

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

	Sayfa No
Emre TURNA, Fırat KAFKAS, Ulvi ŞEKER, H. Serdar YÜCESU Kauçuk Hava Süspansiyon Kiriçlerinin Üretim Yöntemi ve Yorulma Ömrünün Ürün Kalitesi Üzerine Etkisinin Belirlenmesi Determination of the Effect of The Manufacturing Style and Fatigue Life of The Rubber Air Suspension Bellows on Product Quality	759-764
Nihan KAYA, Zeynep YILDIZ, Selim CEYLAN Preparation and Characterisation of Biochar From Hazelnut Shell And its Adsorption Properties For Methylene Blue Dye Finale Kabıgından Biyokömür Hazırlanması ve Karakterizasyonu ve Metilen Mavisini Boyacı Adsorpsiyon Özellikleri	765-776
Eren YARDAĞLI, Kıvılcım YUKSEL, ALDOĞAN Frekans Modülasyonu Sürekli Dalga (FMSD) Ölçüm Sistemlerinde Faz Gürültü Etkisinin Telafisi Phase Noise Compensation in Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) Measurement Systems	777-784
Çihan BAYINDIRLI, Mehmet CELİK, Mehmet DEMİRALP Bir Otobüs Modeli Etrafındaki Akışın CFD Yöntemi ile İncelenmesi ve Sürüklenme Kuvvetinin Pasif Akış Kontrol Yöntemi ile İyileştirilmesi The Investigation of Flow Characteristic Around A Bus Model by CFD Method and Improvement of Drag Force by Passive Flow Control Method	785-795
Rabah GÖMRİ, Belkacem NEZZARI Analysis of Biphasic Cracking of Methane for Hydrogen Production Using Solar Energy	797-803
Şekilip Sadıye YASAR, Musa ATAR The Effects of Wood Preservatives on The Combustion Characteristics of Sessile Oak (Quercus Petraeae L.) Ağaç Koruyucuların Sapsız Meşe (Quercus Petraeae L.) Ağacının Yamma Özelliklerine Etkileri	805-811
Ersin DEMİR Longitudinal Vibration of Temperature Dependent Bar With Variable Cross-Section Değişken Kesitli Sıcaklığa Bağımlı Çubukların Boyuna Titreşimi	813-819
Hali İbrahim VARIYENLİ, Koray GÖKTEKİN Hermetik Gaz Yakıcı Cihazlardaki Atık Isı Enerjisinin Elektrik Enerjisine Dönüştürülmesi Conversion to Electric Energy of Waste Heat Energy in Hermetic Gas Burning Devices	821-830
Abdülvahap ÇAKMAK, Hakan ÖZCAN Benzin İçin Oksijenli Yakıt Katalizörleri Oxygenated Fuel Additives to Gasoline	831-840
İsmail KOC, Omer Kaan BAYKAN, İsmail BABAĞLU Gri Kurt Optimizasyon Algoritmasına Dayanan Çok Seviyeli İmge Eşik Seçimi Multilevel Image Thresholding Selection Based on Grey Wolf Optimizer	841-847
Şekilip KARAŞEL, Zeynep SAĞAR Güç Kalitesi Bozulmalarının 2 Boyutlu Ayırık Dalgacık Dönüşümü Ve Torbalama Karar Ağaçları Yöntemi İle Sınıflandırılması Classification of Power Quality Disturbances With 2D Discrete Wavelet Transform and Bagged Decision Trees Method	849-855
Mehmet YESİLTAS Synchrotron-Based FTIR Micro-Spectroscopy of Martian Meteorites	857-860
Armağan KARAMALLI Bending Analysis of Two Directional Functionally Graded Beams Using A Four-Unknown Shear and Normal Deformation Theory Dört Bilinmeyenli Kayma ve Normal Deformasyon Teorisi Kullanılarak İki Yönlü Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kirişlerin Eğilme Analizi	861-874
Bary BALCI, Mehmet C. YILDIRIM, Özkan BEBEK Mars Gezgin Prototipi Merih-2 Mars Rover Prototipi Merih-2	875-885
Meltem TOKDEMİR, Kurtuluş BORAN, Mustafa AKTAŞ, Simge Pelin ALKAÇ Isı Pompalı Kurutma Tekniği ile Toz Elma ve Elma Cipsi Üretimi: Performans Analizi Production of Powder Apple and Apple Chips With Heat Pump Drying Technique: Performance Analysis	887-894
Abi Bülent UŞAKLI Fizyolojik Sinyallerin Askeri Amaçlı Kullanılabilirliği: Elektroensefalografi ve Yakın Kırsalaltı Spektroskopisi Örneği Usability Of Physiological Signals for Military Purpose: Examples of Electroencephalography And Near Infrared Spectroscopy	895-900
Melih Birhan KENANOĞLU, Nahi Kartal TOKER A Formulation for Scanning Soil-Water Characteristic Curves Toprak-Su Geçiş Karakteristik Eğrileri İçin Bir Formülasyon	901-906
Hülya DURMUŞ, Nilay ÇÖMEZ Soğuk Metal Transferi ile Birleştirilen AA5754 Alaşımı İnce Sacların Korozyon Davranışı Corrosion Behavior Of AA5754 Thin Sheets Welded With Cold Metal Transfer Method	907-911
Ayşe Hilal ULUKARDEŞLER, Ferhan Sami ATALAY Kinetic Studies of Biogas Generation Using Chicken Manure As Feedstock Tavuk Gübresi Kullanılarak Biyogaz Üretiminde Kinetik Çalışmalar	913-917
Hüseyin GÜLLÜ, Dilber Esra YILDIZ The Analysis of Inhomogeneous Barrier Height in In/SnTe/Si/Ag Diode In/SnTe/Si/Ag Diyotunda Homojen Olmayan Engel Yüksekliği Analizi	919-925
Aytac ERKİSİ, Gökhan SURUCU The Investigation DO3-Type Fe3M (M=Al, Ga, Si And Ge) Full-Heusler Alloys Within First Principles Study İlk Prensipler ile DO3-Tipi Fe3M (M=Al, Ga, Si Ve Ge) Tam Heusler Alaşımının İncelenmesi	927-936
Müge KARADAĞ, Ali İhsan SIVRIDAĞ On A Study of The Quaternionic Lorentzian Curve Quaternionic Lorentz Eğrileri Üzerine Bir Çalışma	937-940
Nilgün ANAR, Pınar BAYRAM Seçici Katalitik İndirgeme (SCR) Sistemi ve Araçlara Adaptasyonu Selective Catalytic Reduction (SCR) System and Adapting on The Vehicles	941-950
Murat AYDIN, Emre ACAR Fonksiyonel Kademelenmiş Plakalarda Kalınlık Boyunca Kompozisyonel Değişimin Balistik Performans Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi An Investigation Of The Ballistic Performance Of Functionally Graded Plates Have Different Compositional Gradation Through The Plate Thickness	951-960
Emre AVCI, Mehmet UÇAR SRF Based Output Voltage Control of 3-Level 3-Phase 4-Leg AT-NPC Inverter 3-Seviyeli 3-Fazlı 4-Kollu AT-NPC Eviricinin SRF Tabanlı Çıkış Gerilimi Denetimi	961-966
Feyza Esra ERDOĞAN, Cumalı YILDIRIM On A Study of The Totally Umbilical Semi-Invariant Submanifolds of Golden Riemannian Manifolds Altın Riemann Manifoldlarının Tamamen Umbilikal Yarı-Invariant Altmanifoldları Üzerine Bir Çalışma	967-970
Mahsa MASOUMI, Ebru V.ÖCALIR- AKÜNAL Türkiye'deki Kent İçi Raylı Ulaşım Sistemlerinin Performanslarının Veri Zarflama Analizi İle Karşılaştırılması A Comparison of Performances of Urban Rail Systems in Turkey by Data Envelope Analysis	971-975
Serhat Orkun TAN Schotky Yapılar Üzerine İnceleme ve Analiz Çalışması Review and Analysis Study On Schotky Structures	977-989
Mustafa Bahadır ÖZDEMİR Optimization of Process Parameters of Ground Source Heat Pumps For Space Heating Applications With Taguchi Method	991-998
Kasım ÖZTOPRAK RCDN: A Novel-Energy Efficient Content Delivery Architecture Over Next Generation Systems	999-1006
Furkan ÜSTÜNSOY, H. Hüseyin SAYAN PLC Destekli SCADA İle Enerji Yönetimi İçin Örnek Laboratuvar Çalışması Sample Laboratory Work For Energy Management With SCADA Supported By PLC	1007-1014

POLİTEKNİK DERGİSİ

Journal of Polytechnic

POLİTEKNİK DERGİSİ

VOLUME / CİLT 21 NUMBER / SAYI 4 DECEMBER / AĞUSTOS 2018

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ / POLİTEKNİK DERGİSİ**

GAZI UNİVERSİTY / JOURNAL OF POLYTECHNIC

<http://www.politeknik.gazi.edu.tr>**GAZİ ÜNİVERSİTESİ**

Politeknik Dergisi

Journal of Polytechnic

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

Yayın Yönetmeni / Publishing Manager
Prof. Dr. Adnan SÖZEN
Dekan / Dean

Editör Yardımcısı / Associate Editor
Doç. Dr. M. Tolga ÖZKAN
Gazi Üniversitesi / Gazi University

Editör / Editor
Prof. Dr. Adnan SÖZEN
Gazi Üniversitesi / Gazi University

Editör Asistanı / Assistant Editor
Dr. Serhat KARYEYEN
Gazi Üniversitesi / Gazi University

YARDIMCI EDITÖRLER/ASSOCIATE EDITORS

Prof. Dr. Jose Manuel LOPEZ-GUEDE, University of the Basque Country
Prof. Sanjeevikumar PADMANABAN, Aalborg University
Prof. Dr. Hacı Bayram KARADAĞ, İnönü Üniversitesi
Prof. Dr. İhsan ALP, Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Hilal KURT, Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Murat HOŞÖZ, Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Dilek KUMLUTAŞ, Dokuz Eylül Üniversitesi
Prof. Dr. Zafer TEKİNER, Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Hakan KESKİN, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Murat YÜCEL, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Bünyamin CİYLAN, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Mustafa ÖZER, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Ahmet DURGUTLU, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Hamit SOLMAZ, Gazi Üniversitesi

YAYIN DANIŞMA KURULU/EDITORIAL ADVISORY BOARD

Abid ABU-TAIR , Berzeit University	M. Baki KARAMIŞ , Erciyes Üniversitesi
Adel NASİRİ , University of Wisconsin Milwaukee	Mahmood GHORANNEUISS , Azad University
Alper BÜYÜKKARAGÖZ , Gazi Üniversitesi	Metin GÜRÜ , Gazi Üniversitesi
Arcan DEREÇİOĞLU , Orta Doğu Teknik Üniversitesi	Metin İPEK , Sakarya Üniversitesi
Arif WANI , California State University	Mustafa AKTAŞ , Gazi Üniversitesi
Ayhan ÖZÇİFTİ , Aksaray Üniversitesi	Myung Hyun KİM , Kyung Hee University
Bekir Sami YILBAŞ , King Fahd University	Nadire Şule ATILGAN , Hacettepe Üniversitesi
Cevdet SÖĞÜTLÜ , Gazi Üniversitesi	Nizamettin KAHRAMAN , Karabük Üniversitesi
Engin ÖZDEMİR , Kocaeli Üniversitesi	Nobumasa Matsui , Nagasaki University
Erol ARCAKLIOĞLU , Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi	Nusret AS , İstanbul Üniversitesi
Farzollah MIRZAPOUR , University of Zanjan	Osman ISIKAN , Marmara Üniversitesi
Hakan YAVUZ , Çukurova Üniversitesi	Peter LUND , Helsinki University of Technology
Halit KARABULUT , Gazi Üniversitesi	Ramazan BAYINDIR , Gazi Üniversitesi
Hamit SARUHAN , Düzce Üniversitesi	Ramazan KURT , Bursa Teknik Üniversitesi
Hani H.W.SAIT , King Abdulaziz University	Ramazan YILMAZ , Sakarya Üniversitesi
Henryka Danuta STRYCZEWSKA , Politechnika Lubelska	Recep ÇALIN , Kırıkkale Üniversitesi
Hüseyin AKILLI , Çukurova Üniversitesi	Rodica MILICI , Stefan cel Mare Suceava University
Hüseyin Rıza BÖRKLÜ , Gazi Üniversitesi	Saffa B. RIFFAT , Nottingham University
İbrahim DİNÇER , University of Ontario, Institute of Technology	Sare SAHİL , Gazi Üniversitesi
İbrahim SEFA , Gazi Üniversitesi	Saw Sor HEOH , INTI International University
İhsan KORKUT , Gazi Üniversitesi	Sing LEE , Institute for Plasma Focus
İlhami ÇOLAK , İstanbul Gelişim Üniversitesi	Souad A.M.ALBATHI , International Islamic University of Malaysia
İlker USTA , Hacettepe Üniversitesi	Tayfun MENLİK , Gazi Üniversitesi
İshak KARAKAYA , Orta Doğu Teknik Üniversitesi	Turgay AKBULUT , İstanbul Üniversitesi
Jamal KHATIB , University of Wolverhampton	Ulvi ŞEKER , Gazi Üniversitesi
Jerzy Smardzewski , Ponzan University	Yılmaz ARUNTAŞ , Gazi Üniversitesi
John KINUTHIA , University of South Wales	

Cilt /volume : 21	Sayı / number : 4	Aralık/ December : 2018
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 21 SAYI 4) KATKI VEREN HAKEMLER		
Abdulkadir YAVUZ	Hacı KARADAĞ	Murat CİNİVİZ
Abdullah TOGAY	Hakan YAVUZ	Murat ÖZALP
Ahmet ÖZDEMİR	Halil İbrahim VARIYENLİ	Mustafa AKTAŞ
Ali DURMUŞ	Hamit SOLMAZ	Mustafa BOZDEMİR
Ali SAYGIN	Handan ÖZTEKİN	Mustafa BURUNKAYA
Alper ERGÜN	Hasan ÇALLIOĞLU	Nail YAŞYERLİ
Diyar AKAY	Hatice KANBUR	Necaattin BARIŞÇI
Ebru SOLAK	İbrahim ÜÇGÜL	Necati YALÇIN
Emin HÖKELEKLİ	İhsan TOKTAŞ	Osman ÖZKARACA (2 kez)
Emine KARACA	İlker ÖRS	Osman PERÇİN
Emine YAĞMUR	İlknur DEMİRAL	Sabri UZUNER
Emre YILMAZ (2 kez)	İsa NAVRUZ	Selim ACAR
Engin DELİÖZ	İsmail AYDEMİR	Seyfi POLAT
Eray ARSLAN	M. Tolga ÖZKAN (3 kez)	Sezgin AYDIN
Ertan ALPTEKİN	Mehmet ÇELİK	Şaban ÖZDEMİR
Esra YILDIZ	Mehmet Mahir BÜLBÜL	Şafak ATAŞ
Faik EKMEKÇİ	Mehmet ONUR	Şemsettin ALTINDAL
Fatih Emre BORAN	Melih OKUR	Tayfun MENLİK (2 kez)
Feyza ERDOĞAN	Meltem DOĞAN	Umut AYDEMİR
Figen BALO	Muammer NALBANT	Yakup KAYA
Fusun ZENGİN	Muharrem GÖKÇEN	Yasemin CİFTÇİ
Gülgün YILMAZ	Murat ALTIN	Zehra SARAÇ

<p>Yazışma Adresi / Correspondence Address :</p> <p>Politeknik Dergisi Editörlüğü Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Tanıtım ve Yayın Müdürlüğü 06500 Teknikokullar ANKARA –TÜRKİYE</p> <p>Tel : 0312-202 34 12 Fax : 0312-212 00 59 Elektronik Posta Adresi / e-mail : politeknik@gazi.edu.tr</p>

<p>Teknik Sorumlu / Technical Manager: Erdem ÇİFTÇİ</p> <p>Dizgi / Compositor: İdris ÖZÇELİK</p>

<p>Baskı / Printing : Gazi Üniversitesi Matbaası / Printing Unit of Gazi University</p>

e - ISSN : 2147-9429



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



Kauçuk hava süspansiyon körüklerinin üretim yöntemi ve yorulma ömrünün ürün kalitesi üzerine etkisinin belirlenmesi

Determination of the effect of the manufacturing style and fatigue life of the rubber air suspension bellows on product quality

Yazar(lar) (Author(s)): Emre TURNA¹, Fırat KAFKAS², Ulvi ŞEKER³, H. Serdar YÜCESU⁴

ORCID¹: 0000-0002-7239-3902

ORCID²: 0000-0003-3257-7413

ORCID³: 0000-0001-6455-6858

ORCID⁴: 0000-0002-7805-6085

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Turna E., Kafkas F., Şeker U. ve Yücesu H. S., “Kauçuk hava süspansiyon körüklerinin üretim yöntemi ve yorulma ömrünün ürün kalitesi üzerine etkisinin belirlenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 21(4): 759-764, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.457954

Kauçuk Hava Süspansiyon Körüklerinin Üretim Yöntemi Ve Yorulma Ömrünün Ürün Kalitesi Üzerine Etkisinin Belirlenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Emre TURNA¹, Fırat KAFKAS², Ulvi ŞEKER², H. Serdar YÜCESU^{3*}

¹Meklas Otomotiv İth. İhr. San. ve Tic. Ltd. Şti., Bursa

²Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

³Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 14.11.2017 ; Kabul/Accepted : 23.02.2018)

ÖZ

Bu çalışmada, taşıtlardaki süspansiyon sistemlerinin bir parçası olan hava süspansiyon körüğünün üretim tipinin ürün kalite özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Üretilen körüklerin ilgili standartlar göz önünde bulundurularak fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Üretilen körüğün mekanik performanslarının belirlenmesine yönelik çalışma kapsamında Patlatma Test Makinesi, Taşıma-Genişleme ve Ömür Test Makinesi kullanılmıştır. İmal edilen hava süspansiyon körüklerinin mekanik özelliklerini incelemek amacıyla patlatma, taşıma, genişleme ve ömür testleri gerçekleştirilmiştir. Testler sonrasında, körüğe ait patlatma basıncı, taşıma yükü değeri, tekrarlı yükleme durumunda kuvvet değerlerindeki değişimler belirlenmiştir. Ayrıca, körüğün taşıma yükü ve yatay yer değiştirme değerleri altında boyutsal değişimleri tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hava süspansiyon körüğü, taşıt körüğü, körük üretimi, körük test yöntemleri.

Determination of the Effect of the Manufacturing Style And Fatigue Life of the Rubber Air Suspension Bellows on Product Quality

ABSTRACT

In this study, the effect of the production type of air suspension on the product quality characteristics has been investigated; which are part of the suspension systems in vehicle. The physical and mechanical properties of fabricated air spring bellows were determined taking into account the relevant standards. In scope of the work for determining mechanical performance of fabricated air spring bellows, The Explode Test Machine, The Conveying-Widening and Life Test Machines were used. For analyzing the mechanical properties of manufactured air spring bellows; explode, conveying-widening and life tests has been effectuated. After the tests, explode pressure of air spring bellows, value of carrying load, the changes of the value of force in case of repeatedly loading were determined. Moreover, the value of loading capacity of the air spring bellows and the dimensional changes within the horizontal displacement values were determined.

Keywords: Air spring, vehicle air spring, air spring production, air spring test procedures

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ticari ve kişisel araçlar için kauçuk hava süspansiyon sistemleri, yaylı sönümlenme bileşenleri olarak giderek daha fazla kullanılmaktadır. Gelişmiş stabilite ve araç konforu, otomatik yükseklik ayarı, rijitlik düzenleme kabiliyeti ve farklı yüklerde neredeyse sabit rezonans frekansı gibi özellikler kauçuk hava süspansiyon sistemlerinin diğer süspansiyon sistemlerine karşı temel avantajları olarak sayılabilir [1,2].

Kauçuk hava süspansiyon sistemi genellikle bir üst plaka, bir kauçuk kompozit körük, bir piston ve bir tampondan oluşur. Hava boşluğunun iç kısmı, taşıma kapasitesi sağlayan sıkıştırılmış hava ile doldurulur ve bu kısım

sıkıştırma ve genleşme sayesinde değişen yüklere uygun bir şekilde tepki verir. Kauçuk hava süspansiyon sisteminin en kritik bileşeni körüklerdir. Sonuç olarak, yorulma ömrü genellikle körüklerin dayanma kabiliyetine bağlıdır. Körükler, sızdırmazlık sağlayan bir iç kauçuk tabakasından, takviye için kullanılan iki veya daha fazla kord bezi tabakasından ve farklı çevresel koşullardan körüğü koruyacak dış kauçuk tabakadan oluşan kompozit bir malzemeden imal edilmiştir.

Körüklerdeki gerilme-gerinim koşullarının analitik olarak belirlenmesi, karmaşık geometri ve her şeyden önce malzeme içeriğinin yapısı nedeniyle çok zordur. Hava körüğünün yorulma ömrü, istatistiksel olarak bağımlı olan birkaç faktörden etkilenir, ancak faktörler arasındaki ilişkiyi, analitik yöntemler kullanılarak önceden belirlenmek çok zordur [3-8]. Malzeme

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : yucesu@gazi.edu.tr

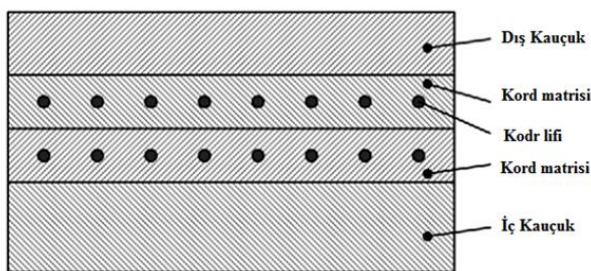
dayanımı, geometri ve gerçekçi yük koşullarına bağlı olan hava süspansiyon körüğünün yorulma ömrü, bu nedenlerden dolayı genellikle modelleri veya prototipleri test ederek belirlenir [9]. Günümüzde, yayların yorulma ömrü tahminleri esas olarak deneyler yoluyla elde edilmektedir.

Bu çalışmanın amacı, elle ve otomatik makinede üretilmiş kauçuk körüğün yorulma ömrünün ürün kalitesi üzerine etkisini belirlemektir. Burada yorulma çevrimlerinin ürün kalitesini belirleyen değerlerinin birbirinden fazla sapmamaları gerekir. Elle ve otomatik makinede üretilmiş kauçuk körüklerin sabit genlikle yüklendiği hızlandırılmış deneylere dayanarak, körüklerin farklı yorulma çevrimleri sonunda hiç yorulmamış numuneye ait kalite özelliklerini tayin etmek mümkündür.

İkinci bölümde, körüklerin maruz kaldığı yük ve analitik gerilme hesaplamaları, deneysel çalışma bölümünde ise test edilmiş kauçuk körükler, deney ekipmanları ve deneysel prosedürler sunulmuştur. Son bölümde ise, deneysel sonuçların ürün kalitesi üzerine etkileri tartışılarak öneriler sunulmuştur.

2. KAUÇUK KÖRÜK YÜKLERİ VE GERİLME HESAPLAMALARI (RUBBER AIR SPRING LOADS AND STRESS CALCULATIONS)

Bu çalışma, fiber takviyeli kauçuk kompozit malzemeden yapılmış kauçuk hava körüğünün yorulma ömrü üzerinde en önemli parçası olan hava körüğü parçası üzerinde odaklanmıştır. Bilindiği üzere, mühendislik sistemlerindeki hasarların çoğunluğu yorulmadan kaynaklanmaktadır. Aşağıda kauçuk hava körüğünün maruz kaldığı yükler ve gerilmeler teorik olarak açıklanmıştır. Körük malzemesi heterojen, anizotropiktir ve katmanlıdır. Körükler dört katmandan oluşur (Şekil 1).

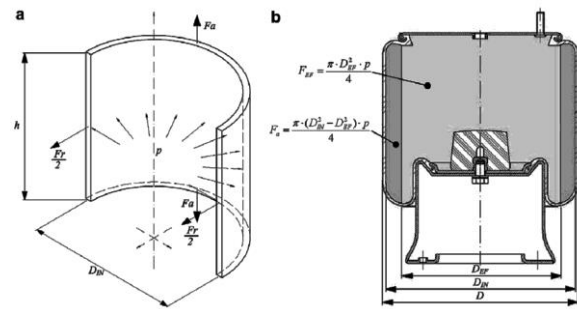


Şekil 1. Hava süspansiyon körüğünü oluşturan bileşenlerin kesiti[1]. (The cross section of the components forming the air spring)

Dış tabaka, körüğü ozon, oksijen, kir, su, mekanik parçalar gibi farklı çevresel etkilerden korunması için kullanılan ince bir kauçuk tabakasıdır. Kord kısmı, kauçuk dolgu malzemesi içerisindeki paralel kablo ipliklerinden oluşur. Kord kısmı her zaman çift tabaka olarak yerleştirilir. Kord çiftleri, her zaman aralarında belirli bir açıyla bir örgü oluşturacak şekilde bir araya getirilir. Kord çiftlerine ait lifler arasındaki açı, körük

eksenine göre simetrik olmalıdır. Aksi durum söz konusu ise, yani kord lifleri körük eksenine göre simetrik değilse, körüğün burularak katlanması görülebilir. İç tabaka körükten havanın sızmasını önlemek için kullanılan ince bir kauçuk tabakadır. Her dört katman vulkanizasyon işlemi sırasında birbirine yapıştırılır. Vulkanizasyon yaptıktan sonra, iki kat kord lifi takviyesine sahip kauçuk körük oluşturur, kord lifleri güçlendirme görevini üstlenir. Kauçuk çok elastik olduğundan ve kord liflerine sahip olmadığından, yükün çoğunluğunun kord lifleri tarafından taşınacağı varsayılabilir.

Çalışma sırasında körüklerdeki gerilme-zorlanma koşulları bilinmelidir. Körükler, içindeki basınç ile hem radyal hem de aksel yönde yüklenir. Üretilen aksel kuvvetin büyük kısmı kauçuk hava körüğünün etkili yay kuvveti olarak kullanılır ve aksel kuvvetin küçük bir kısmı ise körüklerin aksel bir yönde yüklenmesi için harcanır (Şekil 2) [2]. Çalışma sırasında körük, şokları hafifletmek için yüksekliğini değiştirerek farklı sürüş koşullarına tepki verir. Yükseklik değişiklikleri sonucunda, körük içindeki basınç, etkin yük ve belirli bir yerdeki gerilme koşulları sırayla değişir.



Şekil 2. Körüğe etki eden radyal ve aksel yükler [2]. (Radial and axial loads acting on the air spring)

Körüklerdeki gerilme-gerinim koşullarını analitik olarak ifade etmek için, bazı varsayımlar yapılmalıdır. Kauçuk, kord ipliklerinden çok daha yumuşak olduğu için, kord ipliklerinin tüm yükü üstlendiği varsayılabilir. Ayrıca, her iki kablo katmanının da aynı konumda (çap) olduğu varsayılarak problemi basitleştirebiliriz. Bu varsayımlarla kord iplikleri üzerindeki kuvvetler radyal ve aksel yönde hesaplanabilir.

Körüğün içindeki basınçla radyal yönde üretilen kuvvet, $F_{pr} = p \cdot A_r$ (1)

Eşitliği ile hesaplanabilir [1, 2]. Burada p körük içindeki basınçtır ve A_r , F_{pr} kuvvetine dik düzlemdeki alanıdır (Şekil 2a), ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$A_r = D_{IN} \cdot h \quad (2)$$

Eşitlik (2) DIN iç körük çapı ve h, körüğün yüksekliğidir (Şekil 2).(1) ve (2) eşitliklerinden;

$$F_{pr} = p \cdot D_{IN} \cdot h \quad (3)$$

eşitliği elde edilir. Kord ipliklerindeki radyal kuvvet, $F_r = F_{pr}$ (4)

olmalıdır. F_r , birim uzunluk başına kuvvete dönüştürülebilir. (Eşitlik 5).

$$N_r = \frac{p \cdot D_{IN}}{2} \quad (5)$$

Eksenel yöndeki basınç tarafından üretilen kuvvet,

$$F_{pa} = p \cdot A_a \quad (6)$$

eşitliği ile belirlenebilir [1,2]. Burada p körük içindeki basınçtır ve A_a, F_{pa} kuvvetine dik olan düzlemdeki kesittir (Şekil 2a) ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$A_a = \frac{\pi \cdot D_{IN}^2}{4} \quad (7)$$

Eşitlik (6) ve (7) den

$$F_{pa} = \frac{\pi \cdot D_{IN}^2 \cdot p}{4} \quad (8)$$

eşitliği türetilebilir.

Denge denkleminin yerine getirildiğinden emin olmak için, kablo ipliklerindeki eksenel kuvvet,

$$F_{pa} = F_{EF} + F_a \Rightarrow F_a = F_{pa} - F_{EF} \quad (9)$$

eşitliği ile tarif edilebilir. FEF, körük tarafından üretilen etkin kuvveti temsil eder ve bu kuvvet;

$$F_{EF} = \frac{\pi \cdot D_{EF}^2 \cdot p}{4} \quad (10)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada DEF körüğün etkin çapıdır (bakınız Şekil 2b). Eşitlik (9) da, eşitlik (8) ve (10) ifadeleri yerine yazılırsa, F_a

$$F_a = \frac{\pi \cdot (D_{IN}^2 - D_{EF}^2) \cdot p}{4} \quad (11)$$

şeklindeki ifade elde edilebilir.

İşlemi basitleştirmek için F_a, birim uzunluğa göre kuvvet şekline dönüştürülebilir.

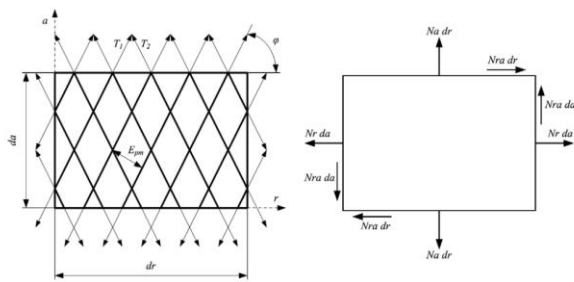
$$N_a = \frac{\pi \cdot (D_{IN}^2 - D_{EF}^2) \cdot p}{4 \cdot D_{mid}} \quad (12)$$

D_{mid}, her iki kordun da bulunduğu çap olarak varsayılır ve şu şekilde hesaplanabilir;

$$D_{mid} = \frac{D + D_{IN}}{2} \quad (13)$$

Burada D, körüklerin dış çapıdır (Şekil 2b).

Körüğe etki eden yükler diferansiyel olarak Şekil 3'teki gibi gösterilebilir.



Şekil 3. Diferansiyel elemana etki eden yükler [1]. (Differential actuating loads)

Elemanların koordinat sistemi körük eksenine paralel, yükler ve deformasyonlar simetrik olacağından, teğetsel kuvvetlerin sıfıra eşit olduğu söylenebilir. Kord ipliklerindeki kuvvetler T₁ ve T₂ olarak gösterilmiştir (Şekil 3). Seçilen koordinat sisteminde, kord lifleri aralarında bir φ açısı olacak şekilde uzanır. Bu nedenle,

radyal yöndeki kord lifi kuvvetlerini sırasıyla T₁·cosφ ve T₂·cosφ olarak ifade edilebilir. Elemanın yüksekliği da ve kord liflerinin yoğunluğu E_{pm} alındığında, Şekil 3 göz önünde bulundurularak, birim uzunluk başına radyal yöndeki kuvvet, N_r,

$$N_r \cdot da = (T_1 \cdot \cos \phi + T_2 \cdot \cos \phi) \cdot E_{pm} \cdot \cos \phi \cdot da \quad (14)$$

ve benzer olarak birim uzunluk başına eksenel yöndeki kuvvet, N_a,

$$N_a \cdot dr = (T_1 \cdot \sin \phi + T_2 \cdot \sin \phi) \cdot E_{pm} \cdot \sin \phi \cdot dr \quad (15)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, dr elemanın genişliğidir.

Eşitlik (14) ve (15) kullanılarak körüğün kord açısı aşağıdaki gibi hesaplanabilir [1,2].

$$\tan^2 \phi = \frac{N_a}{N_r} \quad (16)$$

Yapılan varsayımlar göz önüne alınırsa, kord açısının yalnızca radyal ve eksenel yükler arasındaki ilişkiye bağlı olduğunu belirtilebilir. Dahası, dış çapın ve dolayısıyla körüğünün tüm özelliğinin imalat kordonun açısına oldukça bağlı olduğu söylenebilir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

3.1. Materyal (Material)

Bu çalışmada 190 mm çaplı dingil körüğü kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan kauçuk körüğün şematik şekli ve körük kesiti yukarıda Şekil 1'de gösterilmiştir. Hava süspansiyon körüğü iç kauçuk, birinci kord bezi, ikinci kord bezi ve dış kauçuk olmak üzere dört katmandan oluşmaktadır.

İç kauçuk ve dış kauçuk aynı reçeteye sahip olmakla birlikte aralarındaki tek fark kalınlıktır. Kauçuğun körük üzerindeki fonksiyonu dışarıdan gelen darbelere karşı mukavemeti sağlamaktır. Birinci ve ikinci kord bezi arasında ise hiçbir fark yoktur, her ikisi de aynı rulodan gelmektedir.

Konfeksiyon işlemi biten yarı mamul vulkanizasyon presinde belirli sıcaklık, basınç ve sürede pişirilerek nihai şekli verilir. İstenen şekle ulaşmasının ardından azot ile soğutulmuş aldığı şeklin kalıcı olması sağlanmaktadır. Kauçuk ve kord bezi gibi kompozit malzemelerden oluşan yeni bir kompozit malzemenin davranışlarının kontrol altında tutulması oldukça zordur. Bu sebeple hava süspansiyon körüğü üretim sürecinin mühendislik gerektiren en önemli adımlarından biri de vulkanizasyon sürecidir.

Hava süspansiyon körükleri genel olarak; Sızdırmazlık Testi, Büyüme Kaldırma Testi, Patlatma Testi, Ömür Testi olmak üzere dört teste tabi tutulur. Bu çalışmada numunelere uygulanan bu dört test için TS EN 13597 standardında belirtilen koşullar esas alınmıştır.

3.2. Test Yöntemleri (Test Methods)

Sızdırmazlık Testi: Bir hava süspansiyon körüğünün içindeki havayı tutabilmesi için tamamen kapalı olarak çalışır durumda olması gerekmektedir. Herhangi bir yerde hava sızıntısı olması durumunda körük işlevini

yerine getirmemektedir. İçerisine hava basılan körükler bir su tankının içine yerleştirilir ve hava sızdırmazlık testi yapılır.

Büyüme Kaldırma Testi: Bu testte, araç altında kısıtlı bölgede çalışan körüğün genişlemesinin limitler dâhilinde olup olmadığı test edilir. Körüğün içerisine basınçlı havaya uygulanır ve lazer mesafe ölçüm sensörü ile çap değişimi ölçülür. Aynı zamanda, ürünün yük kaldırma kapasitesinin ölçümü için, bir yük hücresi kullanılarak belirlenen test basınçlarında ve yüksekliklerinde kuvvet ölçümü yapılmaktadır. Testler 5N hassasiyette 50 kN yükleme kapasitesine sahip Devotrans marka Büyüme Kaldırma Test Cihazında gerçekleştirilmiştir.

Patlatma Testi: Hava süspansiyon körükleri türlerine göre belirli bir basınçta çalışmaktadırlar. Körüklerin aşırı basınca karşı mukavemeti patlatma testi aracılığıyla ölçülmektedir. TS EN 13597 standartları incelendiğinde, havalı süspansiyon körüklerinin patlatma basınçlarının çalışma basıncının 3 katı veya 16 bar ile 30 bar arasında olması istenmektedir. Hava kullanılarak yüksek basınçlara çıkmak tehlikeli olduğundan bu testler hidrolik olarak gerçekleştirilmektedir. Test, körük patlayana kadar içerisine su ile bir basınç uygulanarak gerçekleştirilir. Patlatma testleri Firmanın Ar-Ge Merkezinde hizmette bulunan 1 bar hassasiyette 0-100 bar ölçüm aralığına sahip patlatma test cihazında gerçekleştirilmiştir.

Ömür Testi: Hava süspansiyon körüklerinin ömürleri çalışma çevrimi üzerinden test edilmektedir. Körüğün kauçuk ve kord bezinden oluşan kısmı, alt tarafında yer alan pistonla sıvanıp ardından yukarı çıkarak eski haline gelmesi bir çevrimdir. Bu amaçla özel tasarlanmış cihazlarla bu çevrim iki milyon kez tekrarlanarak körüğün ömrünü etkileyebilecek yapısal özelliklerindeki değişimler test edilir.

3.3. Deneysel Çalışma Planı(Experimental Study Plan)
Deneysel elle ve otomatik makine ile üretilmiş benzer ölçülere sahip kauçuk körükler üzerinde, farklı yorulma çevrimlerinin körük kalitesi (kaldırma kapasitesi,

testleri uygulanmıştır. Ayrıca, bu testlerin ardından her bir körüğün maksimum patlama basıncı patlatma testi ile belirlenmiştir. Deneysel test planı Çizelge 1’de gösterilmektedir.

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

Elle ve otomatik makine kullanılarak hazırlanmış ve aynı şartlar altında vulkanize edilmiş kauçuk hava süspansiyon körüğünün sırasıyla kaldırma kuvveti, çap değişimi ve efektif alan test sonuçları verilmiştir. Kaldırma kuvveti ve çap değişimi sonuçları 4 farklı basınç değeri (1, 3 5 ve 7 bar), 5 farklı yorulma ömür çevrim sayısı (0, 5x10⁵, 1x10⁶, 1.5x10⁶ ve 2x10⁶ çevrim) ve 5 farklı bağlama yüksekliğine (230, 300, 400, 500 ve 640 mm) göre oluşturulmuştur. Efektif alan sonuçlarını belirlemede test şartnamesine uygun olarak (TS EN 13597 standardına göre),7 bar’lık maksimum test basıncı dikkate alınarak yapılmıştır.

230 ve 640 mm’lik bağlama yüksekliği değerleri sırasıyla körüğün minimum ve maksimum çalışma yüksekliğini gösterirken, 400 mm bağlama yüksekliği değeri körüğün tasarım yüksekliğidir. Bu durumda, kauçuk hava süspansiyon körüğünün optimal çalışma aralığı 300 ve 500 mm bağlama yüksekliği sınırları içerisinde gerçekleşmektedir. Ayrıca, elle ve otomatik makinede üretilmiş ürünlere ait aynı şartlar altındaki test sonuçlarının karşılaştırmalarında çap değişim sonuçları arasındaki değişimin ± 10 mm, kaldırma kuvveti ve efektif alan sonuçları arasındaki değişimin ise ± 10 tolerans sınırlarında olması gerekmektedir.

Testi yapılan bütün körük numunelerine sızdırmazlık testi yapılmış ve bütün körük numuneleri yapılan sızdırmazlık testini %100 başarı ile geçmiştir. Şekil 4’te görülen kaldırma kuvveti verileri büyüme-kaldırma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Grafikler incelendiğinde basınç arttıkça kauçuk hava süspansiyon körüğünün kaldırma kapasitesinin arttığı açıkça görülmektedir.

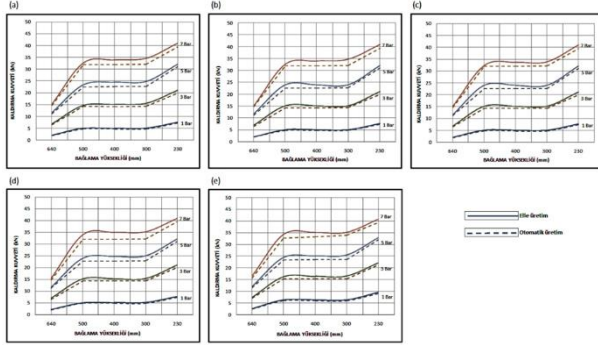
Çizelge 1. Test Planı (Tests Plan)

Ömür Test Çevrimi		Test Tipi			
1	0	Kaldırma kuvveti (kN)	Çap Değişimi (mm)	Efektif alan (cm ²)	Patlatma basıncı ve süresi (bar ve sn)
	500.000				
3	1.000.000				
4	1.500.000				
5	2.000.000				

patlama dayanımı vb.) üzerine etkisini araştırılmak için gerçekleştirilmiştir. Çalışmada 190 mm çapta sarılarak vulkanize edilmiş dingil körüğü kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılacak körükler0, 5x10⁵, 1x10⁶, 1.5x10⁶ ve 2x10⁶ çevrim değerlerine kadar yorulmuş ve bu numunelere 4 farklı basınç (1, 3, 5 ve 7 bar) değeri ve 4 farklı bağlama yüksekliği kullanılarak Kaldırma kuvveti, yanal çap değişimi ve efektif alan değişimi

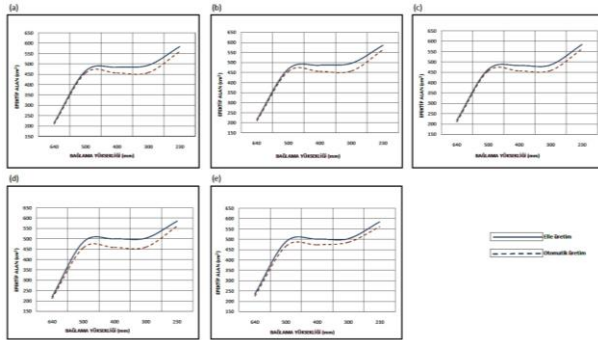
Ayrıca, körükler maksimum bağlama yüksekliğinde minimum kaldırma kapasitesine, minimum bağlama yüksekliğinde ise maksimum kaldırma kapasitesine sahiptir. Bu durum kauçuk körüklerden beklenen bir davranıştır. Değerlendirmeler ve karşılaştırmalar optimum çalışma yükseklikleri dikkate alınarak yapılmıştır. Bütün test şartları için elle ve otomatik makinede üretilmiş ürünlerin kaldırma kuvveti değerleri

arasındaki fark şartnamede belirtilen $\pm 10\%$ tolerans değeri içerisinde. Şekil 4-d ve Şekil 4-e'deki grafikler incelendiğinde, yüksek çevrimde yorulmuş numuneler için optimum çalışma yüksekliğinde kaldırma kuvveti değerlerinin bir miktar yüksek çıktığı tespit edilmiştir. Bunun, kord liflerinin çalışma sertleşmesinden ileri gelen dayanım artışından kaynaklandığı söylenebilir.



Şekil 4. Kaldırma kuvveti test sonuçları: (a) 0 ömür çevrimi, (b) 5×10^5 ömür çevrimi, (c) 1×10^6 ömür çevrimi, (d) 1.5×10^6 ömür çevrimi (e) 2×10^6 ömür çevrimi (Lifting force test results: (a) 0 life cycle, (b) 5×10^5 life cycle, (c) 1×10^6 life cycle, (d) 1.5×10^6 life cycle (e) 2×10^6 life cycle)

Efektif alan, hava süspansiyon körüğünün nominal çalışma basınçlarında kuvvet oluşturan alanı ifade eder ve Şekil 2-b'de gösterilen DEF çapına karşılık gelir. Yorulma ömür testlerinde tüm numuneler 7 bar basınç altında denenmiştir. Şekil 6-d ve 6-e'deki gibi yüksek çevrimde yorulmuş numunelerde efektif alan artmıştır. Bu, yüksek çevrimde yorulmuş numunelerin kord liflerinde daha fazla plastik deformasyon meydana geldiğinden, DEF çapının daha fazla büyümesine atfedilmiştir. Bu durum, Şekil 4-d ve 4-e deki 7 bar basınçta kauçuk hava körüğünün yük taşıma kapasitesindeki artışın nedenini de açıklamaktadır.

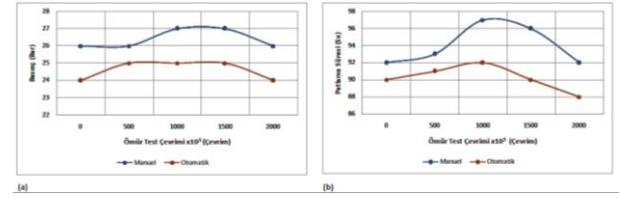


Şekil 6. 7 bar basınç altında efektif alan değişimleri: (a) 0 ömür çevrimi, (b) 5×10^5 ömür çevrimi (c) 1×10^6 ömür çevrimi, (d) 1.5×10^6 ömür çevrimi, (e) 2×10^6 ömür çevrimi (Effective area changes under 7 bar pressure: (a) 0 life cycle, (b) 5×10^5 life cycle (c) 1×10^6 life cycle, (d) 1.5×10^6 life cycle, (e) 2×10^6 life cycle)

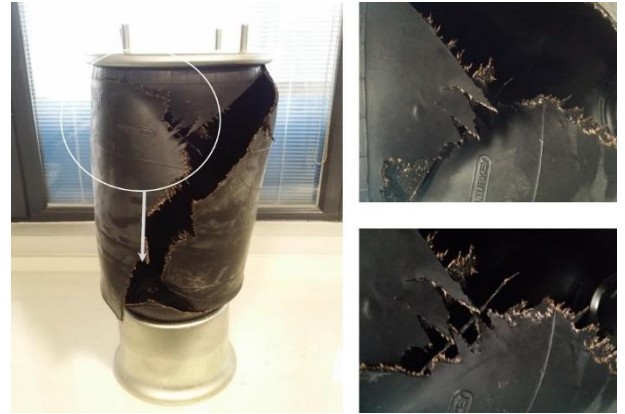
Şekil 7 yorulma ömür çevrimlerine göre patlama basıncı ve patlama sürelerini göstermektedir. Hava süspansiyon körüğünün araç üzeri çalışma sistem basıncı 6 ile 7 bar arasında değişmektedir. Hava süspansiyon körüğünün güvenli bir şekilde çalışabilmesi için dayanım değerinin, sistem basıncına göre 3,5 kat emniyetli çalışmasına

imkân sağlamalıdır. Yapılan 4 farklı patlatma testinin sonuçları değerlendirildiğinde ortaya çıkan patlama basıncı minimum 27 bar olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu değer minimum emniyet katsayısının üstünde bir değere ulaştığı için patlatma test sonuçları uygundur. 1×10^6 ile 1.5×10^6 yorulma çevrimlerinde yorulmuş numuneler yüksek basınçta ve uzun sürede patlarken, 1.5×10^6 yorulma çevrimlerinin ötesinde patlama basıncı ve süresi düşmektedir. Kord liflerinin plastik deformasyonu neticesinde dayanım artışları 1×10^6 ile 1.5×10^6 yorulma çevrimlerinde üst seviyelere ulaşmaktadır. Yorulma çevrim sayılarının bu değerlerin üzerine çıkması kord liflerinin aşırı gevrekleşmesine sebep olduğundan liflerin ani kopmalarına yol açmakta ve bunun da yüksek yorulma çevrimlerinde yorulmuş numunelerin düşük basınçlarda ve sürelerde patlamasına neden olduğu düşünülmektedir.

Patlatma testi sonuçlarının değerlendirme kriterlerinden bir diğeri ise, kord bezinin kopma yönünün iplerle 90 derecelik bir açıya sahip olmasıdır. Test sonucunda ürünler incelendiğinde, kopma yönünün belirlenen kritere uygun olarak patladığı gözlemlenmiştir. Bu durumlar Resim 1' de gösterilmiştir.



Şekil 7. Farklı yorulma çevrimlerinde numuneler için: (a) patlatma basınçları (b) patlama süreleri (For samples with different fatigue cycles: (a) burst pressures (b) burst times)



Resim 1. Patlatma testi uygulanmış körük numunelerinde patlama detayları (Explosion details in blast specimens subjected to blasting test)

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Kauçuk hava süspansiyon körüklerin üretim biçiminin ve yorulma ömrünün ürün kalitesi üzerine etkisini belirlemek için gerçekleştirilen bu çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Bütün test şartları için elle ve otomatik makinede üretilmiş ürünlere ait test sonuçlarının şartnamelerde belirtilen tolerans değerleri içerisinde kaldığı belirlenmiştir.
- Yorulma çevrim sayısının artması kord liflerinin plastik deformasyona uğrayarak uzadığını göstermektedir.
- Kord liflerinin plastik deformasyona uğraması, pekleşme ile dayanımlarını da artırmaktadır. Dayanımdaki artış doğrudan plastik deformasyon miktarına bağlı olmakla birlikte, yüksek oranda yorulmuş kord liflerinde deformasyon miktarının büyümesi bu şartlarda denenen numunelerde kaldırma kapasitesinin artmasına sebep olmuştur.
- Yüksek çevrimde yorulmuş numuneler için optimum çalışma yüksekliğinde kaldırma kuvveti değerlerinin bir miktar yüksek çıkması, kord liflerinin çalışma sertleşmesinden ileri gelen dayanım artışından kaynaklanmaktadır.
- Bağlama boyunun artması hem radyal yönde hemde eksenel yönde oluşan kuvvetleri düşürmektedir. Eksenel yöndeki kuvvet düşüşü kaldırma kapasitesini düşürürken radyal kuvvetlerdeki düşüş ise çaptaki genişlemeyi azaltmaktadır.
- Ortalama yorulma çevrimlerinde Kord liflerinin plastik deformasyonundan kaynaklanan dayanım artışları üst seviyelere ulaşmaktadır. Yorulma çevrim sayılarının üst limitlere çıkarılması kord liflerinin aşırı gevrekleşmesine ve bunun da yüksek yorulma çevrimlerinde yorulmuş numunelerin düşük basınçlarda ve sürelerde patlamasına neden olmaktadır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından desteklenen 0685.STZ.2014 kodlu SANTEZ projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yazarlar bu çalışmanın gerçekleştirilmesine katkı sağlayan Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığına ve Meklas Otomotiv İth.İhr.San.ve Tic.Ltd.Şti. Ar-Ge Merkezine teşekkür eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Oman, S., Fajdiga, M. and Nagode, M., “Estimation of air-spring life based on accelerated experiments”, *Materials and Design*, 31: 3859–3868, (2010).
- [2] Rebernik, J., “Development of air-spring optimization program”, Faculty of mechanical engineering, University of Ljubljana; (2008).
- [3] Mars, W.V. and Fatemi, A. A., “Literature survey on fatigue analysis approaches for rubber”, *Int J Fatigue*, 24: 949–961, (2002).
- [4] Mars, W.V. and Fatemi, A. A., “Factors that effect the fatigue life of rubber: a literature survey”, *Rubber Chem Technol*, 76: 391–412, (2003).
- [5] Cadwell, S., Merrill, R., Sloman, C. and Yost, F., “Dynamic fatigue life of rubber”, *Ind Eng Chem*, 12: 19–23 [Analytical edition], (1940).
- [6] Gent, A.N., “Engineering with Rubber. How to design rubber components”, *Berlin: Rubber Division.*, (2001).
- [7] Cardon, A.H. and Emri, I., “Durability analysis of structural composite systems”, *Faculty of Engineering (T.W)*, Free University Brussels; (1996).
- [8] Oman, S., Nagode, M. and Fajdiga, M., “The material characterization of the air-spring bellows sealing layer”, *Material and Design*, 30: 1141–1450, (2009).
- [9] Fischer, G., and Streicher, M., “Procedure for validation tests on air-springs for commercial vehicles”, *SAE technical paper series*, 982841, November (1998).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



Preparation and characterisation of biochar from hazelnut shell and its adsorption properties for methylene blue dye

Fındık kabuğundan biyokömür hazırlanması ve karakterizasyonu ve metilen mavisi boya için adsorpsiyon özellikleri

Yazar(lar) (Author(s)): Nihan KAYA^{1}, Zeynep YILDIZ² Selim CEYLAN³*

ORCID¹: 0000-0001-8676-6768

ORCID²: 0000-0001-6280-1215

ORCID³: 0000-0001-7258-6205

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Kaya N., Yıldız Z. ve Ceylan S., "Preparation and characterisation of biochar from hazelnut shell and its adsorption properties for methylene blue dye", *Politeknik Dergisi*, 21(4): 765-776, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.386963

Preparation and Characterisation of Biochar from Hazelnut Shell and Its Adsorption Properties for Methylene Blue Dye

Araştırma Makalesi / Research Article

Nihan KAYA^{1*}, Zeynep YILDIZ¹, Selim CEYLAN²

¹ Hitit University, Faculty of Engineering, Chemical Engineering Department, Çorum, Turkey

² Ondokuz Mayıs University, Faculty of Engineering, Chemical Engineering Department, Samsun, Turkey

(Geliş/Received : 25.08.2017 ; Kabul/Accepted : 24.10.2017)

ABSTRACT

One of the major pollutants in water resources are organic dyes that are widely used by different industries. Methylene blue (MB) is one of them which is quite harmful for aquatic life. This pollutant must be removed with proper methods. Adsorption is one of the most popular methods because of its high purification yield and known as a cost effective process if the sorbent is inexpensive. In this study, biochar which is used as an adsorbent has been produced from hazelnut shells used as the raw material. Chemical, thermal and surface characteristics of raw hazelnut shell were investigated by FT-IR, TG/DTG, SEM and elemental analysis. Biochar characteristics were determined by FT-IR, BET and SEM analysis. The effect of different adsorption parameters such as pH, initial dye concentration, contact time, adsorbent dosage and temperature on the adsorption of MB onto hazelnut shell char were examined in batch experiments. The equilibrium of adsorption was modeled using Langmuir and Freundlich isotherm models. The maximum adsorption yield of MB was found to be 83% at pH 4.0, adsorbent dosage of 4 g/L, contact time of 300 min., initial dye concentration of 15 mg/L and temperature of 45 °C. In addition, the Freundlich isotherm was found to be the best fitting isotherm model for the adsorption process. The pseudo-first-order and pseudo-second-order kinetic models were applied to the experimental data and thermodynamic parameters such as Gibbs free energy, enthalpy and entropy were determined.

Keywords: Adsorption, methylene blue, hazelnut shell, carbonization, biochar.

Fındık Kabuğundan Biyokömür Hazırlanması ve Karakterizasyonu ve Metilen Mavisini İçin Adsorpsiyon Özellikleri

ÖZ

Su kaynaklarındaki en büyük kirlenmelerden biri, farklı endüstriler tarafından yaygın olarak kullanılan organik boyalardır. Metilen mavisini bunlardan biri olup, sulu yaşam için oldukça zararlıdır. Bu kirlenici uygun yöntemlerle uzaklaştırılmalıdır. Adsorpsiyon, yüksek saflaştırma verimi nedeniyle en popüler yöntemlerden biridir ve sorbent ucuz olduğu takdirde uygun maliyetli bir işlem olarak bilinmektedir. Bu çalışmada, adsorbent olarak kullanılan biyokömür, hammadde olarak kullanılan fındık kabuklarından üretilmiştir. Ham fındık kabuğunun kimyasal, termal ve yüzey özellikleri FT-IR, TG/DTG, SEM ve elementel analiz ile araştırılmıştır. Biyokömürün özellikleri ise FT-IR, BET ve SEM analizi ile belirlenmiştir. Metilen mavisinin fındık kabuğundan üretilen kömür üzerine adsorpsiyonuna pH, başlangıç boya konsantrasyonu, temas süresi, adsorbent miktarı ve sıcaklık gibi farklı adsorpsiyon parametrelerinin etkisini belirlemek için kesikli deneyler gerçekleştirilmiştir. Adsorpsiyon dengesi Langmuir ve Freundlich izoterm modelleri kullanılarak modellenmiştir. Metilen mavisini için maksimum adsorpsiyon verimi; pH 4.0' de, 4 g/L adsorbent miktarında, 300 dakika temas süresinde, 15 mg/L başlangıç boya konsantrasyonunda ve 45 °C'de %83 olarak bulunmuştur. Buna ek olarak, Freundlich izoterm modelinin adsorpsiyon işlemi için en uygun izoterm modeli olduğu bulunmuştur. Deneysel verilere yalnızca birinci derece ve yalnızca ikinci derece kinetik modeller uygulanmış ve Gibbs serbest enerjisi, entalpi ve entropi gibi termodinamik parametreler belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Adsorpsiyon, metilen mavisini, fındık kabuğu, karbonizasyon, biyokömür.

1. INTRODUCTION

Today, over 100,000 synthetic dyes are used commercially and 700,000 tons of dye is produced annually. These synthetic dyes are widely used in textile, paint, paper, printing, food, plastics and cosmetics industries and cause serious environmental problems

because of they contain hazardous organic substances at high levels. When considered the residual amount of dye used in these industries, environmental importance of coloured wastewater come out [1, 2]. The presence of dyes in water, even at very low concentrations, represents a serious problem due to their negative ecotoxicological effects and bioaccumulation in wildlife [3]. Methylene blue which is the most commonly used substance for dyeing cotton, wood and silk is one of them. It has

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : nihankaya@hitit.edu.tr

harmful effects on living organisms on short periods of exposure [4].

There are many processes available for the removal of dyes by conventional treatment technologies such as chemical, biological and photocatalytic oxidation, coagulation-flocculation, filtration, adsorption, membrane separation and ion-exchange [5]. Amongst these techniques, adsorption which is an environmentally friendly and cost effective procedure is widely acknowledged as the most efficient method because of its ability to remove toxic pollutants from aquatic systems [6]. Activated carbon is the most commonly used adsorbent for dye removal by adsorption because of its large surface area, microporous structure and high adsorption capacities [7]. Especially it is very effective for the adsorption of cationic dye, mordant and acid dyes [8]. The biggest disadvantages of commercial activated carbon is its relatively high cost. Therefore, many researchers has focused on the inexpensive alternative substitutes to commercial activated carbon.

Lignocellulosic materials such as almond, coconut, walnut and hazelnut shells, apricot, olive and cherry stones, rice husk, sawdust are very good precursors because of their availability, cheapness and physico-chemical characteristics for the production of carbon adsorbents based on agricultural wastes [4, 9-11]. The choice of a precursor for the production of effective biochar by pyrolysis or carbonization of raw material is based on low cost, high carbon and low inorganic content because of during carbonization process organics contained in raw material are changed into primary carbon, tar and ash [10, 12].

In this study, hazelnut shell which is the one of low cost agricultural waste by-products was utilized as the raw material for the production of biochar by carbonization process and its adsorption capacity for removal of methylene blue from aqueous solution was evaluated. Contact time (up to 550 min), temperature (25-45 °C), pH of solution (2-10), adsorbent dosage (1-4 g/L) and initial concentration of dye solution (15-45 mg/L) were considered as variables for the adsorption experiment. The equilibrium of adsorption was modeled using Langmuir and Freundlich isotherm models.

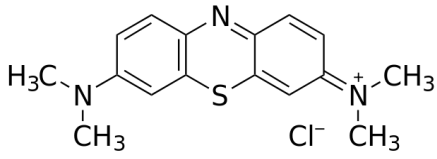
2. MATERIAL AND METHOD

2.1. Materials

Hazelnut shell used as the raw material is one of the highly available cellulosic agricultural wastes in Turkey. In this study, the sample of hazelnut shell (HS) was obtained from the province of Ordu which is located in the north of Turkey. HS was composed of lignin (43%), hemicellulose (30%), cellulose (26%) and extractive substance (1%). The sample was dried by standing for 12 hours at a temperature of 70 °C (UNITERM, mst 55). The dried sample was reduced in size by passing it through a stainless steel blade mill (Waring, USA). Those with dimensions less than 250 µm were used in experiments.

Methylene Blue (MB) dye used in this study was purchased from Merck which was of analytical grade and it was used without further purification. The detailed information of MB is given in Table 1.

Table 1. Details of the dye used

Dyestuff	Basic Blue 9 (BB 9)
IUPAC Name	Methylthionium chloride, 3,7-Bis(dimethylamino)phenothiazinium chloride, Tetramethylthionine chloride
Commercial Name	Methylene Blue (MB)
C.I. Number	52015
Appearance	Dark green crystalline powder
Empirical Formula	C ₁₆ H ₁₈ ClN ₅ S
Molecular Weight	319.86 g/mol
Molecular Structure	
λ _{max}	663 nm

2.1.1. Characterization of raw material

Proximate analysis of the sample was carried out using an ash furnace (E871, D1102-84). For the determination of the volatile matter of the hazelnut shell, the sample was placed in a preheated ash furnace at 950±5 °C for 8-10 minutes and analysis was performed. Ultimate analysis of raw hazelnut shell was performed on the LECO brand CHNS-932 model analyzer. Quantities C, N, H and S were measured simultaneously. The ash content of the hazelnut shell was analyzed at 250 °C for 3 hours and 550 °C for 3 hours. An oxygen bomb calorimeter (e2k) was used when the upper thermal value was determined.

FT-IR spectra of raw hazelnut shell was recorded by Perkin Elmer USA FT-IR spectrometer between 400 cm⁻¹ and 4000 cm⁻¹.

Thermal behaviors of crude hazelnut shell sample was examined by TG, DTG analyzes TA brand and DMAQ800 model thermal analyzer. TG and DTG curves were recorded under the specified conditions (Heating rate: 10 °C/min, Heating range: 30-800 °C).

Scanning electron microscopy (SEM) analysis of the hazelnut shell was carried out to examine its surface morphology by using FEI/Quanta 450 FEG.

2.2. Preparation of Hazelnut Shell Char (Pyrolysis Experiment)

10 g of sample was placed in the chamber and the pyrolysis of the hazelnut shell was carried out in an electric heated pyrolysis reactor with a volume of 600 cm³. Pyrolysis experiments were conducted by passing inert nitrogen gas at a heating rate of 10 °C/min at a flow rate of 100 mL/min at temperatures of 400, 500 and 600

°C. The reactor temperature was supplied by the heat-couple placed inside the reactor from the top of the furnace. After the pyrolysis temperature reached the desired values, it was held at the desired temperature for 60 minutes so that the pyrolysis process could be completed and then the experiment was terminated. Pyrolysis experiments were performed in two times to examine the reusability. The value of mean standard deviation (SD) was 0.15 for reproducibility of carbonisation experimental data. This value indicated that all results exhibited the advantages of high reproducibility and good reusability.

2.3. Characterization of Hazelnut Shell Char

The BET surface area was obtained from nitrogen adsorption isotherms at 77 K by using Quantachrome/IQ-Chemi Surface Area Analyzer. Prior to gas adsorption measurement, the sample was degassed at 200 °C under vacuum for 12 h. The adsorption data were obtained in a relative pressure. The BET surface area was calculated from N₂ adsorption isotherms by using Brunauer-Emmett-Teller (BET) equation.

Scanning electron microscopy (SEM) analysis of the hazelnut shell char was carried out to examine its surface morphology and porosity by using FEI/Quanta 450 FEG. For the observation of surface microporous structure, prior to scanning the samples were coated with a thin layer of gold to make it conductive.

FT-IR spectra of hazelnut shell char was recorded by Perkin Elmer USA FT-IR spectrometer between 400 cm⁻¹ and 4000 cm⁻¹.

2.4. Batch Adsorption Experiments

To determine the applicability of produced hazelnut shell char as an adsorbent for water treatment, the batch adsorption experiments were performed using MB dye as the adsorbate. The dye stock solution (250 mg/L) was prepared by dissolving accurately weighed quantity of the dye in distilled water and all working solutions for the dye sorption experiments were obtained by diluting the stock solution with distilled water to the desired concentration. Batch equilibrium adsorption studies were performed using 250 mL of dye solutions. Parameters affecting the adsorption process such as pH (2-10), adsorbent dosage (1-4 g/L), initial dye concentration (15-45 mg/L), contact time (up to 550 min) and temperature (25-45 °C) were studied in a batch system. pH of the solutions was adjusted by 0.1M HCl and 0.1M NaOH solutions. In each adsorption experiment, the mixtures were agitated in a water bath shaker at 150 rpm. The samples were collected at predetermined time intervals and adsorbent separated from the samples by filtering. The filtrate was analyzed by a UV-visible spectrophotometer (Thermo, Genesys 10S) at λ_{max} to determine the residual dye concentration. Based on the acquired values, the amount of dye adsorbed per unit mass of the adsorbent (q_e) was calculated according to the following Equation (1) and the adsorption yield was calculated by using the Equation (2) [13, 14].

$$q_e = (C_o - C) \times \frac{V}{m} \tag{1}$$

$$\text{Dye Removal (\%)} = \frac{(C_o - C)}{C_o} \times 100 \tag{2}$$

where q_e is the amount of adsorbed dye per gram of adsorbent (mg/g), C_o and C are the initial and final dye concentration in solution phase, respectively (mg/L), V is the volume of dye solution (L) and m is the weight of adsorbent (g).

In order to ensure the reproducibility of the results, all the adsorption experiments were performed in triplicate and the average values were used in data analysis. Relative standard deviations were found to be within ± 2%.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Characterization of Hazelnut Shell

The proximate and ultimate analysis and higher heating value of hazelnut shell are shown in Table 2, taken after drying the samples at 70 °C.

As seen in Table 2, HS has a high content of volatile matter (84.22%) which can be regarded as suitable for pyrolysis processes [15]. Another important property, ash content, is small in HS (1.32%). High ash content is a disadvantage because it causes the sample not to burn well enough to accumulate [15-17]. The S and N contents of the raw material in the literature varied between 0-4.1 and 0.1-12.2, respectively [17]. According to ultimate analysis results of N (1.09%) and S (1.67%) contents are low. Low N and S contents are important because higher N and S contents can cause toxic NO_x and SO_x emissions during disposal [15, 17]. Because of with high volatile matter and low ash content, hazelnut shell may be considered as a suitable precursor for preparing biochar. The thermal value of HS was calculated to be 18.79 MJ kg⁻¹.

Table 2. Proximate and ultimate analysis of hazelnut shell (dry, ash-free basis)

Proximate analysis (w/w%)	Hazelnut shell
Moisture	2.83
Ash	1.32
Volatile matter	84.22
Fixed carbon*	14.46
Ultimate analysis (w/w%)	
C	47.77
H	5.82
N	1.09
S	1.67
O*	43.65
Higher heating value MJ kg ⁻¹	18.79

*By difference

FT-IR spectra of HS are shown in Figure 1. When the FT-IR spectra of the raw hazelnut shells are examined, the broad vibration at $3,341\text{ cm}^{-1}$ is the O-H stretching vibration of the water. The peaks observed between $2,933\text{-}2,862\text{ cm}^{-1}$ are C-H tensile vibrations of aliphatic hydrocarbons. In the spectrum, the strong peak of the C=O asymmetric stretching vibration is observed at about $1,618\text{ cm}^{-1}$. This peak shows that the compounds are of aldehyde, ketone and acid groups. The peaks observed between $1,410\text{-}1,315\text{ cm}^{-1}$ indicate the C-H bending vibration of the aliphatic hydrocarbons [18-20].

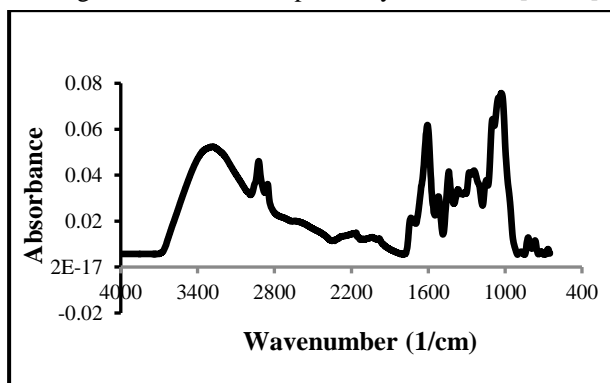


Figure 1. FT-IR spectrum of raw hazelnut Shell

Thermogravimetry (TG) and differential thermogravimetry (DTG) curves of hazelnut shell thermal decomposition at 10 °C min^{-1} heating rate under an inert nitrogen atmosphere are shown in Figures 2a and 2b, respectively. As can be seen from the TG curve given in Figure 2a, moisture and the low molecular weight substances on the surface were removed from the sample up to about 210 °C and the stable structure was not decomposed. Between 210 °C and 400 °C temperatures, most of the sample was separated from the structure and a mass loss of about 63% occurred. The ratio of the sample resulting from the pyrolysis process was determined to be approximately 21%. The differential thermogravimetry curves (DTG) given in Figure 2b were used to determine the mass loss steps of the hazelnut shell in the pyrolysis process. In general, biomass pyrolysis consists of three steps. Dehydration occurs at temperatures of 120 °C . Decomposition of hemicellulose and cellulose, the main components of the biomass, occurs between $120\text{-}350\text{ °C}$. Decomposition of the lignin takes place at temperatures above 350 °C [21]. When the DTG curve of the hazelnut shell shown in Figure 2b was examined, a mass loss of about 65 °C was observed and the moisture was removed from the sample. The first peak, observed at temperatures of 210 °C to 310 °C , is due to hemicellulose decomposition. The second peak observed at high temperatures is related to the decomposition of cellulose, which is more stable than hemicellulose. The molecular weight of cellulose is higher than that of hemicellulosic, and therefore the decomposition of cellulose occurs at a higher temperature than hemicellulosic ($322\text{-}398\text{ °C}$). Although lignin decomposition occurs at higher temperatures than

other components, the decomposition reactions of these components proceed at the same time. However, it shows that the most resistant component of wide peak lignocellulosic biomass observed is lignin decomposition. The results are consistent with the decomposition curves of lignocellulosic biomasses such as sugarcane bagasse, corn cobs, pine wood, rice husks, etc., which have previously been reported in the literature [22-24].

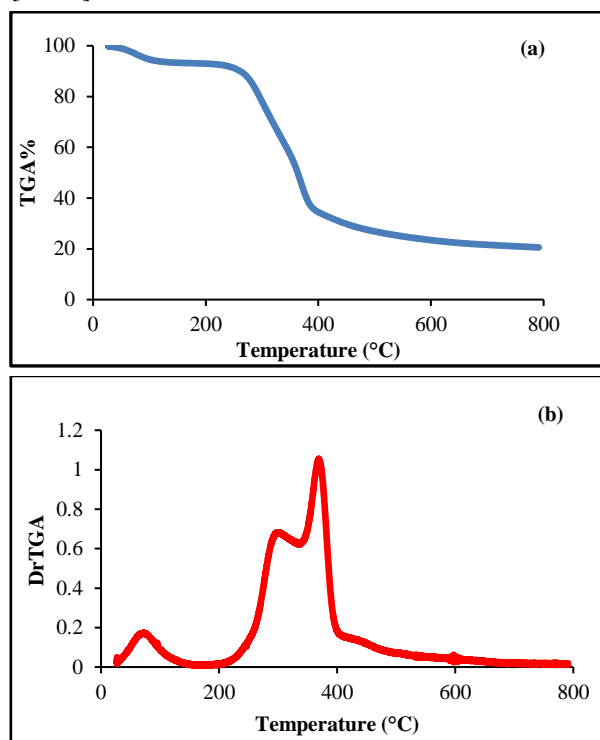


Figure 2. The raw hazelnut shell (a) TGA and (b) DTG curves (10 °C/min)

3.2. Characterization of Hazelnut Shell Char

The quality and physicochemical characteristics of hazelnut shell char depend on the physical and chemical properties of raw material used and also the carbonization conditions [12]. Especially carbonization temperature is one of the most important parameters because of it changes the surface area of biochar and also its adsorption capacities. In this study, the pyrolysis process was occurred separately at carbonization temperatures between $400\text{-}600\text{ °C}$ under the nitrogen flow of 100 mL/min . Specific surface areas of activated carbons obtained by carbonization of hazelnut shells at different temperatures were determined by Brunauer-Emmett-Teller (BET) method. The effect of carbonization temperature on the BET surface area and hazelnut shell char yield are given in Figure 3.

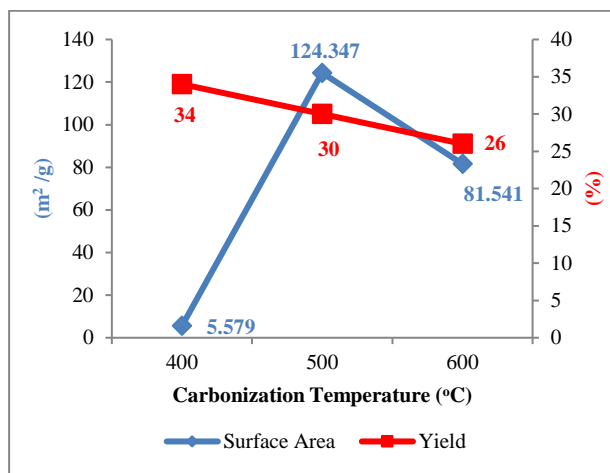


Figure 3. Effect of the carbonization temperature on the surface area and hazelnut shell char yield

As can be seen from Figure 3, with an increase in the carbonization temperature from 400 to 500 °C, the surface area of the hazelnut shell char increased from 5.579 to 124.347 m²/g and then decreased to 81.541 m²/g at 600 °C. To occurring some compounds produced from the cross-linking reactions was resulted in increase surface area with temperature up to 500 °C. The decrease above this temperature was attributed to the collapse of the resultant carbon samples. As a result high temperature has an unfavorable effect on the surface area. Therefore the BET surface area of the hazelnut shell char reach its maximum values at a temperature of 500 °C. In this condition, total pore volume of the biochar was 0.146 cm³/g. Additionally Figure 3 shows the effects of the carbonization temperature on the yield of hazelnut shell

char. The yield was calculated from the weight of resultant biochar divided by the weight of hazelnut shell. According with carbonization temperature increased, the yield of hazelnut shell char decrease. This result can be explained as the weight loss rate is higher primarily due to the initial large amount of volatiles that can be easily released with higher temperature [7].

To determine the surface morphology of the raw hazelnut shell and hazelnut shell char, SEM analysis was used. When compared to raw hazelnut shell's images, the most porous surface structure was clearly observed in the SEM images for bioadsorbent shown in Figure 4b. From these figures, it is clear, there is a good possibility for dye molecules to adsorbed into these pores. Further, the pores on the surface of the adsorbent had highly heterogeneous structure which was provided a large surface area for the adsorption of MB.

The FT-IR spectra was obtained to evaluate qualitatively the chemical structures of hazelnut shell char and is shown in Figure 5. The spectrum displayed the following bands which indicated various surface functional groups. O-H stretching at around 3,500 cm⁻¹ was typically attributed to hydroxyl groups. The region of the spectrum of 1,560 cm⁻¹ was attributed to carbonyl groups (C=O). C-O stretching was observed at around 1,400 cm⁻¹. This compounds is an evidence of the lignocellulosic structure of hazelnut shell [25].

3.3. Determination of Adsorption Capacity of Hazelnut Shell Char

A biochar which is used in adsorption process as an adsorbent should possess high surface area. Therefore the removal of methylene blue (MB) from aqueous

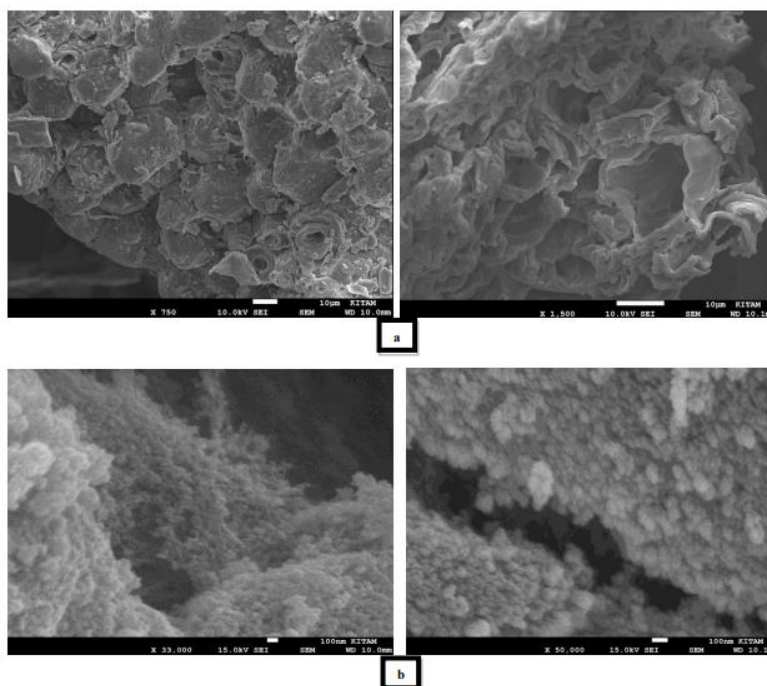


Figure 4. SEM images at different magnification ratio a) raw hazelnut shell b) hazelnut shell char which was carbonized at 500 °C

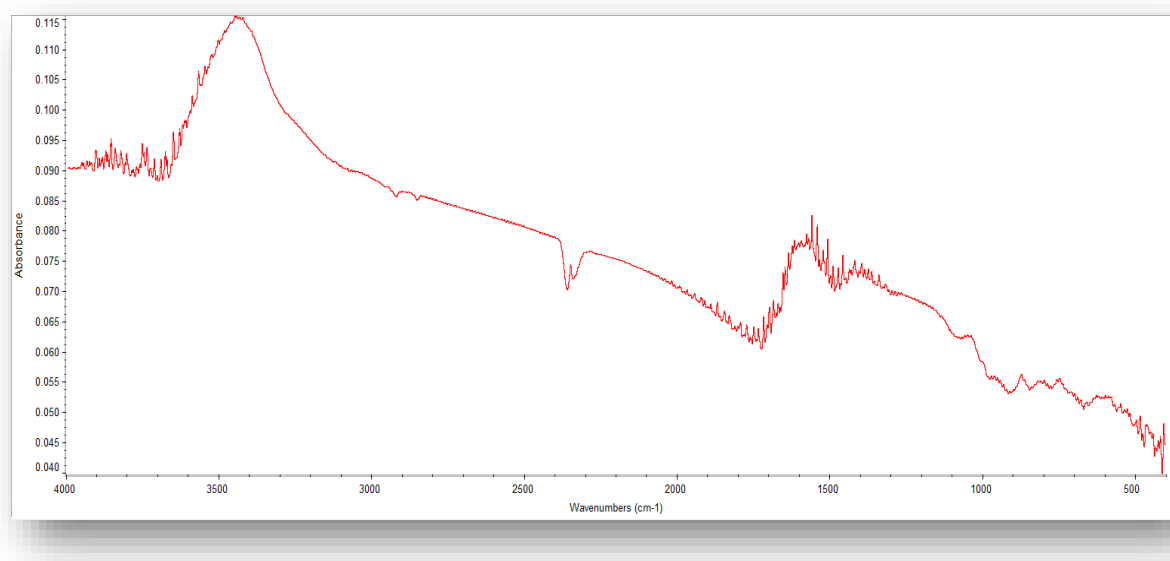


Figure 5. FT-IR spectrum of hazelnut shell char

solution was investigated using hazelnut shell char with the highest surface area ($124.35 \text{ m}^2/\text{g}$) carbonized at $500 \text{ }^\circ\text{C}$.

In adsorption, comparable consequences of various parameters influencing the dye removal process from aqueous solution is an important need. Therefore batch experiments were carried out to determine the effect of pH, initial dye concentration, contact time, adsorbent dosage and temperature in this study.

3.3.1. Effect of contact time and temperature

To evaluate the adsorption characteristics of the produced hazelnut shell char for MB, the change of adsorption rate with time and temperature has been investigated and presented in Figure 6. Experimental results showed that the contact time necessary for maximum adsorption was 300 minute approximately. In addition, MB showed a fast rate of adsorption during the first 180 min of the dye-sorbent contact. This result can be explained due to the large amount of initial surface area and high active binding sites for adsorption of the dye molecules. At higher contact time the rate of adsorption decreased due to decrease in total surface area and reached the equilibrium in 300 minute approximately. After the equilibrium, the amount of dye adsorbed did not change with contact time [3, 26].

Figure 6 indicates that the adsorption of MB as a function of temperature. As depicted in Figure 7, the percentage removal of MB dye increases with increasing temperature. This may be attributed to the increase of diffusion rate of the dye molecules in the solution with

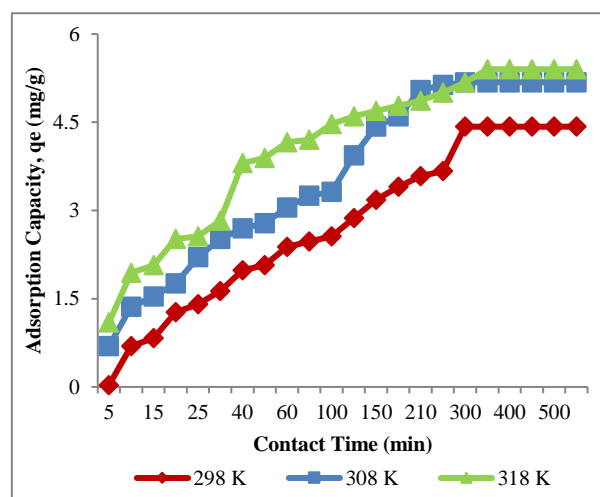


Figure 6. Effect of contact time on adsorption of MB at different temperatures (pH= 4, Adsorbent Dosage= 2 g/L, $C_0= 15 \text{ mg/L}$)

temperature. Because the adsorption controlled by the diffusion process from the bulk to the surface. And also strengthening of the bonds between the dye molecules and the binding sites which are activated at higher temperatures of the sorbent might be enhanced the adsorptive interactions. This increasing trend in dye removal capacity with increasing temperature confirmed the endothermic nature of the ongoing process [27].

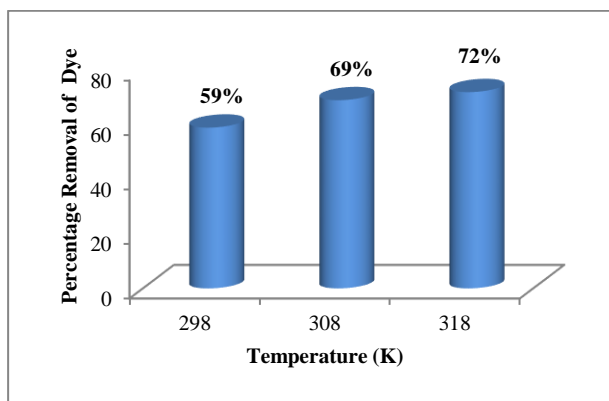


Figure 7. Effect of temperature on percentage removal of MB (pH= 4, Adsorbent Dosage = 2 g/L, C_0 = 15 mg/L, Contact Time = 400 min)

3.3.2. Effect of initial dye concentration

Initial concentration of the adsorbate is an important factor to be considered for effective adsorption process. The effect of different initial dye concentration on percentage removal of MB and adsorption capacity are presented in Figure 8. It was seen that percentage removal of dye decreased with increase in initial dye concentration. At higher concentrations, all dye molecules in the solution do not interact with the binding sites of the adsorbent due to adsorbent has a limited number of active binding sites, which become saturated at a certain concentration [13]. However, the adsorption capacity at equilibrium increased with increase in initial dye concentration. This was so because the initial dye concentration provides an important driving force to overcome the resistance to the mass transfer of dye between the aqueous and the solid phase [28].

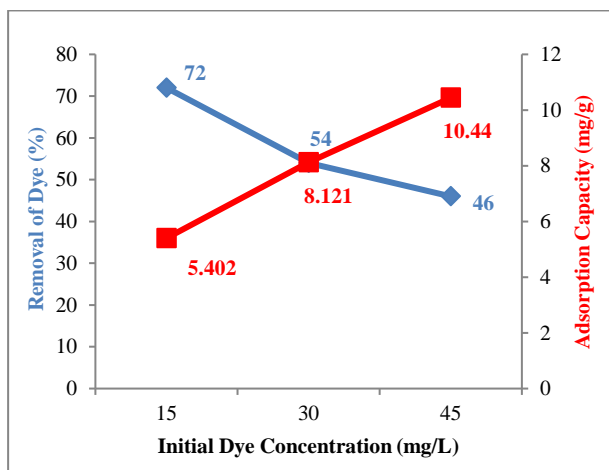


Figure 8. Effect of initial dye concentration on percentage removal of MB (pH= 4, Adsorbent Dosage = 2 g/L, T = 45 °C, Contact Time = 400 min)

3.3.3. Effect of initial solution pH

pH of solution is an important parameter for adsorption because of affecting the surface charge and/or surface

characteristics of adsorbent [29]. In this study, effect of initial pH of solution was investigated at various pH values which are changed between 2-10. As seen from Figure 9, there are no excessive variation in adsorption capacity at each pH studied. As the pH increases, it is usually expected that the adsorption of MB which is a cationic dye increases due to decreasing the number of positively charged sites. However, the high adsorption of MB are favourable at alkaline medium because of electrostatic attraction [4, 30]. But in the experiments, the MB adsorption was not clearly changed with increasing pH of solution [31]. Highest percentage of dye removal (69.07%) was observed at pH 4.0.

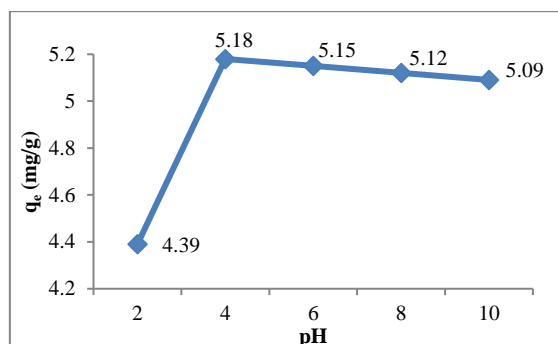


Figure 9. Effect of initial pH of solution on adsorption capacity (C_0 = 15 mg/L, Adsorbent Dosage = 2 g/L, T = 35 °C, Contact Time = 400 min)

3.3.4. Effect of adsorbent dosage

Adsorbent dosage strongly influences the adsorption process by affecting adsorption capacity of the adsorbent. Therefore the influence of adsorbent dosage on MB adsorption by hazelnut shell char was investigated in the range of 1-4 g/L. Results are shown in Figure 10. The adsorption efficiency increased from 36% to 83% as the adsorbent dosage increased from 1 to 4 g/L. This increase could be attributed to an increase in the adsorbent surface area and number of active sites available for adsorption [3, 28].

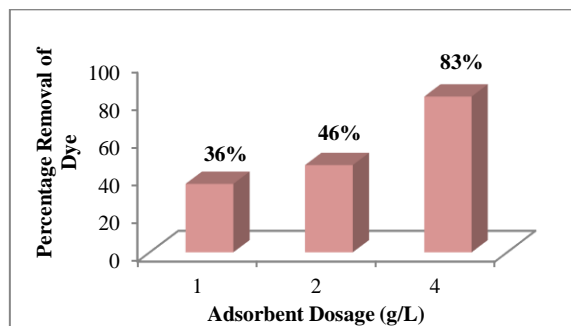


Figure 10. Effect of adsorbent dosage on percentage removal of MB (C_0 = 15 mg/L, pH= 4, Contact Time = 400 min, T = 45 °C)

3.3.5. Adsorption isotherm models

The adsorption isotherm is an equation relating the amount of solute adsorbed onto the solid and the equilibrium concentration of the solute in solution at a given temperature. There are several models for predicting the equilibrium distribution. However, the two models which are Langmuir and Freundlich models are most commonly used for water and wastewater treatment. The Langmuir adsorption isotherm is based on monolayer, uniform, and finite adsorption site assumptions. However, Freundlich isotherm is an empirical equation for multilayer, heterogeneous adsorption sites [32]. The linear form of the Langmuir (Equation 3) and Freundlich (Equation 4) equations are commonly given by:

$$1/q_e = (1/K_L q_m C_e) + (1/q_m) \tag{3}$$

$$\log q_e = \log K_f + n^{-1} \log C_e \tag{4}$$

where C_e is the equilibrium concentration of solute in the bulk solution (mg/L), q_e is the amount of solute (dye) adsorbed per unit mass of adsorbent (mg/g), q_m is the maximum adsorption capacity (mg/g), K_L is the constant related to the free energy of adsorption (L/mg), K_f is a Freundlich constant indicative of the relative adsorption capacity of the adsorbent [mg/g (L/mg)^{1/n}] and $1/n$ is the heterogeneity factor which is the constant characteristics of the system [33].

In this study, to quantify the adsorption capacity of hazelnut shell char for the removal of MB from aqueous solution, the Langmuir and Freundlich isotherm models were used to define the equilibrium datas. Linear plots obtained for $1/q_e$ versus $1/C_e$ and $\log q_e$ versus $\log C_e$ at each temperature for adsorption of MB onto hazelnut shell char are shown in Figure 11. It was observed that

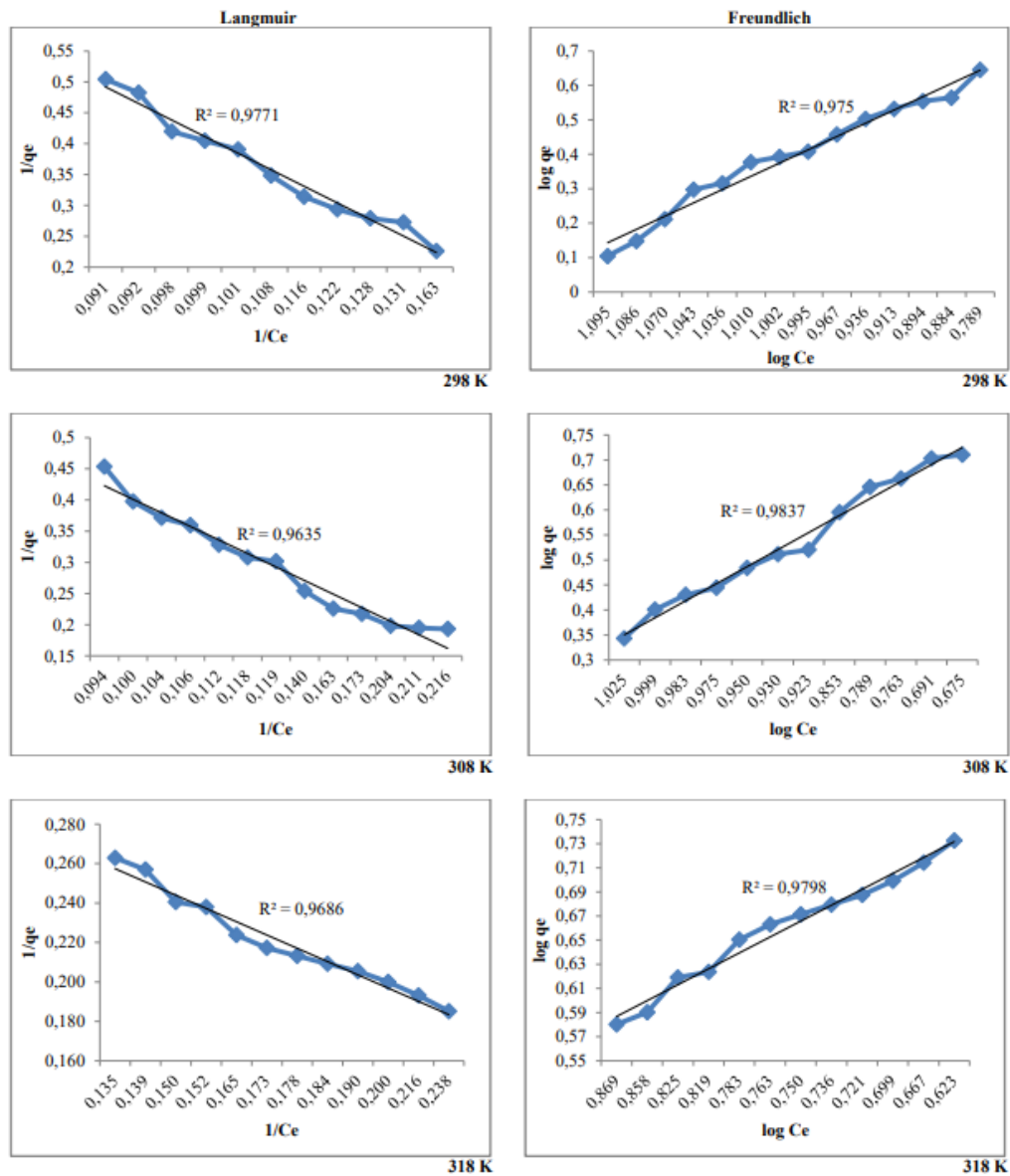


Figure 11. Adsorption isotherms for MB removal using hazelnut shell char

Table 3. The Langmuir and Freundlich isotherm constants for MB adsorption

Isotherm Model	Parameters	Temperature (K)		
		298	308	318
Langmuir	q_m (mg/g)	1.927	2.249	3.785
	K_L (L/mg)	0.0194	0.0205	0.0394
	R^2	0.9771	0.9635	0.9686
Freundlich	K_f [mg/g (L/mg) ^{1/n}]	12.73	20.72	37.45
	n (g/L)	2.597	2.933	7.576
	R^2	0.975	0.9837	0.9798

the Freundlich isotherm model fitted better than the Langmuir isotherm model at all studied temperatures.

The Langmuir and Freundlich isotherm constants for MB adsorption are given in Table 3. The results showed that the values of n lie between 1 and 10 at all studied temperatures, which indicated that the MB dye was favorably adsorbed by hazelnut shell char. In addition, the values of K_f , q_m and n increased with the increase in temperature for MB. So these adsorption isotherms provided some insight into the adsorption mechanism and the surface characteristics of adsorbent [34]

3.3.6. Adsorption kinetics modeling

In order to examine the mechanism of adsorption process, the pseudo first order and the pseudo second order adsorption models were used to adjust kinetic experimental data. The linear form of pseudo first order and pseudo second order rate equations were presented in Equation 5 and 6, respectively.

$$\log \frac{(q_e - qt)}{q_e} = -\frac{K_1}{2.303} t \tag{5}$$

$$\frac{t}{qt} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \tag{6}$$

where, q_t and q_e denote the sorption capacity (mg/g) at a given time and at equilibrium, respectively, K_1 is the pseudo first order rate constant (min^{-1}), K_2 is the pseudo second order rate constant ($\text{g mg}^{-1}\text{min}^{-1}$) and t is the time (min) [5]. The linear graphs of $\log(q_e - q_t)$ versus t and t/q_t versus t are shown in Figure 12. The values of kinetic parameters (the rate constants of the two models with the correlation coefficients) of linear form of both rate equations are presented in Table 4.

As can be seen from Table 4, the R^2 values of the pseudo first order model are closer to 1.0 and higher than those of the pseudo second order kinetics. These results shown that the adsorption of MB dye in aqueous solutions using the hazelnut shell char can be described by pseudo first order kinetic model.

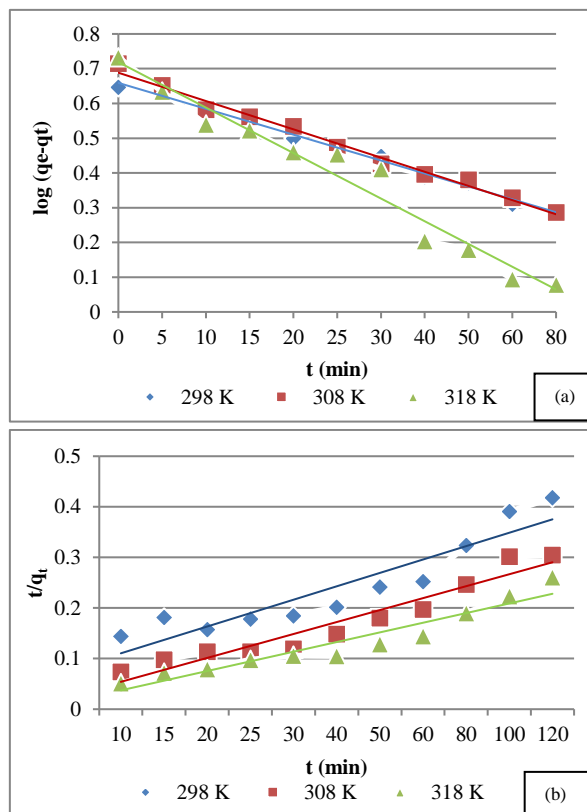


Figure 12. Linear plots of a) pseudo first order and b) pseudo second order model for the adsorption of MB onto hazelnut shell char

Table 4. Rate constants of pseudo first order and pseudo second order models with correlation coefficients

Temperature (K)	Pseudo First Order		Pseudo Second Order	
	K_1 (min^{-1})	R^2	K_2 (g/mg.min)	R^2
298	0.086	0.99	0.0084	0.86
308	0.094	0.99	0.0183	0.93
318	0.151	0.97	0.0200	0.91

3.3.7. Thermodynamic study

Thermodynamic parameters such as ΔG° , ΔH° and ΔS° for the adsorption system were calculated using the following equations (7-9):

$$K_c = \frac{C_{ads}}{C_e} \quad (7)$$

$$\Delta G = -RT \ln K_c \quad (8)$$

$$\ln K_c = \frac{\Delta S}{R} - \frac{\Delta H}{RT} \quad (9)$$

where R (8.314 J/mol K) is the universal gas constant and T (K) is the absolute solution temperature. The values of ΔH° and ΔS° were determined from the slope and intercept of the Van't Hoff plot of $\ln K_c$ versus $1/T$ which are shown in Figure 13 [35]. The calculated thermodynamics parameters are given in Table 5.

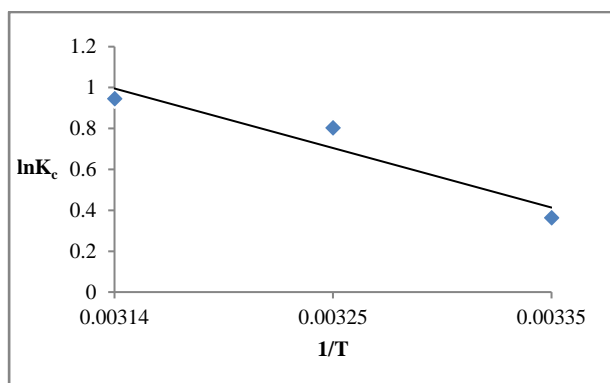


Figure 13. Van't Hoff plot for the adsorption of MB onto hazelnut shell char

Table 5. Thermodynamic parameters of MB adsorption on hazelnut shell char at different temperatures

Temperature (K)	K_c	ΔG° (kJ/mol)	ΔH° (kJ/mol)	ΔS° (J/mol.K)
298	1.439	-0.902	2.42	10.69
308	2.233	-2.057		
318	2.575	-2.501		

As can be seen from Table 5, K_c (equilibrium constant) values increased with an increase in temperature. The positive value of ΔH° showed the endothermic nature of the process. The positive value of ΔS° indicated an increase in the randomness at the solid/solution interface during the adsorption of the MB dye on hazelnut shell char. When temperature increased with considered positive values of ΔH° and ΔS° , ΔG° was going to get a negative value and the process are spontaneous. The decrease in ΔG° values showed the feasibility of adsorption as the temperature increased.

4. CONCLUSIONS

This study aimed to determine the effectiveness of non-commercial activated carbon which is produced from hazelnut shell for the removal of MB dye. Using this material as an adsorbent instead of high cost commercial activated carbon is very important to contribute to industrial ecology at local level because of an alternative green approach for removal of MB is developed. The following conclusions could be made based on the analysis of the results obtained in this work. Experimental results showed that the contact time necessary for maximum adsorption was 300 minute approximately. Highest percentage of dye removal was observed at pH 4.0. It was found that the percentage removal of methylene blue was dependent on the dose of adsorbent. The percent removal of dye increased rapidly with increase in the dose of the adsorbent due to the greater availability of surface area. The kinetics of adsorption process showed that an increase in adsorption capacity with the increasing temperature. This result confirmed the endothermic nature of the ongoing process. It was observed that the adsorption of methylene blue decreased with increasing of the initial dye concentration. The Freundlich equation was found to have the higher applicability (best fit) to the experimental data obtained in this work. The kinetic behaviors of the adsorption of MB dye followed the pseudo first order model and also the adsorption process of MB was spontaneous. As a result, biochar produced from hazelnut shell had sufficient binding capacity to remove methylene blue from water.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank Hitit University and Ondokuz Mayıs University for their support.

NOMENCLATURE

- C_o : Initial dye concentration in solution phase, (mg/L)
- C : Final dye concentration in solution phase, (mg/L)
- C_e : Concentration of the dye solution at equilibrium, (mg/L)
- K_f : Freundlich constant indicative of the relative adsorption capacity of the adsorbent, [mg/g(L/mg)^{1/n}]
- K_L : Constant related to the free energy of adsorption, (L/mg)
- K_1 : Pseudo first order rate constant, (min⁻¹)
- K_2 : Pseudo second order rate constant, (g mg⁻¹ min⁻¹)
- m : Weight of adsorbent, (g)
- $1/n$: Heterogeneity factor
- q_e : Amount of dye adsorbed per unit mass of adsorbent at equilibrium, (mg/g)
- q_m : Maximum adsorption capacity, (mg/g)
- q_t : Sorption capacity at a given time, (mg/g)
- R^2 : Correlation coefficient
- t : Contact time, (min)
- T : Temperature, (K)
- V : Volume of dye solution, (L)

REFERENCES

- [1] Çalışkan M., Değirmenci M. and Çiner F. "Kot boyama tekstil atıksuyunda kalıcı KOİ'nin belirlenmesi", *DEÜ Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4(1):1-9, (2002).
- [2] Poon C.S., Huang Q. and Fung P.C. "Degradation kinetics of cuprophenyl yellow RL by UV/H₂O₂/Ultrasonication (US) process in aqueous solution", *Chemosphere*, 38:1005-1014, (1999).
- [3] Chakraborty S., Chowdhury S. and Saha P., "Adsorption of crystal violet from aqueous solution onto NaOH-modified rice husk", *Carbohydrate Polymers*, 86:1533-1541, (2011).
- [4] Rafatullah M., Sulaiman O., Hashim R and Ahmad A., "Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents: A review", *Journal of Hazardous Materials*, 177:70-80, (2010).
- [5] Mohammadi A. and Karimi A.A., "Methylene blue removal using surface-modified TiO₂ nanoparticles: A comparative study on adsorption and photocatalytic degradation", *J. Water Environ. Nanotechnol.*, 2(2):118-128, (2017).
- [6] Gaouar-Yadi M., Tizaoui K., Gaouar-Benyelles N. and Benguella B., "Efficient and eco-friendly adsorption using low-cost natural sorbents in waste water treatment", *Indian Journal of Chemical Technology*, 23:204-209, (2016).
- [7] Demiral İ. and Aydın Şamdan C., "Preparation and characterisation of activated carbon from pumpkin seed shell using H₃PO₄", *Anadolu University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering*, 17(1):125-138, (2016).
- [8] Sharma S.K., "Green Chemistry for Dyes Removal from Waste Water: Research Trends and Applications", *Wiley*, India, (2015).
- [9] Aygün A., Yenisoy-Karakaş S. and Duman I., "Production of granular activated carbon from fruit stones and nutshells and evaluation of their physical, chemical and adsorption properties", *Microporous and Mesoporous Materials*, 66:189-195, (2003).
- [10] Alade A.O., Amuda O.S., Afolabi A.O. and Adelowo F.E., "Adsorption of acenaphthene onto activated carbon produced from agricultural wastes", *Journal of Environmental Science and Technology*, 5(4):192-209, (2012).
- [11] Savova D., Apak E., Ekinçi E., Yardim F., Petrov N., Budinova T., Razvigorova M. and Minkova V., "Biomass conversion to carbon adsorbents and gas", *Biomass and Bioenergy*, 21:133-142, (2001).
- [12] Kim J.W., Sohn M.H., Kim D.S., Sohn S.M. and Kwon Y.S., "Production of granular activated carbon from waste walnut shell and its adsorption characteristics for Cu²⁺ ion", *Journal of Hazardous Materials*, 85:301-315, (2001).
- [13] Saha P., Chowdhury S., Gupta S. and Kumar I., "Insight into adsorption equilibrium, kinetics and thermodynamics of malachite green onto clayey soil of Indian origin", *Chemical Engineering Journal*, 165:874-882, (2010).
- [14] Ferrero F., "Dye removal by low cost adsorbents: Hazelnut shells in comparison with wood sawdust", *Journal of Hazardous Materials*, 142:144-152, (2007).
- [15] Ceylan S., Topçu Y., "Pyrolysis kinetics of hazelnut husk using thermogravimetric analysis", *Bioresource Technology*, 156:182-188, (2014).
- [16] Sait H. H., Hussain A., Salema A. A., Ani F. N., "Pyrolysis and combustion kinetics of date palm biomass using thermogravimetric analysis", *Bioresource Technology*, 118:382-389, (2012).
- [17] Saidur R., Abdelaziza E. A., Demirbas A., Hossaina M. S., Mekhile S., "A review on biomass as a fuel for boilers", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15:2262-2289, (2011).
- [18] Li S., Chen X., Liu A., Wang L., Yu G., "Co-pyrolysis characteristic of biomass and bituminous coal", *Bioresource Technology*, 179:414-420, (2015).
- [19] Odeh A. O., "Qualitative and quantitative ATR-FTIR analysis and its application to coal char of different ranks", *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 43:129-137, (2015).
- [20] Plis A., Lasek J., Skawinska A., Zuwała J., "Thermochemical and kinetic analysis of the pyrolysis process in cladophora glomerata algae", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 115:166-174, (2015).
- [21] Ghaffar S.H. and Fan M., "Structural analysis for lignin characteristics in biomass straw", *Biomass and Bioenergy*, 57:264-279, (2013).
- [22] Chen Z., Hu M., Zhu X., Guo D., Liu S., Hu Z., Xiao B., Wang J., Laghari M., "Characteristics and kinetic study on pyrolysis of five lignocellulosic biomass via thermogravimetric analysis", *Bioresour. Technol.*, 192:441-450, (2015).
- [23] Hu M., Chen Z., Wang S., Guo D., Ma C., Zhou Y., Chen J., Laghari M., Fazal S., Xiao B., Zhang B., Ma S., "Thermogravimetric kinetics of lignocellulosic biomass slow pyrolysis using distributed activation energy model, Fraser-Suzuki deconvolution, and iso-conversional method", *Energy Convers. Manag.*, 118:1-11, (2016).
- [24] Biswas B., Pandey N., Bisht Y., Singh R., Kumar J., Bhaskar T., "Pyrolysis of agricultural biomass residues: Comparative study of corn cob, wheat straw, rice straw and rice husk", *Bioresour. Technol.*, 237:57-63, (2017).
- [25] Aljeboree A.M., Alshirifi A.N., Alkaim A.F., "Kinetics and equilibrium study for the adsorption of textile dyes on coconut shell activated carbon", *Arabian Journal of Chemistry*, 10:S3381-S3393, (2017).
- [26] Ahmad R., "Studies on adsorption of crystal violet dye from aqueous solution onto coniferous pinus bark powder (CPBP)", *Journal of Hazardous Materials*, 171:767-773, (2009).
- [27] Luk C.J., Yip J., Yuen C.M., Kan C. and Lam K., "A comprehensive study on adsorption behaviour of direct, reactive and acid dyes on crosslinked and non-crosslinked chitosan beads", *Journal of Fiber Bioengineering and Informatics*, 7(1):35-52, (2014).
- [28] Chowdhury S., Chakraborty S. and Saha P., "Biosorption of basic green 4 from aqueous solution by ananas comosus (pineapple) leaf powder", *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 84:520-527, (2011).
- [29] Dawood S. and Sen T.K., "Review on dye removal from its aqueous solution into alternative cost effective and non-conventional adsorbents", *Journal of Chemical and Process Engineering*, 1(104):1-11, (2014).

- [30] Doğan M., Abak H. and Alkan M., “Adsorption of methylene blue onto hazelnut shell: Kinetics, mechanism and activation parameters”, *Journal of Hazardous Materials*, 164:172-181, (2009).
- [31] Karaca S., Gürses A., Açıkyıldız M. and Ejder Korucu M., “Adsorption of cationic dye from aqueous solutions by activated carbon”, *Microporous and Mesoporous Materials*, 115:376-382, (2008).
- [32] Belhachemi M. and Addoun F., “Comparative adsorption isotherms and modeling of methylene blue onto activated carbons”, *Appl. Water Sci.*, 1:111-117, (2011).
- [33] Kumar P.S., Anne Fernando P.S., Ahmed R.T., Srinath R., Priyadharshini M., Vignesh A.M. and Thanjiappan A., “Effect of temperature on the adsorption of methylene blue dye onto sulfuric acid-treated orange peel”, *Chemical Engineering Communications*, 201(11):1526-1547, (2014).
- [34] Aksu Z. and Kabasakal E., “Adsorption characteristics of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) from aqueous solution on powdered activated carbon”, *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 40(4):545-570, (2005).
- [35] Al-Rubayee W.T., Abdul-Rasheed O.F., Mustafa Ali N., “Preparation of a modified nanoalumina sorbent for the removal of alizarin yellow R and methylene blue dyes from aqueous solutions”, *Journal of Chemistry*, 1-12, (2016).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



Frekans Modülasyonlu sürekli dalga (FMSD) ölçüm sistemlerinde faz gürültü etkisinin telafisi

Phase noise compensation in frequency modulated continuous wave (FMCW) measurement systems

Yazar(lar) (Author(s)): Eren VARDARLI¹, Kıvılcım YÜKSEL ALDOĞAN²

ORCID¹: 0000-0002-4756-4570

ORCID²: 0000-0003-1512-3022

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Vardarlı E. ve Aldoğan K. Y., “Frekans modülasyonlu sürekli dalga (FMSD) ölçüm sistemlerinde faz gürültü etkisinin telafisi”, *Politeknik Dergisi*, 21(4): 777-784, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.391797

Frekans Modülasyonlu Sürekli Dalga (FMSD) Ölçüm Sistemlerinde Faz Gürültü Etkisinin Telafisi

Araştırma Makalesi / Research Article

Eren VARDARLI, Kivılcım YÜKSEL ALDOĞAN*

Mühendislik Fakültesi, Elektronik Müh. Bölümü, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir, Türkiye
(Geliş/Received : 14.09.2017 ; Kabul/Accepted :06.12.2017)

ÖZ

Bu makalede, tüm tasarım parametreleri dikkate alınarak, Frekans Modülasyonlu Sürekli Dalga ölçüm sistemlerinde (FMSD) kullanılan faz gürültüsü telafi algoritmalarının analizi sunulmuştur. Bu sayede radyo frekansından optik frekanslara kadar FMSD-tabanlı sistemler için genel ve gerçekçi bir model oluşturulmuştur. Önerilen faz gürültüsü telafi algoritmasının geçerliliği benzetimler aracılığı ile doğrulanmıştır. Benzetim sonuçları makalede sunulan matematiksel modeller ile uyum içerisinde. Bu çalışma, doğrusal olmayan frekans modülasyonun ortaya çıkardığı pahalı ve karmaşık donanımsal gereksinimlerin üstesinden gelinmesini sağlayarak, birden fazla teknolojik alanda (örn. SAR radarlar, fiber optik sensörler) etki yaratabilir.

Anahtar Kelimeler: Faz gürültüsü, frekans modülasyonlu sürekli dalga, metroloji, optik sensör, radar.

Phase Noise Compensation in Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) Measurement Systems

ABSTRACT

We present the analysis of the phase noise compensation algorithms used in Frequency Modulated Continuous Wave measurement systems taking into account all the design parameters. This allows obtaining a generic yet realistic framework for the FMCW-based systems ranging from RF to optical frequencies. The efficiency of the proposed phase-noise compensation algorithm has been verified by the way of simulations. The simulation results show a good agreement with the mathematical foundations discussed in the paper. This work could have a technological implication in many fields (e.g. SAR radar, optical fiber sensor interrogation) in such a way that the stringent and expensive hardware requirements due to nonlinear frequency modulation effects can be overcome a posteriori by the phase noise compensation algorithm demonstrated in this article.

Keywords: Phase noise, frequency modulated continuous wave, metrology, optical sensor, radar.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Frekans Modülasyonlu Sürekli Dalga (FMSD) ölçüm teknikleri, başta radarlar olmak üzere, optik cihaz karakterizasyonu, fiber optik ağların izlenmesi, ve fiber optik sensör uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

FMSD ölçüm sistemlerinin, uzaysal çözünürlük, maksimum ölçüm mesafesi, sinyal algılama hassasiyeti gibi performans parametrelerini belirleyen en önemli etken, frekans modülasyonunun doğrusallığıdır. Doğrusallıktan uzaklaştıkça, elde edilen ara frekanslarda bozulma meydana geleceğinden hayalet hedef algılanması, birden çok hedefin birbirinden ayrıştırılamaması ve sinyal-gürültü oranının azalması gibi sorunlarla karşılaşmaktadır. Doğrusal olmayan frekans modülasyonunun nedeni, frekans üretici osilatörlerin ideal olmayışı ve faz gürültüsüne sahip olmalarıdır.

Literatürdeki faz gürültüsü telafi yöntemleri donanımsal yöntemler ve işaret işleme yöntemleri olmak üzere iki grupta incelenebilir. Frekans tarama doğrusallığının

sağlanması için geliştirilen donanımsal çözümler, kullanılan frekans kaynağını iyileştirmeye yöneliktir. Bunlardan bazıları voltaj kontrollü osilatör için kapalı geri besleme döngüsü kullanılması [1] ya da frekansın tamamen dijital olarak sentezlenmesi ve frekans taramasının dijital olarak yapılmasıdır [2].

Donanımsal yöntemlere alternatif olarak sunulan yazılımsal çözümler ise, sayısal sinyal işleme tekniklerindeki gelişmeler sayesinde, son yılların yaygın araştırma konusu haline gelmiştir. Faz gürültü telafisi için kullanılan en yaygın yöntem, artıksal faz filtresi kullanılarak geliştirilmiş sinyal işleme algoritmasıdır [3, 4].

Bu makalede odaklandığımız çözüm yazılımsal olup, faz gürültüsünün neden olduğu bozulmayı sinyal işleme teknikleri kullanarak, ölçüm sonrası (*a posteriori*) gidermeyi amaçlamaktadır. Artıksal faz filtresini temel alan algoritmanın matematiksel olarak tanımlanmasının ardından, MATLAB benzetimleri yoluyla, faz gürültüsü telafi etkinliği çeşitli örneklerle gösterilmiştir. Makalede analiz edilen faz telafi algoritmasının, RF'den [3, 4] optik frekanslara [5-7] kadar uzanan geniş uygulama

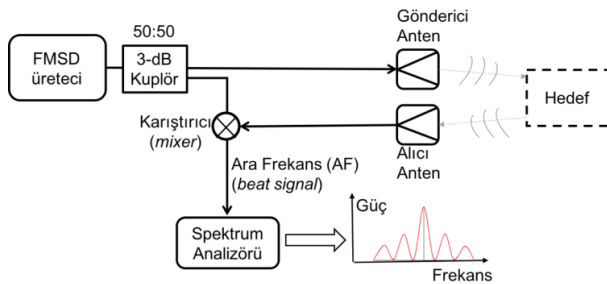
*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : kivilcimyuksel@iyte.edu.tr

yelpazesindeki avantaj ve sınırlamaları gerçekçi sayısal verilerle tartışılmıştır. Bu çalışma ile, farklı uygulama alanlarında karşımıza çıkan FMSD faz gürültüsü telafi algoritmaları, tüm uygulamalarda geçerli olacak şekilde, ortak bir matematiksel çerçeveye alınarak literature katkı sağlanması hedeflenmiştir.

2. FMSD ÖLÇÜM SİSTEMLERİ ÇALIŞMA PRENSİBİ (OPERATION PRINCIPLE OF FMCW MEASUREMENT SYSTEMS)

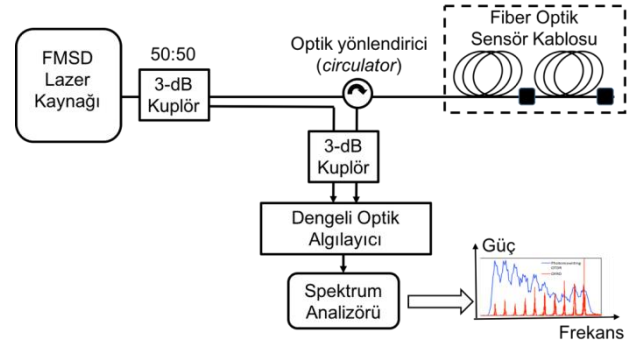
Radarlar genel olarak darbeli ve sürekli dalga radarlar olmak üzere iki grupta incelenebilir. Birinci grupta, gönderilen darbenin hedefe git-gel süresinden hedefin uzaklığı hesaplanır. Ancak bu radarlar yüksek hızlarda çalışan elektronik bileşenler ve karmaşık elektronik tasarım gerektirir. İkinci gruptaki radarlarda, hedefe gönderilen ve algılanan sürekli dalga aynı taşıyıcı frekansa sahiptir ve Doppler prensibi kullanılarak hareketli hedefin hızı hesaplanabilir. Fakat hedefin mesafe bilgisinin elde edilebilmesi için taşıyıcı frekansın modüle edilmesi, başka bir deyişle, gönderilen sürekli dalga sinyal ile hedeften yansıyan sinyal arasında frekans farkı olması gerekir. Bu amaçla, FMSD ölçüm yöntemi radarlara başarıyla uygulanmıştır [8].

Şekil 1’de bu tür bir radar uygulamasının basitleştirilmiş blok diagramı görülmektedir. FMSD üretici çıkışındaki sinyal gücü, 3 dB kuplör kullanılarak ikiye bölünür. Bu sinyalin yarısı referans sinyali (*Local Oscillator*) olarak karıştırıcıya aktarılırken, diğer yarısı gönderici antenden hedefe iletilir. Hedeften yansıyan sinyal, alıcı anten tarafından algılanır ve karıştırıcının radyo frekans girişine uygulanır. Karıştırıcının çıkışında elde edilen ara-frekans sinyali, spektrum analizörü ile incelenir ve hedefin uzaklığı ile doğru orantılı olan ara-frekans değeri frekans uzayında (sinc fonksiyonu olarak) gözlemlenir. FMSD tabanlı radarlar uzun mesafelerde yüksek çözünürlük sağlamanın yanı sıra hedefe gönderilen sinyalin gücü belli bir frekans aralığına dağıtıldığı için ‘dinlenmesi’ daha zor, dolayısıyla güvenlidir. Bu nedenle son yıllarda, kıyı güvenliği, insansız hava araçları ile kritik bölgelerin izlenmesi ve askeri uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır [8].



Şekil 1. FMSD işaretinin, radar alıcı/verici devresine uygulaması. FMSD: Frekans Modülasyonlu Sürekli Dalga. (Implementation of the FMCW signal as an input to the radar transceiver)

FMSD tabanlı ölçüm sistemlerinin, fiber optik sensör uygulamaları için şemalaştırılmış çalışma prensibi Şekil 2’de görülmektedir. FMSD lazer kaynağı çıkışındaki optik sinyalin gücü, 3 dB kuplör ile iki kola ayrılır. Test sinyali optik yönlendirici vasıtasıyla fiber optik kabloya yönlendirilir. Optik fiber içerisinde farklı mesafelerdeki sensör noktalarından yansıyan sinyal, yine optik yönlendirici ile ikinci bir kuplöre aktarılır. Burada, test ve referans sinyalleri girişime uğrar. İkinci kuplörün çıkış kollarına 180 derecelik faz farkı ile aktarılan girişim sinyalleri, dengeli fotodedektör üzerine düşürülerek hem sinyaldeki DC bileşen filtrelenir, hem de test ve referans sinyaller arasındaki faz farkı bilgisi elde edilir. Ardından, sadece ara-frekans bileşenlerini içeren sinyal, spektrum analizörü ile frekans uzayına aktarılır. Spektrum üzerinde gözlemlenen her bir ara-frekans bileşeni optik fiberdeki bir sensör noktasına karşılık gelmektedir. Böylece aynı fibere ardışıl olarak yerleştirilmiş sensörlerin mesafe ve genlik bilgileri, tek bir FMSD ölçümü ile sorgulanmış olur.



Şekil 2. FMSD işaretinin, frekans bölgesinde optik yansımali sensör ölçüm sistemine uygulanması. (Implementation of the FMCW signal to the optical sensor interrogation system)

Yukarıda iki farklı uygulama alanı için açıklandığı üzere, spektrum analizörüne aktarılan girişim sinyali frekans uzayına aktarılır (frekans bileşenlerine ayrıştırılır). Her bir ara-frekans bileşeni, radar uygulamaları için hedefin uzaklık bilgisi, sensör uygulamalarında ise sensörün fiber içindeki pozisyon bilgisi ile doğrudan ilişkilidir. Hedef mesafesi, diğer sistem parametreleri cinsinden şu şekilde ifade edilir:

$$L = \frac{f_{AF} v T}{2 \Delta f} \quad (1)$$

burada f_{AF} , ölçülen ara-frekans bileşeni, v , FMSD işaretinin ortamdaki hızı (örn. radar sinyalinin havadaki hızı, ışık sinyalinin optik fiberdeki hızı), T taşıyıcı frekans tarama periyodu, Δf ise taranan frekans aralığını temsil etmektedir. Eşitlik 1’deki $\frac{1}{2}$ katsayısı, FMSD işaretinin, üretici ile hedef arasında gel-git özelliğinden kaynaklanır. Hesaplanabilecek en küçük frekans aralığı, T ile ters orantılı olduğu için uzaysal çözünürlük,

$$\Delta L = \frac{v}{2 \Delta f} \quad (2)$$

ifadesiyle hesaplanır. Eşitlik 2'den anlaşılacağı üzere, uzaysal çözünürlük sürekli dalganın frekansına bağlı olmayıp, taranan frekans aralığı ile ilişkilidir.

Girişte bahsedildiği üzere, FMSD tabanlı tüm ölçüm sistemlerinin performans parametreleri, direk veya dolaylı olarak, frekans modülasyonunun doğrusal (lineer) olmasına bağlıdır. Doğrusal olmayan frekans değişimi, Şekil 1 ve Şekil 2'de temsil edilen ara-frekanslar çevresinde bir genişlemeye, dolayısıyla uzaysal çözünürlük ve güç kaybına kayba neden olur. FMSD radarlarda karşılaşılan en önemli sorunlardan biri frekans tarayıcı osilatörlerin ideal olmayışı, başka bir deyişle faz gürültüsüne sahip olmalarıdır. FMSD tabanlı optik sistemlerde ise faz gürültüsü lazer kaynağının doğrusal olmayan frekans modülasyon cevabından kaynaklanır. Faz gürültüsünün matematiksel tanımı takip eden bölümde sunulmuştur.

3. FMSD ÖLÇÜM SİSTEMLERİ ANALİTİK MODELİ (ANALYTICAL MODEL OF FMCW MEASUREMENT SYSTEMS)

FMSD çıkışından hedefe gönderilen sinyalin ("giden sinyal") analitik ifadesi eşitlik 3'de verilmiştir. Buradaki üstel ifadenin argümanı giden sinyalin fazını ifade etmektedir.

$$u_{giden}(t) = a \left(\frac{t}{T} \right) \exp \left[j2\pi \left(f_m t + \frac{1}{2} \gamma t^2 \right) \right] \quad (3)$$

bu eşitlikte $a \left(\frac{t}{T} \right)$, FMSD sinyal genliğinin T frekans tarama periyodu ile sınırlı zarfını, f_m giden sinyalin merkezi frekansını, γ taşıyıcı frekansın modülasyon hızını ($\Delta f/T$) ifade etmektedir.

Hedefte yansıyor algılayıcı birime ulaşan sinyal ("gelen sinyal"), giden sinyalin gel-git süresi (τ) kadar gecikmiş hali olarak gösterilebilir. ($u_{gelen}(t) = u_{giden}(t - \tau)$).

Bu iki sinyal karıştırıcı vasıtasıyla çarpılarak ara frekans ($f_{AF} = \gamma\tau$) değeri elde edilir. Bu işlem, tek bir hedef (veya tek bir sensör noktası) için, analitik olarak eşitlik 4 ve 5'de ifade edilmiştir.

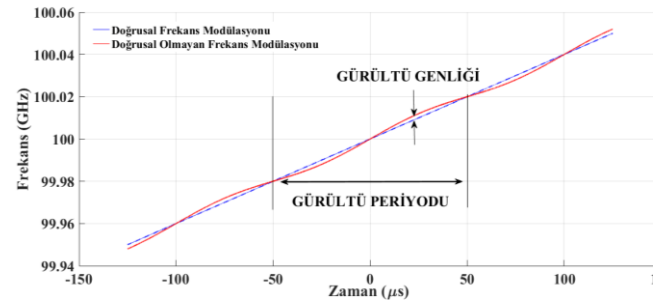
$$\cos \phi_{AF} = \cos \phi_{giden} - \phi_{gelen} \quad (4)$$

$$u_{AF}(t) = g(t) \exp \left[j2\pi \left(f_m \tau + \gamma \tau t - \frac{1}{2} \gamma \tau^2 \right) \right] \quad (5)$$

$g(t)$, algılanan sinyalin zarfı, $\frac{1}{2} \gamma \tau^2$ hedef mesafesinden bağımsız bir faz terimi olarak eşitlik 5'te yer almaktadır. Önceki açıklamalardan anlaşılacağı gibi eşitlik 5, FMSD üreticinin doğrusal bir şekilde modülasyonu sonucu elde edilen ideal durumu temsil etmektedir. Faz gürültüsünü modelleyebilmek için bu ideal işlemin başlangıcında giden sinyalin fazına bir gürültü bileşeni eklenebilir. Faz gürültüsünün sinüzoidal olduğu durumda giden sinyalin frekansı eşitlik 6'da verilmiştir.

$$f(t)_{giden} = f_m + \gamma t + \beta_g \cos(2\pi f_g t) \quad (6)$$

bu eşitlikte gürültü frekansı f_g , gürültü genliği ise β_g olarak tanımlanmıştır (bakınız Şekil 3).



Şekil 3. Sinüzoidal olarak modellenmiş faz gürültüsü (Phase noise modelled as a pure sinusoidal)

Faz gürültüsünün sinüzoidal olduğu model temel alınarak ara frekans sinyalinin fazı eşitlik 7'de verilmiştir.

$$\phi_{AF}(t) = 2\pi \cdot \left[f_m \cdot \tau + \gamma \cdot \tau \cdot t - \gamma \cdot \frac{\tau^2}{2} \right] + e(t) - e(t - \tau) \quad (7)$$

Bu eşitlikte $e(t) = \frac{\beta_g}{f_g} \sin(2\pi f_g t)$ giden sinyalin faz gürültüsü, $\frac{\beta_g}{f_g}$ modülasyon katsayısı, $e(t - \tau)$ ise gelen sinyalin faz gürültüsüdür. Taylor açılımı kullanılarak gürültü teriminin nasıl bir modülasyona yol açtığı eşitlik 8'de belirtilmiştir.

$$s_e(t) = \exp \left[j \cdot \frac{\beta_g}{f_g} \sin(2\pi \cdot f_g \cdot t) \right] = 1 + j \cdot \frac{\beta_g}{f_g} \sin(2\pi \cdot f_g \cdot t) - \frac{1}{2!} \left(\frac{\beta_g}{f_g} \right)^2 \sin^2(2\pi \cdot f_g \cdot t) - j \frac{1}{3!} \left(\frac{\beta_g}{f_g} \right)^3 \sin^3(2\pi \cdot f_g \cdot t) \quad (8)$$

Eşitlik 8 üzerinde yarım açı formülü¹ kullanılarak ikinci harmonik frekansının oluştuğu, bir diğer trigonometrik bağıntı² kullanılarak ise üçüncü harmonik frekansının oluştuğu gözlemlenebilir.

4. FAZ GÜRÜLTÜSÜ TELAFİ ALGORİTMASI (PHASE NOISE COMPENSATION ALGORITHM)

4.1. Adım-1: Giden sinyalin faz gürültüsünden temizlenmesi

Algoritmanın ilk adımında, $u_{AF}(t) = \exp(j \phi_{AF}(t))$ şeklinde ifade edilen kompleks ara frekans, $e(t)$ faz gürültü bileşeninin eşleniği ile çarpılıp giden sinyalin faz gürültüsünden bağımsız hale gelmesi sağlanır. Bu işlem $u_{AF1}(t) = u_{AF}(t) \cdot u_e^*(t)$ şeklinde ifade edilir.

Adım-1'in uygulanmasının ardından, istenmeyen faz terimi olarak τ parametresine bağımlı terimler kalır. Bu bağımlılığın bir faz filtresi kullanılarak giderilmesi gerekmektedir. Bunun için algoritmanın ikinci adımında

¹ $\sin^2(x) = \frac{1 - \cos(2x)}{2}$

² $\cos^3(x) = \frac{3\cos(x) - \cos(3x)}{4}$

QPF (*Quadratic Phase Filter*) olarak bilinen ikincil dereceli faz filtresinden yararlanılmıştır.

4.2. Adım-2: Faz filtresi uygulanması

Adım-1'in uygulanmasının ardından ara frekans sinyalinin fazı eşitlik 9 ile ifade edilir.

$$\phi(t)_{AF1} = 2\pi \cdot \left[f_m \cdot \tau + \alpha \cdot \tau \cdot t - \alpha \cdot \frac{\tau^2}{2} \right] - e(t - \tau) \quad (9)$$

Bu adımdan sonra elimizde, gelen sinyalin faz gürültüsü ($e(t - \tau)$) ve artıksal faz olarak bilinen terim ($-\pi\alpha\tau^2$) kalmıştır. Bu terimlerin ikisi de gel-git süresine (τ) bağımlı olduğundan ilk adıma benzer bir işlem uygulamadan önce, bu bağımlılığın ikincil dereceli faz filtresi (QPF) ile ortadan kaldırılması gerekir. İkinci adımdaki işlem frekans alanında gerçekleşir. Bu işlem literatürde *tersine Fresnel dönüşümü* olarak bilinmektedir. Dönüşümün analitik ifadesi eşitlik 10 ve 11'de verilmiştir. Buradaki üstel ifade, faz filtresinin transfer fonksiyonu olarak tanımlanmıştır.

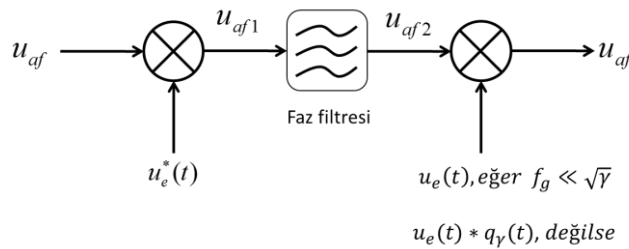
$$U_{AF2}(f) = U_{AF1}(f)Q_{-\gamma}(f) \quad (10)$$

$$Q_{-\gamma}(f) = \exp\left(j\pi \frac{f^2}{\gamma}\right) \quad (11)$$

4.3. Adım-3:

Faz filtresinin uygulanmasının ardından elimizde saf bir sinüs dalgası ve buna ek olarak, gelen faz gürültü sinyalinin Fresnel dönüşümüne uğramış eşleniği [$u_e(t) * q_\gamma(t)$]³ kalmıştır. Artıksal faz temizlenmiş ve faz gürültüsü gel-git parametresinden bağımsız hale gelmiştir. Algoritmanın son adımında, elde edilen sinyal, eğer faz gürültü frekansı $f_g \ll \sqrt{\gamma}$ ile ifade edilen dar-bant koşulunu sağlamakta ise $u_e(t)$ ile, sağlamadığı takdirde ise $u_e(t) * q_\gamma(t)$ ile çarpılır ve ideal girişim sinyali elde edilir.

Algoritmanın tüm adımları Şekil-4'de özetlenmiştir.

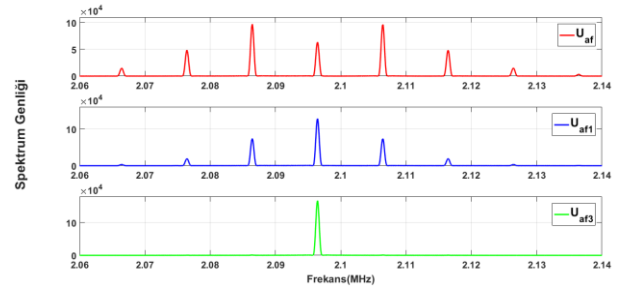


Şekil 4. Faz gürültü telafi algoritmasının genel yapısı (General structure of the phase noise compensation algorithm)

³ * sembolü konvolüsyon işlemini temsil etmektedir. Üstel * sembolü ise eşlenik işlevindedir.

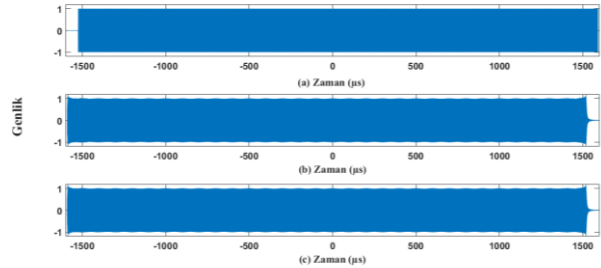
5. BENZETİM SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS)

5.1. Örnek-1: bu örnekte, gürültü frekansı, $f_g \ll \sqrt{\gamma}$ eşitsizliği ile ifade edilen dar-bant koşulunu sağlayacak şekilde seçilmiştir. γ frekans tarama parametresi olup, örneğimiz için 31.4 GHz/sn olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla gürültü frekansı 177 kHz'den çok daha düşük olmalıdır. Bizim belirlediğimiz frekans 10 kHz'dir. Algoritmanın uygulanmasının ardından elde edilen benzetim sonuçları Şekil 5'de sunulmuştur. İlk olarak 10 kHz'lik faz gürültüsü ile modüle edilmiş ara frekans sinyali görülmektedir (u_{AF}). Ardından algoritmanın birinci adımı sonrası (u_{AF1}), ve üçüncü adımın ardından (u_{AF3}) elde edilen saf ara-frekans sinüs spektrumu gözlenmektedir.



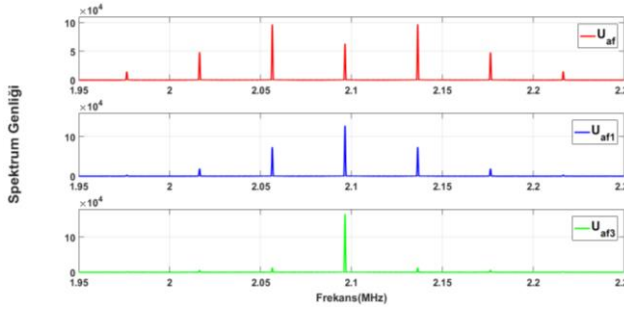
Şekil-5. Örnek-1 benzetim sonuçları (Example-1 simulation results)

İkinci adım, tümüyle geçirgen (*all-pass*) faz filtresinin uygulanmasını içerdiğinden sinyal genliğinde herhangi bir değişikliğe yol açmamaktadır (sinyalin sadece fazında değişiklik gerçekleşmektedir). Bu durum Şekil-6'da gösterilmektedir. Burada tarama periyodunun 3180 μ s olduğu ve u_{AF1} sinyalinin 66.6 μ s'lik gel-git süresinden dolayı gecikmeye maruz kaldığı görülmektedir. Çıktadaki sinyalin ise, uygulanan faz filtresi sayesinde, bu gecikme etkisinden bağımsız hale geldiği ve filtrenin işlevini başarıyla yerine getirdiği gözlemlenmektedir.



Şekil-6. (a) Faz filtresi girişi (u_{AF1}) (b) Faz filtresi çıkışı (u_{AF2}) (c) Adım-3 çıkışı (u_{AF3}) (Input of phase filter, Output of phase filter, Output of step-3)

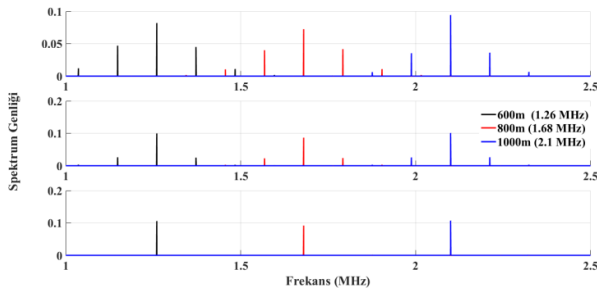
5.2. Örnek-2: Bu örnekte geniş-bant koşulunu sağlayacak şekilde seçilen gürültü frekansı kullanılmıştır. Bu frekans $f_g \approx 0.2\sqrt{\gamma} \approx 40$ kHz ifadesiyle bulunur. Şekil 7’de sunulan benzetim sonuçlarında, 2.09 MHz merkez frekansının 40 kHz ile modüle edildiği açıkça görülebilmektedir. Bu modülasyon sonucunda ikinci ve üçüncü harmonikler oluşmuş, algoritmanın uygulanmasıyla bu harmonik bileşenleri (faz gürültüsü) bastırılmıştır.



Şekil-7. Örnek-2 benzetim sonuçları (Example-2 simulation results)

5.3. Örnek-3: Son örnek olarak benzetim algoritması optik frekans aralığında hem dar-bant, hem de geniş-bant koşulları için test edilmiştir. Merkez frekans olarak 193.54 THz alınmış ve 315 GHz/sn’lik bir frekans tarama hızıyla algoritma denenmiştir. Dar-bant ve geniş-bant koşullarını temsil etmek üzere sırasıyla 20 kHz ve 112 kHz’lik gürültü frekansları uygulanmıştır.

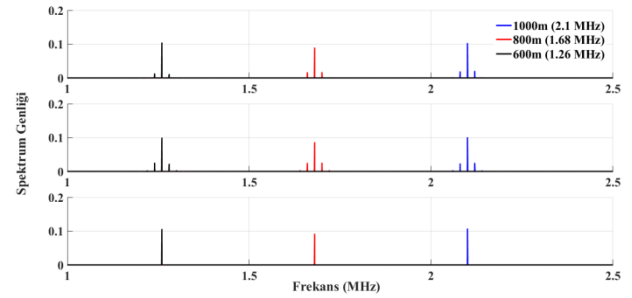
Şekil-8’de geniş-bant için uygulanan benzetim sonuçları görülmektedir. Fiberin 600, 800 ve 1000 metresinde oluşan üç farklı yansıma noktasının herbiri 112 kHz’lik faz gürültüsü ile modüle edilmiştir. Gel-git süreleriyle doğru orantılı olarak üç nokta için elde edilen ara frekanslar sırasıyla 1.26, 1.68 ve 2.1 MHz’dir. Algoritmanın son adımıyla birlikte, her bir noktanın ana gürültü frekansından ve harmoniklerinden temizlendiği gözlemlenmiştir.



Şekil-8. Örnek-3 geniş-bant benzetim sonuçları (Example-3 wide-band simulation results)

Şekil-9’da ise üç nokta için (600, 800 ve 1000 m) dar-bant koşulunu sağlayan 20 kHz’lik bir gürültü frekansı

eklenmiştir. Benzer şekilde algoritmanın son adımında ideal sinüs frekansına ulaşılmıştır.



Şekil-9. Örnek-3 dar-bant benzetim (Example-3 narrow-band simulation results)

6. TARTIŞMA VE SONUÇ (DISCUSSION AND CONCLUSION)

Literatürde farklı uygulama alanları için (örn. SAR radar, optik yansımali sorgulayıcılar) farklı terminoloji ve yaklaşımlarla incelenen algoritmalar, bu makale çalışması kapsamında, tüm uygulamalarda geçerli olacak şekilde tek bir temel çerçeveye alınmıştır. Dolayısıyla bu makalede elde edilen sonuçlar hem RF hem de optik temelli platformlarda kullanılabilir.

Çalışmada önerilen algoritma adımları, tüm matematiksel ayrıntıları ile incelendikten sonra, MATLAB benzetimleri yoluyla, çeşitli örnekler aracılığı ile doğrulanmıştır. Bu örneklerde algoritmanın elektromanyetik spektrumun geniş bir kısmında (1 GHz’den 193 THz’e) etkili olduğu gösterilmiştir. Bununla birlikte algoritmanın dar-bant ve geniş-bant (5 kHz’den 200 kHz’e) koşullarını içeren geniş bir gürültü frekansı (*side-lobe*) aralığında çalıştığı sonucu elde edilmiştir. Bu gürültü frekans aralığı aynı zamanda farklı modülasyon katsayıları (0.1’den 1’e) için denenmiş ve ana gürültü frekansının oluşturduğu harmonik frekansların etkin bir şekilde bastırıldığı gözlemlenmiştir.

Çalışmada önerilen yazılımsal yöntemin önemli bir avantajı, kullanılan algoritma parametrelerinin, farklı uygulama alanlarının ihtiyaçlarına göre uyarlanabilir olmasıdır. Benzetim örneklerinde gerçekçi rakamlarla gösterildiği üzere, FMSD sistemlerini kullanan radar uygulamaları için ihtiyaç duyulan uzaysal çözünürlük metreler mertebesindeyken, optik sensör sorgulayıcıları için bu değer birkaç milimetreye kadar inebilmektedir. Bu durumda, algoritma adımlarının doğru ve etkin çalışması için gereken parametreler (örnekleme frekansı, FFT uzunluğu, tarama başına düşen nokta sayısı vb.), istenen maksimum ölçüm mesafesi de hesaba katılarak, kolaylıkla değiştirilebilir.

Bu sonuçlardan yola çıkarak makalede, pahalı ve karmaşık donanımsal değişikliklere gerek kalmadan, sinyal işleme yöntemleri ile faz gürültüsü sorununun

giderilmesi önerilerek literatüre katkı sağlanması hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Yongqi J., Guoyu H., Ding X., “A new realizable technique to improve the VCO linearity”, *6th International Symposium on antennas, propagation and EM theory*, 396-399, (2003).
- [2] Samarah A. S., Loffeld O., Shahab W., Al-Ibrahim M., “A Digital Sweep (Chirp) Generator With Extremely Small Memory Size And High Level Of The Spurious Free Dynamic Range”, *International Journal of Simulation Systems, Science & Technology*, 11(1): 9-15, 2010.
- [3] Meta A., Hoogeboom P., Ligthart L. P., “Range nonlinearities correction in FMCW SAR”, *IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 403 – 406, (2006).
- [4] Burgos G., Castillo M. C., et al, “Digital on-line compensation of errors induced by linear distortion in broadband LFM radars”, *Electronics Letters*, 39(1):116 – 118, (2003).
- [5] Ding Z., Liu T., Meng Z., Liu K., Chen Q., Du Y., Li D., Yao X. S., “Improving spatial resolution of optical frequency-domain reflectometry against frequency tuning nonlinearity using non-uniform fast Fourier transform”, *Review of Scientific Instruments*, 83(6): 066110, (2012).
- [6] Manuel R. M., Sutherland H. E., “Signal conditioning for compensating nonlinearity and non-repeatability of an optical frequency scanning laser implemented in a C-OFDR system”, *Applied Optics*, 56(3): 457-461, (2017).
- [7] Wang B., Fan X., Wang S., Du J., He Z., “Millimeter-resolution long-range OFDR using ultra-linearly 100 GHz-swept optical source realized by injection-locking technique and cascaded FWM process”, *Optics Express*, 25(4): 3514-3524, (2017).
- [8] <https://www.thalesgroup.com/en/squire>

**EK A: BENZETİM ORNEKLERİNDE KULLANILAN PARAMETRE ÇİZELGELARI
(ANNEX A: SIMULATION PARAMETERS USED IN THREE EXAMPLE CASES)**

Benzetim parametresi	Sembol	Sayısal Değer	Birim
FFT uzunluğu	N_{FFT}	65536	Nokta sayısı
Pencere çeşidi	Hamming		
Örnekleme frekansı	f_s	100	MHz
Örnekleme Periyodu	T_s	10	ns
Her Bir Frekans Taraması için alınan nokta sayısı	N_s	25000	Nokta sayısı
Her Bir Frekans Taraması için işlenen nokta sayısı	N_p	18334	Nokta sayısı
RF merkez frekansı	f_m	100	GHz
RF dalgaboyu	λ_m	3	mm
Taranan frekans aralığı	Δf	100	MHz
Uzaysal çözünürlük	$\frac{c}{2\Delta f}$	1.5	m
Frekans tarama periyodu	T	3.18	ms
Frekans tarama frekansı	$1/T$	314	Hz
Frekans tarama hızı	γ	31.4	GHz/s
Maksimum ölçüm mesafesi	L_{max}	10	km
Maksimum gel-git zamanı	τ_{max}	66.6	μs
Maksimum Ara-Frekans (<i>beat</i>)	$f_{AF,max}$	2.09	MHz
Dar-bant gürültü frekansı	f_g	10	kHz
Geniş-bant gürültü frekansı	f_g	40	kHz

Çizelge 1. Benzetim parametreleri (Örnek-1 ve Örnek-2) (Simulation parameters for Example-1 and 2)

Benzetim parametresi	Sembol	Sayısal Değer	Birim
FFT uzunluğu	N_{FFT}	2,097,152	Nokta sayısı
Pencere çeşidi	Hamming		
Örnekleme frekansı	f_s	10	MHz
Örnekleme Periyodu	T_s	100	ns
Her Bir Frekans Taraması için alınan nokta sayısı	N_S	2,000,000	Nokta sayısı
Her Bir Frekans Taraması için işlenen nokta sayısı	N_p	1,999,934	Nokta sayısı
Optik merkez frekansı	f_m	193.54	THz
Optik dalgaboyu	λ_m	1550	nm
Taranan frekans aralığı	Δf	63	GHz
Uzaysal çözünürlük	$\frac{c}{2\Delta f}$	~ 2	mm
Frekans tarama periyodu	T	200	ms
Frekans tarama frekansı	$1/T$	5	Hz
Frekans tarama hızı	γ	315	GHz/s
Maksimum ölçüm mesafesi	L_{max}	1	km
Maksimum gel-git zamanı	τ_{max}	6.66	μs
Maksimum Ara-Frekans (<i>beat</i>)	$f_{AF,max}$	2.1	MHz
Dar-bant gürültü frekansı	f_g	20	kHz
Geniş-bant gürültü frekansı	f_g	112	kHz



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



Bir otobüs modeli etrafındaki akış yapısının CFD yöntemi ile incelenmesi ve sürüklenme kuvvetinin pasif akış kontrol yöntemi ile iyileştirilmesi

The investigation of flow characteristic around a bus model by CFD method and improvement of drag force by passive flow control method

Yazar(lar) (Author(s)): Cihan BAYINDIRLI¹, Mehmet ÇELİK², Mehmet DEMİRALP³

ORCID¹: 0000-0001-9199-9670

ORCID²: 0000-0002-3390-1716

ORCID³: 0000-0002-7444-5630

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Bayındırlı, C., Çelik M., Demiralp, M., “Bir otobüs modeli etrafındaki akış yapısının CFD yöntemi ile incelenmesi ve sürüklenme kuvvetinin pasif akış kontrol yöntemi ile iyileştirilmesi”, *Politeknik Dergisi*, 21(4): 785-795, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.403993

Bir Otobüs Modeli Etrafındaki Akış Yapısının CFD Yöntemi ile İncelenmesi ve Sürüklenme Kuvvetinin Pasif Akış Kontrol Yöntemi ile İyileştirilmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Cihan BAYINDIRLI^{1*}, Mehmet ÇELİK², Mehmet DEMİRALP³

¹Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Türkiye

²Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Türkiye

³Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Türkiye

(Geliş/Received : 27.11.2017 ; Kabul/Accepted :20.02.2018)

ÖZ

Bu çalışmada, 1/64 ölçekli bir otobüs modelinin aerodinamik direnç katsayısı hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yöntemi ile tespit edilmiştir. Akış analizleri x yönünde 15 m/s, 20 m/s, 25 m/s ve 30 m/s serbest akış hızlarında 173000-346000 Reynolds sayısı aralığında gerçekleştirilmiştir. Akış analizleri Fluent® programında yapılmıştır. Otobüs modelinin aerodinamik direnç katsayısı ortalama 0.657 olarak tespit edilmiş, toplam direncin basınç ve sürtünme kaynaklı dağılımı belirlenmiştir. Model otobüs üzerinde basınç kaynaklı direnç oluşturan bölgeler akış görüntülemeleri ile tespit edilmiştir. Akış yapısını iyileştirmek ve basınç kaynaklı direnci azaltmak için üçgen kesitli akış kontrol elemanı geliştirilmiştir. Akış kontrol elemanı 15 mm çapında eşkenar üçgen şeklinde olup model otobüsün ön tampon üzerine konumlandırılmıştır. Model 1 otobüsün aerodinamik direnç katsayısı 0.623 olarak tespit edilmiştir. Bu pasif akış kontrol yöntemi ile aerodinamik direnç katsayısında ortalama % 5.27 iyileşme sağlanmıştır. Elde edilen bu iyileşmenin yüksek taşıt hızlarında yakıt tüketimine etkisi yaklaşık %3'tür. Bu orandaki bir aerodinamik iyileşmenin bir otobüste yıllık yakıt tüketimine etkisi değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sürüklenme kuvvet katsayısı, pasif akış kontrolü, akış kontrol elemanı, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD).

The Investigation of Flow Characteristic Around A Bus Model by CFD Method and Improvement of Drag Force by Passive Flow Control Method

ABSTRACT

In this study, aerodynamic drag coefficient of 1/64 scaled bus model was determined by the Computational Fluid Dynamics (CFD) method. Flow analyzes were performed at 15 m/s, 20 m/s, 25 m/s ve 30 m/s in x direction, between the range of 173000-346000 Reynolds numbers. Flow analysis was made in Fluent® program. The aerodynamic drag coefficient (C_D) of the bus model was determined as 0.657 on average, the distribution of total drag was determined as pressure-friction based. After the flow visualization, the areas are detected where forms aerodynamic drag on the model bus. A triangular section flow control element has been developed to improve the flow structure and decrease the pressure based drag. The flow control element is an equilateral triangle with a diameter of 15 mm and positioned on the front bumper of the model bus. The aerodynamic drag coefficient of model 1 bus was determined as 0.623. With this passive flow control method, the aerodynamic drag coefficient improved by %5.27. The effect of this improvement on fuel consumption is about 3 % at the high vehicle speed. The effect of this aerodynamic improvement on the annual fuel consumption of a bus has been evaluated.

Keywords: The drag force coefficient, passive flow control, flow control part, Computational Fluid Dynamics (CFD).

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Cisimlerin hava içerisindeki hareketini ve hava ile etkileşimlerini inceleyen bilim dalı aerodinamik olarak adlandırılır. Motorlu kara taşıtlarının aerodinamik yapıda olmaları performans, yakıt tüketimi, ivmelenme, yol tutuşu, ses, çevre kirliliği ve konforunu önemli derecede

etkilemektedir. Bu yüzden taşıt üreticileri aerodinamik çalışmalara büyük önem vermekte ve aerodinamik testlere büyük yatırımlar yapmaktadırlar. Bu konunun toplumun her kesimini ilgilendiren bir husus—haline gelmesine neden olan etken ise tüm tüketim malzemelerinin maliyet analizlerinde taşıma giderlerinin önemli bir yüzde oluşturmasıdır. Türkiye petrol ürünleri bakımından fakir bir ülke olup bu alanda ihtiyaç duyduğu enerjinin tamamına yakını ithal etmektedir. Dünyada

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : cbayindirli@ohu.edu.tr

benzin ve dizel yakıtının en pahalı olduğu ülkelerin başında Türkiye gelmektedir. Yüksek hızlarda hareket eden bir aracın C_D katsayısı %2 düşürüldüğünde yakıt tüketimi yaklaşık %1 azalmasıdır [1]. Öyle ki 100 km/h hızda hareket eden bir otomobil gücünün %50-70'ini aerodinamik direnci yenmeye harcamaktadır. Türkiye'de 2011 verilerine göre şehirlerarası yolcu taşımacılığı alanında faaliyet gösteren 31935 firma olduğu bilinmektedir. Uluslararası planda taşıma yapan firmaların sayısı ise 237'dir. Yurtiçinde şehirlerarası yolcu taşımada kullanılan otobüs sayısı 52707 olup uluslararası yolcu taşımacılığında kullanılan otobüs sayısı 3743'dür [2].

Bu çalışmanın amacı bir otobüs modeline etki eden sürüklenme kuvvetini taşıt üzerinde herhangi bir enerji harcamadan azaltmaktır. Pasif akış kontrol yöntemi olarak tanımlanan bu yöntemin otobüs üzerinde uygulanabilir nitelikte olması ve elde edilen aerodinamik iyileşmenin oranı bu çalışmanın özgün kısmını oluşturmaktadır.

Ortalama 100 km/h hızda hareket eden bir taşıt gücünün %50-70'ini aerodinamik direnç kuvvetlerini yenmek için harcar [3]. Taşıtlarda motorca üretilen güç, hava direnci ve sistem içindeki kayıpları dengeler. Düşük hızlarda hava direnci diğer kayıplar yanında oldukça düşük mertebelindedir. Ancak hız 30-40 km/h değerine ulaşıncaya hava direnci önem kazanır. Bunun sebebi hava direncinin hızın karesiyle doğru orantılı olarak artmasıdır. Katı modeli çizilen bir F1 aracının C_D ve C_L katsayısını ANSYS CFX programında k- ϵ türbülans modeli ile tespit etmiştir. F1 aracının C_D katsayısını 0.516 ve C_L katsayısını 0.425 olarak hesaplamıştır. Bu değerler gerçek değerden çok uzak bir sonuç olduğunu bunun nedenin geometrik benzerliğin tam sağlanamaması, ağ sayısının yetersiz olduğu ve çözümleme yapan bilgisayar kapasitesinin yetersiz olduğundan kaynaklandığını ifade etmiştir. [4]. Perzon, Janson, ve Höglin (1999) 3/10 ölçekli bir çekici ve römork modelinin deneysel sonuçlarını standart k- ϵ , RNG k- ϵ , Non-Linear Eddy Viscosity ve Reynolds Stress Transport Model (RSM) türbülans modellerinin kullanıldığı STARCD ve FLUENT/UNS paket programları yardımı ile elde edilen verilerle karşılaştırmışlar, RNG k- ϵ ve Non-Linear Eddy Viscosity modelleri ile durma noktalarındaki basıncın daha doğru tayin edilebildiğini belirlemişlerdir. Verilerin doğruluğunu arttırmak için çözüm ağını arttırmak gerektiğini tespit etmişlerdir [5]. Perzon ve Davidson (2000) STARCD paket programı ile standart k- ϵ , non-lineer ikinci derece k- ϵ ve non-lineer üçüncü derece k- ϵ türbülans modellerinde transient simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Direnç kuvveti bütün modeller için hesaplanmış ve deneysel verilerden oldukça önemli miktarda sapmalar olduğu tespit edilmiştir. Transient veya transient olmayan k- ϵ modellerinin direnci çok yüksek belirlediğini ifade etmişlerdir [6]. Lokhande, Sovani ve Khalighi (2003) pikap modelin aerodinamik yapısını Fluent® paket programı ile LES ve RNG k- ϵ türbülans modellerini kullanarak incelemişlerdir. Taşıta gelen akışın durma noktası olarak ön tamponun hemen

üst kısmı olduğunu tespit edilmiştir[7]. Krajnovic ve Davidson (2005) eğimli arka geometriye sahip basitleştirilmiş taşıt üzerinden akışa hareketli bir zeminin etkisini ele almıştır. Yapılan incelemede hareketli zeminin C_D katsayısını %8 C_L katsayısını %16 azalttığı tespit edilmiştir. Türbülans modeli olarak LES (Large Eddy Simulation) kullanılmıştır [8]. Apisakkul ve Kittichai Karn (2005) dört değişik yükseklikte konumlandıkları arka spoilerin bir yarış arabasının C_D ve C_L katsayılarına etkilerini Fluent® paket programında k- ϵ türbülans modeli ile hesaplamışlardır. Spoilerin konumlandırıldığı yükseklik arttıkça C_D katsayısında iyileşme tespit etmişlerdir [9]. Fares (2006)

Power FLOW 4.0 programında Lattice Boltzman metoduna göre Ahmed modelini referans alarak yaptığı çalışmada 40m/s hızda taşıtın arkasındaki yaklaşık 30° kritik açıyı temsilen 25° ve 35°'lik eğim açıları için çözümleme yapmış, aracın C_D ve C_L katsayılarını karşılaştırmıştır. Durgun olmayan (unsteady) akışta farklı girdap ve ayrılma davranışları analiz sonuçlarının deneysel verilerle tutarlı olduğunu ifade etmiştir [10]. Desai ve diğerleri (2008) tarafından yapılan sayısal çalışmada aracın çizim datasını Gambit programında oluşturup Fluent® programında çözümleme yapmışlardır. Aracın C_D katsayısını deneysel yöntemle 0.4, sayısal yöntemle 0.55 olarak tespit etmişlerdir. Reynolds sayısına göre sayısal ve deneysel çalışma sonuçların çok farklı olduğunu bu farkın iterasyon sayısı ve çizim datasının geometrik benzerliğinin yetersizliğinden kaynaklanabileceğini ifade etmişlerdir [11]. Cheli, Ripamonti, Sabbioni, ve Tomasini (2011) tarafından yapılan çalışmada ağır vasıtalara değişik zeminlerde ve değişik rüzgar açısında etki eden kuvvet değerlerini araştırmışlardır. Araç uzunluğu arttıkça yanal momentinde arttığını tespit etmişlerdir [12]. Hu Xu-xia ve Wong (2011) yaptıkları çalışmada yeni geliştirdikleri arka spoilerin sedan otomobilin C_D ve C_L katsayılarına etkilerini Fluent® paket programında k- ϵ türbülans modeli ile hesaplamışlardır. Geliştirdikleri spoilerin C_D katsayısını %1.7 C_L katsayısını %4 iyileştirdiğini tespit etmişlerdir [13]. Marinos, M. ve SpyrosG, V (2015) çalışmalarında pasif vorteks üretici kullanarak akış kopması durumunu deneysel ve numerik olarak incelemişlerdir. Airfoil profilinde bir geometri tasarlayarak 87×10^4 Reynolds sayısında akış kopması 5° geciktirilmiş, 15° hücum açısında ise lift kuvveti artmıştır. Shim ve diğerleri (2017) Navier- Stokes denklemlerinde faydalanarak kızak şeklinde bir ön tampon ve arka tampon tasarımı yaparak sürüklenme kuvvetini azaltmayı başarmışlardır. Taşıyıcı modelleme olarak tasarladıkları bu tampon modellerinin drag katsayısına etkisinin tespitinde k- ω türbülans modeli kullanmışlardır. Refereans modele göre yaptıkları tampon tasarımı ile %3.8'e kadar sürüklenme kuvvetinde iyileşme sağlamışlardır [14]. Aktaf vd. (2014) CFD yöntemi kullanarak bir model araca eliptik, dikdörtgen ve üçgen kanatçık ekleyerek aerodinamik bakımdan iyileşme elde etmiştir. Eliptik tasarımda %11.1, dikdörtgen kanatçıkta %6.37 ve üçgen kanatçık

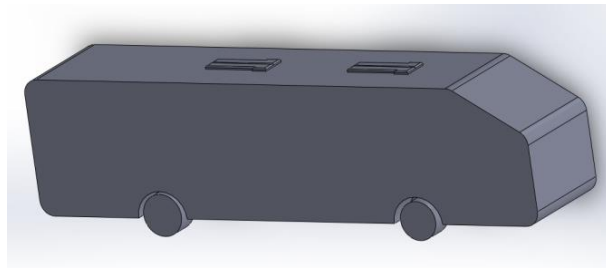
tasarımında %6.87 aerodinamik direnç katsayısında iyileşme sağlamışlardır [15]. Cui ve diğerleri (2015) bir Ahmed body modeli üzerinde sentetik hava püskürtmesi yapmanın aerodinamik direnç katsayısına etkisini CFD yöntemi ile Large Eddy Smilation türbülans modeli kullanarak araştırmışlardır. Yapılan çalışma sonuçlarını deneysel yöntemlerle de doğrulamışlardır. Ahmed body modeli arkasına düzenli püskürtme yaparak sürüklenme katsayısında %3, sentetik jet püskürtmesi yaparak ise %9 iyileşme sağlamışlardır [16]. Mohamed-Kassim ve Filippone (2010)'e göre çekici römork araçlarında pasif akış parçaları ile yakıt tüketiminde % 1'den % 17 'e kadar iyileşme sağlanabilmektedir. Spoiler yapısı iyileştirilerek %9-17, römork etekleri ile %4-6, hava boşlukları kapatılarak %0-4 aerodinamik iyileşme elde edilebilmektedir [17]. Barden ve Gerova (2016) bir çekici modelinde ortalama 7.1° sapma açısı altında aerodinamik direnç katsayısı hesabını deneysel ve numerik olarak hesaplamıştır. Numerik hesaplama yöntemi olarak MATLAB Simulink programını kullanmış. Numerik analiz sonucunda aerodinamik direnç katsayısını ortalama 0.77, deneysel yöntemle 0.805 olarak hesaplamıştır [18]. Gurlek vd. (2012) bir otobüs modeli etrafındaki akış yapısını deneysel olarak incelemiştir. Ortalama ve ani hızlanma vektör haritasını, girdap eğrilerini, akış çizgisi topolojisini ve diğer türbülans özelliklerini PIV (particle image velocimetry) yöntemi ile incelemiştir. Girdap oluşumunun asimetrik olduğunu, otobüsün üst tarafındaki negatif girdap hareketinin yatay, pozitif girdap hareketinin modelin kenarına doğru hareket ettiğini ifade etmişlerdir [19]. Lui ve diğerleri (2016) çalışmalarında çekici römork, pick-up, sedan otomobil araçlarının etrafındaki akış yapılarını laminar akış, türbülanslı akış, sınır tabaka akış yapılarında ve değişik rüzgâr açısı altındaki yapılarını incelemiştir. Ağırlık merkezi yükseldikçe aerodinamik momentlerin arttığını belirtmişlerdir. Yapılan diğer çalışmalarda ağırlık merkezinin tespiti yapılmadığından çalışma sonuçlarının birbirinden farklı olabildiğini ifade etmişlerdir [20]. Ji-qiang ve diğerleri (2017) bir yüksek hızlı trenin aerodinamik yapısını değişik türbülans şiddetinde deneysel olarak incelemiştir. Model tren üzerindeki basınç katsayısı değerlerini tespit etmişlerdir. 0.3-8.6 aralığında değişik türbülans şiddetleri altındaki aerodinamik direnç katsayılarını tespit etmişlerdir. Türbülans şiddeti arttıkça C_D katsayısı ve basınç katsayısı değerleri azaltmıştır. Türbülans şiddeti değişiminin model üzerindeki basınç dağılımını değiştirmediğini ifade etmişlerdir [21]. Hassan ve diğerleri (2014) bir sedan yarış aracın arka tamponunu yapısını değiştirerek aerodinamik bakımdan iyileşme elde etmişlerdir. CFD metodu ile $k-\epsilon$ türbülans modelinden faydalanarak yaptıklarını numerik analiz sonucunda model aracın C_D katsayısını 0.323 olarak tespit etmişlerdir. Geliştirdikleri 5 değişik tampon düfüzörleri ile C_D katsayısını %22.13'e kadar azaltmışlardır. Minimum C_D katsayısını 0.25 olarak tespit etmişlerdir. Bunun nedeninin araç arkasında negatif basınç bölgesinin azaltmaktan

kaynakladığını ifade etmişlerdir [22]. Chillbule ve diğerleri (2014) bir çekici römork modelinin aerodinamik yapısını CDF yöntemi ile incelemiştir. Spoiler altı adet girdap tutucu ve römork arka uzantısından oluşan pasif akış kontrol parçaları ekleyerek çekici römork modelinin C_D katsayısını %21 iyileştirmişlerdir. Bu sonucun 100 km mesafede 4 litre yakıt tasarrufu oluşturacağını belirtmişlerdir [23]. Muthuvel ve diğerleri (2013) çalışmalarında dört değişik otobüs modelinin aerodinamik yapılarını numerik ve deneysel olarak incelemiştir. Otobüs modelinin ön yüzey alanını ve ön tampon yapısını konikleştirerek akış yapısını aerodinamik bakımdan iyileştirmiş ve C_D katsayısında %20.11-35 arasında iyileşme olabileceğini ifade etmişlerdir [24]. Patil ve diğerleri (2012) bir otobüs modeli etrafındaki akış yapısını CFD metodu ile incelemiştir. Otobüs modelinin sürüklenme kuvvetini azaltmak için 3 model geliştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada base model otobüsün C_D katsayısını 0.53 olarak tespit etmişlerdir. Otobüsün ön ve arka yüzeyini modifiye ederek C_D katsayısını 0.49'a yan panel ekleyerek 0,39 'a arka spoiler ekleyerek 0.40'a düşürmeyi başarmışlardır. Böylece sırası ile %6.57, %25.82 ve %24,42 aerodinamik iyileşme sağlamışlardır [25]. Sarı (2007) Renault Kangoo marka hafif ticari araç modellenmiş, numerik yaklaşık çözüm yöntemi olan sonlu hacimler yöntemi ile Fluent® programında analiz edilerek, sanal koşullarda aracın ön formuna etkileyen hava direnci ve C_D direnç katsayıları bulunmuş, bu verilerin yakıt sarfiyatına olan etkileri araştırılmıştır [25]. Nisugi ve arkadaşları (2004) tarafından yapılan, "Fundamental Study of Aerodynamic Drag Reduction for Vehicle with Feedback Flow Control" başlıklı bir çalışmada (Şekil 3c.) geri beslemeli bir akış kontrolü ile bir kara taşıtı için aerodinamik sürüklenme kuvvetinin azaltılması incelenmiştir. Sonuçta bu çalışma ile %21 lik bir güç tasarrufu sağlandığı ifade edilmiştir [26]. Minoru, Katsuji ve Tatsuo (2003) yaptıkları çalışmada trenlerin ve araçların çapraz rüzgârlar altındaki aerodinamik karakterleri sadece araçların şekline değil aynı zamanda araç alt yüzeylerine bağlı olduğunu ifade etmişlerdir [27]. Rohatgi (2012) bir SUV aracının arka kaporta kısmının geometrik yapısını değiştirerek aerodinamik yapısını iyileştirme denemiştir. Aracın arka kaporta kısmının %26 iyileşme sağlanabileceğini ifade etmiştir [28]. Chowdhury, ve diğerleri (2013) tarafından yapılan çalışmada ağır vasıtalara aerodinamik direnç katsayısının azaltacak eklemeler yapmışlardır. Ağır vasıtanın spoiler yapısını iyileştirip çekici ve römork arasında kapatmış ve tekerleklerin neden olduğu sürüklenme direncini azaltacak eklemeler yaparak ortalama %26.1 iyileştirme elde etmişlerdir. Sadece ön spoiler ile %17.6 iyileştirme olabileceğini ifade etmişlerdir [29]. Akansu ve diğerleri. (2011) pasif akış kontrol elemanı olarak kullanılan dairesel kesitli bir çubuk ile kare kesitli bir küt cisim etrafındaki akış durumunda hücum açısının girdap kopma olayına etkisini deneysel olarak incelenmiştir. Akış ayrılması, yeniden tutunması ve girdap oluşum bölgesinin özellikleri ortaya konulmuştur. $L/D=2$ ve 3

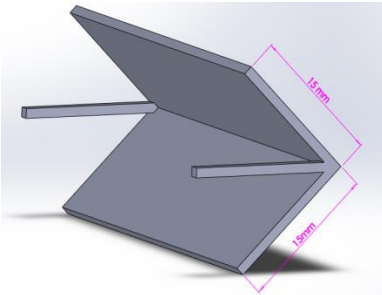
konumlarındaki $\alpha=0^\circ$ hücum açısında, sürüklenme kuvvetinde dikkate değer azalmalar elde etmişlerdir [30]. Solmaz (2010) bir otobüs modelini ANSYS 12.1 programı ile analiz etmiş ve analiz sonuçlarını deney sonuçları ile karşılaştırmıştır. Otobüs modelinin aerodinamik direnç katsayısı deney sonuçlarına göre 0.65 ANSYS verilerine göre ise 0.66 olarak belirlenmiştir [31]. J. McNally ve diğerleri (2015) Çalışmalarında bir Honda Simplified Body (HSB) geometrisinde aktif akış kontrol yöntemi ile sürüklenme kuvvetinde iyileşme sağlamışlardır. Yapılan çalışmada HSB geometrisi üzerine 13 adet değişik çaplarda jet ile hava püskürtmesi yaparak akış kopmasını geciktirerek sürüklenme kuvvetine bağlı güç kaybını %3 azaltmışlardır [32].

2. MATERYAL METOD (MATERIALS AND METHOD)

Bu çalışmada aerodinamik bakımdan incelenen otobüs (base model) 1/64 ölçekli lisanslı modeldir. Otobüs modelinin çizim datası bilgisayar destekli çizim yöntemi ile oluşturulmuştur. Akış kontrol elemanı da aynı yöntemle geliştirilmiş ve otobüse montajı gerçekleştirilmiştir. Şekil 1'de model otobüsü Şekil 2-3'te akış kontrol elemanı çizim dataları verilmiştir.



Şekil 1. 1/64 ölçekli model otobüsün SolidWorks çizimi (SolidWorks drawing 1/64 scale model bus)



Şekil 2. Üçgen kesitli akış kontrol elemanının SolidWorks çizimi (SolidWorks drawing of a triangular section flow control part)

2.1. Benzerlik (Similarity)

Taşıt aerodinamiği ile ilgili çalışmalarında prototip ve model arasında üç farklı benzerlik şartı aranır. Bunlar geometrik, kinematik ve dinamik benzerlik şartlarıdır. Geometrik benzerlik şartını sağlamak için lisanslı model otobüs kullanılmış olup yüzey pürüzlülüğü, çok küçük parçalar ve hava akış kanallarından dolayı meydana

gelebilecek hatalar ihmal edilmiştir. Kinematik benzerlikte blokaj oranı belirleyicidir. Bu çalışmada kullanılan model aracın ön yüzey alanı 0.0019 m^2 , test bölgesi ön yüzey alanı 0.04 m^2 , blokaj oranı ise %4.75'dir. Çengel Y.A., (2008) blokaj oranının %7.5

den daha düşük olmasını önermektedir [33]. Çalışmada dinamik benzerliğin sağlanmasında ise Reynold sayısı bağımsızlığı kullanılmıştır.

2.2. Genel Denklemler (General Equations)

Fluent programı sonlu hacimler metodunu kullanarak süreklilik, momentum, enerji, türbülans için genel integral denklemlerini çözmektedir. Sonlu hacimlerin hesaplamalı akışanlar dinamiği (HAD) ile çözümlenmesinde süreklilik ve momentum denklemleri kullanılır. Uygulamada bu denklemleri analitik olarak çözmek zordur. Bu yüzden bu denklemler paket programlar kullanılarak numerik olarak çözümlenir.

2.1.1. Süreklilik denklemi (Continuity equation)

Süreklilik denklemi, bir akış içerisinde yer alan kontrol hacmindeki kütle dengesi olarak ifade edilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

2.1.2. Momentum denklemi (Momentum equation)

Newton'un ikinci kanununa göre bir akışkan parçasının momentumunun değişim hızı bu akışkan parçasına etki eden kuvvetlerin toplamına eşittir. Bir akışkan parçasının birim hacminin x, y ve z yönlerindeki momentum artış hızı sırasıyla $\rho \frac{Du}{Dt}$, $\rho \frac{Dv}{Dt}$ ve $\rho \frac{Dw}{Dt}$ terimleri ile ifade edilir [34].

Momentum denkleminin x-bileşeni;

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{M_x} \quad (2)$$

Momentum denkleminin y-bileşeni;

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{M_y} \quad (3)$$

Momentum denkleminin z-bileşeni;

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{M_z} \quad (4)$$

2.1.3. Navier – Stokes denklemleri (Navier – Stokes equation)

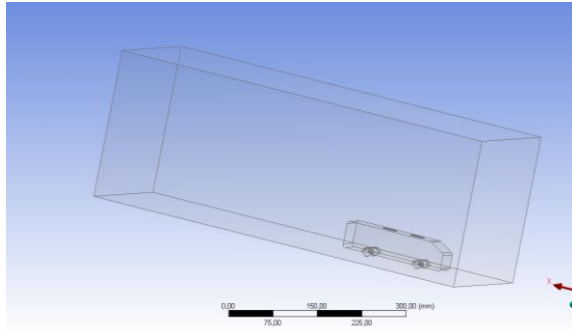
Navier – Stokes ve süreklilik denklemleri diferansiyel hareket denklemleri olarak da ifade edilir. Bu denklemleri çözümlenmesinde bazı kabuller alınarak basınç ve hızın üç bileşeni (x,y,z) hesaplanır. Navier – Stokes denklemlerinin sonlu hacimler metodunun geliştirilmesi için en kullanışlı hali;

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{ gradu}) + S_{M_x} \quad (5)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } v) + S_{My} \quad (6)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } w) + S_{Mz} \quad (7)$$

Akış analizleri Fluent programında gerçekleştirilmiştir. Model otobüs 200 mm*200 mm*1000 mm deney alanı içerisinde zemine konumlandırılmış, kalıp boşluğu oluşturulmuştur. Setup bölümünde bu denklemler çözüm alanındaki her noktada dengeye geldiği zaman Fluent programı ile yapılan çözümlerde yakınsama gerçekleşmektedir. Her akışkan değişkeni için artıklar çözümdeki hatanın şiddetini belirtmektedir. Bu çalışmada yakınsama kriterleri süreklilik, x-hızı, y-hızı ve z-hızı için 1.0×10^{-5} olarak alınmıştır. Türbülans şiddeti ise %1 olarak alınmıştır. Aracın ön yüzey alanı reports-projected area bölümünde 0.0019 m^2 olarak hesaplanmıştır. Çözümler SIMPLE Least Squared Cell Based, k-ε RNG türbülans modeli standart duvar fonksiyonları kullanılarak standart initialization olarak gerçekleştirilmiştir. Çözümler Fluent® programında, Intel® Xeon® CPU E3-1270 V5 3.60 GHz işlemci ve 32 GB ram özelliklerine sahip iş istasyonu (Work Station) bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Şekil 3’de ara yüzü verilen bu bölümde model aracın kalıp boşluğu oluşturulmuş, çizim datası programa tanımlanmış ve meshing bölümüne aktarılmıştır.

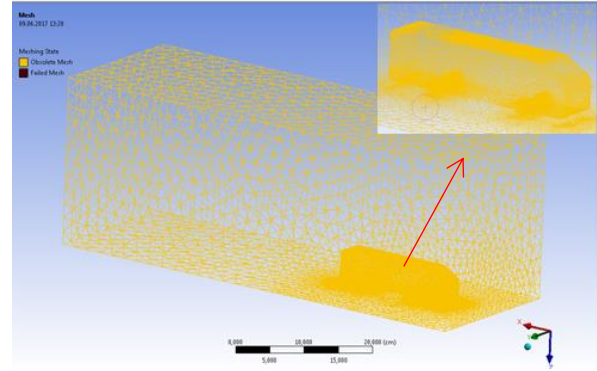


Şekil 3. Model otobüsün “design modeler” ara yüzündeki görünümü ve kalıp boşluğu (The appearance mold cavity and design modeler interface of the model bus)

Şekil 4’de ara yüzü verilen bölümde model otobüsün aerodinamik yapısını önemli derecede etkileyen bölgelerinde daha sık ağ yapısı oluşturulmuş, sınır tanımlamaları yapılmış ve ağ dosyası setup bölüme aktarılmıştır. Model otobüs için 1030562 üçgensel hacim (tetrahedrons) hücre yapısı oluşturulmuştur. Çözüm alanındaki sınırlar aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

- ✓ Giriş: Akışkanın girdiği yüzey olup sabit hız sınır şartı olarak tanımlanmıştır.
- ✓ Çıkış: Akışkanın çıktığı yüzey olup sabit basınç sınır şartı olarak tanımlanmıştır.

- ✓ Duvar ve yol: Duvar deney alanını oluşturan dikdörtgen hacmin kenar yüzeyleri olup duvar sınır şartı kullanılmıştır. Yol aracın konumlandırıldığı taban yüzeyi olup duvar sınır şartı olarak tanımlanmıştır.
- ✓ Otobüsün çizim datasına ait kalıp boşluğu: Analizi yapılan model araçtır. Duvar sınır şartı olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4. Model otobüsün “meshing” ara yüzündeki görünümü (The view "meshing" interface of model bus)

Yapılan akış analizi sonuçlarında model otobüse etki eden sürüklenme kuvveti 1000 iterasyon sonucu elde edilmiştir ve C_D katsayısı tespit edilmiştir. Aerodinamik direnç katsayısı C_D Eşitlik 8’de verilmiş olup sürüklenme kuvveti F_D , yoğunluk ρ , serbest akış hızı V ve ön bakış alanı $A_{\text{ön}}$ parametrelerinin fonksiyonudur.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A_{\text{ön}}} \quad (8)$$

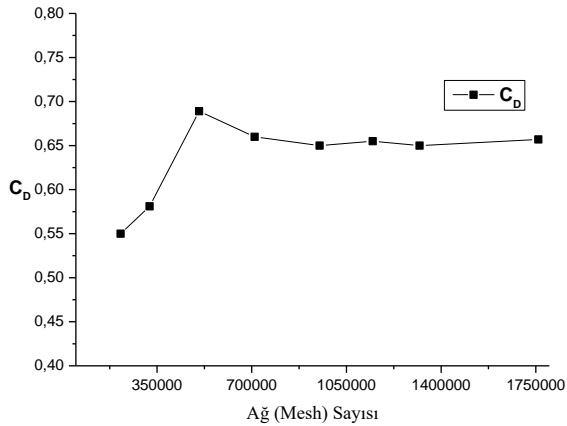
2.3. CFD Çözümlemede Ağdan Bağımsızlık (Mesh Independent In CFD Analysis)

Sonlu hacimler ile ilgili yapılan sayısal çalışmalarda düzgün ve kaliteli bir ağ oluşturmak sonuçların doğruluğu açısından çok önemlidir. Bu yüzden sayısal çalışmalarda ağ kalitesi aranmaktadır. Ancak analizi yapılan geometrilerin karmaşıklığı arttıkça bu ağ kalitesini elde etmek zorlaşmaktadır. Otobüs ve pasif akış kontrol çubuğunda küçük ve kavis açısı bulunan parçalar bulunmaktadır. Bu durum da istenilen düzeyde ağ kalitesi elde edilememiştir. Daha iyi ağ kalitesini elde etmek için çizim datasını daha da basitleştirmek, kavis açısı olan parçaların yerine daha düz parçalar çizmek ya da küçük parçaları kapatmak ve daha çok sayıda ağ yapısı oluşturmak gerekecektir. Bu durumda da çizim datası geometrik benzerlikten uzaklaşacak istenilen iyileşme sağlanamayacaktır. Bu çalışmada ağ kalitesi (element quality) ortalama 0.78 olmuştur. Bu değer 0.5 den yüksek olması önerilmemektedir. Sayısal çalışmaların doğrulanmasında başvurulan yöntemlerden birisi de ağdan bağımsızlık testleridir. Sayısal çözümlemede ağ

sayısı artmasına rağmen sonuç belli bir değerden sonra değişmiyorsa, çözümlemede ağdan bağımsızlık elde edilmektedir. Bu çalışmada Çizelge 1’de görüldüğü üzere model otobüs için 20 m/s serbest akış hızında 8 değişik üçgenel hacim (tetrahedrons) ağ yapısı için ağdan bağımsızlık testleri yapılmıştır. Aracın ağ yapılandırmasında üçgenel ağların minimum ve maksimum boyutları değiştirilerek değişik çarpıklık oranında ve istenilen sayıda ağ yapısı oluşturulmuş ve aynı türbülans modellerinde çözümleme yapılmıştır.

Çizelge 1. 20 m/s hızda yapılan ağdan bağımsızlık testi sonuçları (The mesh independence test results at 20 m / s)

Reynolds Sayısı sayısı	Ağ sayısı	Kuvvet (N)	C_D
230 760	215 403	0.230	0.55
230 760	322 400	0.221	0.581
230 760	505 366	0.262	0.689
230 760	710 667	0.251	0.660
230 760	950 765	0.247	0.650
230 760	1 147 306	0.249	0.655
230 760	1 320 251	0.247	0.650
230 760	1 759 230	0.250	0.657



Şekil 5. Ağ bağımsızlığı grafiği (The mesh independence graph)

Ağdan bağımsızlık testleri sırası 8 değişik ağ sayılarında yapılmıştır. Şekil 5’de görüleceği üzere 710 667 ağ sayısında yapılan çözümlemelerden sonra C_D katsayısı yaklaşık değerlerde elde edilmiştir. Bu çalışmada ağ sayısı 1030562 olarak belirlenmiştir. Bu ağ sayıları ağdan bağımsızlığın elde edildiği bölgede olduğundan akış analizleri ağdan bağımsız olarak gerçekleştirildiği kabul edilmiştir. Numerik sonuçlarda ağ sayısı ve kalitesinden kaynaklanan hatalar ihmal edilmiştir.

3. AERODİNAMİK İYİLEŞTİRME SONUÇLARI (RESULTS OF AERODYNAMIC IMPROVEMENT)

4 değişik Reynolds sayısında yapılan ve 1000 iterasyon sonucunda elde edilen sürüklenme kuvvetine göre model otobüsün C_D katsayısı ortalama 0.658 olarak tespit

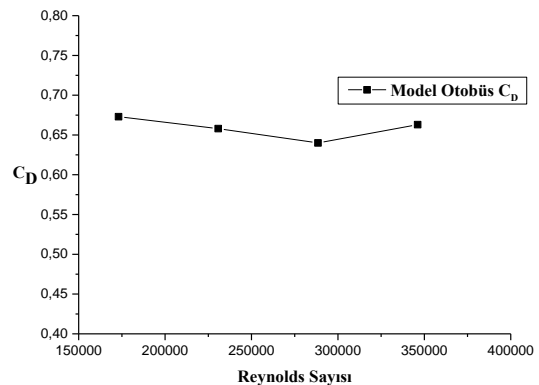
edilmiştir. Toplam sürüklenme kuvvetinin %86.42’si basınç kaynaklı, %13.38’i sürtünme kaynaklı olduğu belirlenmiştir. Her hız değerinde tespit edilen basınç ve sürtünme kaynaklı dağılım Çizelge 2’de verilmiştir. Yapılan analiz sonucunda elde edilen C_D değerleri Çizelge 3’de Reynolds sayısına göre C_D grafiği ise Şekil 6’de verilmiştir.

Çizelge 2. Model otobüsün toplam sürüklenme kuvvetinin dağılımı (Distribution of the total drag force of the model bus)

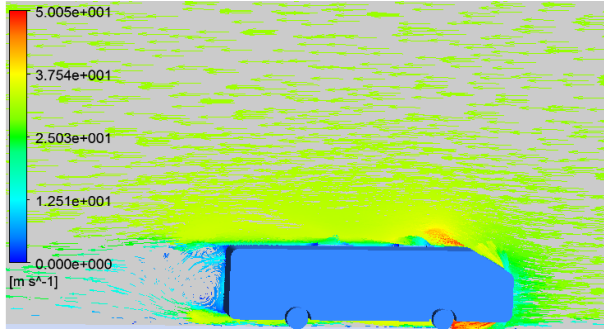
		Kuvvet (N)	Toplam	Yüzde	
Model Otobüs 15 m/s	Basınç	0.122	0.144	%84.78	
	Sürtünme	0.022		%15.08	
Model Otobüs 20 m/s	Basınç	0.214	0.249	%85.94	
	Sürtünme	0.034		%13.65	
Model Otobüs 25 m/s	Basınç	0.331	0.380	%87.11	
	Sürtünme	0.048		%12.63	
Model Otobüs 30 m/s	Basınç	0.498	0.567	%87.83	
	Sürtünme	0.069		%12.17	
				Ortalama	
				Basınç	%86.42
				Sürtünme	%13.38

Çizelge 3. Model otobüsün C_D katsayısı (C_D coefficient of model bus)

Reynolds Sayısı	Hız(m/s)	C_D
173076	15	0.673
230769	20	0.658
288461	25	0.640
346153	30	0.663
Ortalama		0.658



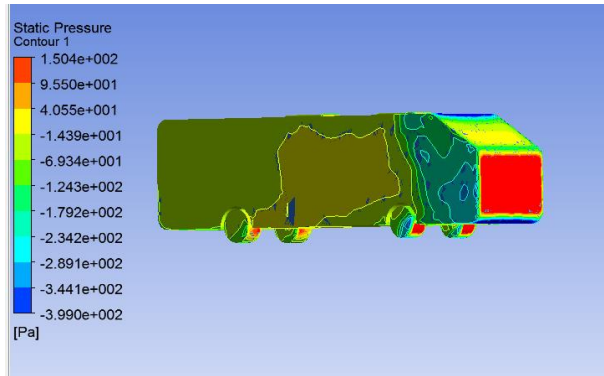
Şekil 6. Model otobüsün sürüklenme katsayısı (C_D) grafiği (The drag coefficient (C_D) graph of model bus)



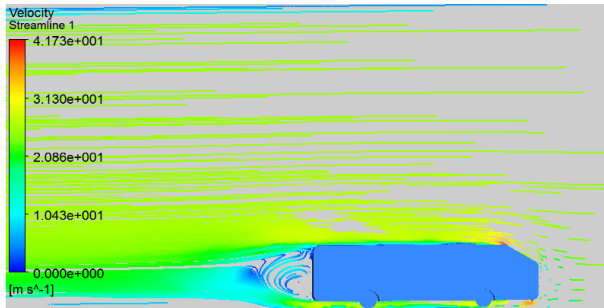
Şekil 7. 25 m/s hızda akış hızının vektörel olarak gösterilişi (Vector image of flow speed at 25 m/s)



Şekil 8a. 25 m/s hızda model otobüs üzerindeki basınç dağılımı



Şekil 8b. 25 m/s hızda model otobüs üzerindeki basınç dağılımı (Pressure distribution on model bus at 25 m/s)

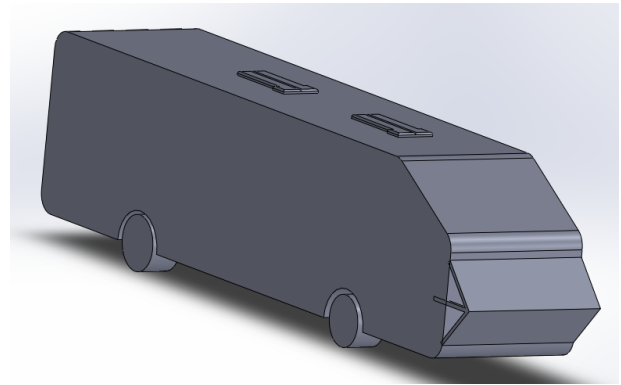


Şekil 9. 25 m/s hızda model otobüs etrafındaki akışın stramlane olarak görüntüsü (The stramlane image of flow around model bus at 25 m/s)

Yapılan analiz sonuçları ve Şekil 7, Şekil 8a, 8b ve Şekil 9'da akış görüntülemelerinde tespit edildiği üzere toplam sürüklenme kuvvetinin %84.60'ı basınç kaynaklıdır. Bu basınç kaynaklı direncin çok büyük kısmı ise otobüsün ön tampon ve ön cam bölgesinde oluştuğu tespit edilmiştir. Bu bölgede durma basıncı oluşmaktadır. Bu çalışmada bu bölgedeki basınç kaynaklı direnci azaltmak ve akışı ön cam üzerine aktarmak amacıyla üçgen kesitli akış kontrol elemanı geliştirilmiş ve aynı deney şartlarında analizi gerçekleştirilmiştir.

3.1. Pasif Akış Kontrolü (Passive Flow Control)

Akış kontrolünde enerji harcanmasına dayalı olarak aktif akış kontrolü ve pasif akış kontrol yöntemi olmak üzere iki çeşit akış kontrol yöntemi vardır. Pasif akış kontrolünde sistem içerisine herhangi bir enerji harcamadan genel olarak aerodinamik yapısı incelenen geometrinin şeklinde yapılan değişiklikler ile gerçekleştirilen akış kontrol yöntemidir [35]. Bu çalışmada aerodinamik iyileşme elde etmek amacıyla model otobüse üçgen kesitli akış kontrol elemanı geliştirilmiş ve numerik yöntemlerle elde edilen aerodinamik iyileşme oranı belirlenmiştir. Boyutları ve şekli Şekil 2'de verilen akış kontrol elemanı model otobüse basınç kaynaklı direncin en yüksek olduğu ön tampon üzeri ile ön cam arasındaki bölgeye konumlandırılmıştır. Montaj sonucu elde edilen model 1 otobüsü Şekil 10'da verilmiştir. Akış kontrol çubuğu ile model otobüsün ön bölümüne çarpan akışın ön cam üzerine aktarılması ve ön tampon ve ön cam bölgesinde oluşan ve basınç kaynaklı direncin azaltılması amaçlanmıştır.



Şekil 10. Model 1 otobüsü (Model 1 bus)

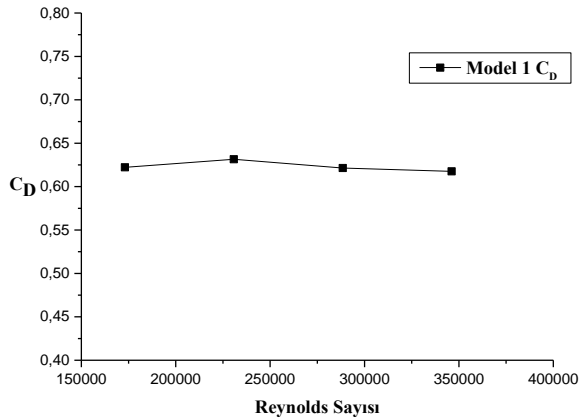
Model 1 ve model otobüsüne etki eden sürüklenme kuvveti aynı analiz şartlarında 1000 iterasyon sonucunda tespit edilmiştir. Toplam sürüklenme kuvvetinin basınç-sürtünme kaynaklı dağılımı Çizelge 4'de verilmiştir. Model 1 otobüsün C_D değerleri Çizelge 5'de Reynolds sayısına göre C_D grafiği ise Şekil 11'de verilmiştir.

Çizelge 4. Model 1 otobüsün toplam sürüklenme kuvvetinin dağılımı (Distribution of the total drag force of the model 1 bus)

		Kuvvet (N)	Toplam	Yüzde
Model 1 15ms	Basınç	0.110	0,133	%82.71
	Sürtünme	0.023		%17.29
Model 1 20ms	Basınç	0.202	0,240	%84.17
	Sürtünme	0.038		%15.83
Model 1 25ms	Basınç	0.313	0,369	%84.82
	Sürtünme	0.055		%14.91
Model 1 30ms	Basınç	0.452	0,528	%85.61
	Sürtünme	0.076		%14.39
				Ortalama
				Basınç %84.33
				Sürtünme %15.61

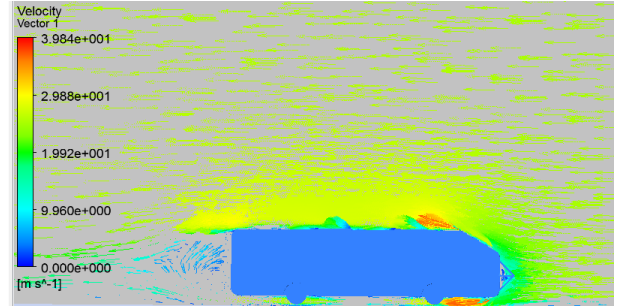
Çizelge 5. Model 1 otobüsün C_D katsayısı C_D coefficient of model 1 bus)

Reynolds Sayısı	Hız(m/s)	C_D
173076	15	0.622
230769	20	0.632
288461	25	0.621
346153	30	0.618
Ortalama		0.623

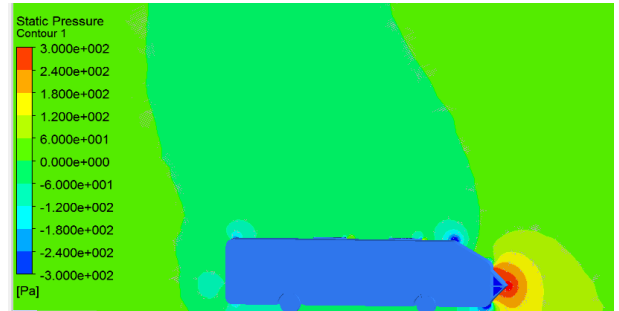


Şekil 11. Model 1 otobüsün sürüklenme katsayısı (C_D) grafiği (The drag coefficient (C_D) graph of model 1 bus)

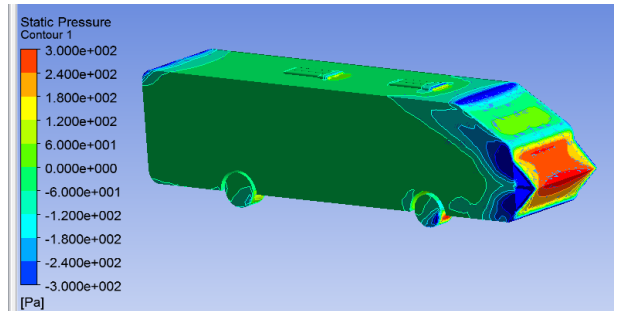
Şekil 15' de 4 değişik hızda yapılan analiz çalışmaları sonucunda model 1 aracının C_D katsayısı ortalama 0,623 model olarak hesaplanmıştır. Elde edilen aerodinamik iyileşme oranı %5,27 olmuştur. CFD analizi sonucunda elde edilen akış görüntülemeleri Şekil 12, 13a, 13b, 13c ve Şekil 14'te verilmiştir.



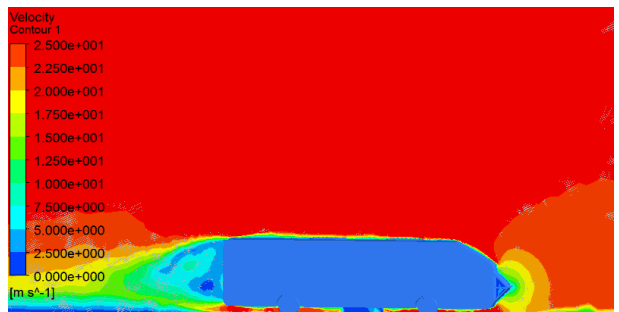
Şekil 12. 25 m/s hızda model 1 otobüsü etrafındaki akışın vektörel olarak gösterilişi (The vector image of flow at 25 m/s around the model 1 bus)



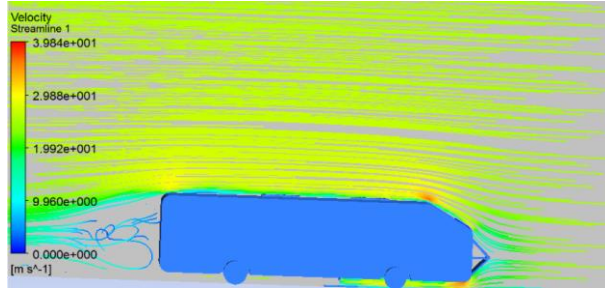
Şekil 13a. 25 m/s hızda model 1 üzerindeki basınç dağılımı (Pressure distribution on model 1 bus at 25 m / s)



Şekil 13b. 25 m/s hızda model 1 üzerindeki basınç dağılımı (Pressure distribution on model 1 bus at 25 m / s)



Şekil 13c. 25 m/s hızda model 1 üzerindeki basınç dağılımı (Pressure distribution on model 1 bus at 25 m / s)



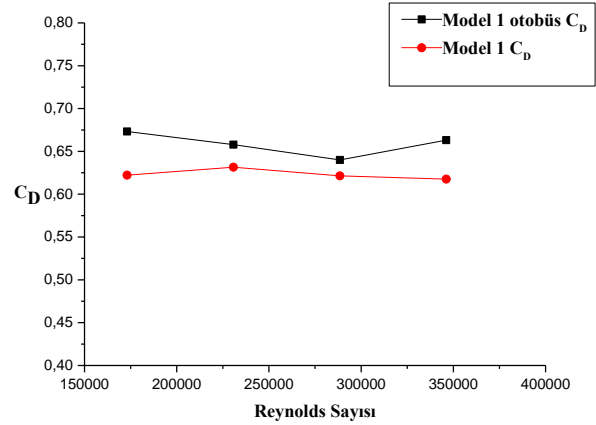
Şekil 14. 25 m/s hızda model etrafındaki akış hızının streamline olarak görüntüsü (The streamline image of flow around model bus at 25 m/s)

Bu çalışmada basınç kaynaklı aerodinamik direnci azaltmak amacı ile bir pasif akış kontrol yöntemi uygulanmış ve olumlu sonuçları elde edilmiştir. Hareket halindeki katı bir cisim, yüzeyine dik yönde basınç kuvvetleri ve yüzeyi boyunca yüzeye paralel kayma kuvvetleri etki etmekte olup bu kuvvetlerin bileşenine sürüklenme kuvveti denilmektedir. Toplam sürüklenme kuvveti basınç ve sürtünme kaynaklıdır. Taşıtlarda toplam sürüklenme kuvvetinin çok büyük bir kısmı basınca bağlıdır. Basınç kaynaklı sürüklenme kuvveti cismin akışa dik olan yüzey bileşenlerine etki eden basınç dağılımı nedeniyle oluşmaktadır.

Üçgen profilli akış kontrol elemanı ile otobüsün akışa dik ön yüzey alanına gelen akış ön cam üzerinden otobüsün üst bölümüne aktarılmıştır. Böylece istenilen akış yönlendirmesi yapılabilmeye ve basınç kaynaklı direncin çok yüksek olduğu ön yüzey alanında iyileşme elde edilmiştir. Akışın vektörel ve streamline görüntülenmesinde bu durum görülmektedir. Yüksek basınç katsayısının olduğu bölge azaltılmıştır. Elde edilen aerodinamik iyileşmenin kaynağı da budur. Bu yöntemle yüksek basıncın meydana geldiği otobüsün ön yüzey alanında basınç kaynaklı sürüklenme kuvveti azaltılmıştır.

4. SONUÇ VE TARTIŞMA (RESULT AND DISCUSSION)

Türkiye’de halen yolcu taşımacılığında en çok otobüsler kullanılmaktadır. Otobüsler yılda uzun mesafeler kat etmektedir. Gerek firmalar gerekse yolcular açısından araçların yakıt tüketimi maliyet analizinde önemli bir konuyu teşkil etmektedir. Bu çalışmada bir otobüs modelinin mevcut aerodinamik yapısı incelenmiştir. Taşıt üzerinde enerji harcamasına gerek duyulmadan pasif akış kontrol yöntemi ile aerodinamik iyileşme elde edilmiştir. Yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçların özetleri aşağıda sunulmuştur.



Şekil 15. Model otobüs ve, model 1 otobüsün aerodinamik direnç katsayılarının karşılaştırma grafiği (Comparison graph of aerodynamic drag coefficients for model bus and model 1 bus)

Model otobüsün aerodinamik direnç katsayısı ortalama 0.658 olarak, model 1 otobüsün C_D katsayısı ise ortalama 0.623 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen aerodinamik iyileşme oranı %5.37 olmuştur. Bu orandaki aerodinamik iyileşme yüksek hızlarda (96 km/h üzeri) yakıt tüketimini yaklaşık %3 azaltmaktadır [1,33].

Bayındırlı ve ark. (2015) yaptıkları numerik çalışmada bir çekici römork aracının toplam sürüklenme kuvvetinin %94.2’sinin basınç %5.8’inin sürtünme kaynaklı olduğunu tespit etmişlerdir[36]. Bu çalışmada model otobüsün toplam sürüklenme kuvvetinin %86.42’i basınç kaynaklı, %13.38’i sürtünme kaynaklıdır. Otobüs modelinde sürtünme kaynaklı direnci azaltmaya yönelik çalışmaların yapılabileceği görülmüştür.

Bu çalışmada geliştirilen ve olumlu etkisi ortaya konulan üçgen profilli akış elemanı otobüs üzerine uygulanabilir niteliktedir. Bu çalışmada analizi yapılan otobüs modelinin prototipinde kullanılan motorun hacmi 12,40 litre olup ortalama 100 kilometre mesafede 25 litre yakıt tüketmektedirler. Bu otobüs yılda 200000 km mesafe kat etmesi durumunda yılda 50000 litre yakıt tüketmektedir. Bu çalışmada elde edilen ve yaklaşık %3 yakıt tasarrufu yıllık 1500 litre daha az yakıt tüketimi anlamına gelmektedir. Türkiye’de yurtiçinde şehirlerarası yolcu taşımasında kullanılan otobüs sayısı 52707’dir. Toplam otobüs sayısı düşünüldüğünde bu çalışmada ortaya konulan yöntemin sonuçları ülke ekonomisi ve çevresel faktörler bakımından önemlidir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BAP) tarafından FEB 2016/24-BAGEP no’lu proje ile desteklenmiştir. Yazarlar desteklerinden dolayı Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi’ne ve

proje danışmanı Doç. Dr. Yahya Erkan AKANSU'ya teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Wood R.M. and Bauer, S.X.S., "Simple and low cost aerodynamic drag reduction devices for tractor-trailer Trucks", *SAE Technical Paper*, 01-3377: 1-18, (2003).
- [2] <http://www.udhb.gov.tr/>, İstatistiklerle Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Raporu, (2003-2011).
- [3] Modi, V.J., Hill, S.St. and Yokomimizo, T., "Drag reduction of trucks through boundary-layer control", *Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics*, 54/55: 583-594, (1995).
- [4] Demircioğlu, T.K., "Bir araç modelinin Aerodinamik Analizi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Simülasyonu", Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 54-98, (2007).
- [5] Perzon, S., Janson, J., and Höglin, L., "On comparisons between CFD methods and wind tunnel tests on a bluff bod", *SAE Technical Paper Series*, 01-0805, 1-11, (1999).
- [6] Perzon, S., and Davidson, L., "On transient modeling of the flow around vehicles using the Reynolds equation", *International Conference on Applied Computational Fluid Dynamics (ACFD)* Beijing China, 720-727 (2000).
- [7] Lokhande, B., Sovani, S., and Khalighi, B. "Transient simulation of the flow field around a generic pickup truck", *SAE Technical Paper Series*, 01-1313: 1- 19, (2003).
- [8] Krajnovic, S., and Davidson, L. "Influence of flow motions in wind tunnels on the aerodynamicsof road vehicles", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93: 677-696 (2005).
- [9] Apisakkul, K.T., and Kittichaikarn, C. "Numerical analysis of flow over car spoiler". *The Ninth Annual National Symposium on Computational Science and Engineering Papers ANSCSE-9*, Bangkok, Thailand (2005).
- [10] Fares, E. "Unsteady flow simulation of the Ahmed reference body using a lattice Boltzmann approach", *Computers & Fluids*, 35: 8-9, (2006).
- [11] Desai M., Channiwala S. A., and Nagarsheth, H. J. Experimental and Computational Aerodynamic Investigations of a Car", *WSEAS Transactions on Fluid Mechanics* 4(3): 359-366 (2008).
- [12] Cheli, F., Ripamonti, E., Sabbioni, E., and Tomasini, G. "Wind Tunnel Tests on Heavy Road Vehicles: Cross Wind Induced Load", *Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics*, 99: 1011-1024, (2011).
- [13] Hu, Xu-xia., and Wong, E.T.T. "A Numerical Study On Rear-spoiler Of Passenger Vehicle". *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 57: 636-641, (2011).
- [14] Marinos, M., and SpyrosG, V., "Experimental investigation of the flow past passive vortex generators on an airfoil experiencing three-dimensional separation", *Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics*, 142: 130-148, (2015).
- [15] Aktaf, A., Omar Ashraf A., Asrar W., "Passive drag reduction of square back road vehicles", *Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics*, 134: 30-43, (2014).
- [16] Cui, W., Zhu, H., Xia, C., Yanga, Z., "Comparison of steady blowing and synthetic jets for aerodynamic drag reduction of a simplified vehicle", *Procedia Engineering*, 126: 388 - 392, (2015).
- [17] Mohamed-Kassim, Z., and Filippone, A., "Fuel savings on a heavy vehicle via aerodynamic drag reduction", *Transportation Research Part D*, 15: 275-284, (2010).
- [18] Barden, J., and Gerova, K., "An on-road investigation into the conditions experienced by a heavy goods vehicle operating within the United Kingdom", *Transportation Research Part D*, 48: 284-297, (2016).
- [19] Gurlek, C., Sahin, B., and Ozkan, G.M., "PIV studies around a bus model", *Experimental Thermal and Fluid Science* 38: 115-126, (2012).
- [20] Liu, X., Han, Y., Cai, C.S., Levitan, M., Nikitopoulos D., "Wind tunnel tests for mean wind loads on road vehicles", *Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics*, 150: 15-21, (2016).
- [21] Ji-qiang, N., Dan, Z., Xi-feng, L., "Experimental research on the aerodynamic characteristics of a high-speed train under different turbulence conditions", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 80: 117-125, (2017).
- [22] Hassan S.M.R., Islam, T., Ali, M., Islam, Md. Q., "Numerical Study on Aerodynamic Drag Reduction of Racing Cars", *Procedia Engineering*, 90: 308 - 313, (2014).
- [23] Chilbule, C., Upadhyay, A., Mukkamala, Y., "Analyzing the profile modification of truck-trailer to prune the aerodynamic drag and its repercussion on fuel consumption", *Procedia Engineering*, 97: 1208 - 1219, (2014).
- [24] Muthuvel, A., Murthi, M.K. Sachin, N.P, Vinay.M.K., Sakthi, S., Selvakumar, E., "Aerodynamic Exterior Body Design of Bus", *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4(7): 2453-2457, (2013).
- [25] Patil, C.N., Shashishekar, K.S., Balasubramanian, A.K., Subbaramaiah, S.V., "Aerodynamic Study and drag coefficient optimization of passenger

- vehicle”, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 1(7): 1-8, (2012).
- [26] Sarı, M.F., “Hafif Ticari Taşıtlarda Taşıt Ön Formuna Etkiyen Hava Direncinin Aerodinamik Analizi ve Yakıt Sarfiyatına Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 28-54, (2007).
- [27] Minoru, S., Katsuji, T., and Tatsuo, M., Aerodynamic characteristics of train/vehicles under cross winds. *Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics*, 91(1-2): 209-218, (2003).
- [28] Rohatgi, U.S., “Methods of Reducing Vehicle Aerodynamic Drag”, ASME Heat Transfer Conference Puesto Rico, USA, (2012).
- [29] Chowdhury, H., Moria, H., Abdulkadir, A., Khan I., Alam, F., and Watkins, S., “A Study on aerodynamic drag of a semi-trailer truck”, *Procedia Engineering*, 56: 201–205, (2013).
- [30] Akansu, Y. E., Özmert, M., Fırat E., “Akış Kontrol Çubuğu İle Kare Kesitli Bir Küt Cisim Etrafındaki Akış Kontrolünde Hücum Açısının Girdap Kopma Olayına Etkisi”, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 31(1): 109-120, (2011).
- [31] Solmaz, H., İcingur, Y., ”Drag Coefficient Determination Of A Bus Model Using Reynolds Number Independence”, *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 4(3): 146-151, (2015).
- [32] Jonathan, M., , Erik, F., Gregory, R., Rajan, K., Kunihiro, T., Farrukh, A., Yoshihiro, Y., and Kei M., “Drag reduction on a flat-back ground vehicle with active flow control”, *Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics*. 145: 292–303, (2015).
- [33] Çengel, Y.A., and Cimbala, J.M., “Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları” Güven Bilimsel Yayınları, İzmir, 562-599, (2008).
- [34] İnce, İ.T. “GTD Model İdari Hizmet Pikap Aracının Aerodinamik Analizi. Doktora Tezi”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 30-66, (2010).
- [35] Saygı, M.I., “Kare Model Etrafındaki Akışın Üfleme ve Emme İle Aktif Kontrolünde Hücum Açısının Ve Slot Kanal Konumunun Etkisinin Deneysel İncelenmesi”. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 88-95, (2008).
- [36] Bayındırlı, C., Akansu, Y.E., Salman, M.S., and Çolak, D., ”The Numerical Investigation of Aerodynamic Structures of Truck and Trailer Combinations”, *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 4 (3): 139-145, (2015).

SEMBOLLER VE KISALTMALAR (SYMBOLS AND ABBREVIATIONS)

A	Araç ön yüzeyi izdüşümü alanı, m ²
C _D	Sürüklenme kuvvet katsayısı
F _D	Sürüklenme kuvveti, N
U _∞	Serbest akış hızı, m/s
Re	Reynolds sayısı
ν	Kinematik viskozite, m ² /s
ρ	Yoğunluk, kg/m ³
HAD	Hesaplama akışkanlar dinamiği
CFD	Computational Fluid Dynamics
v	Anlık hız vektörünün y bileşeni
w	Anlık hız vektörünün z bileşeni
d/dt	Toplam türev
ϑ	Türbülans hız skalası, m/s
U	Ortalama hızın x bileşeni, m/s
V	Ortalama hızın y bileşeni, m/s
W	Ortalama hızın z bileşeni, m/s
w	Yüzey, duvar indisi
Y	Yutulma
x, y, z	Kartezyen koordinat sistemi indisi
ε	Türbülans kinetik enerji yutulması, m ² /s ³
φ	Genel diferansiyel denklemde bir değişken
φ	Herhangi bir akış değişkeni
ψ	Herhangi bir akış değişkeninin ortalama bileşeni
λ	Viskozite sabiti
μ	Laminar viskozite, Pa.s
μ _{eff}	Efektif viskozite, Pa.s
LES	Large Eddy Simulation
RNG	Renormalization-Group
τ _{xx} , τ _{yy} , τ _{zz}	Normal gerilmeler, N
τ _{xy} , τ _{yz} , τ _{xz}	Kayma gerilmeleri, N



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN:1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



Analysis of biphasic cracking of methane for hydrogen production using solar energy

Yazar(lar) (Author(s)): Rabah GOMRI¹, Belkacem NEZZARI²

ORCID¹: 0000-0002-8784-4614

ORCID²: 0000-0003-3202-0439

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Gomri R., Nezzari B., “Analysis of biphasic cracking of methane for hydrogen production using solar energy”, *Politeknik Dergisi*, 21(4): 797-803, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.403998

Analysis of Biphasic Cracking of Methane for Hydrogen Production Using Solar Energy

Araştırma Makalesi / Research Article

Rabah GOMRI^{1*}, Belkacem NEZZARI²

^{1,2}University Mentouri Constantine 1, Department of Genie Climatique, 25000, Constantine, Algeria

(Geliş/Received : 03.01.2018 ; Kabul/Accepted : 27.02.2018)

ABSTRACT

Hydrogen can be produced by many processes, by a series of chemical reactions many of which have been known for centuries. However, most of these reactions raise severe environmental and safety problems, while availability of raw materials is a critical problem. One of the partial solutions is solar hydrogen. It appears that cracking of carbon-rich materials is the right solution for this energy. In this context comes this numerical simulation of the methane cracking phenomenon. In the simulation, we have taken in to account the existence of carbon as a homogeneous powder. The mixture is considered to be biphasic formed by a gaseous phase with methane, hydrogen gases and carbon black powder solid phase. This powder is formed by solid particles with same diameter ($d=50\text{nm}$). The cracking phenomenon of the methane into hydrogen and carbon black takes place in a cylindrical cavity of 16 cm in diameter and 40 cm in length under the heat of concentrated solar radiation without any catalyst. A commercial calculation code "ANSYS FLUENT" is used to simulate the cracking phenomena. Two cases were studied: the first one applying a maximum solar radiation of 16MW/m^2 on the side wall of the reactor and the second one a maximum solar radiation of 5MW/m^2 . The CH_4 flow rate used at the inlet of the reactor is 0.4 L/min and the low Reynolds $K - \epsilon$ turbulence model was applied. A time step of 0.04s has been used. The cracking rate exceeds 90% with a maximum solar radiation of 16MW/m^2 and this rate does not reach 85% with a maximum solar radiation of 5MW/m^2 . The dimensions of the cavity are important and it allows going from the experimental scale to the industrial scale. Working without any catalyst facilitates the separation of the elements after cracking.

Keywords: Hydrogen production, concentrated solar energy, methane, cracking.

1. INTRODUCTION

Solar energy is an abundant source of energy that can be utilized in two ways: (i) to convert sunlight into electricity through a photovoltaic system and (ii) to generate heat using concentrating collectors. Today, among the problems are climate change and ecological degradation, which are direct consequences of greenhouse gas emissions. Although any flammable material can theoretically be used as fuel, only a few are practically realistic. Some of them have low energy content and / or produce toxic gases and other polluting vapors during combustion, such as the pyrophoretic burning of iron particles [1]. The solution consists in the gradual introduction of clean energies. These energies are diverse and hydrogen is considered as one of these solutions, knowing that the combustion of hydrogen with pure oxygen results only in heat and water. Hydrogen can be produced by many processes, by a series of chemical reactions many of which have been known for centuries. However, most of these reactions raise severe environmental and safety problems; besides, the availability of raw materials is a critical problem. One of the partial solutions is solar hydrogen. According to Experimental works in the field of solar hydrogen production, it now appears that cracking of carbon-rich materials is the right solution for this energy for the following reasons:

- Thermolysis (dissociation of water) can be considered as a perfect process but it requires special equipment to withstand the high temperatures required and to separate the two gases produced (O_2 , H_2) which form a highly explosive mixture [1-5] and its cost compared to the output is still a major problem.
- Thermo-chemical cycles [2, 5-13] with two steps taking place under moderate temperatures, require the preparation of the metal oxides or others used in chemical reactions. These cycles also require special equipment and major problems of contamination are posed.
- Gasification or reforming of carbon-rich materials also generates greenhouse gases such as CO_2 and toxic gases such as CO [1, 5, 15].

The cracking of carbon-rich materials such as methane [1- 3, 16 -18] allows us to produce hydrogen without releasing greenhouse gases and without toxic components. Improved combustion by minimizing emissions of environmentally hazardous gases by injecting hydrogen into Gas networks and the availability of methane in the world are sufficient criteria to propose this study of the

- simulation of the cracking of methane in a tubular reactor under concentrated solar heat.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : rabahgomri@yahoo.fr

Table 1. Materials properties (all properties are given by ANSYS FLUENT database)

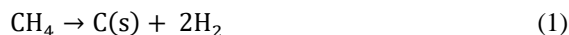
materials	Molecular weight (kg/kgmol)	Density (kg/m ³)	Specific heat (J/kg-k)	Thermal conductivity	Viscosity (kg/m.s)
Methane	16.04303	0.669	0.033	Piecewise polynomial	1.087e-05
Hydrogen gas (H ₂)	2.01594	0.08189	polynomial	polynomial	polynomial
Carbone-solid	12.01115	2000	Piecewise	0.33	1.72e-05

- Biomass-to-hydrogen processes, including gasification, pyrolysis, and fermentation, are less well-developed technologies. These processes offer the possibility of producing hydrogen from energy crops and from biomass materials such as forest residue and municipal sewage. Solar energy can be used to produce hydrogen from water and biomass by several conversion pathways. Concentrated solar energy can generate high temperatures at which thermochemical reactions can be used to split water. Photoelectrochemical water splitting and photobiology are long-term options for producing hydrogen from water using solar energy. All these technologies are in the development stage [1,19].

2. THERMODYNAMY AND THEORY

Kinetic scheme:

We consider that the cracking is governed only by the chemical reaction given by Equation (1):



The constant rate in the forward direction of the reaction is calculated using the Arrhenius expression

$$k_{f,r} = A_r T^{\beta_r} e^{-E_r / RT} \tag{2}$$

Where

A_r : Pre-exponential factor (s⁻¹)

T: temperature (K)

β_r : Temperature factor (-)

E_r : Activation energy (J/kgmol)

R : Universel gas constant (J/kgmol.K⁴)

Carbon is considered as a solid powder. The constant rate of progress of the chemical reaction is calculated by applying the Arrhenius law. Assuming that reaction (1) is of order 1 ($\beta_r = 0$) and according to [16], the activation energy is equal to 147×10^6 J/mol and the pre-exponential factor is equal to 1×10^6 s⁻¹ [16]. The flow is reactive and moreover it is inverted for geometrical reasons which allow us to consider it turbulent despite the low Reynolds number.

Parameters of simulation and flow rate choice:

The properties of materials used in this study are given in Table 1. We chose to work under high temperature and under atmospheric pressure because these conditions favor the cracking of methane [14].

3. CRACKING GEOMETRY AND BOUNDARY CONDITIONS

Reactor Geometry:

The geometry of the cavity in which cracking takes place and the chosen boundaries conditions are shown in Figure 1. The mesh is made by mesh software “Gambit”. The wall effect is taken into consideration. The reactor chosen in this simulation is a cylindrical cavity in which is placed a core containing a tubular void allowing injection of the methane.

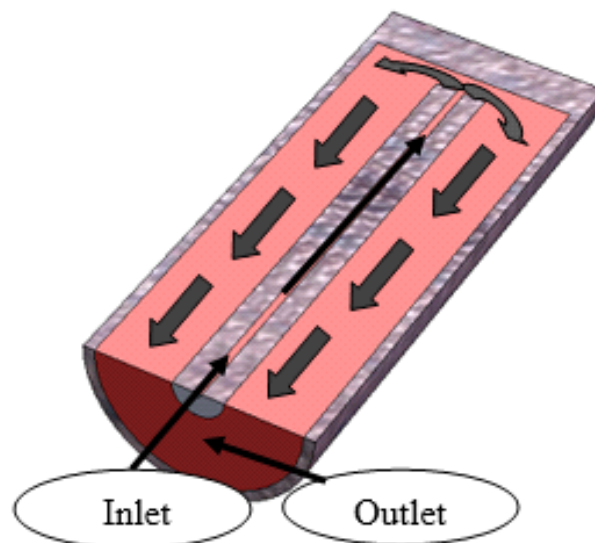


Figure 1. Form of the reactor assumed to be filled by the polyphase mixture

The side opposite to the inlet of the methane is subjected to solar radiation whereas Figure 2 shows only the volume of the gas mixture resulting from the chemical reaction of the cracking taking place in the reactor under the effect of the solar heat. The problem is considered two-dimensional. For reasons of symmetry with respect to the axis of the cavity, the meshed surface represents half of a longitudinal section taken along the reactor (in dashed lines).

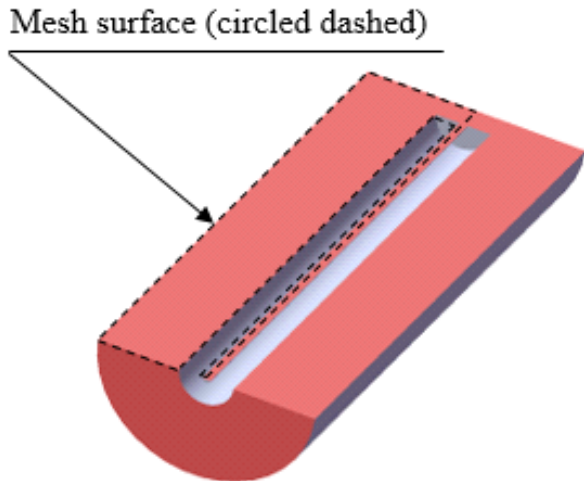


Figure 2. Internal volume of the reactor occupied by the half-section mixture

- 4- Inner longitudinal walls (adiabatic): these walls represent the limits of the reactor core so they are considered adiabatic (no heat exchange in the radial direction from the axis of symmetry)

$$\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y=3 \text{ and } 20 \text{ mm}} = 0$$

- 5- Reactor output : no conditions imposed on the reactor outlet

- 6- Symmetry :The flow is supposed to be independent of the angle of rotation along the axis of symmetry, this allows us to reduce the mesh of 3 dimensions to a mesh of two dimensions according to a plan of longitudinal section which is symmetrical vis a vis the axis of rotation of the reactor.

- 7- Lateral wall (adiabatic): these walls represent the limits of the reactor core so they are considered adiabatic (no heat exchange in the axial direction

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=380 \text{ mm}} = 0$$

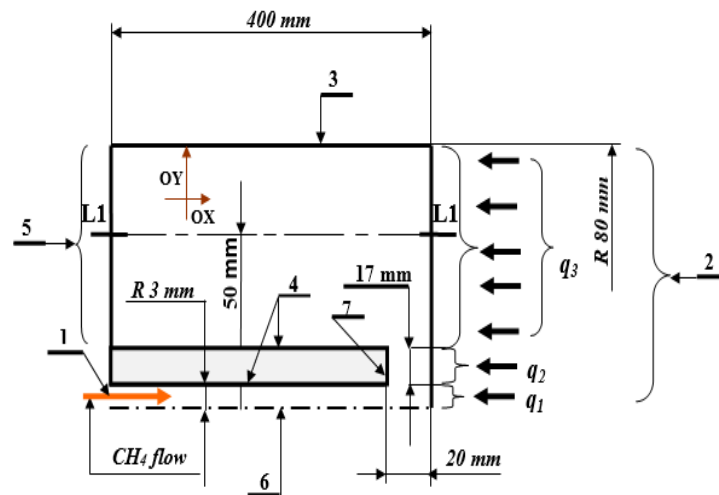


Figure 3. Geometry of the calculation domain

Calculation domain and boundary conditions:

Figure 3 shows geometry of the calculation domain and boundary conditions.

Where:

- 1- orifice (methane inlet): orifice of methane injection when $Q = 0.4 \text{ L/min}$
- 2- Wall subjected to solar radiation: it is assumed that there are 3 zones, the first zone is a circle of 6mm in diameter is subjected to flux radiation q_1 , the second is annular of 3mm of inner radius and 20mm of outer radius, is subjected to flux radiation q_2 while the third is also annular with 20mm inner radius and 80mm outer radius, is subject to flux radiation q_3
- 3- Outer longitudinal walls (adiabatic): the reactor is in a very hot atmosphere, so we neglect any heat exchange between the external walls of the reactor and this atmosphere $\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y=80 \text{ mm}} = 0$.

Flow rate :

In this simulation, we operated with a flow rate used in the experimental work used by Flamant [14 - 15] when $Q = 0.4 \text{ L/min}$ and applying the low Reynolds $k - \epsilon$ turbulence model. A commercial calculation code "ANSYS FLUENT" is used to simulate the cracking phenomenon.

Firstly, 16 MW/m^2 thermal solar radiation at the reactor focus is used assuming that the carbon powder is homogeneous with an average diameter of 50nm for its particles. To choose an average diameter of 50nm, we based on [14] when the carbon powder collected in the filter was amorphous and the diameter of particles was in the range 20–100 nm.

4. RESULTS AND DISCUSSION

As shown in Figure 4, at time $t = 5 \text{ seconds}$ most of the methane is converted to hydrogen. At this time, the quantity of methane injected is not important, for this

reason, the methane is almost completely converted to hydrogen.

Table 2 summarizes the hydrogen mass fractions obtained by simulation while applying a maximum radiation of 16 MW/m² to the side wall of the reactor, as shown in Figure 4, bearing in mind that we used [11-14] to choose values between 16 and 1 MW/m²

calculates each phase separately. It is clear that at the reactor inlet, the fraction of the carbon is equal to zero and as at t=27s, the reactor becomes entirely hot, which allows the cracking of methane before reaching the wall subjected to concentrated solar radiation.

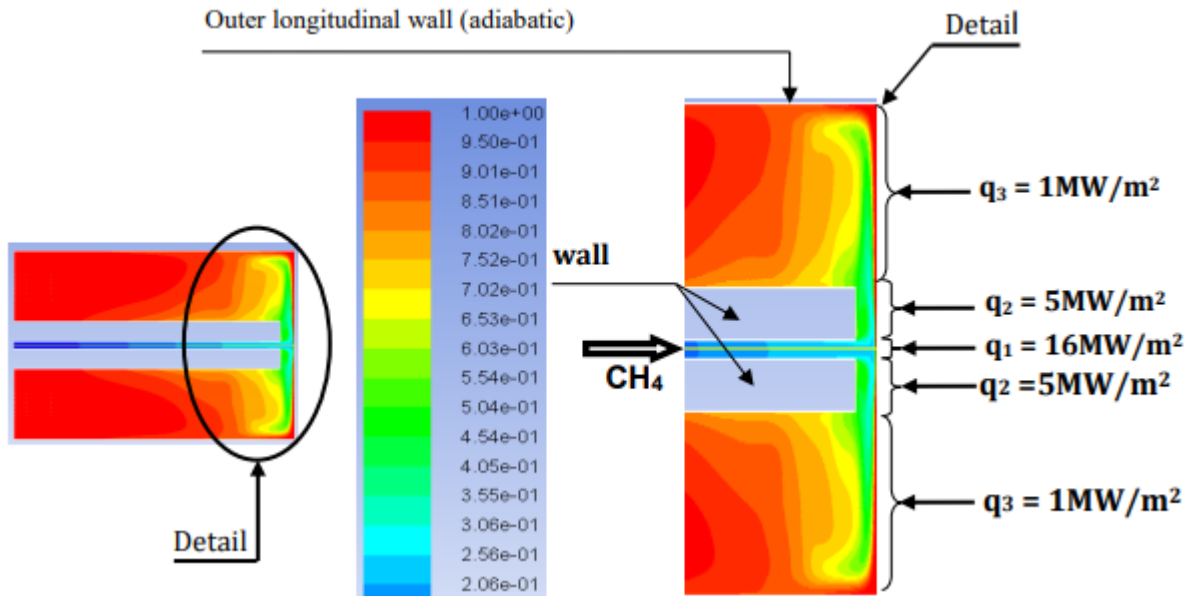


Figure 4. H₂ Contour in the zone for cracking a biphasic mixture at t = 5seconds

Table 2: Hydrogen mass fractions obtained at the reactor outlet

t (s)	H ₂ Fraction	t (s)	H ₂ Fraction	t (s)	H ₂ Fraction
4	0.99358989	12	0.91048795	20	0.90799227
5	0.98986295	13	0.90584034	21	0.91100136
6	0.97666023	14	0.90250364	22	0.91407602
7	0.96304818	15	0.90082000	23	0.91651239
8	0.95060989	16	0.9003958	24	0.91877511
9	0.93956432	17	0.9011825	25	0.9214575
10	0.92897375	18	0.9029467	26	0.92427511
11	0.91810557	19	0.90528852	27	0.92692068

Figure 5 shows the mass fraction of carbon through the reactor at time t = 27s, knowing that ANSYS FLUENT

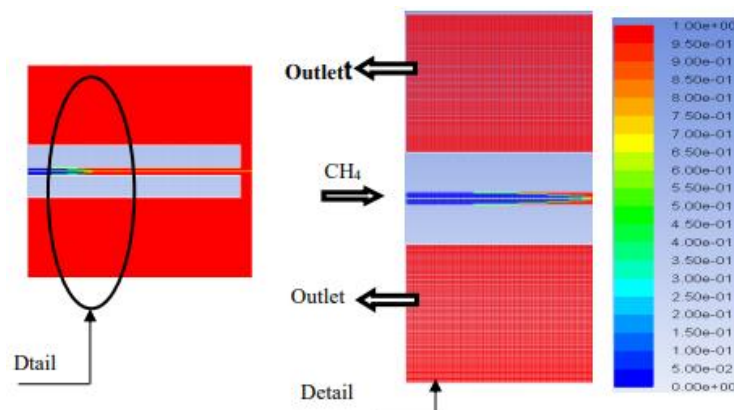


Figure 5. Contours of mass fraction of carbon – solid at time 27s

Figure 6 summarizes the percentage of hydrogen obtained by simulation by applying a maximum radiation of 16MW/m^2 on the side wall of the reactor as shown in Figure 4, based on work of [16-19] to select values between 16 and 1MW/m^2 . Initially ($t = 0\text{s}$) the reactor is empty, any quantity of the gas will be cracked but over time these quantities become important and they require more energy which influences the conversion of methane and cracking rate decreases but it resumes when the time goes by under the effect of the transport of energy by the flow (see Table 1). At 27 seconds, the permanent regime is reached. An average value of H_2 fraction of about 92% is obtained. By applying the same solar concentration and the same flow rate, Flamant [14 -15] (page 85 Table 3) obtained a maximum cracking rate of 91.4%.

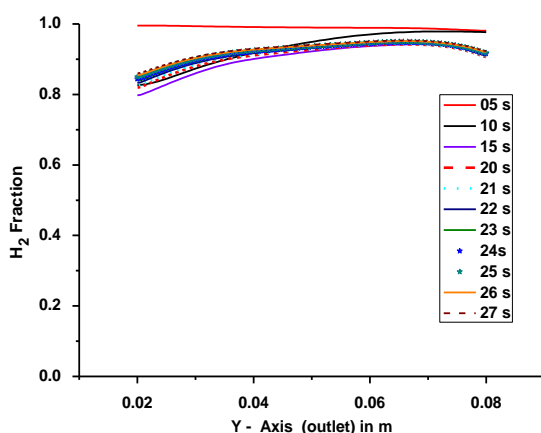


Figure 6. H_2 mass fraction profiles obtained by simulation between 5 and 27 seconds with maximum solar radiation of 16MW/m^2

Figure 7 gives the profiles of the static temperature of the gas phase obtained by simulation between 1 and 27 seconds along the reactor.

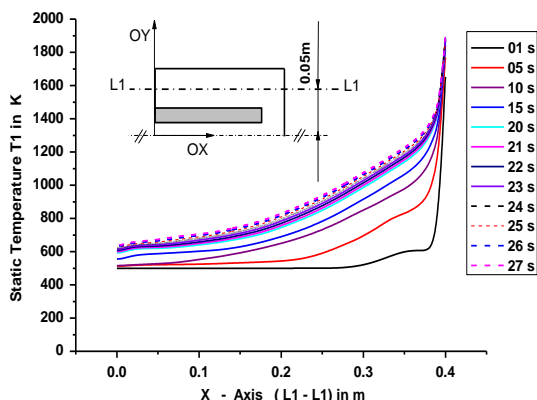


Figure 7. Profiles of the static temperature of the gas phase obtained by simulation between 1 and 27 seconds along the reactor with maximum solar radiation of 16MW/m^2

Figure 8 summarizes the percentage of hydrogen obtained by simulation while applying a maximum radiation of 5MW/m^2 on the side wall of the reactor as shown in Figure 4, based on work of [11-16] to select values between 5 and 1MW/m^2 ($q_1=5\text{MW/m}^2$, $q_2=2\text{MW/m}^2$ and $q_3=1\text{MW/m}^2$). As the previous case and initially ($t = 0\text{s}$) the reactor is empty, the first quantities of methane will be cracked (between 0 and 5 seconds) and with time these quantities become important (between 10 and 40 seconds) and the conversion of these methane quantities, require more energy and therefore the cracking rate decreases but this cracking rate resumes and increases again from the 40th second under the effect of the transport of energy by the flow. At time about 90 seconds the permanent regime is reached. An average value of H_2 fraction of about 81% is obtained.

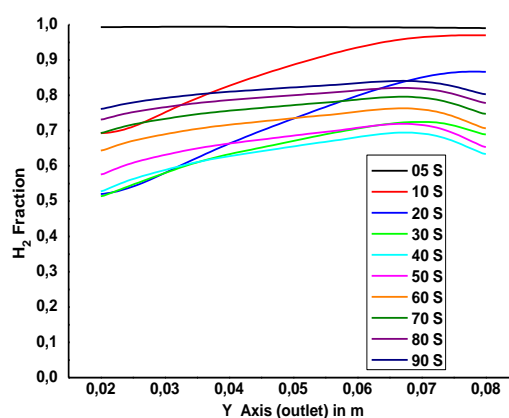


Figure 8. H_2 mass fractions profiles obtained by simulation between 5 and 90 seconds with maximum solar radiation of 5MW/m^2

Figure 9 gives the profiles of the static temperature of the gas phase obtained by simulation between 5 and 90 seconds along the reactor.

Figure 10 shows the difference in temperature along the reactor for the mentioned cases. We chose to compare the temperature of the two cases at the same moments (5, 10, 20 and 27 seconds). It can be seen that the temperatures of the case where the maximum radiation is 16MW/m^2 are greater than those in which the maximum solar radiation is 5MW/m^2 . Since the reaction is endothermic, it consumes the energy needed for cracking and the rest of the energy is used to heat the mixture after cracking and likewise this energy will be transported by the flow. This explains that the energy transported in the case of 16000 suns is greater compared to the case of 5000 suns and this explains the difference of the temperatures of the two cases and consequently we obtain the difference in the cracking rates as shown in the next figure (Figure 11).

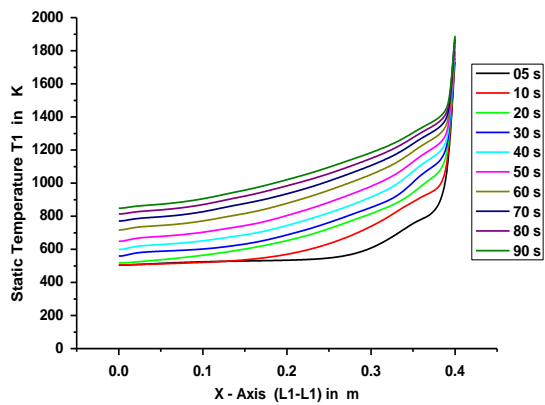


Figure 9. Profiles of the static temperature of the gas phase obtained by simulation between 5 and 90 seconds along the reactor (maximum solar radiation of 5MW/m^2)

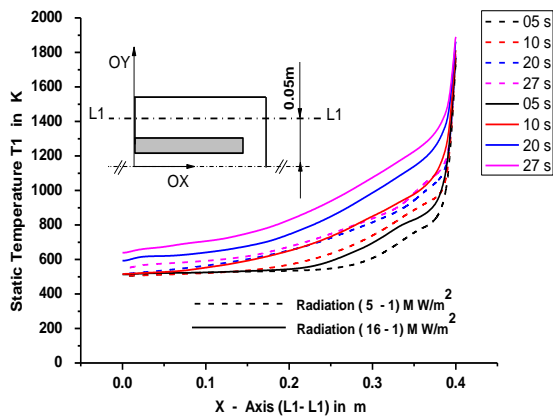


Figure 10. Comparison of the static temperature profiles obtained by simulation between 5 and 27 seconds along the reactor

In Figure 11, it is clear that the cracking rate depends on the solar radiation whatever the cracking time. It is shown that the cracking rate exceeds 90% with a maximum solar radiation of 16MW/m^2 after a time of 27 seconds and this rate does not reach 85% after a time of 90 seconds with a maximum solar radiation of 5MW/m^2 . by applying the same solar concentration and the same flow rate, Flamant [14 -15(page 85 tabl 3)] obtained a maximum cracking rate of 91.4%.

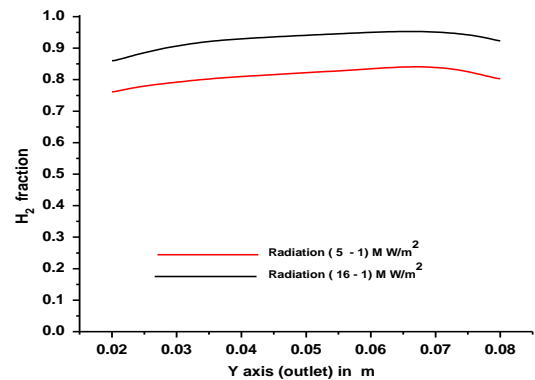


Figure 11. Comparison of the fractional profiles of the hydrogen obtained by simulation at the reactor outlet

CONCLUSIONS

In this paper a detailed comparative study of two phase methane cracking using concentrated solar energy is carried out for flow rate of methane of 0.4L/min . The temperatures of the case where the maximum radiation is 16MW/m^2 are greater than those in which the maximum solar radiation is 5MW/m^2 and consequently the difference in the cracking rates is obtained. The cracking rate exceeds 92% with a maximum solar radiation of 16MW/m^2 and this rate does not reach 85% with a maximum solar radiation of 5MW/m^2 .

REFERENCES

- [1] Grimes C. A., Varghese O. K. and Ranjan S., “*Light, Water, Hydrogen, the solar generation of hydrogen by water photoelectrolysis*”, Springer Science + Business Media, LLC, (2008).
- [2] Kodama T., “High-temperature solar chemistry for converting solar heat to chemical fuels”, *Progress in energy and combustion science*, 29:567–597, (2003).
- [3] Etiévant C., “Solar high-temperature direct water splitting- a review experiments in France”, *Solar Energy Material*, 24:413–440, (1991).
- [4] Sakurai M., Bilgen E., Tutsumi A. and Yoshida K., “Solar UT-3 thermo chemical cycle for hydrogen production”, *Solar Energy*, 57:51–58, (1996).
- [5] Abanades S. and Flamant G., “Thermo chemical hydrogen production from a two step solar- driven water-splitting cycle based on cerium oxides”, *Solar Energy*, 80:1611–1623, (2006).
- [6] Kodama T., Kondoh Y., Yamamoto R., Andou H. And , Satou N., “Thermochemical - hydrogen production by a redox system of ZrO_2 supported- Co(II) -Ferrite”, *Solar Energy*, 78:623–631, (2005).

- [7] Steinfeld A., Sanders S., and Palumbo R., "Design aspects of solar thermo chemical engineering- a case study: Two- step Water – Splitting cycle using the $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{FeO}$ ", *Solar Energy*, 65:43–53, (1999).
- [8] Chavin P., Abanades S., Flamant G. and Lemort F., "Two-step water splitting thermochemical cycle based on iron oxide redox pair for solar hydrogen production", *Energy*, 32:1124–1133, (2007).
- [9] Vishnevetsky, M. E., "Production of hydrogen from solar zinc steam atmosphere", *International Journal of Hydrogen Energy*, 32:2791–2802, (2007).
- [10] Kaneko H., Miura T., Iihara H., Taku S., Ykoyama T., Nakajima H. and Tamaura Y., "Reactive ceramics of $\text{CeO}_2\text{-MO}_x$ (M= Mn, Fe, Ni, Cu) for H_2 generation by two-step water splitting using concentrated solar thermal energy", *Energy*, 32:656–663, (2007).
- [11] Hernandez E. D., Olalde G., Bonnier G., Le Frious F. and M. Sadli, "Avaluation of the application of a solar furnace to study the suitability of metal oxides to be used as secondary reference points in the range 2000–3000°C", *Measurement*, 34:101–109, (2003) .
- [12] Y. Benguerba, L. Dehimi, M. Virginie, C. Dumas, "Modelling of methane dry reforming over $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ catalyst in a fixed-bed catalytic reactor", *Journal of Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 114:109–119, (2015).
- [13] Roohi P., Alizadeh R. and Fatehifar E., "Thermodynamic Study of Transformation of Methane to Synthesis Gas Over Metal Oxides", *International Journal of Thermophysics*, 36:88–103, (2015).
- [14] Abanades S. and Flamant G., "Hydrogen production from solar thermal dissociation of methane in a high-temperature fluid wall chemical reactor", *Chemical engineering and processing: Process Intensification*, 47:490–498, (2008).
- [15] Flamant G., "Production d'hydrogène par énergie solaire –Programme énergie CNRS- MRNT - DGA – Rapport final du projet intégré HYSOL. (2002-2004). http://www.gedeon.prd.fr/ATELIERS/27_28_11_2003/presentations/H2-SolaireIMP-CNRS%20flamant.pdf.
- [16] Hirsch D., and Steinfeld A., "Solar hydrogen production by thermal decomposition of natural gas using a vortex-flow reactor", *International Journal of Hydrogen Energy*, 29:47–55, (2004).
- [17] De Falco M., Marrelli L. and Iaquaniello G., "*Membrane Reactors for Hydrogen Production Processes* - Springer-Verlag, London Limited, (2011).
- [18] Liu K., Song C and Subramani V., "*Hydrogen and syngas production and purification technologies*", John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey, (2010).
- [19] Turner J., Sverdrup G., Mann M.K., Maness P.C., Kroposki B., Ghirardi M., Evans R. and Blake D., "Renewable hydrogen production", *International Journal of Energy research*, 32:397–407, (2008).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



The effects of wood preservatives on the combustion characteristics of sessile oak (*Quercus Petreae* L.)

Ahşap koruyucuların sapsız meşe (Quercus Petreae L.) ağacının yanma özelliklerine etkileri

Yazar(lar) (Author(s)): Şekip Şadiye YAŞAR¹, Musa ATAR²

ORCID¹: 0000-0002-3500-4453

ORCID²: 0000-0002-3944-5512

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Yaşar Ş. Ş. ve Atar M., “The effects of wood preservatives on the combustion characteristics of sessile oak (*Quercus Petreae* L.)”, *Politeknik Dergisi*, 21(4): 805-811, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.404002

The Effects of Wood Preservatives on the Combustion Characteristics of Sessile Oak (*Quercus Petraea* L.)

Araştırma Makalesi / Research Article

Şekip Şadiye YAŞAR^{1*}, Musa ATAR²

¹Gumushane Vocational High School, Department of Desing, Gumushane University, TURKEY

²Technology Faculty, Department of Wood Products Industrial Engineering, Gazi University, TURKEY

(Geliş / Received : 19.01.2018; Kabul / Accepted : 06.02.2018)

ABSTRACT

This study carried out to determine the combustion properties of the sessile oak wood (*Quercus petraea* L.) which impregnated with wood preservative and subjected to surface treatments. For this purpose, the samples, which were prepared from sessile oak wood according to ASTM-E 160-50 combustion principles, impregnated with wolmanit-CB (WC) and tanalith-E (T) in accordance with ASTM-D 1413-76 and then synthetic (St) and Water-based (wb) varnishes were applied according to ASTM-D 3023. The combustion test was carried out in 3 stages, combustion with flame (CWF), self-combustion without flame source (CWOFF) and ember combustion stage (ECP). It was aimed to determine the combustion temperature values in CWF, CWOFF and ECP stage, weight loss, total combustion time and demolition time.

As a result, impregnation applications have increased the total combustion time to between 15-18% and reduced the demolition period. The exact opposite results were obtained for the varnish types, the total combustion time was reduced by 19-21% and the demolition time increased by 10-22%. In CWF stage, the highest temperature was obtained in water-based varnished samples (490 °C), the lowest in non-varnished samples (458 °C); in CWOFF stage the highest temperature in water-based varnished samples (572 °C), the lowest in synthetic varnished samples (544 °C); and in ECP stage the highest temperature in non-varnished samples (306.5 °C), the lowest in the samples with the synthetic varnished (262.7 °C).

Anahtar Kelimeler: Combustion, wood, impregnation, varnish, Wolmanit-CB, Tanalith-E.

Ahşap Koruyucuların Sapsız Meşe (*Quercus Petraea* L.) Ağacının Yanma Özelliklerine Etkileri

ÖZ

Bu çalışma, ahşap koruyucu ile empenye edilmiş, üst yüzey işlemleri uygulanmış sapsız meşe (*Quercus petraea* L.) odununun yanma özelliklerini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Bu maksatla ASTM-E 160-50 'ye göre hazırlanan sapsız meşe örnekleri ASTM-D 1413-76 'ya göre tanalith-E ve wolmanit-CB ile empenye edilmiş, ASTM-D 3023' e göre sentetik ve su bazlı vernik ile verniklenmiştir. Yanma deneyi, alev kaynaklı yanma (CWF), kendi kendine yanma (CWOFF) ve kor halde yanma (ECP) olmak üzere 3 aşamada gerçekleştirilmiştir. Yanma deneyi ile ağırlık kaybı, toplam yanma süresi, yıkılma süresi ve CWF, CWOFF ve ECP periyotlarındaki yanma sıcaklık değerleri belirlenmesi amaçlanmıştır.

Sonuç olarak; empenye uygulamaları toplam yanma süresini %15-18 arasında arttırmış, yıkılma süresini azaltmıştır. Vernik çeşitlerinin tam tersi sonuçlar elde edilmiş, toplam yanma süresi %19-21 arasında azalmış, yıkılma süresi %10-22 arasında artmıştır. Alev kaynaklı aşamada yanma sıcaklığı en yüksek su bazlı vernikli (490 °C), en düşük vernik uygulanmayan örneklerde (458 °C), alev kaynağı olmadan kendi kendine yanmada en yüksek su bazlı vernikte (572 °C), en düşük sentetik vernik uygulanan örneklerde (544 °C), kor halde yanmada en yüksek sıcaklık vernik uygulanmayan örneklerde (306.5 °C), en düşük sentetik vernik uygulanan örneklerde (262.7 °C) elde edilmiştir.

Keywords: Yanma, ağaç, empenye, vernik, Wolmanit-CB, Tanalith-E.

1. INTRODUCTION

Wood is a rapidly decreasing raw material source, which is a construction material that could insulate heat and electricity well and is esthetic, eco-friendly and light. Despite of all its positive aspects, being an inflammable matter restricts its areas of use.

Wood preservatives extends the serve life of the wooden material by protecting it from fire, mechanical weathering, weather conditions, biological hazards,

physical and chemical degradation [1]. It is not only the protective properties of wood preservatives, physical, mechanical and chemical effects are also being investigated. For example in a study the compression strengths of impregnated wood with tanalith-E was investigated. The compression strength values were decrease with tanalith-E to control samples [2]. There are many ongoing researches to increase the resistance of wood especially against combustion and the environmental factors in the wood's place of use [3-6]. Water-based solutions prepared from water-borne salt like oil-based creosote, petrol solution

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : ssyasar@gumushane.edu.tr

pentachlorophenol and CCA, ACQ, CCB, CCP and CBA are commonly used wood preservatives [7]. That recent preservatives are eco-friendly and they are not harmful for human health, also matter considerably not just their resistance against environmental factors, their adsorption onto wooden material and their activity level. Environmental Protection Agency (EPA) suggested that label changing of arsenic, pentachlorophenol and creosote is convenient by taking assuasive precautions in 2008 [8].

Many different fire retardants developed in order to hinder the wooden material from combustion. Romans wet the wood with alum and vinegar and covered it with various materials [9]. Nowadays; boron, ammonium, phosphor and nitrogen compounds are used to prevent wooden material and its composites from combustion [10-19].

Normally, wood does not ignite by itself, but it can ignite with the help of a strong heat source and it creates a self-isolated coal layer during combustion [20]. In thermal analysis, pyrolysis of hemicellulose and cellulose occurs rapidly, it is founded that weight loss of hemicellulose is mainly between 220-315 °C and weight loss of cellulose is mainly between 315-400 °C [21]. Many different methods like thermo gravimetric analysis (TGA), cone calorimeter, fire spreading tests, smoke density tests and oxygen index tests are used in order to identify the combustion behaviors of the material [21, 22-26].

Application methods of impregnation materials affect combustion behaviors. While examining the combustion behaviors of Oriented Strand Board (OSB), treated with materials like potassium carbonate, borax and wolmanit-CB, flaming fire is observed as 1180 secs in the samples in which wolmanit-CB is applied with brush method while flaming combustion observed as 587 secs in dipping method [27].

According to the control samples in thermal analysis of oriental beech wood impregnated with materials like Adolit KD-5, Wolmanit CX-8 and Tanalit-E with 0.25, 1 and 4.7 concentration, all impregnation materials decreased the maximum heat degradation while increased the amount of residual coal [28].

Various thermal behaviors are observed after the treating scots pine wood with fixed concentrated (4%) wood preservatives. Samples treated with Wolmanit-CB decreased the initial heat of weight loss during pyrolysis, the maximum pyrolysis heat and the weight loss after combustion in contrast with the control samples [29].

In this study, the effects of wood preservatives and varnish on combustion behaviors of oak wood examined. For this purpose, it was determined temperatures in the combustion stages, weight loss, total combustion and demolition times

2. MATERIAL AND METHOD

2.1. Material

The sessile oak wood (*Quercus petraea* L.), which is a widely used tree species in furniture production, was obtained from Trabzon province timber management completely randomly. The wood materials selected especially from those that did not suffer from damaged by pests and which does not included growth defect, fiber deterioration and knots.

Tanalith-E and Wolmanit-CB commercial wood protectors were used as impregnation material. Tanalith-E has a water-based copper triazole solution that does not contain chromium and arsenic [30]. Wolmanit-CB contains copper sulphate, potassium bichromate and boric acid in its composition [31]. Wolmanit-CB supplied from Emsan A.Ş. (Korusan) Tanalith-E from Hemel Impregnated Products.

Solvents of synthetic resin varnishes are known to be harmful to human health [32]. In the varnishing of the test specimens, water based varnish and synthetic varnish were applied according to the ASTM D-3023 principles [33]. Marshall-Wood Art and Jansen-Aqua Compact Lasur are used as synthetic and water based varnishes.

2.2. Method

2.2.1. Preparation of the test samples

Combustion test samples were prepared with dimensions of 13 x 13 x 76 mm (radial x tangent x length) according to the ASTM E 160-50 principles [34]. The samples were waited at 20 ± 2 °C before impregnation and at 65% relative humidity until reaching constant weight (12% moisture). Concentration amounts of impregnated materials affect the combustion values [29]. While the combustion properties of Wolmanit-CB and Tanalith-E measured at different concentrations, the combustion properties increased as the amounts of concentration increased, and concentration over 3% was suggested for Wolmanit-CB [35]. In this study, with the advice of the manufacturers, the concentration amounts of Tanalith-E and Wolmanit-CB, was determined as 2.4% and 4%. PH value measured 9.9 for Tanalith-E and 4.3 for Wolmanit-CB. Experiment samples were treated in a vacuum of 600 mm Hg for 30 minutes and at a pressure of 0.6 MPa for 60 minutes according to impregnation materials ASTM D 1413 76 [36] principles.

After the impregnation procedure was applied, the samples were kept until they reached the constant weight at a temperature of 20 ± 2 °C and 65% relative humidity so that they could be ready for surface treatment. The amount of varnish was determined by weighing with 0.01 sensitive scales according to the manufacturer's recommendations. The solid amount of the varnish types used in the study was determined as 47% in synthetic varnish and as 33% in water-based varnish according to TS 6035 EN ISO 3251 [37]. After the varnishing, the samples were kept for 15 days until they reached constant weight.

2.2.2. Combustion Experiments

The test pieces, which are ready after the varnishing, were performed combustion experiments in accordance with ASTM-E 160-50. Before the combustion, each test group weighed to be 24 pieces and placed on the wire stand. In Combustion With Flame (CWF) stage the pressure gauge was set at 0.5 kg/cm², was continued for 3 minutes, and the flame source was extinguished. After CWF stage self-Combustion Without Flame source (CWF) and Ember Combustion Stage (ECP) were carried out. The temperature changes (°C) measured in thermometry on a regular basis for 15 seconds in CWF and 30 seconds in the other combustion stages. During the combustion test, temperatures of CWF, CWF and ECP stage, weight loss, total time of combustion and demolition time were determined.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The retention amount of sessile oak wood is identified as 2.4 kg/m³ for Tanalith-E while as 2.49 kg/m³ for wolmanit-CB.

3.1. Weight Loss in Combustion

Results for variance analysis of weight loss after combustion given in Table 1.

Apart the impregnation material, all interactions turned to be significant. According to impregnation material and varnish type, the mean, maximum, minimum and standard deviation values of weight loss are as shown in Table 2.

3.2. Total Time of Combustion and Demolition Time

Results for variance analysis of the types of impregnation material and varnish related to the total time of

Table 1. Results of variance analysis related to the changes in weight loss

Factor	Degree of freedom	Sum of squares	Average of squares	F Value	P
I	2	0.665	0.332	2.586	*0.103
V	2	0.957	0.479	3.723	0.044
I+V	4	29.622	7.406	57.596	0.000
Error	18	2.314	0.129		
Total	26	33.559			

Table 2. Average minimum, maximum, standard deviation weight loss values

Factor	Application	M (%)	Max(%)	Min (%)	Sx
Impregnation Material	WC	86.26	87.56	84.65	0.34
	T	85.92	87.64	83.99	0.41
	Ni	85.92	87.42	83.82	0.42
Varnish Type	St	86.03	87.42	84.65	0.31
	Wb	85.80	86.78	83.99	0.34
	Nv	86.26	87.64	83.82	0.49

Table 3. Variance analysis results related to the changes in total combustion and demolition time

	Factor	Degree of freedom	Sum of squares	Average of squares	F Value	P
Total time of combustion	I	2	379940.625	189970.313	23.256	0.000
	V	2	833287.500	416643.750	51.005	0.000
	I+V	4	771778.125	192944.531	23.620	0.000
	Error	18	147037.500	8168.750		
	Sum	26	2132043.750			
Demolition Time	I	2	7087.500	3543.750	2.719	*0.093
	V	2	146559.375	73279.688	56.234	0.000
	I+V	4	163012.500	40753.125	31.273	0.000
	Error	18	23456.250	1303.125		
	Sum	26	340115.625			

I: Impregnation Material, V: Varnish Type, P: $\alpha \leq 0.05$, *: insignificant

2.2.3. Analysis of The Data

Data of Experiments analyzed with SPSS 20.0. statistical evaluation program. While multiple variance analyses (UNIVARIATE) applied, differences between groups compared with the Duncan test.

combustion and demolition time of experimental stand are given in Table 3

Except from the effect of impregnation material on demolition time, all interactions are significant. According to impregnation material and varnish type, the mean, maximum, minimum and standard deviation

values of the combustion periods are as shown in Table 4.

material and varnish type, the mean, maximum, minimum and standard deviation values of the

Table 4. The mean, maximum, minimum and standard deviation of total combustion and demolition time

Factor	Procedure	M (sn)	Max (sn)	Min (sn)	Sx	
Total time of combustion	Impregnation Material	WC	1763	2265	1410	97.59
		T	1711	2310	1275	118.75
		Ni	1490	1600	1380	26.63
	Varnish Type	St	1512	1630	1380	30.65
		Wb	1550	1725	1275	51.82
		Nv	1902	2310	1380	120.06
Demolition time	Impregnation Material	WC	902	1005	825	20.58
		T	872	1005	735	30.43
		Ni	910	1170	660	57.24
	Varnish Type	St	988	1170	885	33.35
		Wb	887	1005	735	30.86
		Nv	808	875	660	24.98

WC: Wolmanit-CB, T: Tanalith-E, Ni: Unimpregnated, St: Synthetic varnish, Wb: Water based varnish, Nv: Unvarnished, M: Mean, Min: Minimum, Max: Maximum, Sx: Standard Error of Mean

Table 5. Results of variance analysis on temperature of combustion with flame

Factor	Degree of freedom	Sum of squares	Average of squares	F Value	P
I	2	199.500	99.750	2.997	*0.075
V	2	5301.375	2650.687	79.650	0.000
I+V	4	2586.000	646.500	19.426	0.000
Error	18	599.028	33.279		
Total	26	8685.903			

I: Impregnation Material, V: Varnish Type, P: $\alpha \leq 0.05$, *: insignificant

The highest total time of combustion was determined in the unvarnished samples (1902 secs) and the lowest in unimpregnated samples (1490 secs). The highest period of demolition time was determined in varnished samples (988 secs) and the lowest in unvarnished samples (808 secs).

combustion with flame temperature are as shown in Table 6

The highest temperature in combustion with flame was determined in water-based varnish samples (490 °C) and the lowest (458 °C) in unvarnished samples. Wolmanit-CB kept temperature values highest in combustion with

Table 6. Mean minimum, maximum, standard deviation values of temperature of combustion with flame

Factor	Procedure	M (°C)	Max(°C)	Min (°C)	Sx
Impregnation Material	WC	474	492	453	4.56
	T	468	505	429	8.53
	Ni	469	493	451	4.93
Varnish Type	St	463	470	453	1.92
	Wb	490	505	481	2.49
	Nv	458	482	429	6.09

WC: Wolmanit-CB, T: Tanalith-E, Ni: Unimpregnated, St: Synthetic varnish, Wb: Water based varnish, Nv: Unvarnished, M: Mean, Min: Minimum, Max: Maximum, Sx: Standard Error of Mean

3.3. Combustion Temperatures

3.3.1. Temperature of Combustion with Flame

The results of multiple variance analysis of the effect of impregnation material and varnish type on combustion with flame temperature are given in Table 5.

Except for of impregnation material, all interactions were found to be significant. According to impregnation

flame.

3.3.2. The temperature of self-combustion without flame source

The results of multiple variance analysis of the effect of impregnation material and varnish type on self-combustion without flame source temperature presented in Table 7.

Table 7. The results of variance analyses on the temperature of self-combustion without flame source

Factor	Degree of freedom	Sum of squares	Average of squares	F Value	P
I	2	136.500	68.250	1.586	*0.232
V	2	4041.375	2020.687	46.951	0.000
I+V	4	6280.500	1570.125	36.482	0.000
Error	18	774.694	43.039		
Total	26	11233.069			

I: Impregnation Material, V: Varnish Type, P: $\alpha \leq 0.05$, *: insignificant

Table 8. Mean minimum, maximum, standard deviation values of the temperature of self-combustion without flame source

Factor	Procedure	M (°C)	Max(°C)	Min (°C)	Sx
Impregnation Material	WC	557	573	540	3.73
	T	552	599	504	10.66
	Ni	557	577	532	5.14
Varnish Type	St	544	552	532	2.28
	Wb	572	599	559	4.57
	Nv	549	577	504	8.59

WC: Wolmanit-CB, T: Tanalith-E, Ni: Unimpregnated, St: Synthetic varnish, Wb: Water based varnish, Nv: Unvarnished, M: Mean, Min: Minimum, Max: Maximum, Sx: Standard Error of Mean

Table 9. Results of variance analysis on the temperature of ember combustion stage

Factor	Degree of freedom	Sum of squares	Average of squares	F value	P
I	2	409.500	204.750	2.008	*0.163
V	2	8715.375	4357.687	42.740	0.000
I+V	4	15651.000	3912.750	38.376	0.000
Error	18	1835.250	101.958		
Total	26	26611.125			

I: Impregnation Material, V: Varnish Type, P: $\alpha \leq 0.05$, *: insignificant

Table 10. Mean minimum, maximum, standard deviation values of the temperature of ember combustion stage

Factor	Procedure	M (°C)	Max(°C)	Min (°C)	Sx
Impregnation Material	WC	280.5	293	261	3.69
	T	289	330	269	7.78
	Ni	288.5	376	235	17.02
Varnish Type	St	262.7	277	235	4.57
	Wb	288.7	330	257	8.33
	Nv	306.5	376	271	12.58

WC: Wolmanit-CB, T: Tanalith-E, Ni: Unimpregnated, St: Synthetic varnish, Wb: Water based varnish, Nv: Unvarnished, M: Mean, Min: Minimum, Max: Maximum, Sx: Standard Error of Mean

Except from the effect of impregnation material, all interactions were found to be significant. According to impregnation material and varnish type, the mean, maximum, minimum and standard deviation values of the temperature self-combustion without flame source are as shown in Table 8.

The highest temperature in the combustion without flame source was determined in water-based varnished samples (572 °C) and the lowest in unvarnished samples (544 °C).

3.3.3. The Temperature of Ember Combustion Stage

The results of multiply variance analysis of the effect of impregnation material and varnish type on the temperature of ember combustion shown in Table 9.

Except from the effect of impregnation material, all interactions were found to be significant. The mean, maximum, minimum and standard deviation values of the temperature of ember combustion stage in terms of impregnation material and varnish type are as shown in Table 10.

The highest temperature of ember combustion stage was determined in water-based varnished samples (306.5 °C) and the lowest temperature is in synthetic varnished samples (262.7 °C).

The effects of the impregnation material and varnish types on the combustion temperature are shown in Figure 1.

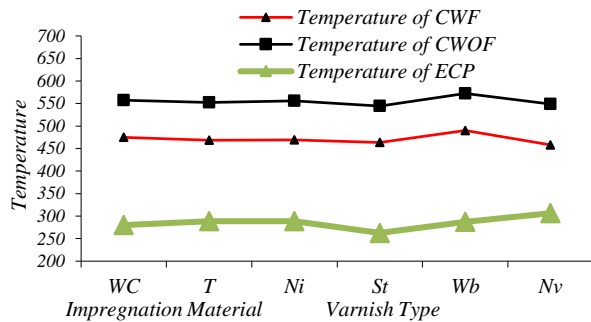


Figure 1. Impact of impregnation material and varnish type on combustion temperature

The impregnated materials showed close values at the combustion temperatures. Synthetic varnish showed minimum values on maximum and minimum combustion temperatures. Waterbased varnish increased temperatures at CWF and CWO stage.

4. CONCLUSION

Varnish types affected weight loss and temperatures occurring during combustion. Water based varnish the most decreased the weight loss. The impregnation materials raised the total time of combustion between 15-18% and reduced the demolition time. The chemical structure of the impregnation materials and the small size of the test samples may have affected the combustion and destruction times. In future studies; wood preservatives can be tested on samples in different sizes by applying different concentrations and pressures.

The varnish types reduced the total time of combustion between 19-21% and raised the demolition time between 10-22% [3-6, 38]. Wolmanit-CB raised the average temperature values in combustion with flame and combustion without flame, kept the minimum combustion temperatures high. Tanalith-E increased the maximum combustion temperature value. Water based varnish raised the average, maximum and minimum temperature values. Wolmanit-CB increased the average temperatures in the combustion with flame and combustion without flame, while it reduced temperatures of ember combustion phrase. In the case of ember combustion phrase, varnish types reduced the combustion temperatures. During all combustion stages varnish types reduced temperatures and synthetic varnish type showed the lowest temperatures. Synthetic varnish may be recommended if varnish application is to be done in a place where there is a risk of fire.

REFERENCES

- [1] Archer K. Lebow S., "Wood preservation," Prim. *Wood Process. Princ. Pract.*, 297-338, (2006).
- [2] Keskin H. and Dağlıoğlu N., "Effects of impregnation with Tanalith-E on the compression strength of some woods", *Journal of Polytechnic*, 20(3): 711-716, (2017).
- [3] Yasar ŞŞ., Fidan MS., Yaşar M., Atar M., Alkan E.,

- "Combustion properties of impregnated spruce (*Picea orientalis* L.) wood. *Construction and Building Materials*, 143: 574-579. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.141>, (2017).
- [4] Fidan MS., Yaşar ŞŞ., Yaşar M., Atar M., Alkan E., "Characterization of the Combustion Parameters of Impregnated and Varnished Cedar Wood (*Cedrus libani*)", *Forest Products Journal*, 66(5-6): 290-299, (2016).
- [5] Yasar ŞŞ., Fidan MS., Yaşar M., Atar M., "Influences of Seasonal Alterations on The Burning Characteristics of Impregnated and Surface Treated Chestnut (*Castanea Sativa* Mill) Wood", *Wood Research*, 61: 399-412, (2016).
- [6] Fidan MS., Yaşar ŞŞ., Yaşar M., Atar M., Alkan E., "Effect of seasonal changes on the combustion characteristics of impregnated cedar (*Cedrus libani* A. Rich.) wood". *Construction and Building Materials*, 106: 711-720, (2016).
- [7] Ibach R.E., "Biological Properties of Wood" *Handb. Wood Chem. Wood Compos.*, 5: 99-126, (2013).
- [8] US EPA, O. (n.d.). "Overview of Wood Preservative Chemicals". website. [Online]: Access, URL: <https://www.epa.gov/ingredients-used-pesticide-products/overview-wood-preservative-chemicals>, (2017).
- [9] Browne F., "Theories of the combustion of wood and its control," *Collections*, (2136): 72, (1958).
- [10] Ibach R.E., "Biological Properties of Wood". *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*, 5: 99-126, (2013).
- [11] McIntyre C.R., Burley J., Evans J., Youngquist J., (Eds.), "Protection from Fire" in *Encyclopedia of Forest Science*, Academic Press, San Diego, CA, 1283-1288, (2004).
- [12] Jiang J., Li J., Gao Q., "Effect of flame retardant treatment on dimensional stability and thermal degradation of wood". *Construction and Building Materials*, 75: 74-81, (2015).
- [13] Bozkurt A., Göker Y., Erdin N., "Emprenye Tekniği", *Istanbul University*, Faculty of Forestry, 3779/425, 429 s, (1993).
- [14] Lee HL., Chen GC., Rowell RM., "Thermal properties of wood reacted with a phosphorus pentoxide-amine system", *J. Appl. Polym. Sci.* 91: 2465-2481, (2004).
- [15] Lee HL., Chen GC., Rowell RM., "Fungal decay resistance of wood reacted with phosphorus pentoxide-amine system", *Holzforchung* 58, 311-315, (2004).
- [16] Keskin H., Atar M., Izciler M., "Impacts of impregnation chemicals on combustion properties of the laminated wood materials produced combination of beech and poplar veneers", *Construction and Building Materials*, 23(2): 634-643, (2009).
- [17] Keskin H., Erturk N.S., Colakoglu M.H., Korkut, S., "Combustion properties of Rowan wood impregnated with various chemical materials", *Int. J. Phys. Sci.* 8 (19) 1022-1028, (2013).
- [18] Özçifçi A. "Renk açıcı kimyasal maddelerin sapsız meşe odununun yanma özelliklerine etkileri", *Z.K.Ü.K.T.E.F. Teknoloji Dergisi*, 3-4: 63-72, (2001).
- [19] B. Uysal and A. Özçifçi, "The effects of impregnation chemicals on combustion properties of laminated wood material," *Combust. Sci. Technol.*, 176(1): 117-133, (2004).

- [20] Hawley Lee F., "Combustion of Wood", Chapter 19 in *Wood Chemistry* by Louis E. Wise and Edwin C. Jahn, 2nd ed., Reinhold, New York, (1952).
- [21] Rowell RM., Dietsberger MA., "Thermal Combustion, and Fire Retardancy of Wood," *Handb. Wood Chem. Wood Compos.*, 127-149, (2013).
- [22] Yang H., Yan R., Chen H., Lee DH., Zheng C., "Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis," *Fuel*, 86(12-13): 1781-1788, (2007).
- [23] Marney DCO, Russell LJ., "Combined fire retardant and wood preservative treatments for outdoor", *Wood Applications – a review of the literature*, *Fire Technol.* 44: 1-14, (2008).
- [24] Baysal E., "Determination of Oxygen Index Levels and Thermal Analysis of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Impregnated with Melamine Formaldehyde-boron Combinations", *Journal of Fire Science*, 20: 373-389, (2002).
- [25] Lewin M., "Flame Retarding Wood by Chemical Modification with Bromate-bromide Solutions", *Journal of Fire Science*, 15: 29-51. (1997).
- [26] Lopez R.A. (patenti bulan), "Fire Retardant Compositions and Methods for Preserving Wood Products", *United States Patent* No. 6,620,349. Patent is still current, (2003).
- [27] Ozkaya K., "The effect of potassium carbonate, borax and wolmanit on the burning characteristics of oriented strandboard (OSB)", *Construction and Building Materials*, vol. 21, pp. 1457-1462, (2007).
- [28] Baysal E., "Fire Properties of Beech Wood (*Fagus orientalis* Lipsky) Treated with Fire Retardants and Plant Extracts ", *F.Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(1): 123-134, (2003).
- [29] Tomak ED., Baysal E., Peker H., "The effect of some wood preservatives on the thermal degradation of Scots pine," *Thermochim. Acta*, 547: 76-82, (2012).
- [30] Hemel Product Catalog, website. [Online]. Access, URL: <http://hemel.com.tr> (2017).
- [31] Bozkurt Y., Göker Y., Erdin N., "Emprenye tekniği", *İ.Ü.Orman Fak. Yayınları*, İstanbul, 3779 (425): 125, 135, (1993).
- [32] Atar M., "Renk açıcı kimyasal maddelerin ağaç malzemede üstyüzey işlemlerine etkileri", *Doktora Tezi*, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara, (1999).
- [33] ASTM D 3023, "Standard practice for determination of resistance of factory applied coatings on wood products to stains and reagent", *ASTM Standards*, U.S.A., 1-3. (1998).
- [34] ASTM E 160-50, "Standard test method for combustible properties of treated wood by the cribe test", *ASTM Standards* West Conshohocken, PA, USA, (1975).
- [35] Cavdar AD., "Effect of various wood preservatives on limiting oxygen index levels of fir wood," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, 50(1): 279-284, (2014).
- [36] ASTM-D 1413-76, "Standart test methods of testing wood preservatives by laboratory soilblock cultures", *Annual Book of Astm Standarts*. USA, 452-460. (1976).
- [37] TS 6035 EN ISO 3251, "Paints, varnishes and plastics - Determination of non-volatile matter content", *TSE*, Ankara, 51, (2005).
- [38] Atar, M., Yalinkilic, A.C., Aksoy, E., "Impacts Of Bleaching Process On Combustion Properties Of Some Wood Materials", *TUBITAK Project*, Project Code: 109O043, Manager of Project: Assoc. Prof. Dr. Musa ATAR, Ankara (2010).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



Longitudinal vibration of temperature dependent bar with variable cross-section

Değişken kesitli sıcaklığa bağımlı çubuğun boyuna titreşimi

Yazar(lar) (Author(s)): Ersin DEMİR

ORCID: 0000-0001-8222-5358

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Demir E., “Longitudinal vibration of temperature dependent bar with variable cross-section”, *Politeknik Dergisi*, 21(4): 813-819, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.426643

Longitudinal Vibration of Temperature Dependent Bar with Variable Cross-Section

Araştırma Makalesi / Research Article

Ersin DEMİR*

Department of Mechatronics Engineering, Pamukkale University, Turkey

(Geliş/Received : 26.01.2018 ; Kabul/Accepted : 27.03.2018)

ABSTRACT

Vibration behavior of a bar with variable cross-section, which its material properties vary with temperature, is investigated in this study. In the analysis, not only theoretical solution but also numerical solution is performed for validation. The numerical analysis is overcome by SolidWorks program based on finite element method. Four types of effects on the bar are investigated. These are effects of temperature variation, geometric ratio, slenderness ratio and mode numbers variation. The temperature is increased from 22 °C to 250 °C. The geometric ratio is varied from 0 to $-1/L$ at intervals of $0.25/L$. The slenderness ratio is varied from $1/10$ to $1/20$ by increasing the length of bar from 200 mm to 400 mm. As for the mode numbers, the first three mode shapes are examined in the analysis. The boundary condition of the bar is taken as clamped-free. According to the results, the natural frequency decreases with increasing the temperature. The natural frequency also decreases with decreasing the slenderness ratio. But, it increases with decreasing the geometric ratio and also increases with increasing the mode number. When the theoretical and numerical results are examined, it is seen that the results are in harmony.

Anahtar Kelimeler: Bar, temperature, vibration, variable cross-section.

Değişken Kesitli Sıcaklığa Bağımlı Çubuğun Boyuna Titreşimi

ÖZ

Bu çalışmada malzeme özellikleri sıcaklıkla değişen, değişken kesitli bir çubuğun titreşim davranışları araştırılmıştır. Analizde, doğrulama için sadece teorik çözüm değil aynı zamanda sayısal çözümde yapılmıştır. Sayısal analiz, sonlu elemanları esas alan SolidWorks programı ile yapılmıştır. Çubuğa etkileyen dört tip etki araştırılmıştır. Bunlar, sıcaklık değişiminin, geometrik oranın, narinlik oranının ve mod sayısının değişimin etkileridir. Sıcaklık 22 °C'den 250 °C'ye kadar artırılmıştır. Geometrik oran, $0.25/L$ aralıklarla 0'dan $-1/L$ 'ye değiştirilmiştir. Narinlik oranı, çubuğun boyu 200 mm'den 400 mm'ye artırılarak, $1/10$ 'dan $1/20$ 'ye değiştirilmiştir. Mod sayılarına gelince, analizde ilk üç mod şekli incelenmiştir. Çubuğun sınır koşulları ankastre-serbest olarak alınmıştır. Sonuçlara göre sıcaklığın artmasıyla doğal frekans düşer. Doğal frekans, narinlik oranının düşmesiyle de düşer. Fakat geometrik oranın düşmesiyle ve mod sayısının artmasıyla artar. Teorik ve sayısal sonuçlar incelendiğinde, sonuçların uyum içinde olduğu görülür.

Keywords: Çubuk, sıcaklık, titreşim, değişken kesit.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The structural elements such as bars, beams, plates, are widely used in the engineering applications. Therefore, many studies have been made on the vibrations of structural elements [1, 2]. Among these structural elements, the bar element has a wide application area in the machine and civil engineering such as mechanisms and frame structures. Some of the studies on vibration of the bar elements are given below.

Li [3] has studied on the free longitudinal vibration analysis of multi-step non-uniform bars. He has reduced the differential equations of the free longitudinal vibrations of bars with variable distributed mass and stiffness to Bessel's equations and he has derived an analytical solution to determine the longitudinal natural frequencies and mode shapes. Bert and Zeng [4] have

applied the differential transform method to the axial vibration problems of compound bars. They have showed the accuracy, simplicity and efficiency of the differential transform method. Ma [5] has presented a new finite element formulation and algorithm for exact solutions of undamped axial vibration problems of elastic bars. They have determined the natural frequencies and the associated vibration mode shapes with their iterative procedure. Arndt *et al.* [6] have applied the adaptive Generalized Finite Element Method to free longitudinal vibration analysis of straight bars and trusses. They have shown the efficiency and convergence of the proposed method in vibration analysis of uniform and non-uniform straight bars in their studies. Velasco *et al.* [7] have recorded the sound wave in a cylindrical steel bar by using a microphone and they have obtained resonance spectrum of the bar by using a sound analysis software. Ranjbaran *et al.* [8] have proposed a new method for computation of longitudinal vibrations of multi-cracked

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : edemir@pau.edu.tr

bars. They have modelled the cracks by equivalent axial springs. They have showed the accuracy, efficiency and robustness of their method in their study. Akgoz and Civalek [9] have investigated the longitudinal free vibration analysis of axially functionally graded microbars. They have used Rayleigh-Ritz solution technique in their study. Bui *et al.* [10] have obtained the optimal configurations of circular bars under free torsional and longitudinal vibration. They have used Pontryagin's maximum principle in their study. Il'gamov [11] has investigated the longitudinal vibrations of a bar with incipient transverse cracks. He has proposed a model based on the assumption that the crack size is small compared with the bar cross-section area. Lee *et al.* [12] have proposed an enhanced spectral element model to solve the axial vibration problems of functionally graded bars.

As the literature survey is examined, it is seen that the vibration analysis of bars with variable or constant cross-section is examined with different methods. Because of the difficulties in the calculation of natural frequency of a bar which has variable material properties due to the temperature, the material properties are assumed to be constant in earlier studies. A study on the effect of the temperature on the longitudinal vibration of the bars is almost never encountered in the open literature. In this study, free longitudinal vibration of a bar, which its material properties vary with temperature is performed. The effects of temperature, geometric ratio, slenderness ratio and mode numbers on the natural frequency of the bar are investigated. Moreover, the mode shapes of bar obtained from theoretical and numerical solutions are also given in the study.

2. MATERIAL AND GEOMETRIC PROPERTIES OF THE BAR (ÇUBUĞUN MALZEME VE GEOMETRİK ÖZELLİKLERİ)

2.1. Geometric Properties (Geometrik Özellikler)

An isotropic rectangular bar as shown in Figure 1 is considered in this study. It is assumed that the width of the bar varies along x direction.

As shown in Figure 1 that b_0 is the half width of the clamped end of the bar and it is varied exponentially as follow.

$$b(x) = b_0 e^{\delta x} \quad (1)$$

In this equation, δ is geometric ratio, and the width of the bar is constant when the δ is equal to zero. The length (L) and the thickness (h) of the bar are taken as constant.

The boundary condition is assumed as clamped at one end and free at other end.

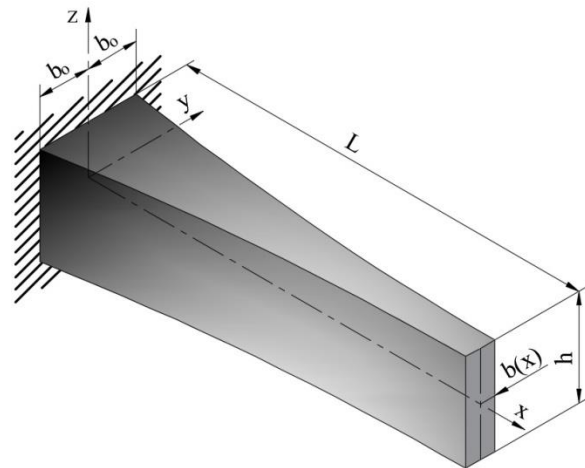


Figure 1. Rectangular bar with variable cross-section (Değişken kesili dikdörtgen çubuk)

2.2. Material Properties (Malzeme Özellikleri)

As in real life, it is assumed that the material properties of the bar change with temperature in this study. A Titanium alloy (Ti-6Al-4V) is preferred as bar material. This material has high strength, and corrosion resistance and low weight. So, this material is widely used especially in medical and space industry [13]. Variation of the material properties of some materials with temperature is given by the following formula by Shen [14].

$$P_j = P_0 (P_{-1} T^{-1} + 1 + P_1 T + P_2 T^2 + P_3 T^3) \quad (2)$$

In this equation, P_0 , P_{-1} , P_1 , P_2 and P_3 are constants related to the material and given in Table 1. T is temperature in Kelvin and P_j is material properties.

Table 1. The constants for Ti-6Al-4V [14] (Ti-6Al-4V için sabitler [14])

Material Properties	P_0	P_{-1}	P_1	P_2	P_3
Young's modulus [Pa]	122.56e+9	0	-4.586e-4	0	0

It is assumed that the bar is affected by the thermal effect in this study. The temperature is increased from 100 °C to 250 °C at intervals of 50 °C. Moreover, the room temperature (22 °C) is also taken into consideration. Then, the Young's modulus of the material is calculated for each temperature value according to Equation (2). According to the results obtained from the calculation, the variation of the Young's modulus with temperature is shown in Figure 2.

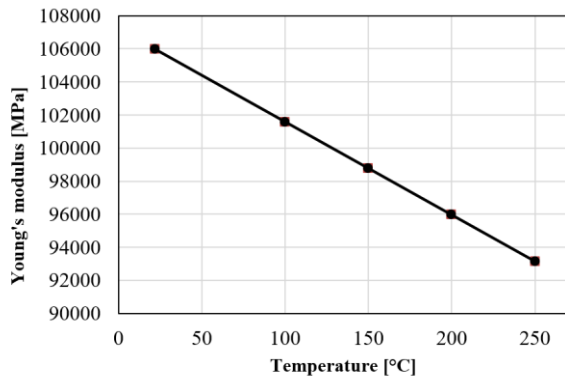


Figure 2. Variation of Young's modulus (Elastisite modülündeki değişim)

The density of bar is taken as constant since one varies slightly with temperature and it equals to 4429 kg/m³ [13].

3. THEORETICAL AND NUMERICAL SOLUTIONS (TEORİK VE SAYISAL ÇÖZÜMLER)

3.1. Theoretical Solution (Teorik Çözüm)

The equation of motion of a longitudinally vibrating bar is written as follows [15],

$$\rho A(x) \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A(x) E(T) \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \right) \quad (3)$$

where $u(x,t)$ is longitudinal displacement, ρ is density, $E(T)$ is variable Young's modulus and it is calculated from Equation (2) according to temperature, $A(x)$ is variable cross-section area and equal to multiply the variable width by constant thickness.

The longitudinal displacement $u(x,t)$ can be taken as exponential function to find the natural frequency of the bar as follows,

$$u(x,t) = U(x) e^{i\omega t} \quad (4)$$

where $U(x)$ is mode shape, ω is circular frequency and t is time. Substituting Equation (4) into Equation (3), reduces to,

$$\frac{d^2 U(x)}{dx^2} + \delta \frac{dU(x)}{dx} + \mu^2 U(x) = 0 \quad 0 \leq x \leq L \quad (5)$$

where

$$\mu^2 = \frac{\rho \omega^2}{E} \quad (6)$$

The solution of the Equation (5) is,

$$U(x) = C_1 e^{\left(-\frac{1}{2}\delta + \frac{1}{2}\sqrt{\delta^2 - 4\mu^2}\right)x} + C_2 e^{\left(-\frac{1}{2}\delta - \frac{1}{2}\sqrt{\delta^2 - 4\mu^2}\right)x} \quad (7)$$

where C_1 and C_2 are constants and determined from boundary conditions.

Because the boundary conditions of the bar are clamped-free, the following equations are applied to the Equation (7).

$$U = 0 \quad \text{at} \quad x = 0 \quad (8)$$

$$dU/dx = 0 \quad \text{at} \quad x = L \quad (9)$$

Applying these two conditions to Equation (7) yields the following vector form.

$$[K]\{C\} = \{0\} \quad (10)$$

By equalizing the determinant of the coefficient matrix $[K]$ to zero, the following characteristic equation is obtained:

$$-\frac{1}{2} e^{-\frac{1}{2}(\delta + \sqrt{\delta^2 - 4\mu^2})L} \delta - \frac{1}{2} e^{-\frac{1}{2}(\delta + \sqrt{\delta^2 - 4\mu^2})L} \sqrt{\delta^2 - 4\mu^2} + \frac{1}{2} e^{\frac{1}{2}(-\delta + \sqrt{\delta^2 - 4\mu^2})L} \delta - \frac{1}{2} e^{\frac{1}{2}(-\delta + \sqrt{\delta^2 - 4\mu^2})L} \sqrt{\delta^2 - 4\mu^2} = 0 \quad (11)$$

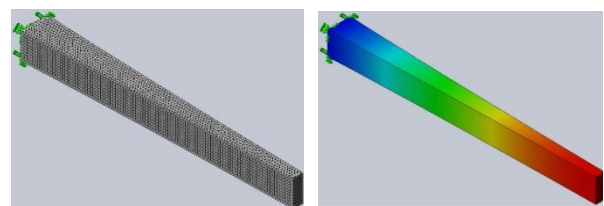
Solution of the above characteristic equation yields the natural frequencies.

Maple software is used to solve the above mathematical equations.

3.2. Numerical Solution (Sayısal Çözüm)

The numerical vibration analysis of the bar is performed by using SolidWorks commercial program based finite element method. The SolidWorks is a program that can do both design and engineering calculations of structural elements.

Firstly, the bar element is modelled in the drawing section of the program. In order to do this, two-dimensional wireframe bar model is drawn. The width of the bar is drawn according to the Equation (1). The three-dimensional model is obtained by extruding the wireframe model along to thickness direction. Then the simulation section of the program is run. In this section, the solver type is selected as FFE Solver from the Options menu. Because the material properties of the bar vary with temperature, a new material is defined in the program according to the Section 2.2. Then the clamped-free boundary condition is applied to the bar. Since the program is based on the finite element method, the model is meshed. The mesh density is selected as fine mesh. The bar model after both meshing and analysis are given in Figures 3 (a) and (b), respectively.



(a) after meshing

(b) after analysis

(ağlama sonrası)

(analiz sonrası)

Figure 3. The bar model (Çubuk model)

As an example, the element size, numbers of total nodes and total elements of the bar with $\delta = -1/L$ are obtained as 1.84961 mm, 77411 and 51975, respectively.

4. RESULTS AND DISCUSSION (SONUÇLAR VE TARTIŞMA)

In this study, the longitudinal vibration analysis of a bar with variable cross-section is investigated. It is assumed that the material properties of the bar vary with temperature.

The thickness of the bar is constant and is assumed as 20 mm. The width of the clamped end of the beam ($2b_0$) is also constant and is also assumed as 20 mm. But the width of the bar is decreasing towards the free end according to the Equation (1). The geometric ratio of the bar δ is varied from 0 to $-1/L$ ($=-1/200$) with $0.25/L$. In order to see the effects of slenderness ratio, the length of the beam is varied from 200 mm to 400 mm at intervals of 50 mm. Five models for geometric ratio and five models for slenderness ratio are examined in the study.

The abovementioned dimensions of clamped end of the bar are summarized in Table 2.

Table 2. The dimensions of clamped end of the bar (Çubuğun ankastre ucunun boyutları)

	Length (L)[mm]	Width ($2b_0$)[mm]	Thickness (h)[mm]
Values	200	20	20

The boundary condition of the bar is assumed as clamped-free. Furthermore, as for the temperature which affected the bar, it is increased from 22 °C to 250 °C. Moreover, first three mode shapes are taken into consideration for natural frequencies.

Both theoretical and numerical calculations have been made to see these effects. It can be seen from the results that the numerical and the theoretical results are in good agreement. The above mentioned effects are explained in detail below.

4.1 The Effects of Temperature (Sıcaklığın Etkileri)

In order to see the effects of temperature on the natural frequency of the bar with variable cross-section, the geometric and the slenderness ratios are taken $-0.25/L$ ($=-0.25/200$) and $1/10$, respectively. The results obtained from theoretical solution are compared with those obtained from numerical solution in Figure 4.

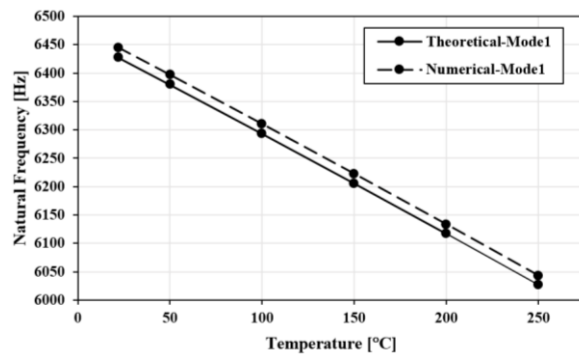


Figure 4. The effect of temperature on natural frequency (Doğal frekans üzerine sıcaklığın etkisi)

It can be seen from Figure 4 that the natural frequency of the bar with variable cross-section ($\delta=0.25$) decreases with increasing the temperature. It is also seen that this decline is about linear. When the natural frequencies obtained at room temperature and 250 °C are compared, the difference is almost 400 Hz. Therefore, it is clear that the effect of temperature on the material properties must be taken into account in vibration calculations. However, in literature, it is generally assumed that the material properties do not change with temperature in the vibration calculations.

When the theoretical and numerical results are examined, it is seen that the results are in harmony.

4.2 The Effects of Geometric Ratio (Geometrik Oranın Etkileri)

The variation of the natural frequency of the bar with geometric ratio is represented in Figure 5. In this figure, the temperature and the slenderness ratio are taken 22 °C, $1/10$, respectively,

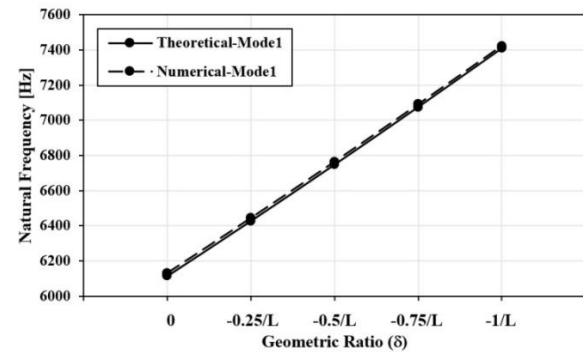


Figure 5. The effect of geometric ratio on natural frequency (Doğal frekans üzerine geometrik oranın etkisi)

The geometric ratio of the bar is varied from 0 to $-1/L$ ($=-1/200$) with $0.25/L$. This means that the width of the free end of the bar is gradually decreased. But width of the clamped end of the bar is always taken as constant. When δ is equal to zero, the cross-sectional area of the bar does not change. It can be seen from the figure that the natural frequency of the bar increases gradually with decreasing the width of the free end of the bar. If high natural frequency is desired, it is more advantageous to use the narrowing bar. Another advantage of the narrowing bar is that less material is used in the bar. The theoretical and numerical results are shown in Figure 5, and they are also in good agreement.

4.3 The Effects of Slenderness Ratio (Narinlik Oranının Etkileri)

The ratio of the width to the length of the bar is defined as slenderness ratio in this study. To see the effect of slenderness ratio of the bar, it is taken $1/10$, $1/12.5$, $1/15$, $1/17.5$ and $1/20$. In order to get these ratios, the length of the bar is increased from 200 mm to 400 mm at intervals of 50 mm while the width was fixed at 20 mm. The geometric ratio is 0 and the temperature is 22 °C. The

variation of the natural frequency of the bar with slenderness ratio is shown in Figure 6.

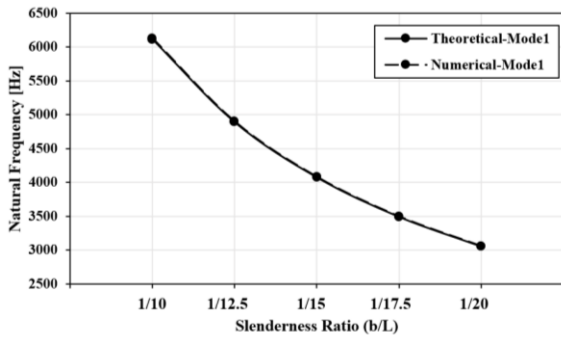


Figure 6. The effect of slenderness ratio on natural frequency (Doğal frekans üzerine narinlik oranının etkisi)

It can be seen from the Figure 6 that the natural frequency of the bar decreases with decreasing the slenderness ratio. It can also be seen from the figure that the curve decreases exponentially. In the other words, the natural frequency decreases with increasing the length of the bar.

4.4 The Effects of Variation in Mode Numbers (Mod Sayılarındaki Değişimin Etkileri)

The first three mode shapes are taken into consideration in the study. The normalized mode shapes of the bar with uniform cross-section are given in Figure 7.

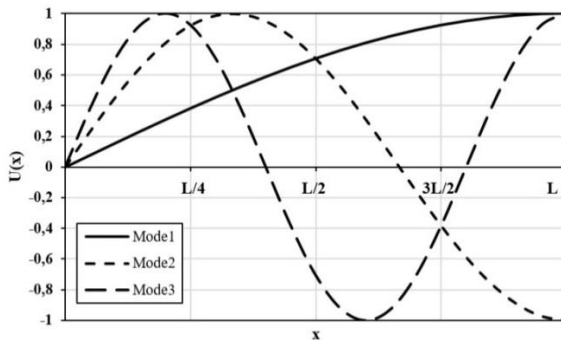


Figure 7. Mode shapes of the bar (Çubuğun mod şekilleri)

These three longitudinal mode shapes are also obtained from SolidWorks program and given in Figures 8, 9 and 10. It can be seen from the Figure 7 that there is only one peak in the curve of Mode 1. But, there are one peak and one trough in the curve of Mode 2. As for the curve of Mode 3, there are two peaks and one trough in it. The SolidWorks results shown in Figures 8-10 are supported the graph shown in Figure 7.

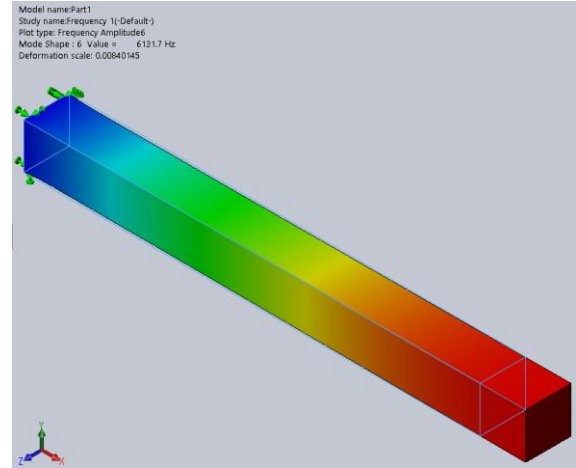


Figure 8. First mode shape (Birinci mod şekli)

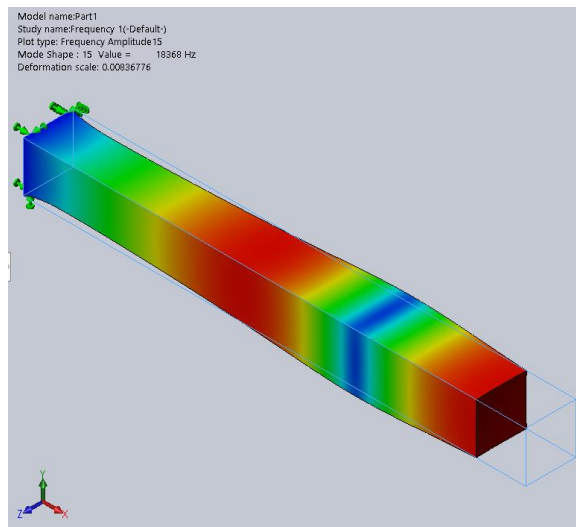


Figure 9. Second mode shape (İkinci mod şekli)

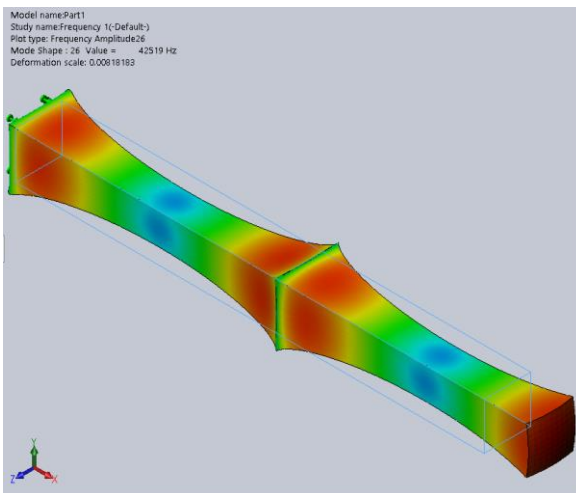


Figure 10. Third mode shape (Üçüncü mod şekli)

According to the results obtained from Figures 7-10, the results obtained from SolidWorks are in agreement with the theoretical results.

Moreover, the variation of the natural frequency of the bar with mode numbers is depicted in Figure 11.

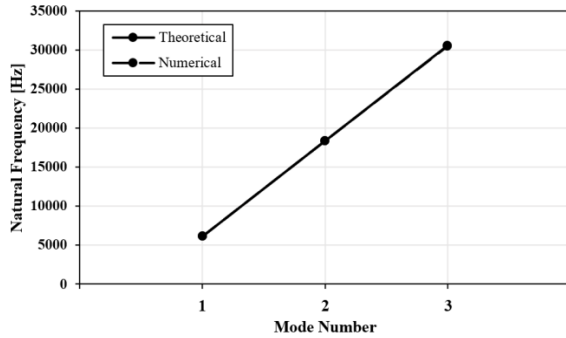


Figure 11. The effect of mode number on natural frequency (Doğal frekans üzerine mod sayısının etkisi)

In this figure, the geometric and the slenderness ratios of the bar are taken 0 and 1/10, respectively. Besides, the temperature is taken as 22 °C. As expected, the natural frequency increases gradually with increasing the mode number. It can be seen in the figure that the difference is very large when the results obtained for modes 1 and 3 are compared. Moreover, this increase appears to be almost linear.

In addition to Figure 11, Figure 12 shows the effect of temperature on the natural frequency as well as the number of modes.

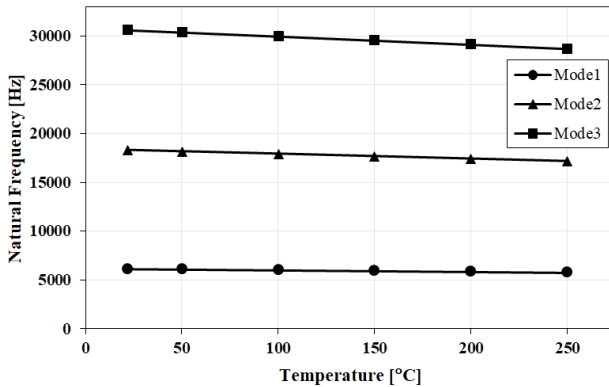


Figure 12. The effects of temperature and mode number on natural frequency (Doğal frekans üzerine sıcaklık ve mod sayısının etkileri)

In this figure, the geometric and the slenderness ratios of the bar are taken as 0 and 1/10, respectively. As mentioned before (in Section 4.1), the natural frequency of the bar decreases with increasing the temperature. But, it is seen in Figure 12 that this decrease is more for Mode 3. This means that the effect of temperature on natural frequency increases with increasing the number of modes.

The increase in natural frequency with the increase in the number of modes is also seen in Figure 12 similar to Figure 11.

5. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

The theoretical free axial vibration analysis of the temperature dependent bar with variable cross-section is investigated in this study. Furthermore, the results obtained theoretical solutions are supported by those obtained from the SolidWorks program. The effects of temperature, geometric and slenderness ratios and mode numbers on the natural frequency of the bar are studied and the following conclusions are drawn from the study.

- The natural frequency of the bar decreases with increasing the temperature.
- The natural frequency of the bar increases as the section of the bar narrows.
- The natural frequency of the bar decreases with decreasing the slenderness ratio.
- The natural frequency increases gradually with increasing the mode number and this increase is linear.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Demir E., Çalhoğlu H. and Sayer M., “Vibration analysis of sandwich beams with variable cross section on variable Winkler elastic foundation”, *Science and Engineering of Composite Materials*, 20(4): 359–370, (2013).
- [2] Çalhoğlu H., Sayer M., Demir E., “Elastic-plastic stress analysis of rotating functionally graded discs”, *Thin-Walled Structures*, 94: 38–44, (2015).
- [3] Li Q. S., “Free longitudinal vibration analysis of multi-step non-uniform bars based on piecewise analytical solutions”, *Engineering Structures*, 22(9): 1205–1215, (2000).
- [4] Bert C. W. and Zeng H., “Analysis of axial vibration of compound bars by differential transformation method”, *Journal of Sound and Vibration*, 275(3-5): 641–647, (2004).
- [5] Ma H., “Exact solutions of axial vibration problems of elastic bars”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 75(2): 241–252, (2008).
- [6] Arndt M., Machado R. D. and Scremin A., “An adaptive generalized finite element method applied to free vibration analysis of straight bars and trusses”, *Journal of Sound and Vibration*, 329(6): 659–672, (2010).
- [7] Velasco S., Roman F. L. and White J. A., “A simple experiment for measuring bar longitudinal and flexural vibration frequencies”, *American Journal of Physics*, 78(12): 1429–1432, (2010).

- [8] Ranjbaran A., Shokrzadeh A. R. and Khosravi S., "A new finite element analysis of free axial vibration of cracked bars", *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, 27(10): 1611–1621, (2011).
- [9] Akgoz B., Civalek O., "Longitudinal vibration analysis of strain gradient bars made of functionally graded materials (FGM)", *Composites Part B-Engineering*, 55: 263-268, (2013).
- [10] Bui H. L., Tran M. T., Le M. Q. and Tran D. T., "Optimal configurations of circular bars under free torsional and longitudinal vibration based on Pontryagin's maximum principle", *Meccanica*, 51(6): 1491–1502, (2016).
- [11] Il'gamov M. A., "Longitudinal vibrations of a bar with incipient transverse cracks", *Mechanics of Solids*, 52(1): 18-24, (2017).
- [12] Lee M., Park I. and Lee U., "An approximate spectral element model for the dynamic analysis of an FGM bar in axial vibration", *Structural Engineering and Mechanics*, 61(4): 551-561, (2017).
- [13] <https://en.wikipedia.org/wiki/Ti-6Al-4V>, (2018).
- [14] Shen H. S., "Functionally Graded Materials Nonlinear Analysis of Plates and Shells", *CRC Press Taylor & Francis Group*, Boca Raton, Florida, Usa, (2009).
- [15] Hagedorn P. and DasGupta A., "Vibrations and Waves in Continuous Mechanical Systems", *John Wiley & Sons Ltd*, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, England, (2007).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



Hermetik gaz yakıcı cihazlardaki atık ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi

Conversion to electric energy of waste heat energy in hermetic gas burning devices

Yazar(lar) (Author(s)): Halil İbrahim VARIYENLİ¹, Koray GÖKTEKİN²

ORCID¹: 0000-0001-6313-1786

ORCID²: 0000-0003-4496-2247

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Variyenli H. İ. ve Göktekin K., “Hermetik gaz yakıcı cihazlardaki atık ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi”, *Politeknik Dergisi*, 21(4): 821-830, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.418849

Hermetik Gaz Yakıcı Cihazlardaki Atık Isı Enerjisinin Elektrik Enerjisine Dönüştürülmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Halil İbrahim VARIYENLİ^{1*}, Koray GÖKTEKİN²

¹Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 06500, Teknikokullar, Ankara, TÜRKİYE

²Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye

(Geliş/Received : 29.01.2018 ; Kabul/Accepted : 08.03.2018)

ÖZ

Bu çalışmada, gaz yakıcı cihazlardaki atık ısı enerjisinden faydalanmak amacı ile bir termoelektrik baca sistemi tasarlanmış ve sistemin teorik analizi yapılmıştır. Tasarlanan sistem; hermetik kombilerdeki atık ısı enerjisinden elektrik enerjisi elde edilmesinde kullanılacaktır. Kalorifer konumunda hesaplamalar -20 °C ile +20 °C dış hava sıcaklıkları arasında 5 °C lik değişimlere göre ve kalorifer suyu sıcaklığı ise 35 °C ile 85 °C arasında 5 °C aralıklarla hesaplanmıştır. Kullanım suyu konumunda ise, dış hava sıcaklığı ise -20 °C ile 35 °C arasında 5 °C lik değişimlere göre ve kullanım suyu sıcaklığı ise 35 °C ile 65 °C arasında 5 °C aralıklarla hesaplanmıştır. Kalorifer konumunda, en düşük güç değeri dış hava sıcaklığı 20 °C ve kalorifer suyu sıcaklığı 35 °C'de iken 57,83 W ve en yüksek güç değeri dış hava sıcaklığı -20 °C ve kalorifer suyu sıcaklığı 85 °C'de ise 273,6 W olarak hesaplanmıştır. Kullanım suyu konumunda ise; en düşük güç değeri dış hava sıcaklığı 35 °C ve kullanım suyu sıcaklığı 35 °C'de iken 31,19 W ve en yüksek güç değeri dış hava sıcaklığı -20 °C ve kullanım suyu sıcaklığı 65 °C'de ise 273,6 W olarak hesaplanmıştır. Dış hava sıcaklığının azalması, kalorifer ve kullanım suyu sıcaklığının artmasına bağlı olarak atık gaz sıcaklığının yükselmesi ile elde edilen güç miktarının arttığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hermetik gaz yakıcı cihaz, atık ısı, elektrik enerjisi, üretim

The Conversion to Electric Energy of Waste Heat Energy in Hermetic Gas Burning Devices

ABSTRACT

In this study, to use waste heat of combi boilers thermoelectric generators mounted in flue part of the system and theoretical analysis of the system was done. The designed system will be used to generate electrical energy from waste heat in hermetic combi boilers. Calculations were done in boiler heating mode at outside air temperatures range of -20 °C and +20 °C with 5 °C variations and heating water temperature is in range of 35-85 °C with 5 °C variations. In hot water heating mode, calculations were done in outside air temperatures range of -20 °C and +35 °C with 5 °C variations and heated water temperature is in range of 35-65 °C with 5 °C variations. In boiler heating mode, the lowest power value was calculated as 57,83 W at 20 °C outside air temperature and heater temperature of 35 °C, and the highest power value was calculated as 273,6 W at -20 °C outside air temperature and heater temperature of 85 °C. In hot water heating mode, the lowest power value was calculated as 31,19 W at at 35 °C outside air temperature and supplying hot water temperature of 35 °C, and the highest power value was calculated as 273,6 W at -20 °C outside air temperature and supplying hot water temperature of 65 °C. By decreasing outside air temperature, depending on the increase in temperature of the heater and supplying hot water, it has been observed that the amount of obtained power increased by increasing the flue gas temperature.

Keywords: Hermetic combi boilers, waste heat, electrical energy, generate.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünya enerji ihtiyacı; hızlı nüfus artışı, sanayideki gelişmeler, kaynakların plansız kullanılması ve benzeri sebeplerden dolayı hızla artmaktadır. Enerji tüketiminin artmasına paralel olarak insanların maden ve enerji kaynaklarına olan talebi de artmıştır [1, 2]. Kullanımı artarak devam eden kömür, petrol ve doğalgaz tüketimi CO₂ yayılımını arttırmakta olup sera etkisine ve küresel ısınmaya neden olmaktadır [3]. Dünya enerji ihtiyacının büyük kısmını sağlayan birincil enerji kaynaklarının 2017 yılı verilerine göre kullanım miktarı 13647 MTEP

(milyon ton eşdeğer petrol) olmuştur. Dünya birincil enerji ihtiyacını karşılamada, petrol kullanımı % 31,7'lik pay ile birinci sırada yer almaktadır. Petrolü; % 28,1'lük pay ile kömür, % 21,6'lük pay ile doğal gaz takip etmektedir. Diğer enerji kaynakları ise jeotermal, güneş, rüzgâr ve ısı enerjisi kaynaklarıdır [4].

Fosil yakıtların alternatifi olan yenilenebilir enerji kaynakları; güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji, hidrolik enerji, biokütle enerjisi, dalga enerjisi, gel-git enerjisi ve hidrojen enerjisi olarak sıralanabilir [1]. Yenilenebilir enerji üretimi; yüksek maliyetli olması, bakım onarım gerektirmesi ve verimlerinin düşük olması nedeniyle kısıtlı olarak kullanılmaktadır. Ayrıca tüm enerji üretim sistemlerinde olduğu gibi yenilenebilir

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : halilv@gazi.edu.tr

enerji sistemleri de genellikle yerleşim yerlerinin dışında kurulmakta ve üretilen enerjinin bir kısmı son kullanıcılara ulaştırılırken iletim – dağıtım hatlarında kaybolmaktadır.

Termoelektrik enerji üretim sistemleri; sıcaklık farkından elektrik enerjisi üretiminde (uzay araçları, otomobiller, jeotermal kaynaklar vb.) ısı enerjisinin mevcut olduğu yerlerde kullanılabilen, uzun ömürlü ve bakım-onarım ihtiyacı duymayan sistemlerdir. Gaz yakıcı cihazlarda fosil gaz yakıtların yanması ile ısı enerjisi açığa çıkmaktadır. Ortaya çıkan ısı enerjisinin büyük kısmı ana eşanjör vasıtasıyla kalorifer veya kullanım suyunun ısıtılması için kullanılmakta, kullanılmayan ısı enerjisi ise baca gazları ile atmosfere atılmaktadır.

Yenilenebilir enerji sistemleri ile kıyaslandığında, termoelektrik enerji üretiminin birçok avantajı bulunmaktadır. Rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji, hidrolik enerji ile biokütle enerjisinden belirli bölgelerde yararlanılmakta ve üretilen enerji iletim dağıtım hatları ile kilometrelerce uzağa taşınmaktadır. Güneş panelleri ile enerji üretiminde çok fazla yüzey alanına gereksinim duyulmakta ve güneşten günün belirli bölümlerinde yararlanıldığı için yüksek maliyetli depolama sistemlerine gereksinim duyulmaktadır. Ayrıca bu sistemler periyodik bakım onarım ve temizlik gerektirmektedir. Termoelektrik sistemler ise bakım onarım gerektirmezler ve termodinamik sistemlerin kullanılmadığı yerlerde kullanılabilirler.

Fosil yakıtların yanması ile çalışan sistemlerde; sistemin tasarımına göre elde edilen ısı enerjisinin bir kısmı sistem tarafından kullanılmakta, bir kısmı ise baca gazları ile kullanılmadan çevreye atılmaktadır [5]. Çevreye atılan ısı enerjisinin geri kazanımı sistemlerin verimini arttıracak; buna bağlı olarak enerji tasarrufu sağlanacak [6], yakıt tüketimi azaltılacaktır [7]. Günümüzde enerjinin büyük çoğunluğu sınırlı rezervlere sahip fosil yakıtlardan sağlandığından, bu kaynakların verimli kullanılması bakımından atık ısıların geri kazanımı oldukça önemlidir [8]. Konvansiyonel ve kondenzasyonlu olarak ikiye ayrılan kombilerin ısı verim değerleri; günümüz teknolojisinde konvansiyonel olanlarda % 80'in, kondenzasyonlu kombilerde % 90'ın üzerindedir [9]. Enerji kaybının büyük kısmı ise kullanılmadan çevreye atılan sıcak baca gazlarından kaynaklanmakta, atık ısının farklı biçimlerde geri kazanımı sağlanmaktadır. Günümüz teknolojisinde atık ısının bir kısmı termoelektrik jeneratörler (TEJ) ile elektrik enerjisine dönüştürülerek, elektrik ihtiyacı şebekeden bağımsız olarak karşılanabilir.

Adavbiele 2013 yılında, benzinli bir motorun atık ısı enerjisinin performans ve fizibilitesini değerlendirmek amacıyla, üç egzoz gazına dayalı TEJ ve bir su soğutucu temelli TEJ kullanmıştır. Geri dönüşümsüzlüklerin yüksek olması nedeniyle TEJ'lerin toplam verimliliğin düşük olmasına rağmen, TEJ'lerin çıkış gücünü motor atık ısısından elde edilebilen bir elektrik düzeyi oluşturmuştur. Genel verimlilik yalnızca % 2,18 iken, kazanılan enerjinin kalitesini arttırmak amacıyla motorun

atık ısıdan elektrik enerjisi üretmek için hala çok fazla alana sahip olduğunu ve TEJ'lerin sera gazı azaltılmasındaki rolünün küresel iklim şemasında çok önemli olabileceğini belirtmiştir [10]. Baskar ve arkadaşları 2014 yılında, atık ısı geri kazanım sisteminin iki zamanlı bir benzinli motora uyarlanmasının fizibilitesini incelemeyi amaçlamışlardır. Birleştirilmiş ısı ve güç sisteminin güç ve ısı üretimi için karbondioksit (CO₂), kükürt dioksit (SO₂) ve azot oksitler (NO_x) emisyonunda azalma gibi yararlar sağladığını belirtmişlerdir. Deneysel performans testi, atık ısı geri kazanım sistemi ile birlikte ve atık ısı geri kazanım sistemi olmadan, iki kez çalıştırılan benzinli motorun genel verimliliğinin sırasıyla % 29,67 ve % 29,2 olduğunu, güç miktarının 90 W olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu deneysel çalışma ile yakıt tüketiminin % 4 oranında azaldığının gözlemlendiğini ve atık ısı geri kazanım sisteminin çeşitli proses endüstrilerinde boşa harcanmış enerjiyi kullanmak için daha verimli olduğunu ortaya koymuşlardır [11]. Kılıç 2010 yılında, enerji mimarlığı çerçevesinde yaptığı bir deney düzeneğiyle binlerce bacadan atık olarak çıkan baca gazının oluşturduğu hava kirliliğinin olumsuz etkisini, oluşan baca ısısından hibrit enerji elde ederek olumlu yöne çevirmeyi amaçlamıştır. Termoelektrik jeneratörün iki yüzeyi arasında sıcaklık farkı oluşturmak için bir yüzeyinde bacadan gelen atık ısı, diğer yüzeyinde ise çevre havası ve soğutma suyu döngüsü kullanmıştır. Yapmış olduğu çalışma sonunda, toplam faydanın rakamsal değerinin % 12,2 olduğu sistemde, herhangi bir ısı kaybı olmaksızın yapının sıcak su ve elektrik enerjisi ihtiyacının verimli bir şekilde karşılanabileceğini belirtmiştir [12]. Özkaymak ve arkadaşları 2014 yılında, termoelektrik jeneratörler kullanarak bir deney seti oluşturmuşlar ve jeneratörün sıcak tutulması gereken yüzeyini soba borusunda üretilen atık gaz yoluyla ısıtarak ve soğuk olan yüzeyi ise üzerinden su geçirip soğutarak sıcaklık farkı ile elektrik üretimi sağlamışlar. Yaptıkları ölçümlerde debinin sıfır olduğu düzeyde 5,11 Volt ve 0,92 Amper üretirken, termoelektrik jeneratörün performansının debinin artırılmasıyla arttığını ve debinin 0,083 lt/s olduğu anda 8,69 Volt ve 1,45 Amper'lik performans elde ettiklerini belirtmişlerdir [13]. Kumar ve arkadaşları, termoelektrik jeneratörlerin performansını incelemek için egzoz gazı ile motor soğutma sıvısı arasındaki sıcaklık farkına göre seçtikleri 18 adet termoelektrik jeneratör modülü bulunan bir ısı eşanjörü tasarlamışlar ve farklı motor çalışma koşullarında motor test cihazında test etmişlerdir. Isı eşanjörlerinin çeşitli tasarımları bilgisayar destekli tasarım programı kullanarak modellemişler ve analiz, akış, ısı aktarım özelliklerini incelemişlerdir. TEJ'in güç üretim verimliliğini en üst düzeye çıkartmak için sıcak ve soğuk yüzey arasında büyük sıcaklık farklılığı sağlanması gerektiğini, çalışmanın aynı zamanda enjektör egzozunda verimli bir şekilde uygulanabileceğini ve yakın gelecekte termoelektrik jeneratörlerin alternatörün boyutunu azaltabileceğini veya otomobillerde alternatörü ortadan kaldırdığını ortaya koymuşlardır [14].

Jadhao ve Thombare 2013 yılındaki çalışmalarında, içten yanmalı motorun atık ısısının egzoz gazı enerjisi ile kaybı açıklamış, içten yanmalı motorlardan atık ısının geri kazanılması için olası yöntemleri ve içten yanmalı motorun performansını ve emisyonlarını incelemiş, atık ısı geri kazanım sisteminin atık ısıyı geri kazanmanın ve yakıt tasarrufu yapmanın en iyi yolu olduğunu belirtmişlerdir. Atık ısı geri kazanım teknolojilerinin kullanımı ile büyük enerji tasarrufu potansiyeli olduğunu ifade etmişlerdir. Egzoz gazı atık ısı geri kazanım ve mekanik güç dönüşümünün Rankine, Stirling ve Brayton gibi termodinamik döngüler ve buhar emme yardımı ile mümkün olduğunu, atık ısı geri kazanımı için termoelektrik jeneratörlerin düşük verimlilikle düşük ısı kullandığını, termal verimlilikte ve emisyonda azalmada aynı miktarda artış için faydalı olduğunu belirlemişlerdir [15].

Literatürdeki çalışmalar, TEJ'ler vasıtasıyla motor atık ısı enerjisinden elektrik elde etme ve çevresel etkileri üzerinedir. Yapılan çalışmanın diğer çalışmalardan farkı, konvansiyonel gaz yakıcı cihazların atık ısı enerjisinden faydalanılarak TEJ'ler vasıtasıyla gaz yakıcı cihazın ihtiyacı olan elektrik enerjisini sağlamak, atık gaz sıcaklığını düşürerek çevresel etkilerini azaltmak ve ülkemizin fosil gaz yakıtta dış ülkelere bağımlılığını azaltmak üzerinedir.

Bu çalışmada, Hermetik tip kombilerin baca borusundan atmosfere atılan atık ısı enerjisi kullanılarak TEJ'ler vasıtasıyla elektrik enerjisi üretecek, atmosfere atılan ısı enerjisinin sıcaklığını düşürecek ve gaz yakıcı cihazın ihtiyacı olan elektrik enerjisini sağlayacak Termoelektrik Baca Sistemi tasarlanmıştır. Fosil yakıtlar ile santrallerde elektrik enerjisi üretiminde çevreye CO₂ salındığı bilinmektedir. Tasarlanan sistemde; sadece ısıtma amaçlı kullanılan birim yakıttan aynı zamanda elektrik enerjisi de üretileceği için gaz yakıcı cihazın enerji verimliliğinin artacağı ve ihtiyaç duyulan elektrik enerjisinin bir kısmı santraller yerine atık gazdan sağlanacağından CO₂ salınım miktarının düşeceği öngörülmektedir.

2. TEORİK ANALİZ (THEORETICAL ANALYSIS)

Termoelektrik jeneratörlerin soğuk yüzey sıcaklığı (T_c), sıcak yüzey sıcaklığı (T_h), maksimum gücü (P_{max}) gibi parametreleri ticari olarak üretimde bulunan firmalar tarafından belirtilir. Maksimum gücün elde edilmesinde termoelektrik jeneratör iç direnci (R), yük direnci (R_L) olmak üzere, yük karşılaşmasındaki ($R_L=R$) yük gerilimi ($V_{max}=VR$) ve maksimum verimlilik (η_{max}) olacaktır. Bu değerler kullanılarak devrenin elektriksel parametreleri hesaplanabilir. Bir termoelektrik jeneratörün verimliliğinin yüksek olmasında; Seebeck sabitinin (α) büyük, elektriksel direnç (R) ve termal iletkenliğin (κ_{th}) düşük değerlerde olması etkilidir. Termoelektrik jeneratörlerde kalite faktörü Eşitlik – 1 ile hesaplanır [16,17].

$$Z = \frac{\alpha^2}{R \cdot \kappa_{th}} \quad (1)$$

Termoelektrik jeneratörün elektrik direnci (R) Eşitlik – 2 ile hesaplanır.

$$R = R_L = \frac{v_{max}^2}{P_{max}} \quad (2)$$

TEJ'in verimliliği yüke bağlı olarak değişir. Yük direnci ($R_L=m.R$) olduğu varsayılır. Burada (m) yük direncinin iç dirence oranıdır. Akım denklemi ise Eşitlik – 3 ile belirlenir.

$$I = \frac{\alpha \Delta T}{(1+m)R} \quad (3)$$

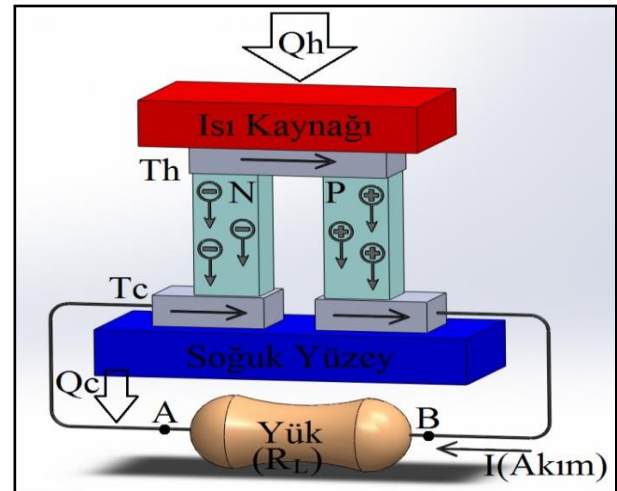
Termoelektrik jeneratörün verimliliği elektrik güç çıkışının sıcak yüzeye uygulanan termal güç girişine oranıdır ve Eşitlik – 4 ile bulunabilir.

$$\eta = \frac{I^2 R_L}{Q_h} \quad (4)$$

Termoelektrik jeneratörün termal iletkenliği Eşitlik – 5 ile hesaplanır [16,17].

$$\kappa_{th} = \frac{\alpha^2}{R.Z} \quad (5)$$

Şekil 1'de basit bir mikro modül – termo çift modellenmiştir. Güç üretimi ve soğutma amaçlı kullanılan termoelektrik modüller çok sayıda termo çiftin birleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Şekil 1'de termo çiftin ısı kaynağı olan yüzeyine (T_h), soğuk yüzeyine (T_c) sıcaklıklarının uygulandığı görülmektedir. Burada T_h sıcaklığı, T_c sıcaklığından büyük olduğundan devrede bir I akımı meydana gelmektedir.



Şekil 1. Basit bir termo çift katı modellemesi (A simple solid modeling thermocouple)

Termo çiftte, R_L yükü olmadan A ve B noktaları arasındaki ölçülen açık devre gerilimi; $V=\alpha \cdot \Delta T$ formülü ile hesaplanır. Termo çiftin uçlarına bir yük bağlandığında ise yükten geçen akım Eşitlik – 6 ile belirlenir.

$$I = \frac{\alpha \Delta T}{(R_c R_L)} \quad (6)$$

Termoelektrik mikro modüle toplam ısı (Q_h) girişi Eşitlik – 7 kullanılarak hesaplanır.

$$Q_h = \alpha \cdot T_h \cdot I - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R_c + K_c \cdot \Delta T \quad (7)$$

Tam bir modül bir sıra termoelektrik mikro modülden meydana geldiğinden, gerçek bir modüle ait jeneratör çıkış gerilimi Eşitlik – 8 kullanılarak hesaplanır.

$$V_o = \alpha_M \cdot \Delta T = I \cdot (R_M \cdot R_L) \quad (8)$$

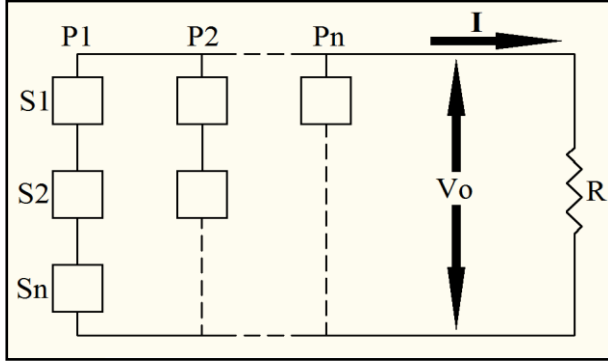
Ortalama modül sıcaklığı Eşitlik – 9 yardımıyla belirlenir.

$$T_{avg} = \frac{(T_h + T_c)}{2} \quad (9)$$

Modülün güç çıkışı (P_o), Eşitlik – 10 ile hesaplanır.

$$P_o = R_L \cdot [(\alpha_M \cdot \Delta T) / (R_M \cdot R_L)]^2 \quad (10)$$

Sonuç olarak, termoelektrik jeneratörlerin büyük bir kısmı elektriksel olarak seri, paralel veya seri - paralel düzende bağlı olan çok sayıda bireysel modülden oluşmaktadır. Bir termoelektrik jeneratörün iç yapısı Şekil 2’de görüldüğü gibi P_n adet paralel ve her paralel kolda S_n adet seri modülün birleşiminden meydana gelmektedir [17].

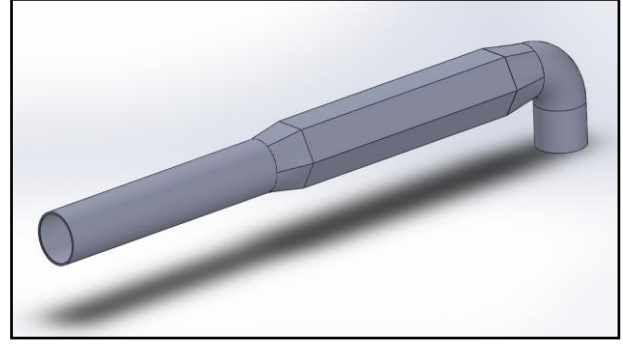


Şekil 2. Basit bir termo çiftin seri ve/veya paralel bağlantı şekli (A simple thermocouple series and / or parallel connection type)

3. MATERYAL VE METOD (MATERIALS and METHOD)

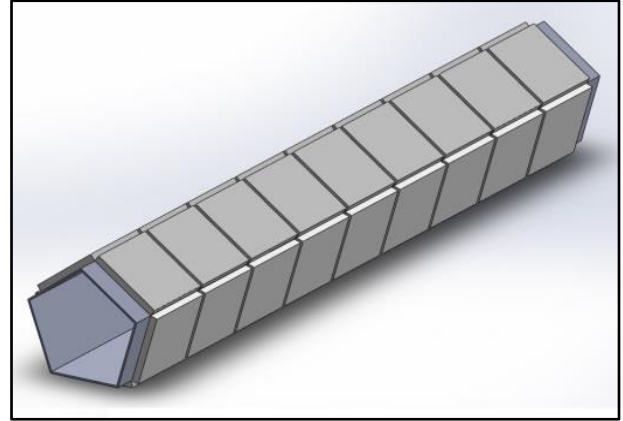
Hermetik kombinin atık gaz ısı enerjisini TEJ’ler vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürecek Termoelektrik Baca Sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan Termoelektrik Baca Sistemi için bundan sonraki bölümlerde TBS sembolü kullanılacaktır.

Hermetik kombilerin iç baca borusu ısı iletim katsayısı yüksek olan alüminyumdan üretilmektedir. Mevcut hermetik kombilerin iç baca borusu alüminyumdan ve silindirik olarak imal edilmektedir. Standart iç baca borusuna TEJ’ler monte edilemeyeceğinden beşgen olarak tasarlanmıştır. Beşgen baca borusunun geometrik şekli standart baca borusundan farklıdır. Bu nedenle beşgen baca borusunun kombiye montajı için giriş ve çıkış kısımları 6 cm çapında standart baca borusuna dönüştürülmüştür. Şekil 3’te tasarlanmış iç baca borusunun modellenmiş hali görülmektedir.



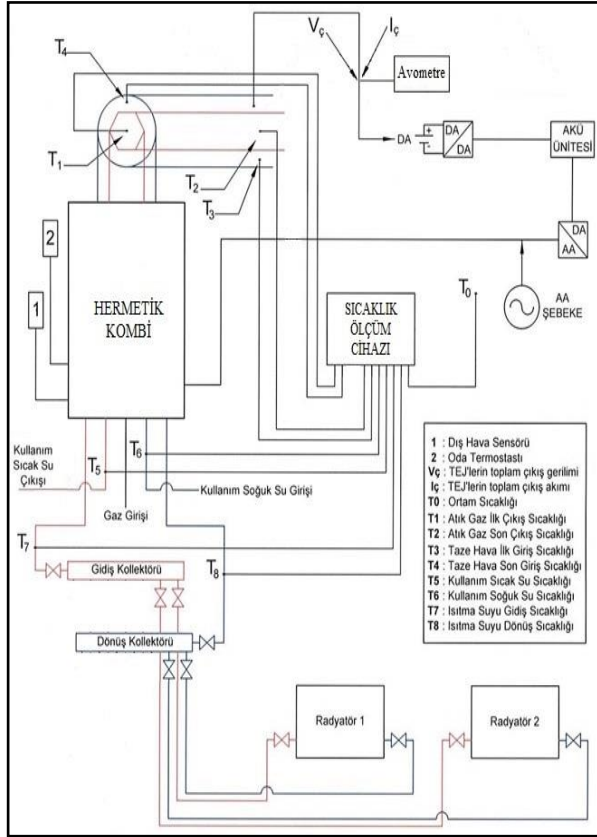
Şekil 3. TBS iç baca borusunun modellenmiş görüntüsü (Modeled image of TBS interior chimney pipe)

Hermetik kombilerin iç baca borusu yanma için gerekli oksijeni atmosferden fan vasıtasıyla alırken atık gazın ısısından faydalanarak yanma odasına ısınarak girer. Bu nedenle, TBS iç baca borusu beşgen olarak TEJ boyutlarına göre 4x40 cm ölçülerinde tasarlanmış olup, İç baca borusuna TEJ’lerin montaj detay görüntüsü Şekil 4’teki gibi modellenmiştir.



Şekil 4. Tasarlanan TBS iç baca borusuna TEJ’lerin montaj detayı (Installation details of TEJs for the designed TBS chimney pipe)

Tasarımı yapılan sisteme ait şematik görünüm Şekil 5’te görülmektedir. Tasarlanan sistemde gaz yakıcı cihaz atık ısı sıcaklığı dikkate alınarak 24 kW gücünde Baymak marka Luna 3 model hermetik tip kombiye göre tasarlanmıştır.



Şekil 5. Tasarlanan sistemin şematik görünümü (Schematic view of the designed system)

Elektrik şebekesi, güç üretim sistemi, depolama birimi, DA-DA konvertör ve DA-AA invertör elektrikselsel bağlantısı Şekil 3.3'te görüldüğü gibi tasarlanmıştır. Tasarlanan sistem, 5 ana bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler; gaz yakıcı cihazdan elde edilen doğru akımı (DA) akü ünitesine uygun hale getiren DA-DA konvertör, elde edilen enerjinin depolandığı akü ünitesi, depolanan enerjinin gaz yakıcı cihazın ihtiyaç duyduğu gerilim şekli olan alternatif akıma (AA) dönüştürülmesi için kullanılan DA-AA invertör, TBS'den elde edilen enerjinin yetersiz kalabileceği ve enerji üretiminde herhangi bir arıza olabilmesi durumları göz önünde bulundurularak AA şebekeden oluşmaktadır.

Sistemden elde edilen akım ve gerilim değerlerinin ölçülmesi için dijital avometre kullanılacaktır. Atık gaz sıcaklığı ve temiz hava sıcaklığının ölçülmesi için 16 kanallı Elimko E-680 model sıcaklık ölçüm cihazı ve sıcaklık ölçümünde kullanılacak Termokupllar ise PT 100 RTD tiptir. PT 100 RTD tip Termokupl'a ait teknik özellikler Çizelge 1'de görülmektedir.

Çizelge 1. PT 100 RTD Özellikleri (PT 100 RTD Features)

Ölçüm aralığı	-50 ~ 400 °C (-58 ~ 752 °F)
Kablo uzunluğu	2 metre
Prob uzunluğu	98 mm
Prob çapı	5 mm
Sonda malzeme	Paslanmaz

Tasarlanan TBS'de kullanılacak Tecteg firmasının TEG2-07025HT-SS model termoelektrik jeneratörüne ait sıcaklık farkına bağlı güç değerleri Çizelge 2'de verilmiştir. Modülün yüzeyleri arasında sıcaklık farkı oluştuğunda, uçlarında DC akım meydana gelmektedir. Modül maksimum 190 °C sıcaklığa dayanabilmektedir.

Çizelge 2. TEG2-07025HT-SS modülün çeşitli sıcaklık farklarında güç değerleri (Power values of TEG2-07025HT-SS module at various temperature differences)

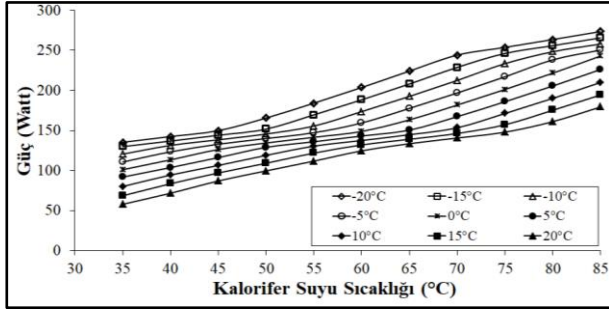
Sıcaklık Farka (°C)	Eşdeğer Gerilim (V)	Eşdeğer Akım (A)	Maksimum Güç (W)
50	0,6	1,1	0,66
80	1,0	2,0	2,00
100	1,3	2,2	2,86
120	1,4	2,4	3,36
150	1,8	3,0	5,40
170	1,9	3,2	6,08
180	2,0	3,4	6,80

4. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

TEJ'lerin verimi sıcaklık farkına bağlıdır; sıcaklık farkı arttıkça verim yükselir, sıcaklık farkı azaldıkça ise verim düşer. TEJ'lerin performansını belirleyen dış hava ve atık gaz arasındaki sıcaklık farkıdır. Kombilerdeki kalorifer ve kullanım su sıcaklığı arttıkça alev boyu büyüyecek, yanma odasında elde edilen ısı enerjisinin tamamı ısı değiştiriciye aktarılamayacak ve bunun sonucunda atık gaz sıcaklığı artacaktır. Bu nedenle, tasarımı yapılan sistemde; yaz konumunda, minimum ve maksimum kullanım suyu sıcaklığı değerlerine göre değişen atık gaz sıcaklığı ve dış hava sıcaklığı, kış konumunda ise minimum ve maksimum kalorifer suyu sıcaklığı değerlerine göre değişen atıkgaz sıcaklığı ve dış hava sıcaklığı baz alınarak elde edilebilecek elektrik enerjisi teorik olarak hesaplanmıştır.

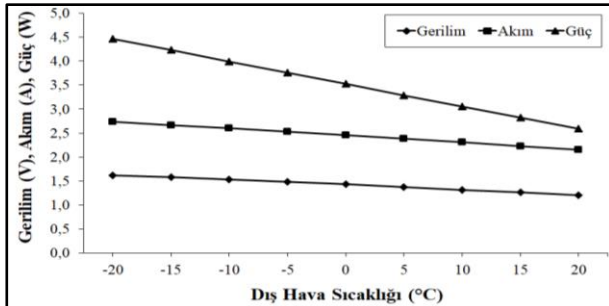
4.1. Kalorifer Konumu (Heating Position)

Şekil 6'da kalorifer suyu sıcaklığına bağlı olarak TBS'den elde edilebilecek güç değerleri teorik olarak verilmiştir. Hesaplamalar -20 °C ile +20 °C dış hava sıcaklıkları arasında 5 °C lik değişimlere göre yapılmıştır. Kalorifer suyu sıcaklığı ise 35 °C ile 85 °C arasında 5 °C aralıklarla her bir dış hava sıcaklığı değerinde hesaplanmıştır. En düşük güç değeri dış hava sıcaklığı 20 °C olduğunda ve kalorifer suyu sıcaklığı 35 °C'de 57,83 W ve en yüksek güç değeri dış hava sıcaklığı -20 °C olduğunda ve kalorifer suyu sıcaklığı 85 °C'de 273,6 W olarak hesaplanmıştır. Dış hava sıcaklığının azalması ve kalorifer suyu sıcaklığının artmasına bağlı olarak atık gaz sıcaklığının yükselmesi ile elde edilebilecek güç miktarının artacağı görülmektedir.



Şekil 6. Klorifer suyu sıcaklığına bağlı olarak hesaplanan TBS'den elde edilebilecek teorik güç değerleri (Theoretical power values that can be obtained from TBS calculated based on the water temperature of the central heating system)

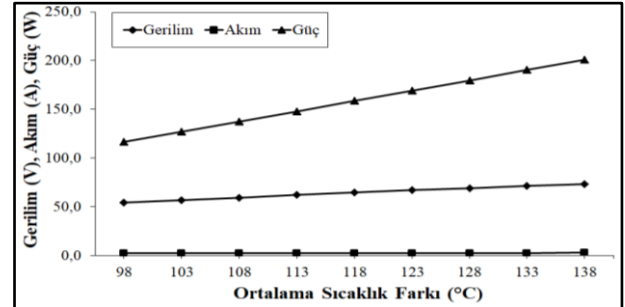
Şekil 7'de dış hava sıcaklığının bir adet TEJ'in elektriksel parametrelerine etkisi verilmiştir. Dış hava sıcaklığı azaldıkça termoelektrik jeneratörlerden elde edilecek ortalama akım, gerilim ve güç değerleri de artmaktadır. Dış hava sıcaklığı 20 °C'de klorifer suyu sıcaklığı 35-85 °C aralığında sıcaklık farkı değerlerinin ortalaması alınarak sistemden elde edilebilecek gerilim değerleri ortalaması 1,21 V olduğunda, akım değerleri ortalaması 2,15 A ve bunlara bağlı olarak güç değeri de 2,59 W olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler minimum elektriksel parametrelerdir. Dış hava sıcaklığının değeri -20 °C'de klorifer suyu sıcaklığı 35-85°C aralığında sıcaklık farkı değerlerinin ortalaması alınarak sistemden elde edilebilecek gerilim değeri ortalaması 1,63 V olduğunda, elde edilebilecek akım değeri ortalaması 2,74 A ve bunlara bağlı olarak güç değeri de 4,46 W hesaplanmıştır. Bu değerler ise maksimum elektriksel parametrelerdir. Elde edilebilecek güç değerleri, sıcaklık farkına bağlı olarak maksimum ve minimum elektriksel parametreler arasında değişmektedir.



Şekil 7. Dış hava sıcaklığının bir adet TEJ'in ortalama elektriksel parametrelerine etkisi (Effect of outside air temperature on the average electrical parameters of one TEJ)

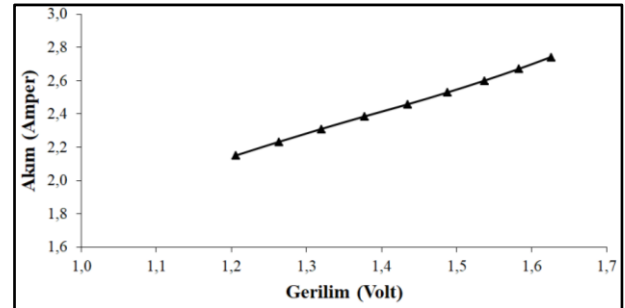
Şekil 8'de yüzeyler arasındaki ortalama sıcaklık farkına bağlı olarak TBS'den elde edilebilecek akım, gerilim ve güç değerleri verilmiştir. Ortalama sıcaklık farkı, klorifer suyu sıcaklığı değiştirildiğinde çevreye atılan atık gaz sıcaklığı ile yanma havası girişindeki dış hava sıcaklığına göre en düşük ortalama değeri 98 °C, en yüksek ortalama değeri ise 138 °C olarak belirlenmiştir. Baca sistemine 45 adet TEJ gerilimi yükseltmek amacıyla birbirine seri bağlanacak şekilde tasarlanmıştır.

Sıcaklık farkına bağlı olarak ortalama gerilim değeri 54,25 V ile 73,15 V arasında, ortalama akım değeri 2,15 A ile 2,74 A arasında, ortalama güç değeri ise 116,69 W ile 200,67 W arasında değiştiği görülmektedir.



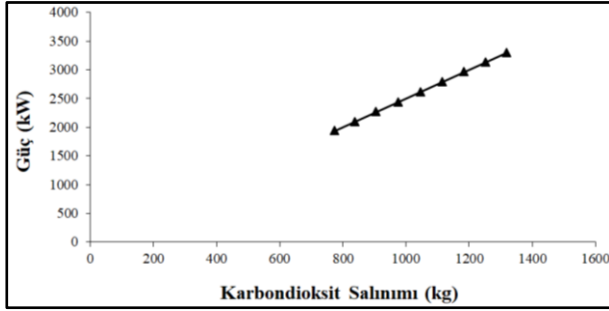
Şekil 8. Yüzeylerde oluşan ortalama sıcaklık farkına bağlı olarak TBS'den elde edilebilecek akım, gerilim ve güç değerleri (Current, voltage and power values that can be obtained from TBS depending on the average temperature difference on the surfaces)

Şekil 9'da dış hava sıcaklığının -20 °C ile 20 °C arasında her 5 °C'lik farkı için, klorifer suyu sıcaklığının 35 °C ile 85 °C arasında aldığı değerlerin ortalaması alınarak elde edilen akım ve gerilim değerleri verilmiştir. Akım değeri 2,15 A iken gerilim değeri 1,21 V değerinde, akım değeri 2,74 A iken gerilim değeri 1,63 V değerindedir. Akım değeri arttıkça gerilim değeri de artmıştır. Buna bağlı olarak TEJ'lerden elde edilen güç miktarının da arttığı görülmektedir.



Şekil 9. Akım - Gerilim Eğrisi (Current - Voltage Curve)

Şekil 10'da üretilen güç değerine bağlı olarak azalan CO₂ salınımı miktarı verilmiştir. Gaz yakıcı cihazlarda fosil yakıtların yanması ile ısı enerjisi elde edilmekte bu enerjinin bir kısmı kullanılmadan baca gazları ile çevreye atılmaktadır. Tasarlanan sistemde atık gaz ile elektrik enerjisi üretileceğinden, elde edilen enerjinin santrallerde üretilmesi sonucunda çevreye atılan CO₂ gazları oluşmayacaktır. Termik santrallerde 1 kWh elektrik enerji üretimi için çevreye ortalama olarak 0,4 kg CO₂ salınır. Fakat tek tek yakıtlara baktığımızda yerli kömürlü santrallerde bu değer 0,59 kg CO₂'ye ulaşır [18]. Şekil 6.5'teki değerler 1 kWh elektrik üretimi için 0,4 kg CO₂ salınacağı kabul edilerek hesaplanmıştır. Grafik oluşturulurken gaz yakıcı cihazın ve TBS'nin ömrü 15 yıl, gaz yakıcı cihazın 6 ay boyunca günde ortalama 6 saat çalıştığı kabul edilmiştir.

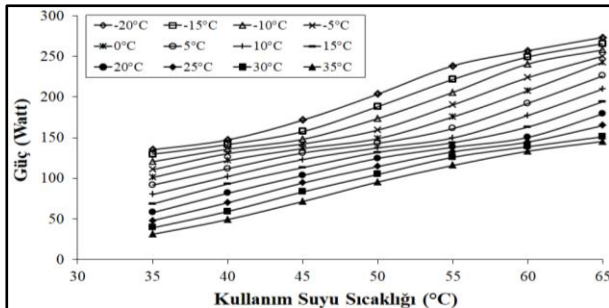


Şekil 10. TBS'den elde edilen güce bağlı olarak azalan CO₂ salınımı grafiği (Decreasing CO₂ emission graph based on TBS)

Kalorifer suyu sıcaklığı 35 °C'de iken bir adet hermetik gaz yakıcı cihazın TBS vasıtasıyla ömrü boyunca ortalama 1936,51 kW elektrik enerjisi üretebileceği ve buna bağlı olarak atmosfere 774,6 kg CO₂ salınımı engellenebileceği tespi edilmiştir. Kalorifer suyu sıcaklığı 85 °C'de iken bir adet TBS vasıtasıyla ömrü boyunca ortalama 3299,38 kW elektrik enerjisi üretecek ve buna bağlı olarak atmosfere 1319,75 kg CO₂ salınımı engellenecektir. Hermetik gaz yakıcı cihazlar ile kalorifer suyu sıcaklığı 35 °C – 85 °C arasında değişmektedir. Bu değerler arasında çalışan bir adet hermetik gaz yakıcı cihazın ortalama 2614,35 kW elektrik enerjisi üreteceği ve atmosfere 1045,74 kg CO₂ salınımı engellenmiş olacağı aşikârdır.

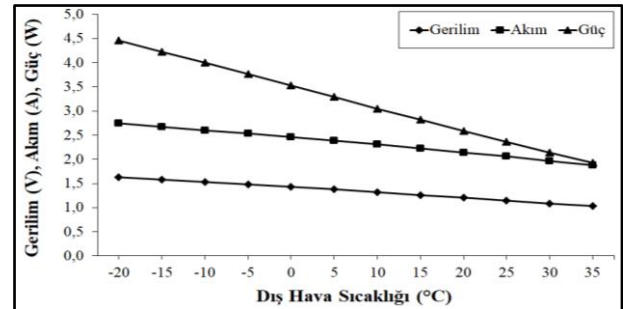
4.2. Sıcak Su Konumu (Hot Water Position)

Şekil 11'de kullanım suyu sıcaklığına bağlı olarak TBS'den elde edilebilecek güç değerleri verilmiştir. Hesaplamalar -20 °C ile +35 °C dış hava sıcaklıkları arasında 5 °C lik değişimlere göre yapılmıştır. Kullanım suyu sıcaklığı ise 35 °C ile 65 °C arasında 5 °C aralıklarla her bir dış hava sıcaklığı değerinde hesaplanmıştır. En düşük güç değeri dış hava sıcaklığı 35 °C olduğunda ve kullanım suyu sıcaklığı 35 °C'de 31,19 W ve en yüksek güç değeri dış hava sıcaklığı -20 °C olduğunda ve kullanım suyu sıcaklığı 65 °C'de 273,6 W olarak hesaplanmıştır. Dış hava sıcaklığının azalması ve kullanım suyu sıcaklığının artmasına bağlı olarak atık gaz sıcaklığının yükselmesi ile elde edilebilecek güç miktarı da artacaktır.



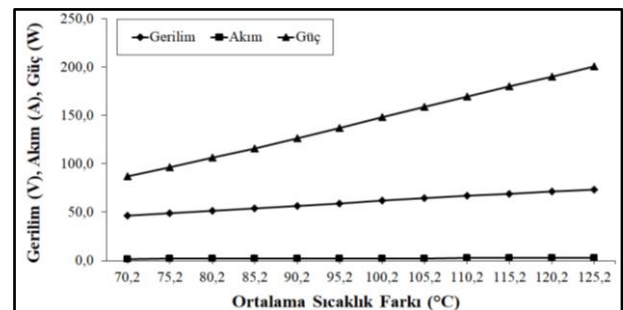
Şekil 11. Kullanım suyu sıcaklığına bağlı olarak TBS'den elde edilebilecek teorik güç değerleri (Theoretical power values that can be obtained from TBS depending on the usage water temperature)

Şekil 12'de dış hava sıcaklığının bir adet TEJ'in elektriksel parametrelerine etkisi verilmiştir. Dış hava sıcaklığı 35 °C'de kullanım suyu sıcaklığı 35-65 °C aralığındaki sıcaklık farkı değerlerinin ortalaması alınarak sistemden elde edilebilecek gerilim değerleri ortalaması 1,03 V olduğunda, akım değerleri ortalaması 1,87 A ve bunlara bağlı olarak güç değeri de 1,93 W olarak hesaplanmıştır. Dış hava sıcaklığının değeri -20 °C'de kullanım suyu sıcaklığı 35-65 °C aralığındaki sıcaklık farkı değerlerinin ortalaması alınarak sistemden elde edilebilecek minimum gerilim değeri ortalaması 1,63 V olduğunda, elde edilecek akım değeri ortalaması 2,74 A ve bunlara bağlı olarak güç değeri de 4,46 W hesaplanmıştır. Bu değerler ise maksimum elektriksel parametrelerdir.



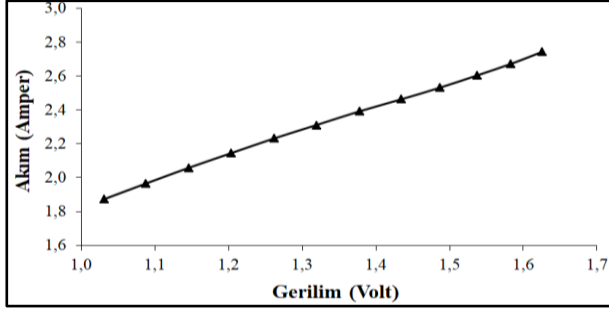
Şekil 12. Dış hava sıcaklığının bir adet TEJ'in elektriksel parametrelerine etkisi (Effect of outside air temperature on the electrical parameters of one TEJ)

Şekil 13'de yüzeyler arasındaki ortalama sıcaklık farkına bağlı olarak TBS'den elde edilebilecek akım, gerilim ve güç değerleri görülmektedir. Ortalama sıcaklık farkı, kullanım suyu sıcaklığı değiştirildiğinde çevreye atılan atık gaz sıcaklığı ile yanma havası girişindeki dış hava sıcaklığına göre en düşük ortalama değeri 70,2 °C, en yüksek ortalama değeri ise 125,2 °C olarak belirlenmiştir. Baca sistemine 45 adet TEJ gerilimi yükseltmek amacıyla birbirine seri bağlanacak şekilde tasarlanmıştır. Sıcaklık farkına bağlı olarak ortalama gerilim değeri 46,37 V ile 73,16 V arasında, ortalama akım değeri 1,87 A ile 2,74 A arasında, ortalama güç değeri ise 86,85 W ile 200,66 W arasında değiştiği görülmektedir.



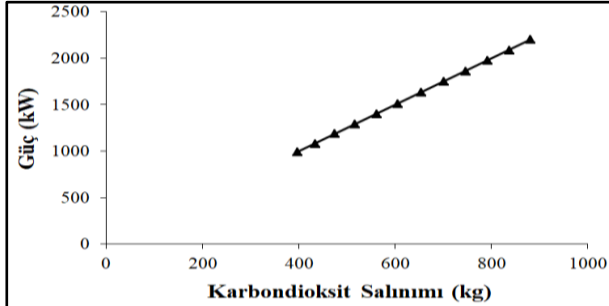
Şekil 13. Yüzeylerde oluşan ortalama sıcaklık farkına bağlı olarak TBS'den elde edilebilecek akım, gerilim ve güç değerleri (Current, voltage and power values that can be obtained from TBS depending on the average temperature difference on the surfaces)

Şekil 14'de dış hava sıcaklığının $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında her $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lik farkı için, kullanım suyu sıcaklığının $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında aldığı değerlerin ortalaması alınarak elde edilen akım ve gerilim değerleri verilmiştir. Akım değeri arttıkça güç değeri de artmıştır. Buna bağlı olarak TEJ'lerden elde edilebilecek güç miktarı da artmıştır.



Şekil 14. Akım - Gerilim Eğrisi (Current - Voltage Curve)

Şekil 15'de üretilen güç değerine bağlı olarak azalan CO_2 salınımı miktarı görülmektedir. Grafik oluşturulurken gaz yakıcı cihazın ve TBS'nin ömrü 15 yıl, gaz yakıcı cihazın 1 yıl boyunca günde ortalama 2 saat çalıştığı kabul edilmiştir.



Şekil 15. TBS'den elde edilen güce bağlı olarak azalan CO_2 salınımı grafiği (Decreasing CO_2 emission graph based on TBS)

Kullanım suyu sıcaklığı $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de iken bir adet hermetik gaz yakıcı cihaz TBS ile ömrü boyunca ortalama $990,74\text{ kW}$ elektrik enerjisi üreteceği tespit edilmiş ve buna bağlı olarak atmosfere $396,3\text{ kg CO}_2$ salınımı engellenmiş olacaktır. Kullanım suyu Sıcaklığı $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de iken bir adet hermetik gaz yakıcı cihaz TBS ile ömrü boyunca ortalama $2201,71\text{ kW}$ elektrik enerjisi üreteceği tespit edilmiş ve buna bağlı olarak atmosfere $880,69\text{ kg CO}_2$ salınımı engellenmiş olacaktır. Hermetik gaz yakıcı cihazlar ile kullanım suyu sıcaklığı $35\text{ }^{\circ}\text{C} - 65\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında değişmektedir. Bu değerler arasında çalışan bir adet hermetik gaz yakıcı cihaz ile ortalama $1581,78\text{ kW}$ elektrik enerjisi üretilen ve buna bağlı olarak atmosfere $632,71\text{ kg CO}_2$ salınımı engellenmiş olacaktır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Kalorifer konumunda elde edilebilecek minimum güç, dış hava sıcaklığı $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de ve kalorifer suyu sıcaklığı $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de iken $57,83\text{ W}$ olarak hesaplanmıştır. Kalorifer konumunda elde edilebilecek maksimum güç ise dış hava sıcaklığı $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de ve kalorifer suyu sıcaklığı $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de $273,6\text{ W}$ olarak hesaplanmıştır. Kalorifer konumunda sıcaklık farkına bağlı olarak ortalama güç değeri $119,54\text{ W}$ ile $203,67\text{ W}$ arasında değiştiği görülmüştür. Tasarlanan TBS'nin kalorifer konumunda ortalama verimi minimum % 3,33 ve maksimum % 5,55 olarak tespit edilmiştir.

Kalorifer konumunda yapılan hesaplamalara göre, bir adet hermetik gaz yakıcı cihazın ömrü boyunca ortalama $2614,35\text{ kW}$ elektrik enerjisi üreteceği ve buna bağlı olarak atmosfere $1045,74\text{ kg CO}_2$ salınımı engellenmiş olacaktır tespit edilmiştir.

Kullanım sıcak suyu konumunda elde edilebilecek minimum güç dış hava sıcaklığı $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve kullanım suyu sıcaklığı $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de $31,19\text{ W}$ olarak hesaplanmıştır. Kullanım sıcak suyu konumunda elde edilen maksimum güç ise dış hava sıcaklığı $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve kullanım suyu sıcaklığı $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de $273,6\text{ W}$ olarak hesaplanmıştır.

Kullanım sıcak suyu konumunda yapılan hesaplamalara göre ortalama güç değerleri $91,74\text{ W}$ ile $203,86\text{ W}$ arasında değişirken, bir adet hermetik gaz yakıcı cihaz ile ortalama $1581,78\text{ kW}$ elektrik enerjisi üretilen ve buna bağlı olarak atmosfere $632,71\text{ kg CO}_2$ salınımı engellenmiş olacaktır belirlenmiştir. Tasarlanan TBS'nin kullanım suyu konumunda ortalama verimi minimum % 2,56 ve maksimum % 5,66 olarak tespit edilmiştir.

Tasarımı yapılan TBS vasıtasıyla hem kalorifer hem de kullanım suyu konumunda gaz yakıcı cihaz ömrü boyunca toplam $4196,13\text{ kW}$ elektrik enerjisi üretilen ve bunun sonucunda atmosfere atılan $1678,45\text{ kg CO}_2$ salınımı engellenmiş olacaktır aşikârdır.

Çizelge 2'de en düşük elektriksel parametreler $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık farkında; gerilim $0,6\text{ V}$, akım $1,1\text{ A}$, güç $0,66\text{ W}$ ve en yüksek elektriksel parametreler ise $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık farkında gerilim 2 V , akım $3,4\text{ A}$, güç $6,80\text{ W}$ olarak belirtilmiştir. TBS'de ise kalorifer ve kullanım sıcak suyu konumlarında en düşük elektriksel parametreler $51\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık farkında; gerilim değeri $0,61\text{ V}$, akım değeri $1,33\text{ A}$, güç değeri $1,27\text{ W}$ ve en yüksek elektriksel parametreler ise $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık farkında gerilim $1,9\text{ V}$, akım $3,2\text{ A}$, güç $6,08\text{ W}$ olarak belirlenmiştir. Kullanım suyu sıcaklığının $35-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığındaki ortalama değerleri alındığında; dış hava sıcaklığı $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ için en düşük ortalama değerler olan gerilim $1,03\text{ V}$, akım $1,87\text{ A}$, güç $1,93\text{ watt}$ ve dış hava sıcaklığı $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ için en yüksek ortalama değerler olan gerilim $1,63\text{ V}$, akım $2,74\text{ A}$, güç $4,46\text{ W}$ olarak hesaplanmıştır.

Literatürde yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında; Adavbiele % 2,18, Baskar ve arkadaşları ortalama % 29,44 ve Kılıç % 12,2 verim elde etmişlerdir. Bu çalışmada minimum % 2,95 ve maksimum % 5,6 ortalama verim elde edilmiştir. Literatürde yapılan

çalışmalar genelde egzoz gazı sıcaklığından ve katı yakıtlı soba atık gaz sıcaklığından faydalanılarak TEJ'ler vasıtasıyla elektrik enerjisi elde etme üzerinedir. Bu çalışmada ise kombi atıkgaz sıcaklığından faydalanılmıştır. Sistem verimini etkileyen en önemli faktör atık gaz sıcaklığı ile soğutucu akışkan sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkıdır.

Sonuç olarak gaz yakıcı cihazlardaki atık ısı enerjisinden elektrik enerjisi üretiminin mümkün olduğu teorik olarak tespit edilmiştir. Sistemin mevcut gaz yakıcı cihaz baca sistemlerinde kullanılması ile atık ısıdan elektrik enerjisi üretilebileceği ve CO₂ salınımının azaltılabileceği öngörülmüştür.

Yarı iletken malzemelerin performansı gün geçtikçe artmakta ve yeni yarı iletken malzemeler üretilmektedir. TEJ'lerin verimlerinin artmasıyla tasarlanan sistem ile elde edilebilecek elektrik enerjisi miktarı da artacaktır. Elektrik üretiminde fosil yakıtların kullanımı sonucunda yüksek miktarda ısı çevreye atılmakta, elektrik iletim ve dağıtımında yüksek kayıplar meydana gelmektedir. Bunun sonucunda fosil yakıtlar verimsiz kullanılmaktadır. Ayrıca elektrik iletim-dağıtım sistemlerinin kurulumu oldukça maliyetlidir. Teknolojinin ilerlemesiyle; TBS ile PV panellerden oluşan hibrit bir sistem ile konutlarda şebekeden bağımsız olarak elektrik üretimi sağlanabilir. Böylece fosil yakıtlar % 90 üzerinde verimle kullanılabilir ve kullanılmadan çevreye atılan enerji % 10 seviyelerinin altına düşürülebilir.

6. TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma, 07/2015-10 kodlu proje kapsamında Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir.

KISALTMALAR VE SEMBOLLER (ABBREVIATIONS AND SYMBOLS)

KISALTMALAR

MTEP	Milyon Ton Eşdeğer Petrol
TEJ	Termoelektrik Jeneratör
TBS	Termoelektrik Baca Sistemi

SEMBOLLER

T _c	Soğuk Yüzey Sıcaklığı (°C)
T _h	Sıcak Yüzey Sıcaklığı (°C)
P _{max}	Maksimum Güç (W)
R	Elektriksel Direnç (Ω)
R _L	Yük Direnci (Ω)
V _{max}	Maksimum Yük Gerilimi (V)
η _{max}	Maksimum Verimlilik (%)
α	Seebeck sabiti (V/°C)
K _{th}	Termal İletkenlik (W/mK)
Z	Kalite Faktörü

m	Yük Direncinin İç Dirence Oranı
Q _h	Termal Güç Girişi (W)
I	Jeneratör çıkış akımı (A)
R _C	Termoelektrik mikro modülün ortalama iç direnci (Ω)
K _c	Termo Çiftin İletkenliği (W/K)
V _o	Jeneratör Çıkış Gerilimi (V)
α _M	Modülün Ortalama Seebeck Katsayısı (V/°C)
R _M	Modülün Ortalama Direnci (Ω)
T _{avg}	Ortalama Modül Sıcaklığı (°C)
P _o	Modülün Güç Çıkışı (W)

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Koç, E., Şenel, M. C., Dünyada ve Türkiye'de Enerji Durumu - Genel Değerlendirme. *Mühendis ve Makina*, 54(639): 32-44, (2013).
- [2] Kılıç, A. M., Kılıç, Ö., Türkiye'de Elektrik Üretiminde Kömür Kullanımı ve Stratejik Önemi. *Madencilik Türkiye*, 40: 74-83, (2014).
- [3] Keçebaş A., Gedik E., Kayfeci M., Fosil Yakıtların Kullanımından Kaynaklanan Hava Kirliliği Üzerine Jeotermal Enerji ve Doğalgaz Kullanımının Etkisi: Afyon Örneği. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(3): 23-30, (2010).
- [4] IEA (International Energy Agency), September 2017. *Key World Energy Statistics*, Paris, France.
- [5] Terhan, M., Çomaklı, K. Baca Gazı Atık Isısı ile Kazan Yakma Havasının Ön Isıtılmasının Fizibilitesi. *Mühendis ve Makina*, 56(668): 56-63, (2015).
- [6] Kara, O., Hürdoğan, E., Kaşka, Ö. (2015). Endüstriyel bir fırının atık ısısının enerji verimliliğine etkisinin deneysel olarak incelenmesi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 12(4): 95-101.
- [7] Çomaklı, K., Terhan, M. Sıcak su üretimi için baca gazı atık enerjinin kullanımı, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 124: 43-51, (2011).
- [8] Çomaklı, K., Terhan, M., Doğalgaz Yakıtlı Kazandan Çıkan Atık Baca Gazının Ekserji Analizi. *Mühendis ve Makina*, 56(670): 58-64, (2015).
- [9] Yılmaz, O. T., Doğalgazlı ısıtma cihazlarında (kombi) atık gazdan enerji kazanımı sağlayan yeni nesil plakalı rekuperatörün simülasyon tabanlı geliştirilmesi. *12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir, (2015).
- [10] Adavbiele, A.S., Generation of Electricity from Gasoline Engine Waste Heat. *Journal of Energy Technologies and Policy*, 3(5): 3-16, (2013).
- [11] Baskar, P., Seralathan, S., Dipin, D., Thangavel, S., Norman, C. F. I. J. and Arnold, C., Experimental Analysis of Thermoelectric Waste Heat Recovery System Retrofitted to Two Stroke Petrol Engine. *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*. 4(1): 9-14, (2014).
- [12] Kılıç, T., Termoelektrik Jeneratörler Kullanılarak Yapılardaki Atık Enerjinin Geri Kazanılması Üzerine Bir Çalışma, *Yüksek Lisans Tezi*, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 79-81, (2010).
- [13] Özkaymak, M., Baş, Ş., Acar, B., Yavuz, C., Boran, K., Tabak, S. A., Varyenli, H.İ., Asal, Ö. (2014). Atık Baca

- Gazı Kullanımı ile Termoelektrik Jeneratörlerde Elektrik Üretiminin Faydalı Kullanımının Deneysel İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part:C Tasarım ve Teknoloji*, 2(4): 289-298, (2014).
- [14] Kumar, C. R., Sonthalia, A., Goel R., Experimental Study On Waste Heat Recovery From An Internal Combustion Engine Using Thermoelectric Technology. *Thermal Science*, 15(4): 1011-1022, (2011).
- [15] Jadhao, J. S., Thombare, D. G., Review on Exhaust Gas Heat Recovery for I.C. Engine. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, 2(12): 93-100, (2013).
- [16] Kunt, M. A., İçten Yanmalı Motor Atık Isılarının Geri Kazanımında Termoelektrik Jeneratörlerin Kullanımı. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 3(2): 192-203, (2016).
- [17] Baş, Ş., Atık Baca Gazı Kullanımı İle Termoelektrik Jeneratörlerde Elektrik Üretiminin Faydalı Kullanımının Deneysel İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 36-39, (2014).
- [18] Yumurtacı, Z., Dönmez, A.H. (2013). Konutlarda Enerji Verimliliği. *Mühendis ve Makina*, 54(637): 38-43, (2013).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



Benzin için oksijenli yakıt katkıları

Oxygenated fuel additives to gasoline

Yazar(lar) (Author(s)): Abdülvahap AKMAK¹, Hakan ZCAN²

ORCID¹: 0000-0003-4416-1685

ORCID²: 0000-0002-7848-3650

Bu makaleye Őu Şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): akmak A. ve zcan H., "Benzin için oksijenli yakıt katkıları", *Politeknik Dergisi*, 21(4): 831-840, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.457956

Benzin için Oksijenli Yakıt Katkıları

Derleme Makalesi / Review Article

Abdülvahap ÇAKMAK^{1*}, Hakan ÖZCAN²

¹Kavak Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Samsun Üniversitesi, Türkiye

²Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 23.02.2018 ; Kabul/Accepted : 12.07.2018)

ÖZ

İçten yanmalı motorlardan salınan zararlı egzoz gazlarını azaltmak, yakıtın vuruntu direncini ve yenilenebilir yakıt kullanımını artırmak amacı ile benzine farklı oranlarda değişik oksijenli yakıt katkı maddeleri eklenmektedir. Sunulan bu çalışmada, geçmişte kullanılan yakıt katkıları ile günümüzde benzine eklenen oksijenli yakıt katkıları incelenmiştir. Ayrıca gelecek yıllarda kullanımı mümkün olan bazı oksijenli yakıt katkılarının üretim yöntemleri ve önemli kimyasal-fiziksel yakıt özellikleri değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Oksijenli yakıt katkıları, benzin, oktan arttırıcı, ikinci nesil biyoyakıt, yenilenebilir yakıt.

Oxygenated Fuel Additives to Gasoline

ABSTRACT

In order to reduce harmful exhaust emissions emitted from the internal combustion engines, increase the knock resistance of the fuel and usage of renewable fuel, many different oxygenated additives are added to base gasoline. In this present study, fuel additives used in the past and oxygenated additives are used nowadays have been evaluated. Moreover, oxygenates that likely used in the future, their production processes and some important physical-chemical fuel properties have been assessed.

Keywords: Oxygenated fuel additives, gasoline, octane booster, second generation biofuel, renewable fuel.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Buji ateşlemeli motorlar hafif olmaları ve bakım maliyetlerinin düşük olması nedeniyle özellikle otomobillerin tahrikinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Son yıllarda motor teknolojisinde meydana gelen gelişmeler buji ateşlemeli motorların daha verimli, daha ekonomik ve daha çevreci motorlar haline gelmesini sağlamıştır. Ancak yeni emisyon standartları ile belirlenen kirletici emisyon değerlerinin sağlanması için motor teknolojisindeki gelişmeler tek başına yetersiz kalmaktadır. Bu durum motor üreticilerinin karşılaştığı en önemli sorunlardan biri haline gelmiştir. Bu sorunun aşımı için buji ateşlemeli motorlarda kullanılan benzinin bileşimi değiştirilmektedir [1].

Benzinin fiziksel ve kimyasal özellikleri ile performansını bileşiminde bulunan hidrokarbonlar ve katkı maddeleri belirler. Benzinin bileşiminde karbon sayısı 4-12 arasında değişen çok farklı hidrokarbon türü farklı oranlarda bulunur. Bu hidrokarbon grupları farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir ve benzin içindeki miktarları benzinin yakıt özelliklerini, performansını ve emisyonlarını doğrudan etkilemektedir [1].

Benzinin bileşiminde bulunan hidrokarbonlar; parafinler (alkanlar): izo-parafinler, aromalar, naftenler, olefinler (alkenler): diolefinler ve alkinler şeklinde sınıflandırılmaktadır [2]. Bu hidrokarbon gruplarından izo-parafinler yakıtın vuruntu direncini arttırdığı için benzin içerisindeki izo-parafin oranının mümkün olduğu kadar yüksek olması istenir. Aromatik hidrokarbonlar ve olefinler de

yakıtın vuruntu direncini artırmasına rağmen, aromatik hidrokarbonların düzensiz emisyonları (formaldehit, asetaldehit, benzen, tolüen ve ksilen) arttırması, motorda karbon birikintisine neden olması, olefinlerin ise yakıtın uçuculuğunu arttırmasından dolayı benzindeki bu hidrokarbonların oranı sınırlandırılmıştır [1, 2].

Benzine, yakıtın oktan sayısını arttırıcı katkı maddeleri, oksijenli yakıt katkı maddeleri, buzlanma önleyici katkı maddeleri, deterjan bazlı katkı maddeleri, korozyon önleyici katkı maddeleri, köpük önleyici katkı maddeleri, metal deaktivatörleri, antioksidanlar, biyosidler ve boyar maddeler gibi katkıları katılır. Bu yakıt katkı maddelerinden en önemlileri, yakıtın oktan sayısını ve oksijen içeriğini arttırmak için kullanılan yakıt katkı maddeleridir. Oktan sayısı yakıtın vuruntuya karşı direncini karakterize eden bir sayıdır. Benzinin oktan sayısını arttırmadaki amaç motorun vuruntulu çalışmasını önlemektir. Benzinli motorların sıkıştırma oranının düşük olması bu motorların dizel motorlarına göre daha verimsiz çalışmasına neden olmaktadır. Ancak benzinli motorlarda yüksek sıkıştırma oranları, vuruntulu yanmadan dolayı seçilememektedir. Fakat vuruntu direnci yüksek yakıt kullanarak (oktan sayısı yüksek) benzinli motorların verimi biraz arttırılabilir. Çok yüksek oktan sayılı benzinin üretimi zor ve ekonomik olmadığı için kullanım açısından bir fayda sağlamaz [3].

Motorlu taşıtların egzozundan yayılan gazlar ciddi boyutta hava kirliliğine neden olmaktadır. Bu nedenle zararlı egzoz gazlarının çevre ve insan sağlığı üzerindeki etkilerini azaltmak için taşıtlardan salınan emisyonlar çıkarılan emisyon standartları ve yasalarla sınırlandırılmaktadır. Günümüzde motorlu taşıtlardan kaynaklı

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta: a.cakmak.tr@gmail.com.tr

emisyonlar yeni motor teknolojileri, motor optimizasyon teknikleri, katalitik konvertör, NO_x indirgeyici ve partikül filtresi gibi sistemlerin yanında yakıtların bileşimi değiştirilerek (*reformulation*) azaltılmaktadır. Fakat, yalnızca yanma sonrası kontrol sistemleri ve motor tasarımı ile belirlenen emisyon değerlerinin karşılanmasında zorluklar yaşanmaktadır. Bu nedenle düşük emisyon ve daha iyi motor performansı için yakıtların vuruşu direnci yüksek farklı oksijenli yakıt katkılarıyla harmanlanarak kullanılması gibi alternatif yöntemler tercih edilmektedir. Oksijenli yakıt katkı maddesi kullanımı bu alanda araştırmaların odak noktası olmaktadır.

Yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı ilk olarak ABD’de 1995 yılında benzindeki hidrokarbon bileşimi önemli ölçüde değiştirilmeye başlanmıştır [4]. Bu tür benzine yeniden formüle edilmiş benzin (*reformulated gasolines, RFG*) denilmektedir ve yeni bileşim ülkeden ülkeye değişiklik göstermektedir [5]. Ancak genelde, yakıtın vuruşu direncini arttırmak, karbonmonoksit (CO): hidrokarbon (HC) ve partikül madde (PM) emisyonlarını azaltmak için benzine oktan sayısı yüksek oksijenli yakıt katkıları eklenmektedir. Ayrıca düzensiz emisyonları (*formaldehit, asetaldehit, benzen, tolüen ve ksilen*) ve yakıtın uçuculuğunu azaltmak (buhar basıncı düşürülmek) için yakıt bileşimindeki aromatik ve olefin miktarı sınırlandırılmaktadır [4,5].

Ticari anlamda ilk olarak benzinin oktan sayısını arttırmak için 1923 yılında benzine kurşun tetra etil eklenmeye başlanmıştır. O yıllarda aromatik hidrokarbon, benzen gibi hidrokarbonlar ve etanol gibi bazı alkollerin yakıtın oktan sayısını arttırdığı bilinmesine rağmen üretimi ucuz olması nedeniyle kurşun tetra etil kullanımı tercih edilmiştir [6]. Kurşun tetra etil (*Tetraethyl lead: Pb(C₂H₅)₄*) etililen klor, kurşun ve sodyumun reaksiyona sokulmasıyla üretilir. Yanma sırasında oluşan kurşun oksitler yanma hızını azaltarak vuruşu önler. Sıkıştırma strokunun sonuna doğru artan silindiri içi basınç ve sıcaklık etkisiyle ortaya çıkan OH ve HC gibi aldehit radikalleri ile O ve H gibi aktif öğeler yanma reaksiyonunun başlamasına ve kimyasal reaksiyonların zincir şeklinde devam etmesine yol açar ve bu reaksiyonlar çok hızlı gerçekleşirse vuruşu yanma meydana gelir. Kurşun tetra etil, aktif öğeleri azaltıcı yönde etki ederek zincir reaksiyonlarını yavaşlatır ve vuruşu önler [3]. Yakıtın oktan sayısını arttırmak için 1150 litre benzine 1 litre kurşun tetra etil eklenmesi yeterli olmaktadır [7]. 1970 yılların sonunda motorlu taşıtların egzozundan salınan kurşun emisyonları insan sağlığına zararlı olduğu fark edilmiştir. Yanma sonucu oluşan kurşun oksitler kansere ve zihinsel hasarlara neden olması, özellikle anne karnındaki bebeklerin zihinsel gelişimini olumsuz etkilemesi, katalitik konvertöre zarar vermesi ve buji tırnakları ile supapların yüzeyini kaplaması nedeniyle benzine katılan kurşun tetra etil miktarı kademeli olarak azaltılmış ve 1996 yılında Amerika’da kullanımı yasaklanmıştır [8]. Türkiye’de ise kurşunsuz benzin 2004 yılında kullanılmaya başlanmıştır. Kurşun tetra etil günümüzde bazı uçak yakıtlarında ve gelişmemiş bazı ülkelerde halen kullanılmaktadır [4]. Kurşun tetra etil kullanımının

yasaklanmasıyla birlikte *Ferrocene*; Fe(C₅H₅)₂ ve *Manganese tricarbonyl*; CH₃C₅H₄-Mn(Co)₃ gibi bazı metal esaslı yakıt katkıları, yakıtın oktan sayısını arttırmak için kullanılmıştır. Ancak manganez oksit parçacıklarının kana karışarak sinir sistemine zarar vermesi nedeniyle bu katkıları bazı ülkelerde sadece uçak yakıtlarına ilave edilmesine izin verilmektedir [9]. Kurşun tetra etil kullanımının sınırlandırılmasıyla birlikte 1979 yılından itibaren benzine yapısında oksijen bulunan metil tersiyer bütül eter (MTBE) eklenmeye başlanmıştır. MTBE’in depolama tanklarından sızarak yer altı içme sularına karıştığı tespit edilmesi ve kanserojen olması nedeni ile 1995 yılından itibaren MTBE kullanımı sınırlandırılmış ve günümüzde Amerika’da benzine MTBE ilave edilmesi yasaklanmıştır [4]. Benzinin oktan sayısını arttırmak için kurşun tetra etil ve MTBE’ye ek olarak metanol, etanol, bütanol, tersiyer bütül alkol (TBA): tersiyer amil alkol (TAA) gibi alkoller ve etil tersiyer bütül eter (ETBE): tersiyer amil metil eter (TAME): tersiyer amil etil eter (TAEE) ve di-izopropil eter (DIPE) gibi farklı eterler kullanılmış ve bunlardan bazıları günümüzde halen kullanılmaktadır.

Günümüzde benzinin oktan sayısı, rafineri işlemi sırasında uygulanan izomerizasyon (*isomerization*): katalitik parçalama (*catalytic cracking*): yeniden oluşturma (*reforming: dehydrocyclization*) yöntemlerinin yanında vuruşu direnci yüksek oksijenli maddeler (oksijenat) eklenerek arttırılmaktadır [10]. İzomerizasyon işlemi düz zincirli parafinik hidrokarbonlar izomerlerine dönüştürülür. Katalitik parçalama işlemi yüksek basınç ve sıcaklık etkisi ile ayrıca katalizör kullanılarak büyük moleküllü hidrokarbonlar küçük moleküllü hidrokarbonlara dönüştürülür. Daha sonra bu küçük moleküllü hidrokarbonlardan dallanmış yapıda hidrokarbon molekülleri elde edilir. Yeniden oluşturma sürecinde ise düz zincirli parafinik hidrokarbonlar *siklo* parafinlere dönüştürülür. Bu şekilde dallanmış yapıda veya *siklik* yapıdaki hidrokarbon miktarı yüksek tutularak yakıtın vuruşu direnci artırılır. Ancak bu yöntemler benzinin üretim maliyetini oldukça artırır. Bu nedenle bu yöntemlere gerek kalmadıkça başvurulmaz. Benzinin oktan sayısı yine rafineri işlemi sonunda oktan sayıları yüksek olan alkol ve eter gibi oksijenli maddeler eklenerek arttırılır [10].

Aynı zamanda rafineri sürecinde, yakıt içindeki hafif hidrokarbon miktarı azaltılarak yakıtın buhar basıncı standartları karşılayacak şekilde ayarlanır. Yakıtın buhar basıncının çok yüksek olması uçucu hidrokarbon emisyonlarını (VOC: *volatile organic compounds*) artırır. Ayrıca buhar basıncı fazla olan yakıt, yakıt sisteminde buhar tıkaçına yol açar. Soğukta ilk hareketin kolay olması için de yakıt buhar basıncının çok düşük olması istenmez.

Günümüze Türkiye, Amerika ve Avrupa ülkelerinde benzinin oktan sayısını ve oksijen içeriğini arttırmak için benzine değişik oranlarda etanol, metanol gibi kısa zincirli alkoller ile farklı eterler eklenmektedir. Eklenen bu katkı maddelerinin türü ve oranı ülkeden ülkeye değişiklik göstermektedir.

Çizelge 1'de Türkiye'de TÜPRAŞ tesislerinde üretilen 95 oktan kurşunsuz benzin ile Amerika'da kullanılan bileşimi değiştirilmiş benzinin özellikleri EN 228 benzin standardı ile birlikte verilmiştir.

Çizelge 1 incelendiğinde TÜPRAŞ benzini EN 228 standardını karşıladığı görülmektedir. TÜPRAŞ tarafından piyasaya sürülen benzinde maksimum aromatik hidrokarbon, olefin ve benzen miktarı hacimsel olarak sırasıyla %35, %18 ve %1 oranında sınırlandırılmıştır. Reformüle edilmiş benzinde ise bu oranlar neredeyse yarı yarıyadır. Yine 95 oktan TÜPRAŞ benzininin kütlece oksijen içeriği %2,7 iken reformüle edilmiş benzinde bu oran %3,7'dir. Bu oksijen içeriğinin karşılanmasında TÜPRAŞ benzininde hacimsel olarak maksimum %3 metanol, %5 etanol, izopropil alkol, izobütil alkol, tersiyer bütil alkol ile beş veya daha fazla karbon atomlu eterler harmanlanarak elde edilir. Reformüle edilmiş benzinde kütlece %3,68 oksijen oranı ise hacimsel olarak %9,7 etanol ve % 0,01'den daha az MTBE ve TAME benzinle harmanlanarak elde edilir. EN 228 benzin standardında belirtilen kütlece %2,7 oksijen içeriği, benzine maksimum %5 oranında etanol ilave edilerek sağlanır ve eski tip araçlarda kullanılmak üzere üretilen benzindir. Bu standarda göre bir diğer benzin türü ise kütlece oksijen içeriği %3,7 olan ve maksimum etanol oranı %10 olan kurşunsuz benzindir.

alkoller (metanol, etanol) ve eterler ticari olarak kullanılan oksijenatlardır [14].

Benzinin oktan sayısını artırmak, buhar basıncını düşürmek ve benzine oksijen içeriği kazandırmak için alkoller ve eterler uzun yıldan beri kullanılmaktadır. Alkollerden metanol, etanol, izopropil alkol, tersiyer bütil alkol (TBA); tersiyer amil alkol (TAA) ağır moleküllü alkoller; propanol, bütanol, pentanol gibi alkoller, eterlerden metil tersiyer bütil eter (MTBE); etil tersiyer bütil eter (ETBE); tersiyer amil metil eter (TAME); tersiyer amil etil eter (TAAE); di-izopropil eter (DIPE) ve di-terciyer amil eter (di-TAE) yakıt katkıları olarak kullanılabilir. Uygulamada metanol, etanol, bütanol gibi alkoller ile MTBE ve ETBE en çok tercih edilen oksijenli yakıt katkılarıdır. Her bir alkol ve eterin fiziksel ve kimyasal özellikleri farklı olduğundan kullanılan katkı maddesinin türü ve miktarı benzinin fiziksel ve kimyasal özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Etanol, metanol gibi bazı alkoller hem saf yakıt olarak hem de yakıt katkısı olarak kullanılabilir [15]. Alkol ve eterlerin yakıt katkısı olarak kullanılması durumunda bazı avantaj ve dezavantajları vardır [16]. Alkollerin en büyük avantajı oktan sayılarının yüksek olmasıdır. Bu nedenle yüksek sıkıştırma oranları seçilerek vuruşta meydana gelmeden motorun verimi artırılabilir [17]. Bunun yanında yapılarında bulunan

Çizelge 1. TÜPRAŞ benzininin ve bileşimi değiştirilmiş (reformüle edilmiş) benzinin yakıt özellikleri ile EN 228 benzin standardı (Specification of TÜPRAŞ gasoline and reformulated gasoline with EN 228 gasoline standard) [11-13]

Özellik	TÜPRAŞ Benzini	Reformüle Edilmiş Benzin	EN 228 Benzin Standardı
Araştırma Oktan Sayısı (RON)	min. 95	-	min. 95
Motor Oktan Sayısı (MON)	min. 85	-	min. 85
Yoğunluk (kg/m ³)@15 °C	720-775		720-775
Buhar Basıncı (kPa)	yaz:45-60/kış:60-90	yaz:50/kış:90	kış:50-80
Kurşun İçeriği (mg/L)	maks. 5	-	-
Kükürt İçeriği (mg/kg)	maks. 10	(sülfür) 22,5 ppm	maks. 10
Mangan İçeriği (mg/L)	maks. 2	-	-
Olefin miktarı (hacimce %)	maks. 18	maks. 9,55	maks. 18
Aromatik miktarı (hacimce %)	maks. 35	maks. 16,4	maks. 35
Benzen miktarı (hacimce %)	maks. 1	maks. 0,53	maks. 1
Oksijen İçeriği (kütlece %)	maks. 2,7	maks. 3,68	maks. 2,7

2. OKSİJENLİ YAKIT KATKILARI: ALKOL ve ETERLER (OXYGENATED FUEL ADDITIVES: ALCOHOLS and ETHERS)

Oksijenli yakıt katkıları (oksijenatlar) molekül yapılarında bir veya daha fazla oksijen atomu içeren organik maddelerdir. Oksijenatlar, değişik alkoller, eterler, esterler ve karbonatlardan oluşur ancak primer

oksijen yanma verimini artırarak CO, HC ve PM emisyonlarını azaltır. Gizli buharlaşma ısıları yüksek olması nedeniyle silindire alınan karışımın veya havanın yoğunluğunu, dolayısıyla motorun hacimsel veriminin artırır [18]. Alkollerin kendi kendine tutuşma sıcaklığı (*auto-ignition*) ile parlama noktaları (*flash point*) benzine göre daha yüksek olması sayesinde taşıma ve depolama açısından daha güvenli yakıtlardır [19]. Isıl

değerleri düşük, gizli buharlaşma ısıları yüksek olduğu için çevrimin tüm noktalarında sıcaklıkları düşürürler böylece sıkıştırma işini azaltarak efektif verimin artmasını sağlarlar. Alkollerin NO_x ve CO₂ emisyonlarına etkisi için literatürle farklı sonuçlar mevcuttur [20]. Fakat alkoller biyokütleden üretilmeleri durumunda, alkollerin yanması sonucu oluşan karbondioksit (CO₂) tekrardan bitkiler tarafından fotosentez işleminde kullanılacağından toplam karbondioksit salınımını arttırmazlar. Ancak alkollerin üretim maliyeti benzine göre daha yüksektir. Isıl değerlerinin benzine göre düşük olması motor gücünün düşmesine ve yakıt tüketiminin artmasına neden olmaktadır. Suda çözünme oranları yüksektir ve havadaki nemi çekmeye oldukça yatkındırlar [21]. Bu yüzden benzin-alkol karışımında faz ayırımı meydana gelir ve yakıtın korozyon etkisi artar [22]. Formaldehit, asetaldehit, benzen, ksilen, tolüen ve aseton gibi düzensiz emisyonları arttırdıkları [23]. Metal ve plastik yakıt sistemi elemanlarına zarar verirler [19]. Yüksek gizli buharlaşma ısıları nedeniyle soğuk iklimlerde motorun ilk hareketinde sorunlara neden olabilirler [24]. Buhar basınçları (Reid buhar basıncı) benzine göre düşük olmasına rağmen benzinle karıştırıldıklarında oluşan alkol-benzin azeotropik karışımları yakıtın Reid buhar basıncını artırır [21, 22, 25].

Alkollerin yakıt olarak kullanımı yeni bir durum olmayıp 100 yıl öncesine kadar dayanmaktadır. Fakat o yıllarda petrolün bol ve ucuz olması nedeni ile alkoller yerine benzin tercih edilmiştir [15]. Ancak günümüzde zararlı egzoz gazlarını ve fosil yakıt kullanımını azaltmak için yenilenebilir kaynaklardan üretilen alkol ve eterlerin kullanımı önem kazanmıştır. Etanol, metanol ve bütanol gibi alkoller biyokütlenin fermantasyonu ile üretilebilir ancak bu yöntemle sadece etanolün üretimi ekonomik olmaktadır. Metanol ile propanol, bütanol ve pentanol gibi büyük moleküllü alkoller doğal gazdan veya diğer karbon kaynaklarından (kömür vb.) üretilmektedir [16].

Alkollerin kullanımı sırasında meydana gelen faz ayırımı ve yakıt buhar basıncının artması gibi önemli teknik sorunlar nedeni ile alternatif oksijenli yakıt katkıları olarak eterler kullanılmaya başlanmıştır.

Çizelge 2'de benzin ve bazı alkol ile eterlerin önemli fiziksel-kimyasal yakıt özellikleri verilmiştir. Çizelge 2'de görüldüğü gibi eterlerin yakıt özellikleri, benzin ile alkollerin yakıt özellikleri arasında yer alır. Örneğin, eterlerin ısı değeri benzinin ısı değerinden düşüktür fakat alkollerin ısı değerinden daha yüksektir. Oktan sayıları, benzinin oktan sayısından yüksek ancak alkollerin oktan sayısından daha düşüktür. Yine oksijen içerikleri alkollere göre daha azdır. Ancak eterlerin alkollere göre bazı önemli üstünlükleri vardır. Eterlerin Reid buhar basıncı düşüktür ve bu nedenle uçucu hidrokarbon emisyonlarını arttırmazlar [26]. Benzinle her oranda karışırlar ve faz ayırımı meydana gelmez. Oksijen içerikleri sayesinde CO, HC ve PM emisyonlarını azaltırlar. Ancak üretim maliyetleri yüksektir ve depolama tanklarından sızarak yer altı içme sularını kirletebilirler[27].

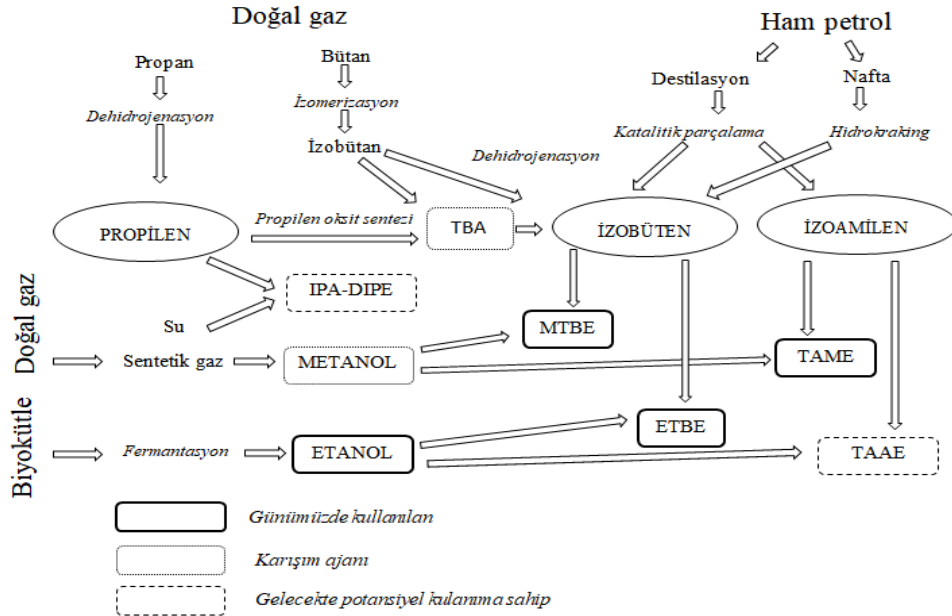
Eterler, alkollerin ve petrol esaslı hidrokarbonların asidik bir katalizör eşliğinde gerçekleşen reaksiyonu ile elde edilir. MTBE, metanolun ve petrol esaslı bir hidrokarbon olan isobütenin asidik bir katalizörle yüksek basınç ve sıcaklıkta reaksiyona sokulmasıyla elde edilir [28]. Aynı yöntemle metanol yerine etanol kullanıldığında etil tersiyer bütül eter (ETBE) elde edilir. ETBE üretiminde biyokütleden elde edilen etanol kullanıldığı için kısmen yenilenebilir bir yakıt katkısıdır. Reaksiyon sonunda ETBE ve etanol azeotropik karışımı oluşur. ETBE'in bu karışımdan basit distilasyon yöntemiyle ayırmak mümkün değildir. Ayırma işlemi için öncelikle reaksiyon ortamına su ekleyerek oluşan azeotropik moleküllerin parçalanması ve ardından isobüten, etanol ve suyun ortamdaki uzaklaştırılarak ETBE'in saflaştırılması gerekmektedir [29]. Bu saflaştırma süreci ise ETBE'in üretim maliyetini arttırmaktadır [26, 29]. Tersiyer amil metil eter (TAME) metanolun bir hidrokarbon olan izoamilen ile (C₅ olefinler) asidik bir katalizör eşliğinde reaksiyona sokularak elde edilir. Bu reaksiyonda metanol yerine etanol kullanılması durumunda tersiyer amil etil eter (TAEE) elde edilir. TAEE üretiminde biyokütlenin fermantasyonu ile elde edilen etanol kullanıldığı için kısmen yenilenebilir oksijenli yakıt katkı maddesidir. Fakat TAEE'in günümüzde ticari olarak üretimi yapılmamaktadır [25]. Di-izopropil eterin (DIPE) üretimi ise diğer eterlerin üretiminden farklıdır. DIPE üretiminde alkol kullanılmaz. Önce propilen su ile reaksiyona sokularak izopropil alkol elde edilir. Daha sonra izopropil alkol propilen ile reaksiyona sokularak di-izopropil alkol elde edilir. DIPE'nin en büyük dezavantajı benzinle karıştırıldığında kolay patlayabilen peroksitlerin oluşması ve bu nedenle taşıma, depolama ve dağıtım aşamalarında yangın açısından diğer eterlere göre daha fazla risk oluşturmasıdır [28]. Di-tersiyer amil eter (di-TAE) izoamilenin, izoamil alkol ile reaksiyona sokulması ile elde edilir [25]. İzamil alkol etanol üretiminde yan ürün olarak ortaya çıkan fuzel yağının yaklaşık olarak %60'ını oluşturur [30]. Di-TAE ucuz hammadden üretilmesi ve kısmen yenilenebilir olması nedeni ile oksijenli yakıt olarak kullanılma potansiyeline sahiptir. Ancak günümüzde bu eterin ticari olarak üretimi yapılmamaktadır [31].

Şekil 1'de bazı eterlerin üretim akış şeması verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi ETBE, TAEE üretimlerinde etanol kullanıldığı için bu eterler kısmen yenilenebilir oksijenli yakıt katkı maddeleridir. Diğer yakıt katkılarının üretiminde tamamen petrol esaslı maddeler kullanıldığı için yenilenebilir yakıt katkıları değildir. Etil eterlerin (ETBE ve TAEE) oktan sayısı MTBE'ye göre yüksek ve MTBE'ye göre Reid buhar basınçları daha düşüktür [28]. ETBE'in %47'si ve etanolün %100'ü yenilenebilirdir [32].

Fosil yakıt kullanımının ve CO₂ salınımının azaltılması açısından oldukça önemli olan tamamen yenilenebilir ETBE'in üretimi Almanya'da kurulu bir biyorafineride gerçekleştirilmiştir [33].

Çizelge 2. Benzin ve bazı oksijenli yakıt katkı maddelerinin önemli fiziksel ve kimyasal özellikleri (Important physical-chemical fuel properties of gasoline and some oxygenated fuel additives) [14, 17, 31, 34, 35, 36]

Özellik	Benzin	Metanol	Etanol	MTBE	ETBE	TAAE	TAME	DIPE
Kapalı Formül	-	CH ₄ OH	C ₂ H ₅ OH	C ₅ H ₁₂ O	C ₆ H ₁₄ O	C ₇ H ₁₆ O	C ₆ H ₁₄ O	C ₆ H ₁₄ O
Mol Kütlesi (kg/kmol)	-	32,04	46,07	88,15	102,18	116,21	102,18	102,18
Oksijen içeriği (küt.%)	-	49,93	34,8	18,2	16	13,8	16	16
Yoğunluk (kg/m ³) @ 20 °C	760	792	789	758	736	761	766	721
Gizli Buharlaşma Entalpisi (kJ/kg) @ 20 °C	307	1103	873	340	306	-	-	318
Stokiyometrik H/Y Oranı	14,6	6,5	8,95	11,76	12,17	12,49	12,17	12,17
Atlı Isıl Değer (kJ/kg)	43000	20000	26900	35200	36000	37000	36000	39300
Reid Buhar Basıncı (kPa)	41-103	31,7	14,3	53,8	30,2	11,8	9>	15.9>
Araştırma Oktan Sayısı	-	111	108	116	118	>105	>105	>105
Motor Oktan Sayısı	-	92	92	101	-	-	-	-


Şekil 1. Bazı eterlerin üretim akış şeması (Production process of some ethers) [28]

3. DİĞER OKSİJENLİ YAKIT KATKILARI (OTHER OXYGENATED FUEL ADDITIVES)

Yukarıda bahsedilen oksijenli yakıt katkılarının çoğu günümüzde kullanılmasına rağmen üretim maliyetlerinin yüksek olması, uygulamada bazı teknik sorunlarla karşılaşılması, eterlerin yer altı sularını kirletmesi ve petrol esaslı katkıların olması sebebi ile araştırmacılar yenilenebilir kaynaklardan üretilebilen (özellikle biyokütle) ekonomik ve oksijen içerikli yeni yakıt katkı maddeleri üzerinde çalışmaktadırlar. Biyoyakıtlar birinci nesil ve ikinci nesil biyoyakıtlar olarak iki sınıfa ayrılabilir. Gıda amaçlı tüketilen ve tarımsal ürünlerden elde edilen biyoyakıtlar (etanol, biyodizel) birinci nesil biyoyakıtlardır [37]. Birinci nesil biyoyakıtların ticari olarak üretimi yıllardır birçok ülkede yapılmaktadır. Bu yakıtların gıda amaçlı tarımsal ürünlerden elde edilmesi, dünyada gıda fiyatlarının artmasına ve ayrıca mevcut gıda krizinin büyümesine yol açtığından dolayı tepki çekmekte ve önemini yitirmektedir [19]. Bununla birlikte ülkelerin hedeflediği biyoyakıt kullanım oranları dikkate alındığında artan nüfusa rağmen tarım alanlarının çoğunun biyoyakıt üretimine ayrılmasını gerektirmesi, gıda üretim alanlarının azalmasına ve gıda krizinin

derinleşmesine neden olacaktır. Bu nedenle biyoyakıt üretiminde gıda amaçlı tüketilmeyen hammaddelerin kullanılmasını zorunluluk haline gelmiştir. İkinci nesil biyoyakıtlar gıda olarak tüketilemeyen örneğin; jatrofa yağı, alg (su yosunu) gibi bitkiler, selülozik tarımsal ve orman atıklarından elde edilmektedir [38]. Günümüzde ikinci nesil biyoyakıt üretimi ticari olarak yapılmamaktadır. Ancak bazı ülkeler ikinci nesil biyoyakıtların ticari üretimini ve kullanımını artırmak amacı ile bazı yasal düzenlemeler yapmakta ve hedefler koymaktadır. Örneğin ABD’de tarımsal ürünlerden etanol üretimi yerine selülozik bitkilerden etanol üretimi zorunlu hale getirilmiştir. Yine AB ülkeleri 2020 yılında ulaşımda kullanılan biyoyakıt ihtiyacını tarımsal olmayan ürünlerden elde etmeyi planlamıştır [32]. Ayrıca Uluslararası Enerji Birliği (IEA) 2050 yılında küresel çapta yük ve yolcu taşımacılığında kullanılan yakıtın %27’sini ikinci nesil biyoyakıtlardan karşılamayı hedeflemiştir [39].

Biyoyakıt üretim teknolojisinde meydana gelen gelişmeler ve bilim insanlarının yoğun çabaları neticesinde yukarıda bahsedilen oksijenatlardan farklı olarak yakıt katkısı olarak kullanılacak yeni oksijenli yakıt katkıları üretilmiştir. Üzerinde çalışmaların

sürdüğü ve gelecekte kullanılma potansiyeline sahip yeni oksijenli yakıt katkı maddelerinden en önemlileri; Gliserin tert-bütül Bütül Eter (GBTE): terpinol, di-metil karbonat, feniletanol, ETBE/etanol azeotropik karışımları, bütanol, etil asetat, metil asetat ve 2,5 dimetilfuran (DMF) olduğu söylenebilir.

Gliserin tert-bütül eter (GTBE): Gliserinin isobüten ile heterojen asidik bir katalizör varlığında reaksiyona (eterleşme reaksiyonu) sokularak elde edilir [40,41]. Transesterifikasyon yöntemi ile biyodizel üretiminde reaktanların kütlece %10'u kadar gliserin yan ürün olarak ortaya çıkar [42]. Gliserin yüksek viskozite ve düşük oktan sayısına sahip olması ve benzin/dizel ile karışmaması nedeni ile motorlarda doğrudan yakıt olarak kullanılmamaktadır [43]. Bunu yerine gliserinin isobüten ile eterifikasyonu gerçekleştirilerek elde edilen gliserin ter-bütül eterin, bugün kullanılan MTBE ve ETBE'e alternatif bir oksijenli yakıt katkı maddesi olacağı düşünülmektedir [44]. Gliserinin, isobüten ile eterifikasyon reaksiyonu sonunda tert-mono bütül eter (MTBG): di-tert-bütül eter (DTBG): ve tri-tert-bütül eter (TTBG) ile yan ürün olarak isobütenin dimerleri oluşur. Bu eterlerden mono-eterler benzin için iyi bir katkı maddesi olduğu, di-eterler ve tri-eterler ise iyi karışma karakteristikleri, ayrıca yakıtın soğukta akış özelliklerini iyileştirdikleri için dizel ve biyodizel için uygun katkı maddeleri olduğu belirtilmektedir [40, 45, 46]. Gliserin tert-bütül eter tek bir molekül olmayıp dallanmış yapıdaki farklı eterlerin karışımıdır ve bu eter karışımının oktan sayısı (RON:112-128, MON: 91-92) yüksek [47] setan sayısı ise düşüktür [48]. Bu nedenle bu eterlerin dizel/biyodizel yakıtı ile karıştırılması durumunda standartlarla belirlenen minimum setan sayısının elde edilmesi için setan artırıcı bazı katkıların kullanılması gerekir [48]. Gliserin eter üretiminde saflık derecesi yüksek olan gliserin ve isobütenin kullanılması gerekmektedir [49]. Bu durum gliserin eterlerin üretim maliyetini arttırmaktadır [50]. Yanı sıra literatürde pilot ölçekte gliserin eter üretimi gerçekleştirilmemiştir. Bu nedenle tam anlamıyla üretim maliyeti belirlenememiştir [40]. Gliserin eterlerin yakıt katkısı olarak kullanımı ekonomik olmasına bağlıdır [48]. Gliserin eter üretiminin ekonomik olması ise doğrudan gliserin ve isobütenin miktarına bağlıdır. 2020 yılında biyodizel üretiminin 36 milyon tona ulaşacağı ve bu üretimden 3 milyon ton gliserin elde edileceği tahmin edilmektedir [51]. Bu miktardaki gliserinin tamamı gıda, boya ve kozmetik gibi sektörlerde değerlendirilmesi mümkün olmamakla birlikte çevresel sorunlara yol açma potansiyeline sahiptir [43, 52, 53]. Dolayısıyla gliserinin oksijenli yakıt katkısı üretiminde kullanılması ile hem gliserinin neden olacağı çevre sorunlarının önüne geçilecek hem de biyodizelin üretim maliyetini düşürecektir [40]. Gliserinden değişik kimyasal yöntemlerle üretilen gliserin eter, karbonatlar, ketal ve solketallar oksijenli yakıt katkısı olarak kullanılma potansiyeline sahiptir [40, 48, 53]. Ancak üretim maliyeti, yakıt özellikleri ve dönüşüm verimi dikkate alındığında GTBE'nin diğer gliserin esaslı katkı maddelerine göre daha avantajlıdır

[48, 54]. Bu nedenle oksijenli yakıt katkısı üretiminde gliserinin eterifikasyonu dikkatleri çeken önemli bir yöntemdir [49, 55].

İsobüten (C₄) rafineride ham petrolün katalitik parçalanması ile elde edilir. Ayrıca şekerin fermantasyonu ile de üretilebilir [56]. Ancak isobütenin maliyeti gliserinin maliyetinden daha fazladır [57]. İsobütenin yenilenebilir kaynaklardan üretilmesi gliserin eterin tamamen yenilenebilir yakıt katkısı olmasını sağlayacaktır. GTBE üretiminde isobütenin yerine propilen oksit üretiminde yan ürün olarak ortaya çıkan Tersiyer bütül alkol (TBA) de kullanılabilir [58, 59, 60]. Gliserinin aseton ile reaksiyonunda (heterojen asidik katalizör varlığında) oksijenli bir ürün "ketal (solketal)" elde edilir. Solketal MTBE'in yerine kullanılacak potansiyele sahip bir oksijenli bileşiktir. Aseton petrol esaslı bir madde olduğu için solketal tamamen yenilenebilir değildir. Ancak aseton biyokütleden de üretilebilir. Bu durumda solketal tamamen yenilenebilir bir oksijenli yakıt katkısı olacaktır. Solketalın hacimsel olarak %5 oranında benzine katılması durumunda karışımın oktan sayısı 2,5 artar [53].

Gliserinin isobütenin yerine rafineri işlemi sırasında elde edilen benzin (*FCC gasoline: Fluid Catalytic Cracking gasoline*) ile doğrudan yüksek basınç altında katalizörle reaksiyona sokularak gliserin eterlerin oluşması sağlanmaktadır. Bu yöntemle elde edilen yakıtın oktan sayısı benzinden daha yüksek, buhar basıncı (RVP) ise daha düşüktür. Distilasyon karakteristiği ise benzinin distilasyon karakteristiğine benzerdir. Bu yöntemle elde edilecek yakıt miktarı da artmaktadır [61]. Gliserin yerine benzinin etanol ile eterifikasyonu da yapılabilir [62]. Ürünlerde etanol bulunacağı için yakıtın oktan sayısı gliserin ile eterleşme reaksiyonuyla elde edilen yakıttan daha yüksektir [61]. Etanol ile eterleştirilen benzinin Reid buhar basıncı benzin-etanol karışımından daha düşüktür [63]. Bu eterleşme reaksiyonunda yakıt içindeki olefinik hidrokarbonlar reaksiyona girerek azaltılır. Yakıtın uçuculuğunu arttıran olefinik hidrokarbonların rafineri işlemi sırasında ek bir maliyetle benzin içindeki miktarı sınırlandırılır. Benzinin etanol ile eterleşme reaksiyonu sayesinde benzin içindeki olefinik hidrokarbon miktarı azaltılarak yüksek oktan sayılı ve buhar basıncı daha düşük oksijenli yakıt elde edilebilir [63].

Terpinol: Benzinin oktan sayısını arttırmak için kullanılacak yenilenebilir oksijenli yakıt katkılarında biridir. Terpinol çam ağacından elde edilen reçineye orto fosforik asit eklenmesiyle üretilir [64]. Ayrıca limonenden de kimyasal yöntemlerle üretilebilir [65]. Isıl değeri etanolden yüksektir. Oktan sayısı 104 olan terpinolun vuruntu direnci hacimce %5 oranında etanol içeren benzine göre daha yüksektir [66]. Terpinol, benzinin vuruntu direncini arttırmak için yeni bir oksijenli yakıt katkı maddesi olarak kullanılabilir.

Bütanol: Son yıllarda benzine katkı maddesi olarak kullanılacak büyük molekülü alkollerden biri olan bütanol araştırmacıların dikkatini çekmiştir [67].

Bütanolün enerji içeriği ve buhar basıncı dikkate alındığında küçük moleküllü alkollere göre ve MTBE'e göre oldukça avantajlı olduğu görülmektedir. 105 gibi yüksek oktan sayısına sahip olan izobütanol özellikle benzin için belirlenen buhar basıncı limit değerlerinin, yakıt içindeki hafif HC bileşenleri uzaklaştırılmadan karşılanmasını kolaylaştırmaktadır [68].

Di-metil karbonat (DMC): Sanayide solvent olarak kullanılan önemli bir kimyasaldır. Oktan sayısı yüksek olduğu için benzin katkı maddesi olarak da kullanılabilir. DMC karbondioksitin metanol ile katalizör olarak ZnO kullanılarak gerçekleştirilen reaksiyondan elde edilir [69]. İnsan ve çevre sağlığı için toksik etkiye sahip değildir [70]. Kütlece %53,3 oksijen içermektedir. Kapalı formülü $C_3H_6O_3$ şeklindedir. Oktan sayısı yüksektir (101-116). Ancak ısı değeri (15700kJ/kg) benzinin ve etanolün ısı değerinden daha düşüktür [71]. Bu özellikleri ile DMC benzinin oktan sayısını arttıracak oksijenli yakıt katkılarında biridir [72].

Feniletanol (*2-phenylethanol*): Kâğıt üretiminde yan ürün olarak ortaya çıkan bir alkol türüdür. Lignoselulozik hammaddelerden de elde edilebilir [73]. Aromatik oksijenat olduğu için vuruuntu direnci yüksektir [74] ve bu nedenle benzin için uygun bir yakıt katkısıdır [75]. Kapalı formülü $C_8H_{10}O$ şeklindedir. Alt ısı değeri 36700 kJ/kg ve araştırma oktan sayısı 110'dur. Bu özellikleri ile uygun bir oksijenli yakıt katkı maddesidir.

ETBE/etanol azeotropik karışımları: Etanolün isobüten ile reaksiyonunda ETBE elde edilir. Ancak bu reaksiyonda dönüşüm verimi arttıkça ürünlerdeki ETBE/etanol azeotropik karışım miktarı da artmaktadır [29]. Ürünler içerisinde ETBE, reaksiyona girmeyen etil alkol, isobüten ve reaksiyon sonunda oluşan su vardır. Ürünlerde ETBE ve etanol azeotropik karışım halinde bulunur ve bu karışımı basit distilasyon ile ayırmak mümkün değildir. ETBE saflaştırmak için bu azeotropların kırılması ya da saflaştırma işlemi için özel membranlar kullanılması gerekir [29]. Bu durum ETBE'in üretim maliyetini arttırmaktadır [26, 29]. Yüksek maliyetinden dolayı ETBE/etanol karışımlarını doğrudan yakıt katkısı olarak kullanmak daha avantajlıdır. ETBE/etanol azeotropik karışımının özellikleri ETBE ile etanolün özellikleri arasındadır. Bu karışımın ısı değeri ETBE'in ısı değerinden az, ancak etanolün ısı değerinden daha yüksektir. Uçuculuğu ve sudaki çözünürlüğü etanole göre daha azdır. ETBE göre daha yüksek oktan sayısına sahiptir [26]. Üretiminde biyoetanol kullanılan, saflaştırma işlemi gerektirmediği için ekonomik olan ve yenilenebilirlik oranı yüksek olması nedeniyle ETBE/etanol karışımı benzinin bileşiminin değiştirilmesinde kullanılabilir önemli bir katkı maddesidir.

Etil asetat: Etanolün asetik asit ile reaksiyona girmesi sonucu elde edilen esterdir. Sanayide solvent olarak kullanılan etil asetat benzine göre daha az uçucudur. Hoş bir kokuya sahiptir ve toksik etkisi yoktur. Endüstriyel üretimi çok olduğu için maliyeti ETBE ve MTBE'e göre

düşüktür. Benzin ile karıştırıldığında karışımın oktan sayısını artırır [5].

Metil asetat: Metanolün asetik asit ile reaksiyonu sonucunda elde edilir. Oksijen içeriği etil asetata göre fazla fakat ısı değeri etil asetatın ısı değerinden düşüktür. En önemli avantajı benzinin Reid buhar basıncını arttırmadan karışımın oktan sayısını yükseltmesidir. Bu yüzden benzin için oksijenli yakıt katkı maddesi olarak kullanılabilir [5].

2,5-dimethylfuran (DMF) : Son yıllarda biyoyakıt üretim teknolojisinde meydana gelen gelişmelerin bir ürünü olan 2,5-dimethylfuran (DMF) biyokütle esaslı früktozun katalitik dönüşümü ile elde edilir. Elde edilen bu oksijenli yakıt katkısı benzine daha yakın, etanolden daha iyi fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir [76]. Hacimsel ısı değeri, etanolün ısı değerinden yüksektir. Araştırma oktan sayısı (RON) 119 olarak tahmin edilmektedir [77]. Vuruuntu direnci yüksek olduğu için yüksek sıkıştırma oranları seçilerek motorun efektif verimini arttıracak beklenmektedir. Suda çözünmez ve depolama açısından herhangi bir sorun teşkil etmez. Günümüzde ticari olarak üretimi yapılmayan DMF benzin için oksijenli yakıt katkı maddesi olarak kullanılma potansiyeline sahiptir [78, 79]. Benzer yöntemlerle mısır esaslı glikozdan pilot ölçekte tamamen yenilenebilir izooktan üretimi gerçekleştirilmiştir [33]. Çizelge 3'te bazı oksijenli yakıt katkılarının önemli fiziksel-kimyasal özellikleri verilmiştir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Buji ateşlemeli motorlardan salınan zararlı egzoz emisyonlarını standartlarla belirlenen limitlerde tutmak, yakıtın vuruuntu direncini yükseltmek ve yenilenebilir biyoyakıt kullanımını arttırmak için gelecek yıllarda benzine eklenecek yenilenebilir oksijenli yakıt katkı miktarının daha fazla olacağı açıktır. Bu yenilenebilir oksijenli yakıt katkısının karşılanmasında farklı alternatifler mevcuttur. Ancak kullanılacak yakıt katkısının ikinci nesil biyoyakıt grubunda yer alması, üretiminin ekonomik olması, insan ve çevre sağlığı açısından bir tehdit oluşturmaması önemlidir. Bu noktada gliserin eterlerin ve ETBE/etanol azeotropik karışımlarının sahip olduğu avantajlar nedeniyle oksijenli yakıt katkısı olarak kullanılma potansiyeline daha çok sahiptirler. Yeni oksijenli yakıt katkılarının üretim tekniklerinin geliştirilmesi ve bu katkıların motor performans ve egzoz emisyonlarına etkilerinin kapsamlı olarak araştırılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Yitao, S. H. E. N., SHUAI, S., Jianxin, W. A. N. G., and Jianhua, X. I. A. O., "Optimization of gasoline hydrocarbon compositions for reducing exhaust emissions", *Journal of Environmental Sciences*, 21(9): 1208-1213, (2009).
- [2] Beşergil, B., "*Yakıtlar ve Yağlar*", Ege Üniversitesi Basımevi, İzmir, (2009).

- [3] Safgönül, B., Ergeneman, M., Arslan, H. E. ve Soruşbay, C., “İçten Yanmalı Motorlar”, Birsen Yayınevi., (2013).
- [4] Nadim, F., Zack, P., Hoag, G. E., and Liu, S., “United States experience with gasoline additives”, *Energy Policy*, 29(1): 1-5, (2001).
- [5] Dabbagh, H. A., Ghobadi, F., Ehsani, M. R., and Moradmam, M., “The influence of ester additives on the properties of gasoline”, *Fuel*, 104: 216-223, (2013).
- [6] <http://www.eesi.org/papers/view/fact-sheet-a-brief-history-of-octane>
- [7] Lincoln, K. J., “The secret history of lead: special report”, *The Nation March*, 20: 11-45, (2000).
- [8] Thomas, V. M., “The elimination of lead in gasoline”, *Annual Review of Energy and the Environment*, 20(1): 301-324, (1995).
- [9] Gidney, J. T., Twigg, M. V., & Kittelson, D. B., “Effect of organometallic fuel additives on nanoparticle emissions from a gasoline passenger car”, *Environmental science & technology*, 44(7): 2562-2569, (2010).
- [10] Demirbas, A., Balubaid, M. A., Basahel, A. M., Ahmad, W., and Sheikh, M. H., “Octane rating of gasoline and octane booster additives”, *Petroleum Science and Technology*, 33(11): 1190-1197, (2015).
- [11] https://www.tupras.com.tr/uploads/Urunler2/KURSUNS_UZ_BENZIN_95_OKTAN_243.pdf
- [12] <https://www.epa.gov/gasoline-standards/reformulated-gasoline>
- [13] Rodriguez-Anton, L. M., Hernandez-Campos, M., and Sanz-Pérez, F., “Experimental determination of some physical properties of gasoline, ethanol and ETBE blends”, *Fuel*, 112: 178-184, (2013).
- [14] Arteconi, A., Mazzarini, A., and Di Nicola, G., “Emissions from ethers and organic carbonate fuel additives: a review”, *Water, Air, and Soil Pollution*, 221(1-4): 405, (2011).
- [15] Awad, O. I., Mamat, R., Ali, O. M., Sidik, N. A. C., Yusaf, T., Kadirgama, K., and Kettner, M., “Alcohol and ether as alternative fuels in spark ignition engine: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (2017).
- [16] Sharudin, H., Abdullah, N. R., Najafi, G., Mamat, R., and Masjuki, H. H., “Investigation of the effects of iso-butanol additives on spark ignition engine fuelled with methanol-gasoline blends”, *Applied Thermal Engineering*, 114: 593-600, (2017).
- [17] Sezer, I., and Bilgin, A., “Effects of methyl tert-butyl ether addition to base gasoline on the performance and CO emissions of a spark ignition engine”, *Energy and Fuels*, 22(2): 1341-1348, (2008).
- [18] Balki, M. K., Sayin, C., and Canakci, M., “The effect of different alcohol fuels on the performance, emission and combustion characteristics of a gasoline engine”, *Fuel*, 115: 901-906, (2014).
- [19] Hsieh, W. D., Chen, R. H., Wu, T. L., and Lin, T. H., “Engine performance and pollutant emission of an SI engine using ethanol-gasoline blended fuels”, *Atmospheric Environment*, 36(3): 403-410, (2002).
- [20] Canakci, M., Ozsezen, A. N., Alptekin, E., and Eyidogan, M., “Impact of alcohol-gasoline fuel blends on the exhaust emission of an SI engine”, *Renewable Energy*, 52: 111-117, (2013).
- [21] Mužíková, Z., Pospíšil, M., and Šebor, G., “Volatility and phase stability of petrol blends with ethanol”, *Fuel*, 88(8): 1351-1356, (2009).
- [22] Surisetty, V. R., Dalai, A. K., and Kozinski, J., “Alcohols as alternative fuels: An overview”, *Applied Catalysis A: General*, 404(1): 1-11, (2011).
- [23] Manzetti, S., and Andersen, O., “A review of emission products from bioethanol and its blends with gasoline. Background for new guidelines for emission control”, *Fuel*, 140: 293-301, (2015).
- [24] Silva, N. R., and Sodré, J. R., “Cold start and drivability characteristics of ethanol-methyl-t-butyl ether blend fuelled vehicle”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 215(5): 645-649, (2001).
- [25] Da Silva, R., Cataluna, R., de Menezes, E. W., Samios, D., and Piatnicki, C. M. S., “Effect of additives on the antiknock properties and Reid vapor pressure of gasoline”, *Fuel*, 84(7): 951-959, (2005).
- [26] De Menezes, E. W., Cataluña, R., Samios, D., and Da Silva, R., “Addition of an azeotropic ETBE/ethanol mixture in eurosuper-type gasolines”, *Fuel*, 85(17): 2567-2577, (2005).
- [27] Lince, D. P., Wilson, L. R., and Carlson, G. A., “Methyl tert-butyl ether (MTBE) contamination in private wells near gasoline stations in upstate New York”, *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 61(4): 484-488, (1998).
- [28] Ancillotti, F., and Fattore, V., “Oxygenate fuels: market expansion and catalytic aspect of synthesis”, *Fuel Processing Technology*, 57(3): 163-194, (1998).
- [29] De Menezes, E. W., and Cataluña, R., “Optimization of the ETBE (ethyl tert-butyl ether) production process”, *Fuel Processing Technology*, 89(11): 1148-1152, (2008).
- [30] Vauclair, C., Tarjus, H., and Schaetzel, P., “Permeative properties of PVA-PAA blended membrane used for dehydration of fusel oil by pervaporation”, *Journal of Membrane Science*, 125(2): 293-301, (1997).
- [31] Cataluña, R., da Silva, R., de Menezes, E. W., and Ivanov, R. B., “Specific consumption of liquid biofuels in gasoline fuelled engines”, *Fuel*, 87(15): 3362-3368, (2008).
- [32] Union, E. “Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC”, *Official Journal of the European Union*, 5, (2009).
- [33] [www. Global-bioenergies.com](http://www.global-bioenergies.com), “Fully Renewable ETBE”, (2017).
- [34] Shayan, S. B., Seyedpour, S. M., and Ommi, F., “Effect of oxygenates blending with gasoline to improve fuel properties”, *Chinese journal of mechanical engineering*, 25(4): 792-797, (2012).
- [35] Wu, X., Daniel, R., Tian, G., Xu, H., Huang, Z., and Richardson, D., “Dual-injection: The flexible, bi-fuel concept for spark-ignition engines fuelled with various

- gasoline and biofuel blends”, *Applied Energy*, 88(7): 2305-2314, (2011).
- [36] <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>
- [37] Fogassy, G., Thegarid, N., Schuurman, Y., and Mirodatos, C., “From biomass to bio-gasoline by FCC co-processing: effect of feed composition and catalyst structure on product quality”, *Energy and Environmental Science*, 4(12): 5068-5076, (2011).
- [38] Timilsina, G. R., “Biofuels in the long-run global energy supply mix for transportation”, *Phil. Trans. R. Soc. A*, 372(2006): 20120323, (2014).
- [39] IEA, “**Technology Roadmap: Biofuels for Transport**”, International Energy Agency, (2011).
- [40] Bozkurt, Ö. D., Tunc, F. M., Bağlar, N., Celebi, S., Günbaş, İ. D., and Uzun, A., “Alternative fuel additives from glycerol by etherification with isobutene: Structure–performance relationships in solid catalysts”, *Fuel Processing Technology*, 138: 780-804, (2015).
- [41] Karinen, R. S., and Krause, A. O. I., “New biocomponents from glycerol”, *Applied Catalysis A: General*, 306: 128-133, (2006).
- [42] Beatrice, C., Di Blasio, G., Guido, C., Cannilla, C., Bonura, G., and Frusteri, F., “Mixture of glycerol ethers as diesel bio-derivable oxy-fuel: Impact on combustion and emissions of an automotive engine combustion system”, *Applied Energy*, 132: 236-247, (2014).
- [43] Fernando, S., Adhikari, S., Kota, K., and Bandi, R., “Glycerol based automotive fuels from future biorefineries”, *Fuel*, 86(17): 2806-2809, (2007).
- [44] Caetano, N. S., Loureiro, J. M., and Rodrigues, A. E., “MTBE synthesis catalysed by acid ion exchange resins: Kinetic studies and modeling of multiphase batch reactors”, *Chemical engineering science*, 49(24): 4589-4604, (1994).
- [45] Nouredini, H., Dailey, W. R., and Hunt, B. A., “Production of ethers of glycerol from crude glycerol-the by-product of biodiesel production”, *Advances in Environmental Research*, 2(2): 232 – 243, (1998).
- [46] Melero, J. A., Vicente, G., Morales, G., Paniagua, M., and Bustamante, J., “Oxygenated compounds derived from glycerol for biodiesel formulation: Influence on EN 14214 quality parameters”, *Fuel*, 89(8): 2011-2018, (2010).
- [47] Wessendorf, R., “Glycerol derivatives as fuel components”, *Erdöl and Kohle Erdgas Petrochemie*, 48(3): 138-143, (1995).
- [48] Jaeger-Voirol, A., Durand, I., Hillion, G., Delfort, B., and Montagne, X., “Glycerin for new biodiesel formulation”, *Oil and Gas Science and Technology- Revue de l'IFP*, 63(4): 395-404, (2008).
- [49] Zhou, C. H. C., Beltramini, J. N., Fan, Y. X., and Lu, G. M., “Chemosselective catalytic conversion of glycerol as a biorenewable source to valuable commodity chemicals”, *Chemical Society Reviews*, 37(3): 527-549, (2008).
- [50] Wan Isahak, W. N. R., Che Ramli, Z. A., Ismail, M., Mohd Jahim, J., and Yarmo, M. A., “Recovery and purification of crude glycerol from vegetable oil transesterification”, *Separation and Purification Reviews*, 44(3): 250-267, (2015).
- [51] OECD/FAO, OECD-FAO, “Agricultural Outlook 2011”, *OECD Publishing*, 78, (2011).
- [52] Calero, J., Luna, D., Sancho, E. D., Luna, C., Bautista, F. M., Romero, A. A., and Verdugo-Escamilla, C., “An overview on glycerol-free processes for the production of renewable liquid biofuels, applicable in diesel engines”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42: 1437-1452, (2015).
- [53] Mota, C. J., da Silva, C. X., Rosenbach Jr, N., Costa, J., and da Silva, F., “Glycerin derivatives as fuel additives: the addition of glycerol/acetone ketal (solketal) in gasolines”, *Energy and Fuels*, 24(4): 2733-2736, (2010).
- [54] Jaeger-Voirol, A., Delfort, B., Montagne, X., Durand, I., and Hillion, G., “Glycerol derivatives for diesel fuel reformulation”, (No. 2005-01-2203): *SAE Technical Paper*, (2005).
- [55] Bradin, D., Grune, G.L., Trivette, M. ‘US 20090013591 A1’, Alternative fuel composition for use in gasoline, diesel, marine biodiesel, jet and flexible fuel engines, comprises fuel/alcohol blend and glycerol ether mixture of glycerol ethers, (2009).
- [56] Fukuda, H., Fujii, T., and Ogawa, T., “Microbial production of C3-and C4-hydrocarbons under aerobic conditions”, *Agricultural and biological chemistry*, 48(6): 1679-1682, (1984).
- [57] Di Serio, M., Casale, L., Tesser, R., & Santacesaria, E., “New process for the production of glycerol tert-butyl ethers”, *Energy & Fuels*, 24(9): 4668-4672, (2010).
- [58] Kiatkittipong, W., Intarachoen, P., Laosiripojana, N., Chaisuk, C., Praserttham, P., and Assabumrungrat, S., “Glycerol ethers synthesis from glycerol etherification with tert-butyl alcohol in reactive distillation”, *Computers and Chemical Engineering*, 35(10): 2034-2043, (2011).
- [59] Klepáčová, K., Mravec, D., and Bajus, M., “Etherification of glycerol with tert-butyl alcohol catalysed by ion-exchange resins”, *Chemical Papers*, 60(3): 224-230, (2006).
- [60] Chang, J. S., Zhang, Y. C., Chen, C. C., Ling, T. R., Chiou, Y. J., Wang, G. B., ... and Chou, T. C., “One-step synthesis of gasoline octane booster and diesel fuel from glycerol and tert-butyl alcohol”, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 53(13): 5398-5405, (2014).
- [61] Kiatkittipong, W., Suwanmanee, S., Laosiripojana, N., Praserttham, P., and Assabumrungrat, S., “Cleaner gasoline production by using glycerol as fuel extender”, *Fuel Processing Technology*, 91(5): 456-460, (2010).
- [62] Kiatkittipong, W., Thipsunet, P., Goto, S., Chaisuk, C., Praserttham, P., and Assabumrungrat, S., “Simultaneous enhancement of ethanol supplement in gasoline and its quality improvement”, *Fuel Processing Technology*, 89(12): 1365-1370, (2008).
- [63] Kiatkittipong, W., Yoothongkham, K., Chaisuk, C., Praserttham, P., Goto, S., and Assabumrungrat, S., “Self-etherification process for cleaner fuel production”, *Catalysis letters*, 128(1-2): 154, (2009).
- [64] Vallinayagam, R., Vedharaj, S., Yang, W. M., Roberts, W. L., and Dibble, R. W., “Feasibility of using less viscous and lower cetane (LVLC) fuels in a diesel engine: a review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51: 1166-1190, (2015).

- [65] Tan, Q., and Day, D. F., "Bioconversion of limonene to α -terpineol by immobilized *Penicillium digitatum*", *Applied microbiology and biotechnology*, 49(1): 96-101, (1998).
- [66] Vallinayagam, R., Vedharaj, S., Naser, N., Roberts, W. L., Dibble, R. W., & Sarathy, S. M., "Terpineol as a novel octane booster for extending the knock limit of gasoline", *Fuel*, 187: 9-15, (2017).
- [67] Lee, S. K., Chou, H., Ham, T. S., Lee, T. S., and Keasling, J. D., "Metabolic engineering of microorganisms for biofuels production: from bugs to synthetic biology to fuels", *Current opinion in biotechnology*, 19(6): 556-563, (2008).
- [68] Rankovic, N., Bourhis, G., Loos, M., & Dauphin, R., "Understanding octane number evolution for enabling alternative low RON refinery streams and octane boosters as transportation fuels", *Fuel*, 150: 41-47, (2015).
- [69] Kim, D. W., Kim, C. W., Koh, J. C., and Park, D. W., "Synthesis of dimethyl carbonate from ethylene carbonate and methanol using immobilized ionic liquid on amorphous silica", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 16(3): 474-478, (2010).
- [70] Tundo, P., and Selva, M., "The chemistry of dimethyl carbonate", *Accounts of Chemical Research*, 35(9): 706-716, (2002).
- [71] Wen, L. B., Xin, C. Y., and Yang, S. C., "The effect of adding dimethyl carbonate (DMC) and ethanol to unleaded gasoline on exhaust emission", *Applied Energy*, 87(1): 115-121, (2010).
- [72] Bhanage, B. M., Fujita, S. I., Ikushima, Y., and Arai, M., "Transesterification of urea and ethylene glycol to ethylene carbonate as an important step for urea based dimethyl carbonate synthesis", *Green Chemistry*, 5(4): 429-432, (2003).
- [73] McCormick, R. L., Ratcliff, M. A., Christensen, E., Fouts, L., Luecke, J., Chupka, G. M., and Boot, M., "Properties of oxygenates found in upgraded biomass pyrolysis oil as components of spark and compression ignition engine fuels", *Energy and Fuels*, 29(4): 2453-2461, (2015).
- [74] Shankar, V. S. B., Al-Abbad, M., El-Rachidi, M., Mohamed, S. Y., Singh, E., Wang, Z., and Sarathy, S. M., "Antiknock quality and ignition kinetics of 2-phenylethanol, a novel lignocellulosic octane booster", *Proceedings of the Combustion Institute*, 36(3): 3515-3522, (2017).
- [75] Tian, M., Van Haaren, R., Reijnders, J., and Boot, M., "Lignin derivatives as potential octane boosters", *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 8(2015-01-0963): 415-422, (2015).
- [76] Zhong, S., Daniel, R., Xu, H., Zhang, J., Turner, D., Wyszynski, M. L., and Richards, P., "Combustion and emissions of 2, 5-dimethylfuran in a direct-injection spark-ignition engine", *Energy and Fuels*, 24(5): 2891-2899, (2010).
- [77] Román-Leshkov, Y., Barrett, C. J., Liu, Z. Y., and Dumesic, J. A., "Production of dimethylfuran for liquid fuels from biomass-derived carbohydrates", *Nature*, 447(7147): 982-985, (2007).
- [78] Christensen, E., Yanowitz, J., Ratcliff, M., and McCormick, R. L., "Renewable oxygenate blending effects on gasoline properties", *Energy and Fuels*, 25(10): 4723-4733, (2011).
- [79] Daniel, R., Tian, G., Xu, H., Wyszynski, M. L., Wu, X., and Huang, Z., "Effect of spark timing and load on a DISI engine fuelled with 2, 5-dimethylfuran", *Fuel*, 90(2): 449-458, (2011).
- [80] <https://cameochemicals.noaa.gov/chris/MTT.pdf>
- [81] Badawy, T., Williamson, J., and Xu, H., "Laminar burning characteristics of ethyl propionate, ethyl butyrate, ethyl acetate, gasoline and ethanol fuels", *Fuel*, 183: 627-640, (2016).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



Gri kurt optimizasyon algoritmasına dayanan çok seviyeli imge eşik seçimi

Multilevel image thresholding selection based on grey wolf optimizer

Yazar(lar) (Author(s)): Ismail KOC¹, Omer Kaan BAYKAN², Ismail BABA OGLU³

ORCID¹: 0000-0003-1311-5918

ORCID²: 0000-0001-5890-510X

ORCID³: 0000-0002-2503-1482

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Koc I., Baykan O. K. ve Babaoglu I., "Gri kurt optimizasyon algoritmasına dayanan çok seviyeli imge eşik seçimi", *Politeknik Dergisi*, 21(4): 841-847, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.389613

Gri Kurt Optimizasyon Algoritmasına Dayanan Çok Seviyeli İmge Eşik Seçimi

Araştırma Makalesi / Research Article

Ismail KOC*, Omer Kaan BAYKAN, Ismail BABA OGLU

Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye

(Geliş/Received : 01.07.2017 ; Kabul/Accepted : 07.10.2017)

ÖZ

Çoklu eşikleme, görüntü işleme ve örüntü tanıma için önemli bir görüntü işleme tekniğidir. Optimal bir eşik değerinin seçimi görüntü eşiklemede en ciddi aşamalardan birisidir. İki seviye segmentasyon eşik değeri yardımıyla orijinal resmi iki alt bölüme ayırmayı içerirken, çoklu segmentasyon çok eşik değerlerini içermektedir. Özellikle çok seviyeli görüntü eşiklemede, detaylı araştırmaya ilişkin hesaplama zamanı tercih edilen eşik sayısı ile birlikte üstel olarak artmaktadır. Zor problemler için, sürü zekası başarılı ve etkili optimizasyon metodlarından biri olarak bilinmektedir. Bu çalışmada, doğadaki gri kurtların sosyal liderlik ve avcılık davranışlarını taklit eden son zamanlarda önerilmiş sürü tabanlı meta sezgisel olan gri kurt algoritması (GWO) çok seviyeli görüntü eşikleme probleminin çözümü için kullanılmaktadır. Standart test resimleri üzerinde yapılan deneysel sonuçlar GWO algoritmasının diğer modern algoritmalarla karşılaştırılabilir olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler : Çok seviyeli imge eşikleme, otsu metodu, sürü zekası, optimizasyon algoritmaları, gri kurt algoritması.

Multilevel Image Thresholding Selection Based on Grey Wolf Optimizer

ABSTRACT

Multilevel thresholding is an important image process technique for image processing and pattern recognition. Selecting an optimal threshold value is one of the most crucial phase in image thresholding. While bi-level segmentation contains separating the original image into subdivided sections with help of a threshold value, multilevel segmentation involves multi threshold values. Especially in multilevel image thresholding, the computational time of detailed search increases exponentially with the number of preferred thresholds. For compelling problems, swarm intelligence is known as one of the successful and influential optimization methods. In this paper, the grey wolf optimizer (GWO), a recently proposed swarm-based meta-heuristic which imitates the social leadership and hunting behavior of gray wolves in nature is employed for solving the multilevel image thresholding problem. The experimental results on standard benchmark images indicate that the grey wolf optimizer algorithm is comparable with other state of the art algorithms.

Keywords: Multilevel image thresholding, otsu method, herd intelligence, optimization algorithms, gray wolf algorithm

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bir görüntünün benzer yoğunluk, renk ve şekillere sahip homojen parçalara bölünmesi tekniği olan görüntü segmentasyonu, görüntü işlemedeki temel aşamalardan birisidir. Görüntü segmentasyonu genellikle resmi anlamada ve resim temsilinde ilk adımı temsil eder. Segmentasyonun sağladığı sonuçlar, özellik çıkarımı, resim tanıma, semantik yorumlama ve nesne sınıflandırması gibi daha üst düzey uygulamalarda kullanılır [1].

Eşikleme teknikleri, basitliklerinden dolayı gri tonlamalı görüntülerin bölünmesinde çok yaygındır. Görüntü segmentasyonu genellikle bir görüntüyü belirli uygulamalar için kullanılmak üzere parçalara bölme işlemini basitleştirir. Görüntü segmentasyonu, karakter tanıma [2], otomatik hedef algılama [3], video değişim algılaması [4], tıbbi görüntüleme [5, 6] ve benzeri [7] uygulama alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Son

birkaç on yılda literatürde görüntü segmentasyonuna yönelik birçok algoritma önerilmiştir. Genel olarak, görüntü segmentasyonu algoritmaları eşikleme, bölge büyümesi, kenar tabanlı ve kümeleme şeklinde sınıflandırılabilir.

Eşik değerlendirme, görüntü segmentasyonunda çok önemli ve etkili bir rol oynamaktadır. Görüntünün histogramından elde edilen eşik değerlerine bağlı olarak görüntüyü eşiklemenin iki yolu vardır. Bunlar: (a) iki seviyeli eşikleme [8] ve (b) çok düzeyli eşikleme [9, 10]. Geleneksel teknikler [11] ve akıllı yöntemler [12] dâhil olmak üzere, görüntü segmentasyonu için birçok eşikleme yaklaşımı önerilmiştir. Histogram eşikleme tekniği, basit ancak etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu teknik, istenen görüntünün histogramından bir eşik değeri seçerek görüntü segmentasyonunu gerçekleştirir. Çözüm için birkaç eşikleme tekniği vardır. Otsu kriteri olarak adlandırılan bu yöntemlerden bir tanesi, gri seviye görüntüsündeki sınıflar arasındaki varyans değerinin maksimizasyonunu hedefleyerek optimal eşik değerlerini seçer. Bu

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : ismailkoc@selcuk.edu.tr

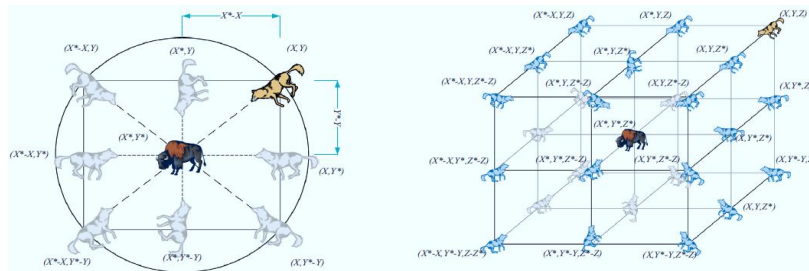
çalışmada eşik sorunu çözmek için Otsu kriterleri kullanılmıştır [13].

Meta-sezgisel yöntemler, bir çözüm uzayında etkin bir arama yapabilmek ve lokal optimum noktasından kurtulabilme yeteneğine sahip bir süreç oluşturmak için yerel iyileştirme prosedürleri ve üst düzey stratejiler arasında bir etkileşim organize eden optimizasyon teknikleridir [14, 15]. Optimum çok düzeyli görüntü eşiklerini hesaplamak için doğadaki biyolojik, sosyal, kimyasal ve fiziksel sistemlerin davranışlarından türetilen çeşitli meta-sezgisel algoritmalar önerilmiştir. Tüm problemlerin çözümünü başarıyla yerine getiren herhangi bir algoritma bulunmadığından [16], kombinatoriyal veya sürekli problemler için farklı yaklaşımlar geliştirilmiştir [17]. Meta-sezgisel algoritmaların orijinal versiyonları, çözüm kalitesini artırmak için modifiye edilir veya melezleştirilir. En yaygın doğadan esinlenen algoritmalar, parçacık sürü optimizasyonu (PSO) [18], diferansiyel evrim (DE) [19], ateşböceği algoritması (FA) [20],[21], guguk kuşu arama (CS) [22], karınca koloni optimizasyonu [23-26], yapay arı koloni algoritması [27-30], yarasalar algoritması (BA) [31], ağaç tohum algoritması [32] ve insan arayıcı optimizasyonu (HSO) [33-35] yöntemlerini içermektedir.

Bu çalışmada, gri kurt optimizasyon algoritması (GWO), çok düzeyli görüntü eşikleme probleminin çözümü için önerilmektedir. GWO algoritması uygulanması kolay ve çözüm kalitesi açısından da başarılı bir algoritmadır. Bu nedenle, Otsu kriterlerini kullanarak çok seviyeli eşikleri bulmak için GWO yöntemi kullanılmıştır.

Önerilen algoritma, DE, CS gibi son zamanlarda önerilen diğer algoritmalar ile karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, genel olarak önerilen GWO algoritmasının hem doğruluk hem sağlamlık açısından PSO, DE, CS, FA ve (iyileştirilmiş yarasalar algoritması) IBA algoritmalarına kıyasla daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Makalenin geri kalan kısmı aşağıdaki şekilde organize edilmiştir. Bölüm 2, çok düzeyli eşiklerin optimal değerlerini aramak için uyarlanmış orijinal GWO'yu tanıtmaktadır. Bölüm 3, çok seviyeli eşik problemini tanımlar ve Otsu tekniğinin nesnel işlevlerini sunar. Bölüm 4, standart benchmark görüntüleri kullanılarak çok seviyeli bölütleme uygulanarak elde edilen diğer algoritmaların deneysel sonuçlarını karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Son olarak, sonuçlar Bölüm 5'te tartışılacaktır.



Şekil 1. Gri kurtların 2D ve 3D uzayındaki konum vektörleri ve olası sonraki konumları (Position vectors and possible next positions of gray wolf in 2D and 3D space) [36]

2. GRİ KURT OPTİMİZASYON ALGORİTMASI (GWO) (GRAY WOLF OPTIMIZER)

Gri kurt optimizasyon algoritması, gri kurtların avcılık davranışını ve toplumsal davranışlarını taklit ederek önerilmiştir. Toplumsal hiyerarşi ile ilgili olarak, gri kurtlar *alfa*, *beta*, *delta* ve *omega* olarak sınıflandırılır. Alfa grubu, kurt grubu onun kurallarına uyduğu için hâkim bir türdür. Beta sınıfı, kararlarda *alfa*'ya yardımcı olan ikincil kurtları ifade etmektedir. Omega ise en düşük sıradaki gri kurtları temsil etmektedir. Bir kurt yukarıda belirtilen herhangi bir türe ait değilse, *delta* olarak adlandırılır. Grup avlama işlemi, kurtların toplumsal etkileşimlerinin yanı sıra gri kurtların ilginç bir sosyal davranışdır. GWO'nun ana bölümleri avı çevreleme, avlama ve avına saldırma aşamaları oluşturmaktadır [36].

2.1. Sosyal Hiyerarşi (Social Hierarchy)

Aday çözümler kurtların toplumsal hiyerarşisi göz önüne alınarak yapılandırılmıştır. En iyi uygunluk değerine sahip çözümler sırasıyla *alfa*, *beta*, *delta* ve *omega* isimli kurtlar olarak kabul edilir.

2.2. Avı Çevreleme (Encircling prey)

Gri kurt, Denklem 1 ve 2'yi kullanarak avının çevresindeki pozisyonunu rasgele güncelleyebilir. Gri kurtların kuşatma davranışı şu şekilde sunulabilir:

$$D = |C \cdot X_p(t) - X(t)| \quad (1)$$

$$X(t+1) = |X_p(t) - A \cdot D| \quad (2)$$

Burada t değeri mevcut iterasyonu, A ve C değerleri katsayı vektörlerini, X_p avın konum vektörünü, X bir gri kurdun konumunu temsil etmektedir. A ve C değerleri Denklem 3 ve 4'te sırasıyla hesaplanır:

$$A = |2a \cdot r_1 - a| \quad (3)$$

$$C = |2a \cdot r_2| \quad (4)$$

a 'nın bileşenleri yinelemeler sırasında lineer olarak 2'den 0'a düşürülür. r_1 ve r_2 [0, 1] arasındaki rastsal bir vektördür. r_1 ve r_2 rastgele vektörleri, kurtların Şekil 1'de gösterilen 2D ve 3D uzayındaki noktalarından herhangi bir yere ulaşmasına izin verir. Böylece, gri kurt, herhangi bir rasgele konumdaki avın etrafındaki boşluk içindeki konumunu Denklem (1) ve (2)'ye göre düzenleyebilir. Benzer şekilde, Şekil 1'de verilen 2D ve 3D uzayı, n boyutlu bir arama uzayına genişletilebilir ve böylece gri kurtların, şimdiye kadar elde edilen en iyi çözüm etrafında hiper-küplerde (veya hiper-kürelerde) hareket etmesi sağlanacaktır.

2.3. Avlama (Hunting)

Gri kurtların alfa, beta ve delta türleri avın mevcut konumu hakkında olağanüstü bilgiye sahiptirler. Bu nedenle, elde edilen ilk üç en iyi çözüm kaydedilir ve diğer kurtların en iyi arama ajanlarının pozisyonlarına göre konularını güncellemeleri sağlanır. Bu bağlamda Denklem 5-11 kullanılabilir [37].

$$D_{\alpha} = |C_1 \cdot X_{\alpha} - X| \quad (5)$$

$$D_{\beta} = |C_2 \cdot X_{\beta} - X| \quad (6)$$

$$D_{\delta} = |C_3 \cdot X_{\delta} - X| \quad (7)$$

$$X_1 = |X_{\alpha} - A_1 \cdot D_{\alpha}| \quad (8)$$

$$X_2 = |X_{\beta} - A_2 \cdot D_{\beta}| \quad (9)$$

$$X_3 = |X_{\delta} - A_3 \cdot D_{\delta}| \quad (10)$$

$$X(t+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (11)$$

2.4. Ava Saldırma (Attacking Prey)

Bu aşamada, a değeri azaltılır ve bu nedenle A'nın değişim aralığı azaltılır. A, [-1,1] aralığında rasgele değerlere sahip olduğunda, arama ajanının sonraki konumu, mevcut konumu ile avın konumu arasındaki herhangi bir yerde olacaktır.

2.5. Arama (Search for prey)

Gri kurtlar genellikle alfa, beta ve delta'nın konularına göre arama yapar. Avını aramak ve avlarına saldırma anında bir araya gelmek için birbirlerinden ayrılırlar. Dağılımı matematiksel olarak modellemek için, l'den büyük veya l'den küçük rastgele değerlere sahip A parametresi kullanılır. Bu işlem, araştırmayı (exploration) önemli hale getirir ve GWO algoritmasının global aramasına destek sağlar.

GWO algoritmasının akış şeması Şekil 2'de verilmiştir.

```

Gri Kurt Populasyonunu Başlat Xi=(i=1,2,...,n)
a, A C parametrelerini ata
Her bir ajanın uygunluk değerini hesapla
Xα, Xβ, ve Xδ değerlerini bul
Xα = Populasyondaki en iyi konuma sahip ajan
Xβ = Populasyondaki en iyi ikinci konuma sahip ajan
Xδ = Populasyondaki en iyi üçüncü konuma sahip ajan

while (t< Maksimum İterasyon sayısı)
  for Her bir ajan
    Mevcut arama ajanların konularını Denklem 11 ile güncelle.
  end for

  a, A ve C parametlerini güncelle
  Her bir ajanın uygunluk değerini hesapla
  Xα, Xβ ve Xδ parametlerini hesapla
  t = t+1
end while
return Xα

```

Şekil 2.GWO algoritmasının sözde kodu (Pseudo-code of GWO algorithm)

3. ÇOKLU EŞİKLEME PROBLEMİ

(MULTILEVEL THRESHOLDING PROBLEM)

Eşikleme tekniği, verilen resmin histogramına dayalı olarak görüntü segmentasyonunu gerçekleştirir. İşlenecek bir görüntüde L gri seviyeleri, 0 ve L-1

arasındaki t eşik değeri, I verilen bir resmi ifade ettiği varsayımı üzerinden, bir görüntü için iki seviyeli eşikleme Denklem 12'teki gibi tanımlanabilir:

$$\begin{aligned} P_F &= \{I(x,y) \in I \mid 0 \leq I(x,y) \leq t-1\} \\ P_B &= \{I(x,y) \in I \mid t \leq I(x,y) \leq L-1\} \end{aligned} \quad (12)$$

Eşikleme için segment sayısının artmasıyla, iki seviyeli eşikleme çok seviyeli eşiklemeye dönüştürülebilir. Dönüşüm formülü Denklem 13'te verilmiştir.

$$\begin{aligned} P_0 &= \{I(x,y) \in I \mid 0 \leq I(x,y) \leq t_0-1\} \\ P_1 &= \{I(x,y) \in I \mid t_0 \leq I(x,y) \leq t_1-1\} \\ &\dots \\ P_n &= \{I(x,y) \in I \mid t_{n-1} \leq I(x,y) \leq L-1\} \end{aligned} \quad (13)$$

Burada I(x,y) koordinat sistemindeki x, y koordinatlarından elde edilen pikseli ifade etmektedir. I(x,y) [0, 255] arasındaki değere sahiptir. Çok seviyeli eşiklemenin amacı optimal eşik değerlerini (t₀, t₁, ..., t_n) hesaplamaktır. (P₀, P₁, ..., P_n) verilen resmin farklı kısımlarını temsil etmektedir. A ∩ A̅ = ∅ koşulunun sağlanması gereklidir, ve P değerlerinin hepsinin birleşimi I resmini oluşturmaktadır.

Çoklu eşikleme için az sayıda en iyi eşik değerini bile hesaplamak oldukça zor iken çift seviyeli eşikleme için optimum eşik bulunması hesaplama yükü açısından zor değildir. Bu nedenle, belirli bir görüntünün optimum eşik değerlerini hesaplamak için sezgisel algoritmaları kullanmak daha elverişlidir.

3.1. Otsu'nun Eşik Yöntemi (Otsu Thresholding Method)

Otsu metodu [38] sınıflar arasındaki varyansın maksimizasyona dayalı olup, görüntü eşikleme için önerilen en yaygın yöntemlerden birisidir. İki seviyeli eşik değerlendirme için Otsu, eşik değeri bulmak için sınıflar arası varyansı tanımlamıştır. Tüm sınıflar için değerlendirilen sigma fonksiyonlarının toplamı maksimize edildiğinde, iki seviyeli eşik değeri için optimum t değeri bulunabilir. Amaç fonksiyonunun matematiksel modellenmesi Denklem 14-19'daki gibidir:

$$t^* = \operatorname{argmax}[f_b(t)] \quad (14)$$

$$f_b(t) = \sigma_0 + \sigma_1 \quad (15)$$

$$\sigma_0 = \omega_0(\mu_0 - \mu_t)^2 \quad \text{ve} \quad \sigma_1 = \omega_1(\mu_1 - \mu_t)^2 \quad (16)$$

$$\mu_0 = \frac{1}{\omega_0} \sum_{i=0}^{t-1} i x p_i \quad \text{ve} \quad \mu_1 = \frac{1}{\omega_1} \sum_{i=t}^{L-1} i x p_i \quad (17)$$

$$\omega_0 = \sum_{i=0}^{t-1} p_i \quad \text{ve} \quad \omega_1 = \sum_{i=t}^{L-1} p_i \quad (18)$$

$$p_i = \frac{x_i}{X} \quad (19)$$

burada, x_i i. seviyesindeki toplam piksel sayısını, X toplam piksel sayısını temsil etmektedir. p_i Denklem 19'da görüldüğü gibi i. gri seviyedeki olasılık seviyesini göstermektedir. ω₀ ve ω₁ Denklem 18'teki 0. ve 1. segmentlerin oluşmasının tahmin edilen olasılığını. μ₀ ve μ₁ Denklem 17'deki gibi sırasıyla 0 ve 1. sınıfların ortalama yoğunluğunu ve μ_t ise Denklem 16'daki gibi resmin ortalama değerini ifade etmektedir. Son olarak

Denklem 15'te görüldüğü gibi σ_0 is 0. sınıfın varyansını σ_1 ise 1. sınıfın varyansını göstermektedir.

Sınıflar arası varyansa dayalı iki seviyeli görüntü eşikleme Denklem 20-24'teki gibi çok seviyeli eşiklemeye genişletilir:

$$t^* = \operatorname{argmax}[f_m(t)] \quad (20)$$

$$f_b(t) = \sum_{i=0}^n \sigma_i \quad (21)$$

$$\sigma_0 = \omega_0(\mu_0 - \mu_t)^2, \sigma_1 = \omega_1(\mu_1 - \mu_t)^2, \dots, \sigma_n = \omega_n(\mu_n - \mu_t)^2 \quad (22)$$

$$\mu_0 = \frac{1}{\omega_0} \sum_{i=0}^{t_0-1} i x p_i, \mu_1 = \frac{1}{\omega_1} \sum_{i=t_0}^{t_1-1} i x p_i, \dots \quad (23)$$

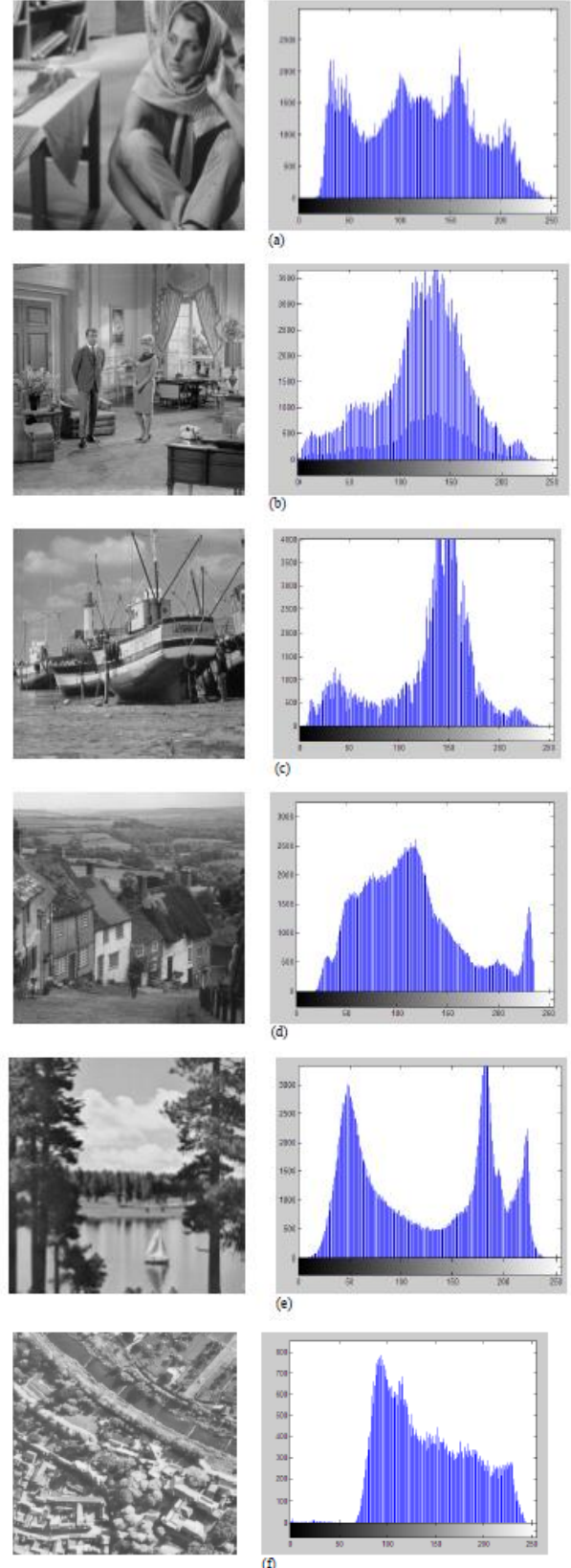
$$\mu_n = \frac{1}{\omega_n} \sum_{i=t_{n-1}}^{L-1} i x p_i$$

$$\omega_0 = \sum_{i=0}^{t_0-1} p_i, \omega_1 = \sum_{i=t_0}^{t_1-1} p_i, \dots, \omega_n = \sum_{i=t_{n-1}}^{L-1} p_i \quad (24)$$

4. DENEYSSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

Çok seviyeli görüntü eşikleme problemi, Gandomi ve ark. (2013) [22] çalışmasında belirtilen fonksiyonları maksimize eden $[0, L - 1]$ aralığında optimum eşikleri elde etmeyi amaçlamaktadır. Problemin boyutu, eşik sayısı k sayısı kadardır ve arama uzayı ise $[0, L-1]$ aralığındadır. Bu çalışmada önerilen GWO algoritması popülasyona dayalı diğer beş farklı meta-sezgisel tekniklerle karşılaştırılmıştır: PSO, DE, CS ve FA ve IBA. PSO, DE, CS ve FA ve IBA algoritmalarının sonuçlarının tamamı ise Alihodzic ve Tuba (2014) makalesinden alınmıştır [7].

Deneysel çalışmalar, elde edilen sonuçlar ışığında PSO, DE, CS ve FA ve IBA algoritmalarının sonuçları ile adil bir karşılaştırma yapmak için 6 standart görüntü kullanılarak gerçekleştirilmiştir [7]. Bu çalışmada kullanılan Barbara, Living Room, Boats, Goldhill ve Lake gibi görüntülerin büyüklüğü (512×512) ve Antenna veri boyutu ise (256×256) şeklindedir. Barbara ve Boats görüntüleri http://decsai.ugr.es/~javier/test_images/ adresinden alınmıştır. Living Room ve Lake görüntüleri http://www.imageprocessingplace.com/root_files_V3/image_databases.htm adresinde bulunabilir. Goldhill resmi https://ece.uwaterloo.ca/z70wang/research/quality_index/demo.html sitesinden seçildi. Hava görüntüsü, <http://sipi.usc.edu/database/database.php?volume=misc> adresindeki Güney Kaliforniya Sinyali ve Görüntü İşleme Enstitüsü resim veritabanında mevcuttur. Bu resimlere ait orijinal görüntüler ve gri seviyedeki histogramları sırasıyla Şekil 3'te gösterilmektedir



Şekil 3. Gri seviye test görüntüleri ve bunların histogramı ve: (Gray level test images and their histogram and:) (A) Barbara, (b) Oturma odası, (c) Tekneler, (d) Goldhill, (e) Göl, ve (f) Anten. ((A) Barbara, (b) Living room, (c) Boats, (d) Goldhill, (e) Lake, and (f) Antenna)

Otsu'nun kriterleri için GWO yöntemiyle elde edilen deneysel sonuçlar diğer algoritmaların sonuçlarıyla birlikte karşılaştırmalı olarak Çizelge 1'de verilmiştir. Ortalama değerler (Ort. Değ.) en iyi değerler maksimum değer olduğu için kalın olarak işaretlenmiştir. Standart sapma (St. Sap.) ise en küçük değerler kalın olarak işaretlenmiştir. Deneysel çalışmalarda araştırılan eşik sayısı 2, 3, 4 ve 5 olarak seçilmiştir. Meta-sezgisel algoritmalar stokastik özelliklere sahip olduğundan, her deney, her bir resim görüntüsü için ve her bir k eşik değeri için 50 kez çalıştırılmıştır. Önerilen algoritma ile elde edilen en iyi çözüm $fb(t)$ 'nin uygunluk değeri, bilinen en iyi değere ulaştığında, çalışma sonlandırılmıştır. Bu nedenle, tekrarlamasında optimum elde edilemediği zaman çalışma 2000 iterasyona ulaştığı anda çalışma sonlandırılmıştır. Ayrıca, tüm algoritmalarındaki popülasyon boyutu $N = 40$ alınmıştır. Otsu'nun amaç fonksiyonuna dayanan deneyler için, altı test meta-sezgisel algoritma için 50 bağımsız çalıştırma için ortalama ve standart sapmalar hesaplanmış ve Çizelge 1'de sunulmuştur. PSO, DE, CS, FA ve IBA algoritmalarıyla elde edilen sonuçlar Alihodzic and Tuba (2014) çalışmasından alınmıştır [7]. Deneysel çalışmalar i5-3210M CPU 2.50 GHz CPU, Windows 10 Pro 64-bit işletim sistemi ve 4GB RAM özellikli bir bilgisayarda Matlab R2014a versiyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak, önerilen yöntemin çalışma zamanı (saniye cinsinden) MATLAB'ın *tic* ve *toc* fonksiyonları kullanarak elde edilmiş ve Çizelge 2'de sunulmuştur.

algoritması *Barbara* için diğer algoritmalarla yaklaşık aynı sonucu elde ederken kararlılık açısından değerlendirildiğinde ise GWO algoritması PSO, CS ve DE yöntemlerinden daha başarılı sonuçlar elde etmiştir. $K=5$ durumunda *Barbara* test verisinde GWO yöntemi 2891.49129 değeriyle diğer algoritmaların elde ettiği değeri geçmiş ve en iyi performansı sergilemiştir ve aynı zamanda bu test verisi için kararlılık açısından PSO ve DE yöntemlerinden de başarılı olmuştur. *Living Room* test verisi için $K=5$ durumu dışında tüm durumlarda başarılı sonuçlar elde etmiştir. *Tekneler* verisi için *Living Room* test verisine benzer şekilde $K=5$ durumu dışında iyi sonuçlar elde edilmiştir. *Goldhill* veri seti sonuçları incelendiğinde $K=2, 3$ ve 4 için en iyi değerlere ulaşılmıştır. $K=5$ durumunda ise GWO algoritması IBA ve FA algoritmalarına çok yakın bir sonuç elde etmiştir. *Lake* test verisi için ise GWO bu kez sadece PSO ve DE yöntemlerinden daha kararlı olduğu göstermiştir. Son olarak *Antenna* verisi için $K=2$ ve $K=3$ durumunda en iyi sonuçlara ulaşılmıştır. $K=4$ ve $K=5$ durumunda ise GWO algoritması çözüm kalitesi açısından IBA ve FA algoritmalarından sonra en başarılı algoritma olmuştur. Özetle, GWO algoritması *Barbara* test verisinde K 'nın tüm durumlarında en iyi performansı verirken diğer test verilerinde ise $K=5$ durumu dışında GWO yönteminin en iyi sonuca ulaştığı görülmüştür. Ayrıca GWO yöntemi ile IBA yönteminin çalışma süreleri Çizelge 2'de karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 1. Otsu'nun kriterine göre PSO, DE, CS, FA, IBA yöntemlerinden elde edilen ortalama değerlerin ve standart sapmaların GWO yöntemiyle karşılaştırılması (Comparison of mean values and standard deviations obtained from PSO, DE, CS, FA, IBA methods by GWO method according to Otsu's criterion)

Alg.	K	Barbara		Living Room		Boats		Goldhill		Lake		Antenna	
		Ort. Değ.	St. Sap.	Ort. Değ.	St. Sap.	Ort. Değ.	St. Sap.	Ort. Değ.	St. Sap.	Ort. Değ.	St. Sap.	Ort. Değ.	St. Sap.
PSO	2	2608.61078	1.82E-12	1627.90917	0.00E-00	1863.34673	0.00E-00	2069.5102	4.55E-13	3974.73821	3.64E-12	1808.17105	2.27E-13
	3	2785.16328	2.27E-12	1760.10302	2.27E-13	1994.53631	1.59E-12	2220.37264	1.36E-12	4112.6311	4.55E-12	1905.41061	1.14E-12
	4	2856.2608	6.66E-03	1828.86438	1.59E-12	2059.86622	4.22E-04	2295.3801	1.48E-03	4180.88398	7.41E-03	1955.08562	7.65E+00
DE	2	2608.61078	1.82E-12	1627.90917	0.00E-00	1863.34673	0.00E-00	2069.5102	4.55E-13	3974.73821	3.64E-12	1808.17105	2.27E-13
	3	2785.16209	8.31E-03	1760.10302	2.27E-13	1994.53527	7.26E-03	2220.37264	1.36E-12	4112.6311	4.55E-12	1905.41061	1.14E-12
	4	2856.26131	2.80E-03	1828.86033	1.30E-02	2059.86527	6.85E-03	2295.3801	1.48E-03	4180.88398	7.41E-03	1955.08562	7.65E+00
CS	2	2608.61078	1.82E-12	1627.90917	0.00E-00	1863.34673	0.00E-00	2069.5102	4.55E-13	3974.73821	3.64E-12	1808.17105	2.27E-13
	3	2785.16328	2.27E-12	1760.10302	2.27E-13	1994.53631	1.59E-12	2220.37264	1.36E-12	4112.6311	4.55E-12	1905.41061	1.14E-12
	4	2856.26151	2.45E-03	1828.86438	1.59E-12	2059.86628	1.36E-12	2295.38047	2.27E-12	4180.88616	0.00E-00	1957.01797	0.00E-00
FA	2	2608.61078	1.82E-12	1627.90917	0.00E-00	1863.34673	0.00E-00	2069.5102	4.55E-13	3974.73821	3.64E-12	1808.17105	2.27E-13
	3	2785.16328	2.27E-12	1760.10302	2.27E-13	1994.53631	1.59E-12	2220.37264	1.36E-12	4112.6311	4.55E-12	1905.41061	1.14E-12
	4	2856.26213	4.55E-13	1828.86438	1.59E-12	2059.86628	1.36E-12	2295.38047	2.27E-12	4180.88616	0.00E-00	1957.01797	0.00E-00
IBA	2	2608.61078	1.36E-12	1627.90917	0.00E-00	1863.34673	0.00E-00	2069.5102	4.55E-13	3974.73821	4.09E-12	1808.17105	2.27E-13
	3	2785.16328	1.36E-12	1760.10302	2.27E-13	1994.53631	1.14E-12	2220.37264	1.36E-12	4112.6311	3.64E-12	1905.41061	1.14E-12
	4	2856.26213	4.55E-13	1828.86438	2.27E-12	2059.86628	9.09E-13	2295.38047	2.27E-12	4180.88616	0.00E-00	1957.01797	0.00E-00
GWO	2	2609.11376	1.84E-12	1627.90917	6.89E-13	1863.34673	1.84E-12	2069.5102	1.84E-12	3974.73821	2.30E-12	1808.17105	6.89E-13
	3	2785.61199	1.38E-12	1760.10302	6.89E-13	1994.53631	1.15E-12	2220.37264	1.38E-12	4112.6311	5.51E-12	1905.41061	9.19E-13
	4	2856.69877	4.59E-13	1828.86438	1.61E-12	2059.86628	2.30E-12	2295.38047	2.30E-12	4180.88616	0.00E+00	1957.01793	2.77E-04
	5	2891.49129	6.96E-03	1871.98523	1.91E-02	2092.77269	6.43E-03	2331.15611	3.42E-03	4216.94326	1.97E-03	1980.65571	2.57E-03

Çizelge 1 incelendiğinde ortalama değerler açısından $k=2$ durumda *Barbara* için GWO yöntemi diğer yöntemlerden daha iyi sonuç elde ederken. $k=3$ durumunda algoritmaların performansı arasında çok ciddi bir fark görülmemiştir. $k=4$ durumunda GWO

Çizelge 2 incelendiğinde, IBA yöntemi eşik seviyesi 2, 3 ve 4 olduğu durumlarda çok daha hızlı olurken, GWO yönteminin eşik seviyesinin 5 olduğu tüm durumlarda çok daha kısa sürede sonuç ürettiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak GWO yönteminin eşik seviyesinin 5 ve

daha yüksek olduğu durumlarda IBA yöntemine göre daha hızlı bir şekilde sonuç üretebileceği düşünülmektedir.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada çok seviyeli görüntü eşiklemeyle ilişkin önemli bir optimizasyon problemi ele alınmıştır. Eşikleme problemi üssel bir problem olduğu için sürü zekâsına dayalı meta sezgisel yöntemlerin kullanılması daha uygun olmaktadır. Dolayısıyla bu problem için gri kurt optimizasyon algoritmasını uyarlanmış ve elde edilen sonuçlar literatürde sıkça kullanılan popülasyon tabanlı diğer algoritmaların sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Önerilen GWO algoritması 6 standart benchmark görüntü üzerinde test edilmiştir. Çözüm kalitesi göz önüne alındığında, GWO algoritmasının genel olarak diğer tüm algoritmalarından belli ölçüde daha üstün olduğu kanıtlanmıştır. Bu sonuçlar da önerilen algoritmanın çok seviyeli görüntü eşikleme probleminin çözümünde kullanılabileceğini göstermiştir.

- [5] Adollah R., Mashor M. Y., Rosline H., and Harun N. H.. "Multilevel Thresholding as a Simple Segmentation Technique in Acute Leukemia Images". *Journal of Medical Imaging and Health Informatics*. 2: 285-288, (2012)
- [6] Dominguez A. R. and Nandi A. K.. "Detection of masses in mammograms via statistically based enhancement. multilevel-thresholding segmentation. and region selection". *Computerized Medical Imaging and Graphics*. 32: 304-315, (2008)
- [7] Alihodzic A. and Tuba M.. "Improved bat algorithm applied to multilevel image thresholding". *Scientific World Journal*. 2014. 176718, (2014)
- [8] Kumar S., Kumar P., Sharma T. K., and Pant M.. "Bi-level thresholding using PSO. Artificial Bee Colony and MRLDE embedded with Otsu method". *Memetic Computing*. 5: 323-334, (2013)
- [9] Pare S., Kumar A., Bajaj V., and Singh G. K.. "A multilevel color image segmentation technique based on cuckoo search algorithm and energy curve". *Applied Soft Computing*. 47. 76-102, (2016)

Çizelge 2. GWO yönteminin çalışma süreleri açısından IBA yöntemi ile karşılaştırılması (saniye cinsinden) (Comparison of GWO method with IBA method in terms of processing time (in seconds))

		Barbara	Oturma odası	Tekneler	Goldhill	Göl	Anten
IBA	2	0.039	0.039	0.038	0.038	0.039	0.046
	3	0.089	0.088	0.089	0.088	0.089	0.103
	4	3.014	2.945	2.931	2.775	2.613	2.67
	5	100.079	130.397	75.879	74.674	73.019	99.88
GWO	2	3.29	2.36	3.22	3.28	2.97	3.48
	3	25.26	21.17	21.38	22.35	22.81	23.87
	4	35.98	31.56	30.52	30.95	31.27	32.43
	5	39.40	37.11	36.53	36.96	37.15	40.59

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Sathya P. and Kayalvizhi R.. "Modified bacterial foraging algorithm based multilevel thresholding for image segmentation". *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 24: 595-615, (2011)
- [2] Lazaro J., Martin J. L., Arias J., Astarloa A., and Cuadrado C.. "Neuro semantic thresholding using OCR software for high precision OCR applications". *Image and Vision Computing*. 28: 571-578, (2010)
- [3] Anagnostopoulos G. C.. "SVM-based target recognition from synthetic aperture radar images using target region outline descriptors". *Nonlinear Analysis-Theory Methods & Applications*. 71: E2934-E2939, (2009)
- [4] Hsiao Y. T., Chuang C. L., Lu Y. L., and Jiang J. A.. "Robust multiple objects tracking using image segmentation and trajectory estimation scheme in video frames". *Image and Vision Computing*. 24: 1123-1136, (2006)
- [10] Guo Y. Z., Zhu W. X., Jiao P. P., Ma C. H., and Yang J. J.. "Multi-object extraction from topview group-housed pig images based on adaptive partitioning and multilevel thresholding segmentation". *Biosystems Engineering*. 135: 54-60, (2015)
- [11] Pal N. R. and Pal S. K.. "A Review on Image Segmentation Techniques". *Pattern Recognition*. 26: 1277-1294, (1993)
- [12] Osuna-Enciso V., Cuevas E., and Sossa H.. "A comparison of nature inspired algorithms for multi-threshold image segmentation". *Expert Systems with Applications*. 40: 1213-1219, (2013)
- [13] Ayala H. V. H., Santos F. M. d., Mariani V. C., and Coelho L. d. S.. "Image thresholding segmentation based on a novel beta differential evolution approach". *Expert Systems with Applications*. 42: 2136-2142, (2015)
- [14] Yang X. S.. "Efficiency Analysis of Swarm Intelligence and Randomization Techniques". *Journal of*

- Computational and Theoretical Nanoscience*. 9: 189-198, (2012)
- [15] Yang X. S.. "Review of meta-heuristics and generalised evolutionary walk algorithm". *International Journal of Bio-Inspired Computation*. 3: 77-84, (2011)
- [16] Yang X. S.. "Free Lunch or No Free Lunch: That Is Not Just a Question?". *International Journal on Artificial Intelligence Tools*. 21: (2012)
- [17] Gandomi A. H. and Yang X. S.. "Evolutionary boundary constraint handling scheme". *Neural Computing & Applications*. 21: 1449-1462, (2012)
- [18] Kennedy J. and Eberhart R.. "Particle swarm optimization". *1995 Ieee International Conference on Neural Networks Proceedings. 1-6*: 1942-1948, (1995)
- [19] Storn R. and Price K.. "Differential evolution - A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces". *Journal of Global Optimization*. 11: 341-359, (1997)
- [20] Yang X. S.. "Firefly Algorithms for Multimodal Optimization". *Stochastic Algorithms: Foundations and Applications. Proceedings* 169-178, (2009)
- [21] Fister I. Fister I. Yang X. S.. and Brest J.. "A comprehensive review of firefly algorithms". *Swarm and Evolutionary Computation*. 13: 34-46, (2013).
- [22] Gandomi A. H.. Yang X. S.. and Alavi A. H.. "Cuckoo search algorithm: a metaheuristic approach to solve structural optimization problems". *Engineering with Computers*. 29: 17-35, (2013)
- [23] Dorigo M. and Gambardella L. M.. "Ant colonies for the travelling salesman problem". *Biosystems*. 43: 73-81, (1997)
- [24] Tuba M. and Jovanovic R.. "Improved ACO Algorithm with Pheromone Correction Strategy for the Traveling Salesman Problem". *International Journal of Computers Communications & Control*. 8: 477-485, (2013)
- [25] Jovanovic R. and Tuba M.. "An ant colony optimization algorithm with improved pheromone correction strategy for the minimum weight vertex cover problem". *Applied Soft Computing*. 11: 5360-5366, (2011)
- [26] Jovanovic R. and Tuba M.. "Ant Colony Optimization Algorithm with Pheromone Correction Strategy for the Minimum Connected Dominating Set Problem". *Computer Science and Information Systems*. 10: 133-149, (2013)
- [27] Bacanin N. and Tuba M.. "Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm for Constrained Optimization Improved with Genetic Operators". *Studies in Informatics and Control*. 21: 137-146, (2012)
- [28] Tuba M. and Bacanin N.. "Artificial Bee Colony Algorithm Hybridized with Firefly Algorithm for Cardinality Constrained Mean-Variance Portfolio Selection Problem". *Applied Mathematics & Information Sciences*. 8: 2831-2844, (2014)
- [29] Brajevic I. and Tuba M.. "An upgraded artificial bee colony (ABC) algorithm for constrained optimization problems". *Journal of Intelligent Manufacturing*. 24: 729-740, (2013)
- [30] Subotic M. and Tuba M.. "Parallelized Multiple Swarm Artificial Bee Colony Algorithm (MS-ABC) for Global Optimization". *Studies in Informatics and Control*. 23: 117-126, (2014)
- [31] Yang X. S.. "A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm". *Nicso 2010: Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization*. 284: 65-74, (2010)
- [32] Kiran M. S.. "TSA: Tree-seed algorithm for continuous optimization". *Expert Systems with Applications*. 42: 6686-6698, (2015)
- [33] Tuba M. Brajevic I. and Jovanovic R.. "Hybrid Seeker Optimization Algorithm for Global Optimization". *Applied Mathematics & Information Sciences*. 7: 867-875, (2013)
- [34] Tuba M. and Bacanin N.. "Improved seeker optimization algorithm hybridized with firefly algorithm for constrained optimization problems". *Neurocomputing*. 143: 197-207, (2014)
- [35] Dai C. H.. Chen W. R.. Song Y. H.. and Zhu Y. F.. "Seeker optimization algorithm: a novel stochastic search algorithm for global numerical optimization". *Journal of Systems Engineering and Electronics*. 21: 300-311, (2010)
- [36] Mirjalili S.. Mirjalili S. M.. and Lewis A.. "Grey Wolf Optimizer". *Advances in Engineering Software*. 69: 46-61, (2014)
- [37] Jayakumar N.. Subramanian S.. Ganesan S.. and Elanchezhian E. B.. "Grey wolf optimization for combined heat and power dispatch with cogeneration systems". *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 74: 252-264, (2016)
- [38] Otsu N.. "A threshold selection method from gray-level histograms". *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*. 9: 62-66, (1979)



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



Güç kalitesi bozulmalarının 2 boyutlu ayrık dalgacık dönüşümü ve torbalama karar ağaçları yöntemi ile sınıflandırılması

Classification of power quality disturbances with 2D discrete wavelet transform and bagged decision trees method

Yazar(lar) (Author(s)): Seçkin KARASU¹, Zehra SARAÇ²

ORCID¹: 0000-0001-5277-5252

ORCID²: 0000-0003-3330-5196

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Karasu S. ve Saraç Z., “güç kalitesi bozulmalarının 2 boyutlu ayrık dalgacık dönüşümü ve torbalama karar ağaçları yöntemi ile sınıflandırılması”, *Politeknik Dergisi*, 21(4): 849-855, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.391795

Güç Kalitesi Bozulmalarının 2 Boyutlu Ayrık Dalgacık Dönüşümü ve Torbalama Karar Ağaçları Yöntemi ile Sınıflandırılması

Araştırma Makalesi / Research Article

Seçkin KARASU, Zehra SARAC*

Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

(Geliş/Received : 07.07.2017 ; Kabul/Accepted : 11.09.2017)

ÖZ

Bu çalışmada, Güç Kalitesi (GK) bozulmalarının sınıflandırılması için 2 Boyutlu Ayrık Dalgacık Dönüşümü (2B-ADD) yöntemi ile öznelikler çıkartılmakta ve Destek Vektör Makineleri (DVM), Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Torbalama Karar Ağaçları (TKA) yöntemleri ile sınıflandırma işlemi yapılmaktadır. Gürültülü (40 dB, 30 dB ve 20 dB) ve gürültüsüz durumları içeren 11 farklı GK bozulması için toplamda 2200 adet sinyal sentetik olarak üretilmektedir. Sinyaller 2 boyutlu görüntü matrislerine çevrilmekte ve her birine 2B-ADD uygulanmaktadır. Farklı ayrıştırma seviyesi ve istatistiksel özellikler uygulanarak öznelikler oluşturulmaktadır. Özneliklerden en uygun olanları Sıralı İleri Seçim (SİS) ve ReliefF yöntemleri ile seçilmektedir. Benzetim çalışmasına göre 3 farklı sınıflandırıcının başarımı birbirleri ile kıyaslanmaktadır. Sıralı ileri seçim ile seçilen öznelikleri kullanan TKA yönteminin %99.12±0.12 oranı ile en iyi başarımı veren yöntem olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Güç kalitesi, 2 boyutlu ayrık dalgacık dönüşümü, torbalama karar ağaçları sınıflandırıcısı, sıralı ileri seçim, ReliefF.

Classification of Power Quality Disturbances with 2D Discrete Wavelet Transform and Bagged Decision Trees Method

ABSTRACT

In this study, to classify Power Quality (PQ) disturbances, attributes are extracted by 2D Discrete Wavelet Transform (2D-DWT) method and Support Vector Machines, Artificial Neural Networks and Bagged Decision Trees (BDT) methods are used for classification stage. 2200 signals are synthetically produced for 11 different PQ disturbances, including noisy (40 dB, 30 dB and 20 dB) and noiseless states. Signals are transformed into 2D image matrices and 2D DWT is applied to each. Attributes are created by applying different level of decomposition and statistical properties. The most appropriate ones are selected with Sequential Forward Selection (SFS) and ReliefF methods. BDT method, which uses selected attributes with SFS, is the method that gives the best performance with a rate of 99.12±0.12%.

Keywords: Power quality, 2D discrete wavelet transform, bagged trees classifier, sequential forward selection, ReliefF

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son zamanlarda elektrik şebekesinde yenilenebilir enerji kaynaklarının, ileri hızlı kontrol donanımlarının ve karmaşık sistem bağlantılarının kullanımının artması, Güç Kalitesi (GK) bozulmalarında artışa sebep olmakta ve bu durum konut, sanayi ve akademik alanlarda kritik bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır [1, 2]. GK bozulmaları, elektrik şebekesinin ekonomik işletilmesini olumsuz etkilemektedir [3]. Mevcut şebekelerin akıllı şebekelere dönüşmeye başladığı günümüzde, hem üreticilerin hem de tüketicilerin yüksek GK seviyesine ulaşmalarını sağlamak için otomatik olarak GK'nın izlenmesi, bozulmaların tanınması ve sınıflandırılması önemli olmaktadır [3, 4].

GK bozulmalarını ayırt etmek için her bir bozulmayı temsil edecek özellikler belirlenmelidir [4]. Literatürde sinyal işleme yöntemleri ile ayırt edici öznelikler çıkartılmakta ve bunlar sınıflandırma aşamasında kullanılmaktadır [4, 5]. Ayrık Fourier Dönüşümü (AFD), Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (KZFD), Dalgacık Dönüşümü (DD), Stockwell Dönüşümü (SD), Hilbert Dönüşümü (HD) ve Gabor Dönüşümü (GD) [4, 5] gibi sinyal işleme yöntemleri GK bozulmalarından özneliklerin çıkartılması için kullanılmaktadır. Sınıflandırma aşamasında oluşturulacak modelin karmaşıklığını azaltmak ve sınıflandırma başarımını yükseltmek amacıyla çıkartılan özneliklerden en uygun olanları seçilmektedir [5, 6]. Makine öğrenmesinde filtreleme ve sarmalama gibi öznelik seçme yaklaşımları mevcuttur [7]. Filtreleme yaklaşımında sınıflandırma yöntemi uygulanmadan önce en uygun öznelikler korelasyon tabanlı belirlenmektedir. Sarmalama yaklaşımında ise sınıflandırma performansı

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : zehrasarac@beun.edu.tr

göz önünde bulundurularak en uygun öznelik vektörü belirlenmektedir. Literatürde Bilgi Kazancı, Ki-Kare, ReliefF, F-Skor gibi filtreleme yöntemleri ile Sıralı İleri Seçim (SİS), Sıralı Geri Seçim (SGS), Genetik Algoritma (GA), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Karınca Koloni Optimizasyonu (KKO) gibi sarmalama tabanlı öznelik seçme yöntemleri bulunmaktadır [5-7]. Karar Ağaçları (KA), Naive Bayes (NB), k-En Yakın Komşu (k-EYK), Destek Vektör Makineleri (DVM), Yapay Sinir Ağları (YSA) [18], Hibrid ve Kolektif Öğrenme yaklaşımları gibi sınıflandırma yöntemleri mevcuttur [8, 9].

Literatürde GK bozulmalarını temsil eden özneliklerin çıkartılması aşamasında bir boyutlu sinyal işleme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmanın da temelini oluşturan sinyal işleme yöntemi olarak 2B-ADD [10-12] çalışmaları mevcuttur. Ece ve Gerek yaptıkları çalışmada GK bozulma verisi üzerinde bir periyot boyunca değişim gösteren dalga şekillerini 2 boyutlu görüntü matrisine çevirmişlerdir. Daha sonra 2B-ADD, GK bozukluklarını tespit etmek için kullanmışlardır. Çalışmada önerdikleri yöntemin gerilim yükselmesi, gerilim kesintisi ve harmonikli durumlar gibi sinyalleri ayırt etmede önemli özellikler sergilediğini göstermiş olmalarına rağmen herhangi bir sınıflandırma algoritması ile performans incelemesi yapmamışlardır [10]. Shareef ve arkadaşları, 150 adet 8 çeşit GK bozulma verisini önerdikleri görüntü işleme tabanlı yöntem ile sınıflandırmışlardır. Önce 1 boyutlu veriyi 2 boyutlu gri görüntü verisine çevirmişler daha sonra Ayrık Dalgacı Dönüşümü (ADD) ile Yatay, Dikey ve Diyagonal detay katsayılarını elde etmişlerdir. [10]'daki gibi elde ettikleri öznelik dalga formunun büyüklüğü ve süresine bağlı olarak sınıflandırma yapmışlardır. Bu yöntemin %97.33 oranında başarımlı sağladığını göstermişlerdir. Sonrasında Gama Doğrulaması (Gamma Corection), Kenar Belirleme (Edge Detection), Doruklar ve Vadiler (Peaks and Valleys) tanıma yöntemleri ile özellik çıkartımı yapıp bu morfolojik özelliklere dayalı sınıflandırma yapmışlardır. Sınıflandırıcı başarımlarını [10]'daki yöntemle elde ettikleri ile kıyaslama yaparak, sınıflandırma başarımlarını önerdikleri yöntem ile %99.33 olarak bulmuşlardır [11].

Krishna ve Kaliaperumal yaptıkları çalışmada 1 boyutlu GK bozulma verisini 2 boyutlu veriye çevirip, bu matrisi 2B-ADD yöntemi ile Yaklaşık, Yatay, Dikey ve Diyagonal olmak üzere 4 alt banda ayırmışlardır. Daha sonra 8 çeşit sınıf içeren 2000 veri üzerinde çıkarttıkları özellikleri kullanarak Karar Ağaçları Sınıflandırıcısı ile sınıflandırma işlemi yapmışlardır. Sınıflandırıcı başarımlarını 1 boyutlu ADD (1B-ADD) ile kıyaslamışlardır. Önerdikleri yöntemin %98,98'lik bir başarımlı olduğunu göstermişlerdir (1B-ADD için bu oran %94.3). Daha sonra bozulma türlerinin ikili veya üçlü olacak şekilde gerçekleşmesi durumu içinde bir çalışma yapmışlardır. 16 farklı sınıf içeren 480 veri üzerinde 1B-ADD, 2B-ADD ve 1 Boyutlu Stockwell Dönüşümü (1B-SD) yöntemleri ile sırası ile %81.04, %97.29 ve %97.91'lik sınıflandırıcı başarımlı elde etmişlerdir. Önerdikleri yöntemin 1D-SD sonucuna yakın olduğunu bulmuşlardır. Yüksek örnekleme frekansında

çalışma durumunda, dağıtık bilgisayarlar ve paralel işlemciler veya FPGA ve GPU gibi özelleştirilmiş işlemciler kullanılarak işlem yükünün azaltılabileceğini önermişlerdir [12].

Diğer bir sinyal işleme yaklaşımını kullanan Uyar ve arkadaşları yaptıkları çalışmada S-dönüşümü ve yerel ikili örüntüler yöntemi ile 8 farklı güç kalitesi bozulma çeşidini ayırmak için bir çalışma yapmışlardır. Sinyallere SD uygulamışlar, daha sonra ön işlem yaparak gri seviyeli görüntü elde etmişlerdir. Gri görüntülü sinyallerden ikili görüntüye yerel ikili örüntüler yaklaşımı ile geçiş yapmışlardır. Bu dönüşüm ile histogram şeklinde bir öznelik vektörü elde edilmiştir. YSA ile sınıflandırma yapmışlar ve 10-katlamalı çapraz doğrulama ile oluşturdukları modeli test etmişlerdir. Sonuçta 8 sınıf için %98.12'lik bir başarımlı elde etmişlerdir [13].

Bu çalışmada, 2B-ADD yöntemi ve istatistiksel özellikler ile güç kalitesi bozulmalarından gerekli öznelikler çıkartılmaktadır. Öznelik seçiminde SİS ve ReliefF yöntemleri sırasıyla uygulanmaktadır. Sınıflandırma adımı DVM, YSA ve TKA yöntemleri ile en yüksek başarımlı sınıflandırıcı oluşturulmaktadır. 2B-ADD yönteminde 1., 2. ve 3. seviye ayırıştırma için SİS yöntemi ile seçilen öznelikleri kullanan TKA sınıflandırıcısının genel başarımlı %99.12±0.12 olarak elde edilmektedir. 2B-ADD ve TKA yöntemlerine dayalı GK bozulmalarını sınıflandıran bu modelin, literatürdeki görüntü işlemeye dayalı modellerle kıyaslaması yapılmaktadır. Önerilen modelin 11 farklı GK bozulması ile en çok sınıf içeren sınıflandırıcı modeli olmasına rağmen, diğer yöntemlere göre başarımlarının oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Çalışmada kullanılan yöntemler II. bölümde açıklanmakta, farklı ayırıştırma seviyelerinin uygulandığı ve en iyi özneliklerin seçilerek farklı sınıflandırma modellerinin başarımları III. bölümde kıyaslanmakta ve IV. bölümde sonuçlar değerlendirilmektedir.

2. MODELLER VE YÖNTEMLER (MODELS AND METHODS)

2.1. Veri seti (Dataset)

Çalışmada, 11 farklı GK bozulma durumunu içeren 2200 adet sinyal matematiksel eşitliklere dayalı olarak oluşturulmaktadır [9]. Standartlarla belirlenmiş olan GK olayları, normalize genliğe sahip ve 50 Hz şebeke frekansı temel alınarak üretilmektedir. Tek bir sinyal, satır ve sütun sayısı eşit 2 boyutlu bir matris haline dönüştürülebi- len 1600 adet veri noktası içermektedir. Sinyalin örnekleme frekansı 8 kHz olmaktadır. Her bir sinyalde 10 periyot bulunmaktadır. Gürültüsüz ve 40 dB, 30 dB ve 20 dB Gauss gürültü seviyesi içeren sinyaller eşit miktarda üretilmektedir. Sinyal çeşitleri için sınıf etiketleri ve sinyal sayıları Çizelge 1.'deki gibi verilmektedir.

Çizelge 1. GK bozulmaları için sınıf etiketleri ve sayıları (Class tags and numbers for PQ disturbances)

Etiket	Sinyal Çeşidi	Sinyal Adedi
S1	Sinüoidal Sinyal	200
S2	Gerilim Düşmesi	200
S3	Gerilim Yükselmesi	200
S4	Gerilim Kesintisi	200
S5	Gerilim Titreşimi	200
S6	Geçici Sahnımlı Durum	200
S7	Harmonikli Durum	200
S8	Gerilimde Çentik	200
S9	Gerilimde Ani Yükseliş	200
S10	Harmonikli Gerilim Düşmesi	200
S11	Harmonikli Gerilim Yükselmesi	200

2.2. Veri Önileme (Data pre-processing)

Veri önileme, veri içerisinde gürültü bileşenlerinin, tutsuz, eksik veya kayıp verinin temizlenmesi amacıyla yapılmaktadır [7]. Benzetim çalışmasında GK bozulma sinyallerindeki özellikleri kaybetmeyen ancak gürültü bileşenlerini azaltan Butterworth alçak geçiren filtre uygulanmaktadır.

2.3. Öznitelik Çıkartma (Feature Extraction)

2.3.1 RMS ve THD Hesabı (Calculation of RMS and THD)

RMS (Kare Ortalamalarının Karekökü) değeri, sinyal üzerinde (V_s) N adet noktanın karelerinin toplamının ortalaması karekökü alınarak hesaplanmaktadır. Bu ifade Eşitlik 1 ile verilmektedir.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (V_s(n))^2} \quad (1)$$

THD (Toplam Harmonik Bozunum) hesabı, sinyal üzerinde n. harmonik değerinin RMS değerlerinin karesinin toplamının karekökü, temel frekansın RMS değerine (V_{temel}) oranlanması ile yapılmaktadır. Bu ifade Eşitlik 2 ile verilmektedir.

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^N (V_{rms}(n))^2}{V_{temel}}} \quad (2)$$

2.3.2 İki Boyutlu Ayrık Dalgacık Dönüşümü (2D Discrete Wavelet Transform)

2B-ADD kullanarak, iki boyutlu ölçeklendirme fonksiyonu $\varphi(x,y)$ ve üç adet iki boyutlu dalgacık fonksiyonu $\psi^H(x,y)$, $\psi^V(x,y)$ ve $\psi^D(x,y)$ elde edilebilir [14]. Bu fonksiyonlar, her biri tek boyutlu bir ölçekleme fonksiyonuna (φ) bağlı olan dalgacık fonksiyonlarıdır (ψ). Tek boyutlu bu dalgacık fonksiyonları, farklı yönlerdeki etkileri dikkate alınarak ayrılabilir ölçeklendirme parametresine bağlı olarak Eşitlik 3-6 ile ifade edilmektedir [12, 14].

$$\varphi(x,y) = \varphi(x)\varphi(y) \quad (3)$$

$$\psi^H(x,y) = \psi(x)\varphi(y) \quad (4)$$

$$\psi^V(x,y) = \varphi(x)\psi(y) \quad (5)$$

$$\psi^D(x,y) = \varphi(x)\varphi(y) \quad (6)$$

Eşitlik 4-6 ile ifade edilen dalgacıklar iki boyutlu görüntü üzerinde yatay (ψ^H), dikey (ψ^V), diyagonal (ψ^D) değişimleri ortaya koymaktadırlar.

Ayrılabilir iki boyutlu ölçekleme ve frekansa bağlı olan dalgacık fonksiyonları Eşitlik 7-8 ile yazılmaktadır.

$$\varphi_{j,m,n}(x,y) = 2^{j/2} \varphi(2^j x - m, 2^j y - n) \quad (7)$$

$$\psi_{j,m,n}^i(x,y) = 2^{j/2} \psi^i(2^j x - m, 2^j y - n) \quad (8)$$

Eşitlik 8'de i terimi H, V veya D değerlerinden birini ifade etmektedir ($i=\{H,V,D\}$). M ve N boyutlarındaki $f(x,y)$ fonksiyonunun ADD'si Eşitlik 9-10 ile verilebilir.

$$W_\varphi(j_0, m, n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) \varphi_{j_0,m,n}(x,y) \quad (9)$$

$$W_\psi^i(j, m, n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) \psi_{j,m,n}^i(x,y) \quad (10)$$

Normalde $j_0 = 0$ olsun, $j=0,1,2,\dots,J-1$ ve $m,n=0,1,2,\dots,2^j-1$ olacak şekilde $m,n=0,1,2,\dots,2^j-1$ seçelim. Bu eşitliklerdeki j_0 ölçek fonksiyonu için keyfi bir başlangıç noktasını, $W_\varphi(j_0, m, n)$ katsayıları ise j_0 ölçeğinde $f(x,y)$ fonksiyonu için yaklaşık katsayısını ve $W_\psi^i(j, m, n)$ yatay, dikey ve diyagonal detay katsayılarını $j \geq j_0$ koşulu için ifade etmektedir [14].

2.4. Öznitelik Seçme Yöntemleri (Feature Selection Methods)

2.4.1. Sıralı İleri Seçim (SİS) (Sequential Forward Selection-SFS)

Bu yöntemde, başlangıç öznitelik kümesi boş küme seçilmekte ve sırasıyla öznitelikler eklendikçe kriter değeri hesaplanmaktadır [6]. Bu yöntemde ilk seçilen en önemli öznitelik olmaktadır. Her bir adımda kriter değeri hesaplanmakta ve bu değer sıfır olana kadar iterasyona devam edilmektedir [6]. Koşul sağlandığında en uygun öznitelik kümesi bulunmaktadır.

2.4.2. ReliefF Yöntemi (ReliefF Method)

Bu yöntem veri madenciliği uygulamalarında sınıflandırma ve regresyon analizinde özniteliklerin seçilmesinde kullanılmaktadır [6].

ReliefF algoritmasındaki temel amaç, değerleri birbirine yakın örnekler arasında ne kadar iyi ayırt edildiğine göre özniteliklerin kalitesini tahmin etmektir [15, 16]. Rastgele seçilmiş örnek sayısı R olmak üzere, algoritma iki en yakın komşu için arama yapmaktadır. Bunlardan ilki aynı sınıftan en yakın komşuyu ifade eden H ve farklı sınıftan en yakın komşuyu ifade eden M olarak tanımlanır. Aynı ve farklı sınıftan en yakın komşuları hesaplamak için çok boyutlu öklit uzaklığı kullanılmaktadır. R, M ve H değerlerine bağlı A öznitelikleri için tahmin edilen $W[A]$ ağırlık katsayısı güncellenmekte ve ağırlık katsayılarının bulunması için m kez çalıştırılmak-

tadır [15]. İki ayrı örnek için öznitelik değerleri arasındaki fark diff fonksiyonu ile hesaplanmakta ve $W[A]$ öznitelik kalitesi Eşitlik 11 ile verilmektedir.

$$W_{yeni}[A] = W_{eski}[A] - \frac{\text{diff}(A, R, H)}{m} + \frac{\text{diff}(A, R, M)}{m} \quad (11)$$

Yöntem Kononenko tarafından, tamamlanmamış, gürültülü verilere toleranslı ve çoklu sınıf içeren problemlerin çözümü için uyarlanmıştır [17].

2.5 Sınıflandırma Yöntemleri (Classification Methods)

2.5.1. Destek Vektör Makineleri (DVM) (Support Vector Machines-SVM)

DVM son zamanlarda veri sınıflandırma ve regresyon problemleri için kullanılan güçlü bir veri madenciliği aracıdır [5, 7]. 2 farklı DVM sınıflandırıcı kombinasyonu ile çoklu sınıf içeren problemlere çözüm aranmaktadır [5]. DVM, iki grubun üyelerini birbirine en uzak olacak şekilde ayıran sınır çizgisini bulmaya çalışmaktadır [7].

2.5.2. Yapay Sinir Ağları (YSA) (Artificial Neural Networks-ANN)

Farklı karmaşık ve gerçek dünya problemini çözmek amacıyla YSA tabanlı yöntemler kullanılmaktadır. Sinir ağı tabanlı sınıflandırma yöntemi, kendi kendini ayarlayabilme, öğrenebilme yeteneğine sahip, veri ilişkilerini bilmesine gerek olmadan farklı modellere uygulanabilme gibi ayırt edici özelliklere sahiptir [4]. Giriş ve çıkış arasında bir gösterimin olmadığı, örüntü tanıma, sınıflandırma [18], regresyon [19, 20] analizlerinde kullanılmaktadır.

2.5.3. Torbalama Karar Ağaçları (TKA) (Bagged Decision Trees-BDT)

Kolektif öğrenme yöntemi olan torbalama karar ağacı sınıflandırıcısı, birlikte çalışan sınıflandırma algoritmalarını kullanarak başarıyı arttırmaya yönelik olarak düzenlenmektedir [7]. Tekil öğrenci yerine, temel öğrenciden birden fazla kopya bir karar ağacı oluşturmakta ve sınıflandırıcı çıkışı oylama tekniği ile birleştirilmektedir [7].

2.6. K-Katlamalı Çapraz Doğrulama (K-fold Cross Validation)

K katlamalı çapraz doğrulama, X veri kümesi rastgele olmak üzere, K tane eşit büyüklükte parçalara

bölünmekte ve her katta biri doğrulama diğerleri eğitim amaçlı olarak kullanılmaktadır. Oluşturulan K adet sınıflandırma başarımının ortalaması alınarak sistemin genel başarımı hesaplanmaktadır [7].

2.7. Başarım Ölçütü (Performance Measure)

Oluşturulan sınıflandırıcının ne kadar başarılı olduğunu Eşitlik 12'deki başarım ölçütü ifadesi ile hesaplamak mümkündür [7]. Bu eşitlikteki TP ve TN sırasıyla doğru pozitif ve doğru negatifleri, FP ve FN ise yanlış pozitifleri ve yanlış negatifleri temsil etmektedir.

$$\text{Doğruluk} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (12)$$

3. BENZETİM SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS)

Benzetim çalışması için MATLAB programı kullanılmaktadır. Matematiksel eşitlikler ile 2200 adet GK bozulma verisi üretilmektedir. 1. ve 2. öznitelikler sırası ile RMS ve THD değerleri olmaktadır. 2B-ADD'de Db1 (Daubechies-1) ana dalgası kullanılmakta ve 1. 2. ve 3. seviye ayrıştırma için inceleme yapılmaktadır. 2B-ADD sonucunda oluşan Yatay, Dikey, Diyagonal ve Yaklaşık katsayı matrisleri için ağırlıklı, harmonik ve geometrik ortalama, standart sapma, çarpıklık, basıklık gibi istatistiksel özellikler hesaplanmaktadır. Dönüşüm sonucunda oluşan katsayı matrisleri için En Yüksek Satır Vektörü (EYSaV) ve En Yüksek Sütun Vektörü (EYSüV) oluşturulmaktadır. EYSaV ve EYSüV için sırasıyla ağırlıklı ortalama, standart sapma ve norm entropi değerleri hesaplanmaktadır.

Zaman bölgesine dayalı RMS ve THD değerleri ile 2B-ADD analizi sonucu oluşan istatistik tabanlı değerler birlikte düşünüldüğünde, sadece 1. seviye ayrıştırma için 50 adet, 1. seviye ve 2. seviye ayrıştırma için 98 adet ve 1. seviye, 2. seviye, 3.seviye ayrıştırma için toplamda 146 adet öznitelik oluşturulmaktadır. Çizelge 2.'de tüm öznitelikler ve öznitelik indisleri verilmektedir.

Ayrıştırma seviyesinin artırılması ile amaçlanan, seçilen öznitelikler ve oluşturulan farklı sınıflandırıcılar için en yüksek başarıyı veren modeli ortaya çıkartmaktır. Karmaşıklığı azaltmak ve başarıyı yüksek sınıflandırıcı

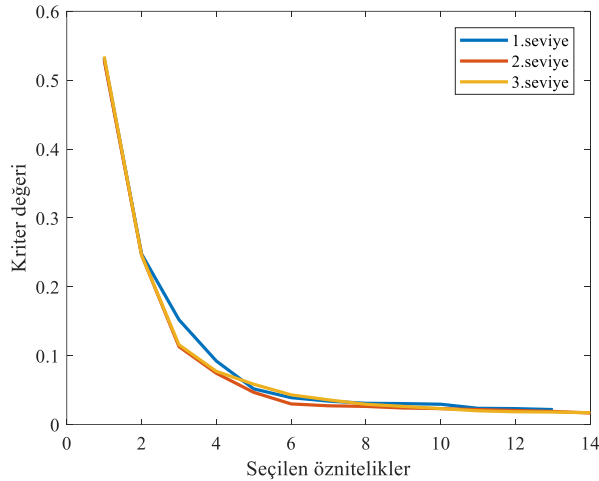
Çizelge 2. Oluşturulan öznitelikler ve öznitelik indisleri (Created features and their indices)

İstatistiksel Özellikler	I_1^V	I_1^H	I_1^D	I_1^A	I_2^V	I_2^H	I_2^D	I_2^A	I_3^V	I_3^H	I_3^D	I_3^A
Ağırlıklı Ortalama	3	15	27	39	51	63	75	87	99	111	123	135
Harmonik Ortalama	4	16	28	40	52	64	76	88	100	112	124	136
Geometrik Ortalama	5	17	29	41	53	65	77	89	101	113	125	137
Standart Sapma	6	18	30	42	54	66	78	90	102	114	126	138
Çarpıklık	7	19	31	43	55	67	79	91	103	115	127	139
Basıklık	8	20	32	44	56	68	80	92	104	116	128	140
EYSaV Ağırlıklı Ortalama	9	21	33	45	57	69	81	93	105	117	129	141
EYSaV Standart Sapma	10	22	34	46	58	70	82	94	106	118	130	142
EYSaV Norm Enerji	11	23	35	47	59	71	83	95	107	119	131	143
EYSüV Ağırlıklı Ortalama	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120	132	144
EYSüV Standart Sapma	13	25	37	49	61	73	85	97	109	121	133	145
EYSüV Norm Entropi	14	26	38	50	62	74	86	98	110	122	134	146

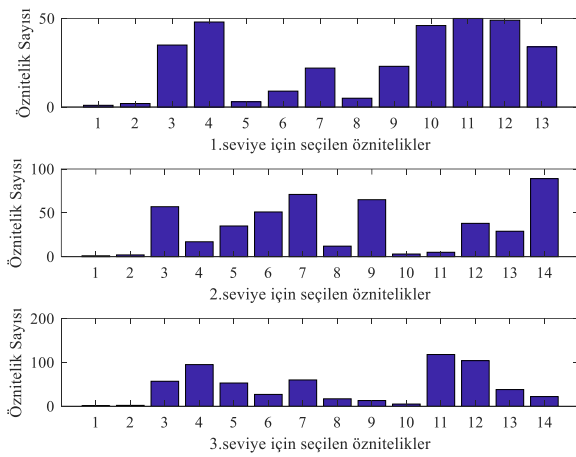
(1;RMS, 2:THD)

modeli oluşturmak için SİS ve ReliefF yöntemleri ile en iyi öznelikler seçilmektedir. DVM, YSA ve TKA yöntemleri ile her bir durumda seçilen öznelikler için modeller oluşturulmakta ve 10-katlamalı çapraz doğrulama ile sınıflandırıcı başarımları ölçülmektedir.

Şekil 1. ve Şekil 3.'te sırasıyla SİS ve ReliefF yöntemlerinin, her bir iterasyon sonucu kriter değeri değişiminin 2B-ADD analizinde farklı ayırıştırma seviyesi durumlarındaki değişimi verilmektedir. SİS yöntemi için genel olarak iterasyon sayısının artırılması ve 3. seviye ayırıştırmanın da dahil edilmesi ile kriter değerinin azaldığı ve en düşük kaldığı görülmektedir.



Şekil 1. SİS yöntemi için her bir iterasyondaki kriter değeri değişimi (Change of the criterion value in each iteration for SFS method)

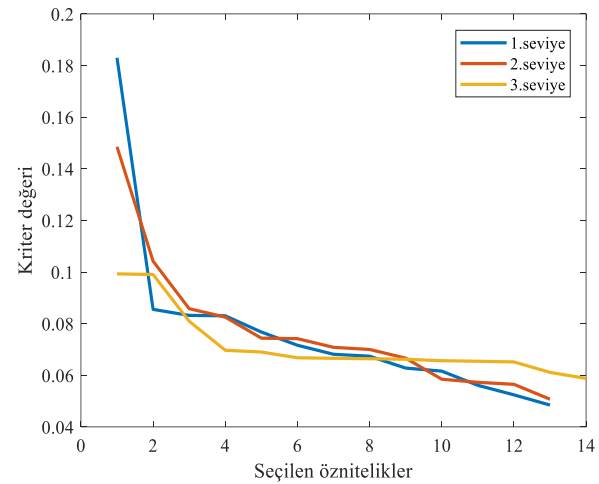


Şekil 2. SİS yöntemi için ağırlık değerlerine göre sıralanmış öznelikler (Features ordered by weights for SFS method)

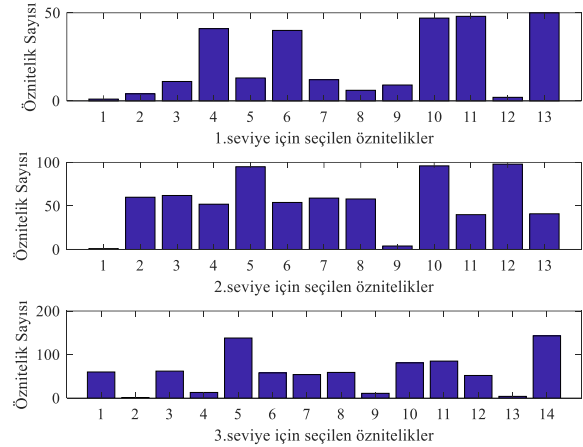
ReliefF yöntemi için iterasyon sayısının artırılması ile kriter değeri azalmakta ancak 1. seviye için kriter değeri en düşük kalmaktadır. Her bir iterasyonda sırasıyla seçilen özneliklerin indisleri SİS ve ReliefF yöntemleri için sırasıyla Şekil 2. ve Şekil 4.'te verilmektedir.

DVM için çekirdek fonksiyonu Polinom ve çoklu sınıf modeli Bire Bir (One vs One) olarak seçilmektedir. YSA için giriş katmanı nöron sayısı 1 ile 14 arasında, gizli katman nöron sayısı 1 ile 60 arasında değiştirilmekte ve çıkış katmanı nöron sayısı 11 olmaktadır. Aktivasyon

fonksiyonları Tan-Sigmoid, Soft-Max olarak seçilmektedir. Eğitim aşamasında Momentumlu Gradyan azalan algoritması kullanılmakta ve Epoch sayısı 1000 olarak alınmaktadır. Kolektif öğrenme yöntemi Torbalama (Bagging) yöntemi ve temel öğrenicisi Karar Ağaçları sınıflandırıcı olan TKA için 30 adet öğrenici kopyası oluşturulmaktadır. İki farklı yöntemle seçilen öznelikler ve farklı ayırıştırma seviyeleri için DVM, YSA ve TKA yöntemleri ile sınıflandırma başarımları sonuçları Çizelge 3.'teki gibi verilmektedir.



Şekil 3. ReliefF yöntemi için her bir iterasyondaki kriter değeri değişimi (Change of the criterion value in each iteration for ReliefF method)



Şekil 4. ReliefF yöntemi için ağırlık değerlerine göre sıralanmış öznelikler (Features ordered by weights for ReliefF method)

Çizelge 3. Sınıflandırma yöntemlerinin başarımları (Performances of classification methods)

2B ADD Analizi	Öznelik Seçme Yöntemleri	Sınıflandırma Yöntemleri		
		DVM	TKA	YSA
1-seviye	SİS	97.94±0.11	98.54±0.13	98.23±0.11
	ReliefF	97.90±0.14	98.17±0.21	98.09±0.15
1 ve 2-seviye	SİS	98.62±0.10	98.75±0.14	98.53±0.08
	ReliefF	94.21±0.22	93.63±0.34	92.07±0.46
1, 2, 3-seviye	SİS	98.41±0.11	99.12±0.12	98.60±0.05
	ReliefF	97.28±0.19	97.75±0.22	97.10±0.07

Çizelge 3.'ten, genel olarak SİS ile seçilen özneliklerin Relief yöntemi ile seçilenlere göre yüksek başarımlı sağladığı görülmektedir. DVM yönteminin en yüksek başarımlı, 1. ve 2. seviye ayrıştırma için SİS ile seçilen özneliklerin kullanıldığı durumda %98.62±0.10 olarak bulunmaktadır. YSA yönteminde ise en yüksek başarımlı, 1., 2. ve 3. seviye ayrıştırma için SİS ile seçilen özneliklerin kullanıldığı durumda %98.60±0.05 olarak ortaya çıkmaktadır. YSA yönteminin DVM'ye göre ayrıştırma seviyesi arttırıldığında başarımlı olarak yakaladığı görülmektedir. 1., 2. ve 3. seviye ayrıştırma için üretilen ve SİS ile seçilen öznelikler için TKA yöntemi, %99.12±0.12 oranı ile en yüksek sınıflandırıcı başarımlı yakalamaktadır. Çizelge 4.'te en iyi modelin giriş olarak aldığı özneliklerin hangi ayrıştırma seviyelerinden geldiği görülmektedir. Zaman

bölgesinden 2 adet ve ADD analizinde 1. seviye ayrıştırmadan 6, 2. seviyeden 4 ve 3. seviyeden 2 adet olmak üzere toplamda 14 adet öznelik SİS yöntemi ile seçilmektedir. Çizelge 5.'te ise en iyi model olan TKA yöntemi için sınıflandırma başarımlı karışıklık matrisi ile sunulmaktadır. Bu yöntem, S2 sınıfını %97.5 oranı ile en düşük oranda, S1, S7 ile S8 sınıflarını ise %100 oranında sınıflandırmaktadır.

Çizelge 6.'da çalışmada ortaya çıkan sınıflandırıcının başarımlının, iki boyutlu görüntü işlemeye dayalı olarak önerilen diğer yöntemlerle kıyaslanması yapılmaktadır.

Literatürdeki sonuçlara göre oluşturulan model, 11 farklı GK bozulması ile en çok sınıf içeren sınıflandırıcı modeli olmasına rağmen, diğer yöntemlere göre başarımlının oldukça yüksek olduğu görülmektedir.

Çizelge 4. 2B-ADD analizinde 1., 2. ve 3. seviye ayrıştırma seviyeleri için SİS yöntemi ile seçilen öznelikler (Selected features by SFS method for 1st, 2nd and 3rd level decompositions in 2D-DWT analysis)

İstatistiksel Özellikler	I ₁ ^V	I ₁ ^H	I ₁ ^D	I ₁ ^A	I ₂ ^V	I ₂ ^H	I ₂ ^D	I ₂ ^A	I ₃ ^V	I ₃ ^H	I ₃ ^D	I ₃ ^A
Ağırlıklı Ortalama	3	15	27	39	51	63	75	87	99	111	123	135
Harmonik Ortalama	4	16	28	40	52	64	76	88	100	112	124	136
Geometrik Ortalama	5	17	29	41	53	65	77	89	101	113	125	137
Standart Sapma	6	18	30	42	54	66	78	90	102	114	126	138
Çarpıklık	7	19	31	43	55	67	79	91	103	115	127	139
Baskılık	8	20	32	44	56	68	80	92	104	116	128	140
EYsAv Ağırlıklı Ortalama	9	21	33	45	57	69	81	93	105	117	129	141
EYsAv Standart Sapma	10	22	34	46	58	70	82	94	106	118	130	142
EYsAv Norm Enerji	11	23	35	47	59	71	83	95	107	119	131	143
EYSüV Ağırlıklı Ortalama	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120	132	144
EYSüV Standart Sapma	13	25	37	49	61	73	85	97	109	121	133	145
EYSüV Norm Entropi	14	26	38	50	62	74	86	98	110	122	134	146
Seçilen	2	2	2		3			1	1	1		

(1:RMS, 2:THD)

Çizelge 5. En iyi model olan TKA için karışıklık matrisi (Confusion matrix for the best model BDT)

S1	200											100
S2		195		4								97.5
S3	1		196		3							98
S4				199							1	99.5
S5					200							100
S6	4					196						98
S7							200					100
S8								200				100
S9	1		1						198			99
S10		2								198		99
S11			1								199	99.5
												99.14
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	

Tahmin Edilen Sınıf

Çizelge 6. Önerilen yöntemin literatürdeki çalışmalar ile kıyaslanması (Comparison of the proposed method with the studies in the literature)

Çalışmalar	Sınıf	Sinyal İşleme Yöntemi	Sınıflandırma Başarımlı
[10]	4 adet	2B-ADD	-
[11]	8 adet	Gama Doğrulaması, Kenar Belirleme, Doruklar Vadiler	%99.33
[12]	7 adet	2B-ADD	%98.98
[13]	8 adet	1D S-Dönüşümü, Yerel İkili Örüntüler	%98.12
Bu çalışma	11 adet	2B-ADD	%99.12±0.12

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, farklı parametrelere dayalı matematiksel eşitlikler yardımı ile rastgele üretilmiş 2200 adet GK bozulmasının 2B-ADD ile ayırt edici özellikleri oluşturulmakta, SİS ve Relief yöntemleri ile oluşturulan özniteliklerden en uygun olanları seçilmekte ve DVM, YSA ve TKA yöntemleri ile sınıflandırılması yapılmaktadır. Sinyallerden doğrudan alınan RMS ve THD değerleri de özniteliklere eklenmekle birlikte, ADD analizinde 1., 2. ve 3. seviye ayırıştırma ile sırasıyla 50, 98 ve 146 adet öznitelik istatistiksel özelliklere dayalı olarak oluşturulmaktadır. Her bir adımda SİS ve Relief yöntemleri oluşturulan özniteliklere uygulanarak sınıflandırma başarımını yüksek tutabilecek olanları seçilmektedir. Zaman bölgesinden 2 adet ve ADD analizinde 1. seviye ayırıştırılmadan 6, 2. seviyeden 4 ve 3. seviyeden 2 adet olmak üzere toplamda 14 adet öznitelik SİS yöntemi ile seçilmektedir. Bu öznitelikler için sınıflandırma aşamasında TKA yönteminin %99.12±0.12 oranı ile en iyi başarıyı veren yöntem olduğu görülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Bülent Ecevit Üniversitesi tarafından desteklenmiştir (BAP Projesi No: 2017-75737790-03). Yazarlar Bülent Ecevit Üniversitesi'ne desteklerinden ötürü teşekkür ederler.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Thirumala K., Jain T. and Umarikar A.C., "Visualizing time-varying power quality indices using generalized empirical wavelet transform", *Electric Power Systems Research*, 143: 99-109, (2017).
- [2] Nashad N.R., Islam M.J., Alam S., Rahat R.M., Begum M.T. and Alam M.R., "A simplistic mathematical approach for detection and classification of power quality events", *Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE), International Conference on IEEE*, 698-703, (2017).
- [3] Granados-Lieberman D., Romero-Troncoso R.J., Osornio-Rios R.A., Garcia-Perez A. and Cabal-Yepez E., "Techniques and methodologies for power quality analysis and disturbances classification in power systems: a review", *IET Generation, Transmission & Distribution*, 5(4): 519-529, (2011).
- [4] Saini M.K. and Kapoor R., "Classification of power quality events—a review", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 43(1): 11-19, (2012).
- [5] Khokhar S., Zin A.M., Mokhtar A.S., Ismail N.M. and Zareen N., "Automatic classification of power quality disturbances: A review", *Research and Development (SCORED), IEEE Student Conference on IEEE*, 427-432, (2013).
- [6] Stańczyk U. and Jain L.C., "Feature selection for data and pattern recognition", *New York: Springer*, (2015).
- [7] Tan P.N., Kumar V. and Steinbach M., "Introduction to Data Mining", *Pearson*, (2005).
- [8] Montoya F.G., García-Cruz A., Montoya M.G. and Manzano-Agugliaro F., "Power quality techniques research worldwide: A review" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54: 846-856, (2016).
- [9] Karasu S. and Başkan S. "Classification of power quality disturbances by using ensemble technique", *24th Signal Processing and Communication Application Conference (SIU), IEEE*, 529-532, (2016)
- [10] Ece D.G. and Gerek O.N., "Power quality event detection using joint 2-D-wavelet subspaces", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 53(4): 1040-1046, (2004).
- [11] Shareef H., Mohamed A. And Ibrahim A.A., "An image processing based method for power quality event identification", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 46: 184-197, (2013).
- [12] Krishna B.V. and Kaliaperumal B., "Image pattern recognition technique for the classification of multiple power quality disturbances", *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 21(3): 656-678, (2013).
- [13] Uyar M., Kaya Y. and Ataş M., "Classification of power quality disturbances based on S-transform and image processing techniques", *21st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), IEEE*, 1-4, (2013).
- [14] Gonzalez R.C. and Woods R.E., "Digital Image Processing", *Prentice Hall*, 2002.
- [15] Robnik-Šikonja M. and Kononenko I., "An adaptation of Relief for attribute estimation in regression", *Machine Learning: Proceedings of the Fourteenth International Conference (ICML)*, 296-304, (1997).
- [16] Kira K. and Rendell L.A., "A practical approach to feature selection", *Machine Learning Proceedings*, 249-256, (1992).
- [17] Kononenko I., "Estimating attributes: analysis and extensions of RELIEF", *European conference on machine learning, Springer*, 171-182, (1994).
- [18] Karasu S. and Saraç Z., "Classification of power quality disturbances with S-transform and artificial neural networks method", *25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), IEEE*, 1-4, (2017).
- [19] Karasu S., Altan A., Saraç Z. and Hacıoğlu R., "Prediction of wind speed with non-linear autoregressive (NAR) neural networks", *25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), IEEE*, 1-4, (2017).
- [20] Karasu S., Altan A., Saraç Z. and Hacıoğlu R., "Estimation of fast varied wind speed based on NARX neural network by using curve fitting", *International Journal of Energy Applications and Technologies*, 4(3): 137-146, (2017).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



Synchrotron-based FTIR micro-spectroscopy of Martian Meteorites

Yazar(lar) (Author(s)): Mehmet YESILTAS

ORCID: 0000-0002-1521-0460

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Yesiltas M., “Synchrotron-based ftir micro-spectroscopy of martian meteorites”, *Politeknik Dergisi*, 21(4): 857-860, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.385460

Synchrotron-Based FTIR Micro-spectroscopy of Martian Meteorites

Araştırma Makalesi / Research Article

Mehmet YESILTAS*

Kirklareli University, Faculty of Aeronautical and Space Sciences, Kirklareli, Turkey

(Received : 12.07.2017 ; Accepted : 15.08.2017)

ÖZ

SNC grubundan Mars meteoritleri $\sim 1 \mu\text{m}$ yüzeyel çözünürlüklü sinkrotron-tabanlı FTIR spektroskopisi ile orta-kızılötesi alanda incelendi (4000-850 cm^{-1}). EET A79001, ALH 84001, ve Nakhla meteoritlerinde silikat aralığı belirgin üç bandı ortaya koyarken, Chassigny farklı bir spektral profile sahiptir. Örneklerden bazılarının alifatik tip organik moleküller ve OH içerdiği kızılötesi spektra ile gösterilmiştir. Yüzeysel olarak çözümlenen dağılım haritalarında bu moleküllerin örnekler içinde heterojen olarak dağıldıkları görülmektedir. Bu durum ana-cisimde kompleks süreçlere işaret etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kızılötesi spektroskopisi, sinkrotron-ışınımı, meteoritler, mars, organikler.

Synchrotron-Based FTIR Micro-spectroscopy of Martian Meteorites

ABSTRACT

Martian meteorites from SNC group were studied with synchrotron-based FTIR spectroscopy with $\sim 1 \mu\text{m}$ spatial resolution in the mid-infrared region (4000-850 cm^{-1}). Silicate region in EET A79001, ALH 84001, and Nakhla present three prominent bands, while Chassigny has a different spectral profile. The infrared spectra reveal that some of the grains contain aliphatic type organic molecules as well as OH. According to the spatially resolved distribution maps, these molecules appear to be heterogeneously distributed in the samples. This points to complex parent body processes.

Keywords: Infrared spectroscopy, synchrotron-radiation, meteorites, martian, organics.

1. INTRODUCTION

Martian meteorites originate from the planet Mars as a result of collisions between various bodies and the surface of Mars. Martian meteorites recovered on Earth consist of shergottite, nakhlite, and chassignite meteorites (SNCs), which have different chemical, mineralogical, elemental compositions [1]. The shergottites include subgroups of basaltic, olivine-phyric, and lherzolic meteorites [2], and the distinction is based on their chemistry as well as textures [3]. In addition to SNCs, the martian meteorite collection also includes an orthopyroxenite sample Allan Hills 84001 (ALH 84001) [2], in which signatures of ancient martian life may have been [4]. Several spectroscopic methods have been used to study martian meteorites in the laboratory. For instance, Raman spectroscopy was used by [5] in order to investigate carbonate globules in ALH 84001. [6] used Mossbauer spectroscopy to interpret remote sensing data from Mars. In addition, x-ray spectroscopy was used to understand chemistry of phyllosilicates and sulfates on Mars [7]. Infrared spectroscopy is a particularly helpful technique for the study of martian meteorites [e.g., 8, 9, 10, 11, 12]. It was shown by [13] that synchrotron-based Fourier Transform infrared spectroscopy (FTIR) is able

to resolve organic and inorganic features in meteorites with $\sim 1 \mu\text{m}$ spatial resolution.

Martian rocks provide a record of Mars's evolution [9]. Composition of Mars has been studied mostly through remote sensing techniques where an orbiter collects data from the surface of the Mars, although with a much larger pixel size. Future samples return missions to Mars will potentially provide pristine martian samples for study, until then martian meteorites recovered on Earth are the best possible martian samples to study in the laboratory in order to understand geologic history of Mars. According to the Meteoritical Bulletin Database, there are 197 approved martian meteorites in our collection, composed mainly of shergottites, with minor contribution from nakhlites and chassignites.

Here, we report spatially resolved FTIR spectroscopy of a total of 12 grains from 4 martian meteorites, ALHA 84001 (orthopyroxenite), Chassigny (chassignite), Nakhla (nakhlite), and EETA 79001 (shergottite). In addition to their mid-infrared spectra, chemical distribution images of silicates, aliphatic hydrocarbons, and OH content were generated for all grains with $\sim 1 \mu\text{m}$ spatial resolution.

2. MATERIALS and METHODS

We have received small chips of meteorites from the Smithsonian Institution (SI) as well as NASA's Johnson

* Sorumlu yazar (Corresponding Author)
e-mail : myesiltas@knights.ucf.edu

Space Center (JSC) (Table 1). The chips were ground down to powder size in the laboratory. FTIR imaging experiments were conducted at the Synchrotron Radiation Center, University of Wisconsin in Madison, using the IRENI (InfraRed Environmental Imaging) synchrotron beamline [14]. In IRENI, a matrix of rays from 12 synchrotron beams was arranged to illuminate the sample under the microscope. This arrangement results much brighter light source than conventional thermal light sources, which then homogeneously illuminate 4096 pixels of the commercial focal plane array (FPA) detector. A Bruker Hyperion 3000 IR microscope with a 74X magnification objective was coupled to a Bruker Vertex 70 FTIR spectrometer for our infrared measurements and a condenser of 0.60 numerical aperture was used to match the aperture of the objective, which corresponds to a pixel size of $0.54 \mu\text{m} \times 0.54 \mu\text{m}$. Infrared spectra were collected in the $4000\text{--}850 \text{ cm}^{-1}$ with 4 cm^{-1} spectral resolution and 128 scans were co-added. Before each measurement, a sample-free region of the diamond window was used for the collection of reference spectrum.

Table 1. Samples investigated in this work.

Meteorite Name	Type	Source
EET A79001	Shergottite	JSC
Nakhla	Nakhlite	SI
Chassigny	Chassignite	SI
ALH 84001	Orthopyroxenite	JSC

3. RESULTS AND DISCUSSION

Results show that $1180\text{--}850 \text{ cm}^{-1}$ region in the spectra of EET A79001 and ALH 84001 contains three peaks at 1043 , 942 , and 878 cm^{-1} , which can be attributed to Si-O stretching vibrations in silicates. These peaks appear more prominent and at $\sim 20 \text{ cm}^{-1}$ higher frequencies in the spectra of Nakhla. While it is a single peak in others, the peak near 878 cm^{-1} is a doublet in the spectra of Nakhla with positions of 918 cm^{-1} and 878 cm^{-1} . Based on the infrared spectra, Chassigny appears to have a different silicate peak profile than other meteorites studied here, the observed peaks include a shoulder peak near 1017 cm^{-1} , a sharp peak at 965 cm^{-1} and a broad peak at 882 cm^{-1} .

Higher frequency part of the spectra include contribution from organic molecules and OH. Small but sharp peaks at 2961 , 2924 , and 2852 cm^{-1} are due to C-H stretching vibrations in aliphatic moieties. Infrared spectra of most grains present a broad band between 3750 cm^{-1} and 3000 cm^{-1} due to O-H stretching vibrational modes of adsorbed and/or interlayer water. The spectral region between $1600\text{--}2600 \text{ cm}^{-1}$ was omitted here because the infrared spectra for the investigated meteorites are featureless in this region.

Infrared images of meteorite grains provide spatial distribution of absorbance at specific wavelengths. These

spatial distribution maps can be useful for the interpretation of relationships of particular functional groups within the local heterogeneity of samples. In other words, relative compositional distribution of organic molecules and mineral species can be obtained, and relative amounts of them can be inferred. In the studied meteorites, silicates appear to be the main component in the grains. Aliphatic hydrocarbons are not present in all grains, however the OH content is present in most grains. The aliphatic and OH content seem to be heterogeneously distributed across the grains (e.g., grains 1 and 2 in ALH 84001 and Chassigny).

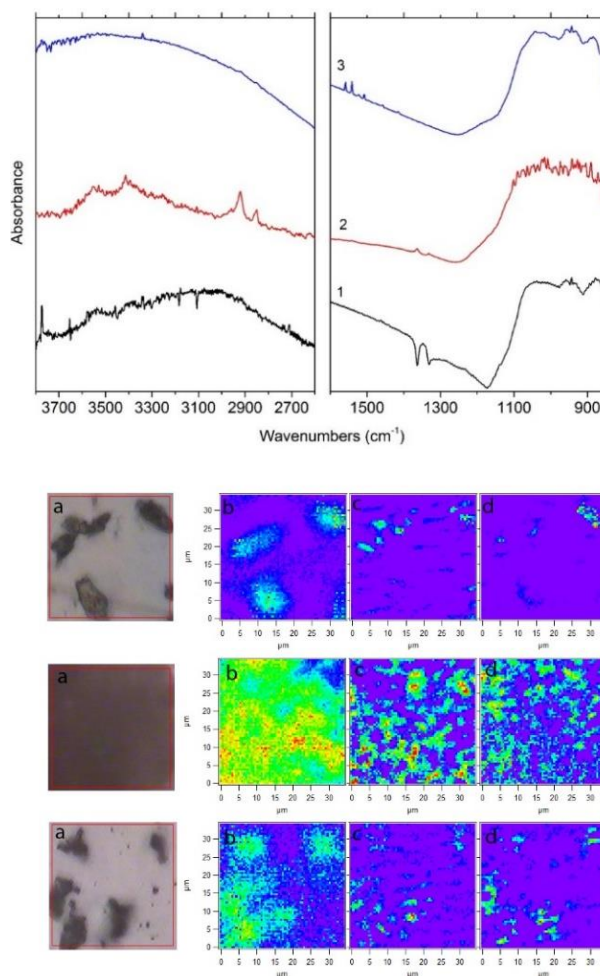


Figure 1. Top: Mid-infrared absorbance spectra of EET A79001 grains. Numbers represent different grains in the field of view, and spectra are offset for clarity. Bottom: Visible images of the studied grains (a), spatial distribution of silicates (b, $1180\text{--}850 \text{ cm}^{-1}$), aliphatics (c, $3000\text{--}2800 \text{ cm}^{-1}$), and OH content (d, $3750\text{--}3000 \text{ cm}^{-1}$). Colors of infrared maps indicate absorbance, red being the highest and violet being the lowest. Distribution images from bottom to top correspond to infrared spectra from bottom to top.

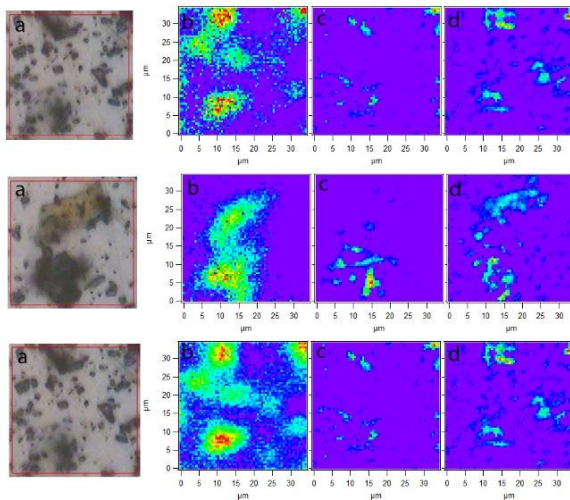
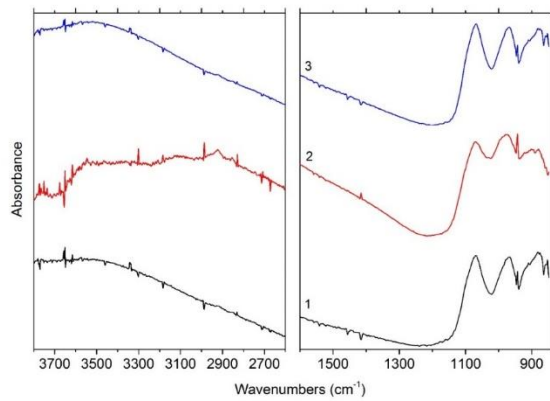


Figure 2. Top: Mid-infrared absorbance spectra of Nakhla grains. Numbers represent different grains in the field of view, and spectra are offset for clarity. Bottom: Visible image of the studied grains (a), spatial distribution of silicates (b, 1180–850 cm^{-1}), aliphatics (c, 3000–2800 cm^{-1}), and OH content (d, 3750–3000 cm^{-1}). Colors of infrared maps indicate absorbance, red being the highest and violet being the lowest. Distribution images from bottom to top correspond to infrared spectra from bottom to top.

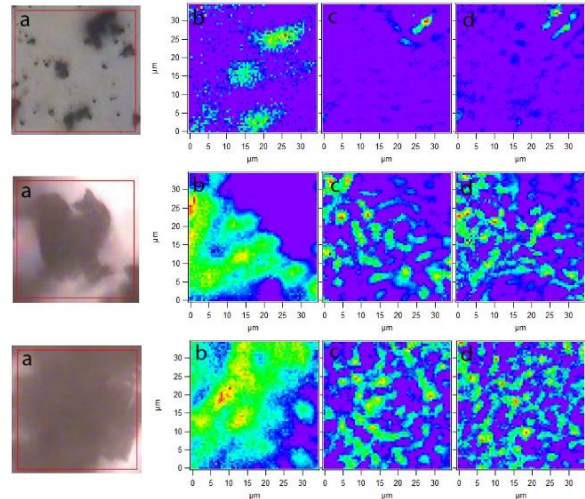
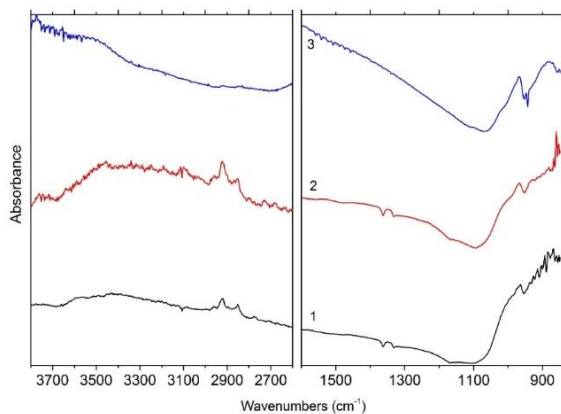


Figure 3. Top: Mid-infrared absorbance spectra of Chassigny grains. Numbers represent different grains in the field of view, and spectra are offset for clarity. Bottom: Visible image of the studied grains (a), spatial distribution of silicates (b, 1180–850 cm^{-1}), aliphatics (c, 3000–2800 cm^{-1}), and OH content (d, 3750–3000 cm^{-1}). Colors of infrared maps indicate absorbance, red being the highest and violet being the lowest. Distribution images from bottom to top correspond to infrared spectra from bottom to top.

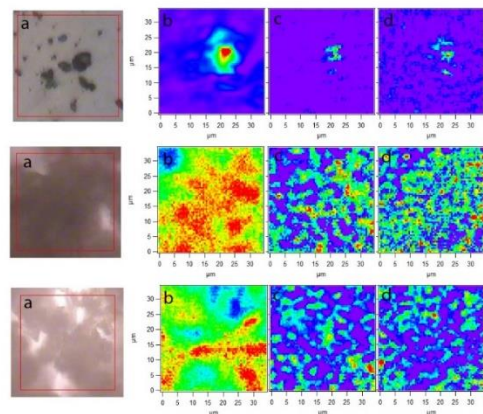
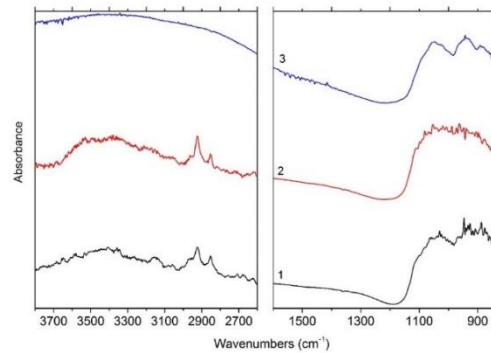


Figure 4. Top: Mid-infrared absorbance spectra of ALH 84001 grains. Numbers represent different grains in the field of view, and spectra are

offset for clarity. Bottom: Visible image of the studied grains (a), spatial distribution of silicates (b, 1180–850 cm⁻¹), aliphatics (c, 3000–2800 cm⁻¹), and OH content (d, 3750–3000 cm⁻¹). Colors of infrared maps indicate absorbance, red being the highest and violet being the lowest. Distribution images from bottom to top correspond to infrared spectra from bottom to top.

6. CONCLUSION

Spectral investigation of martian meteorites in the infrared may shed light on the mineralogy of Mars, and can also be used to interpret the remote sensing data obtained from orbiters and landers. We presented here that synchrotron-based FTIR spectroscopy can provide invaluable information on meteorites with high resolution. Spectra of the martian meteorites studied here show that some of the grains contain aliphatic type organic moieties as well as OH, although indigeneity of these molecules needs to be confirmed via future experiments. Silicate mineralogy of Chassigny differs from other meteorites presented here. Chassigny was reported to be olivine-rich meteorite with regions of olivine + pyroxene combinations [15]. We believe silicate peaks in the spectra of Chassigny show infrared features due to both olivine and pyroxene, in agreement with [15]. We note that slight spectral differences for each meteorite may be attributed to orientation effects in the crystal structure of minerals. ALH 84001 is an orthopyroxenite meteorite, meaning that the mineralogy is dominated by the mineral orthopyroxene, and the differences in the spectra of this meteorite may be partially due to pyroxene minerals of different compositions (e.g., high-Ca vs. low-Ca pyroxenes). Spatial distribution maps present that aliphatic moieties and OH are distributed heterogeneously, indicating complex parent body processes.

ACKNOWLEDGEMENT

We thank SI and NASA's JSC for providing the meteorite samples. IRENI beamline's construction and development was supported by NSF MRI award # 0619759.

REFERENCES

- [1] Bridges J. C. & Warren P. H., "The SNC meteorites: basaltic igneous processes on Mars", *Journal of the Geological Society*, 163:229–251, (2006).
- [2] Fritzi J., Artemieva N., and Greshake A., "Ejection of Martian meteorites", *Meteoritics & Planetary Science*, 40:1393–1411 (2005).
- [3] Treiman A. H., Gleason J. D., and Bogard D. D., "The SNC meteorites are from Mars", *Planetary and Space Science*, 48:1213–1230, (2000).
- [4] McKay D. S., Gibson E. K., Jr., Thomas-Keptra K. L., Vali H., Romanek C. S., Clemett S. J., Chillier X. D. F., Macchling C. R., and Zare R. N., "Search for past life on Mars: Possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH 84001", *Science*, 273:924–930. (1996).
- [5] Steele A., Fries M. D., Amundsen H. E. F., Mysen B. O., Fogel M. L., Schweizer M., Boctor N. Z., "Comprehensive imaging and Raman spectroscopy of carbonate globules from Martian meteorite ALH 84001 and a terrestrial analogue from Svalbard", *Meteoritics & Planetary Science*, 42:1549–1566, (2007).
- [6] Lane M. D., Dyar M. D., and Bishop J. L., "Spectroscopic evidence for hydrous iron sulfate in the Martian soil", *Geophysical Research Letters*, 31:L19702, (2004).
- [7] Altheide T. S., Chevrier V. F., Dobreá E. N., "Mineralogical characterization of acid weathered phyllosilicates with implications for secondary martian deposits", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74:6232–6248, (2010).
- [8] Dyar M. D., Treiman A. H., Pieters C. M., Hiroi T., Lane M. D., and O'Connor V., "MIL03346, the most oxidized Martian meteorite: A first look at spectroscopy, petrography, and mineral chemistry", *Journal of Geophysical Research*, 110:E09005, (2005).
- [9] Ehlmann B. L. and Edwards C. S., "Mineralogy of the Martian Surface", *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 42:291–315, (2014).
- [10] Stephen N. R., Schofield P. F., Berry A. J., and Donaldson P., "Mid-IR Mapping of Martian Meteorites; Spatially Resolved Mineral Spectra from a Synchrotron Source", *45th Lunar and Planetary Science Conference*, #1378, (2014).
- [11] Stephen N. R., Schofield P. F., Berry A. J., "Infrared mapping of silicate minerals in Martian meteorites using a synchrotron light source", *EPSC Abstracts*, 8:297, (2013).
- [12] Anderson M. S., Andringa J. M., Carlson R. W., Conrad P., Hartford W., Shafer M., Soto A., and Tsapin A. I., "Fourier transform infrared spectroscopy for Mars science", *Review of Scientific Instruments*, 76:034101, (2005).
- [13] Yesiltas M. and Kebukawa Y., "Associations of organic matter with minerals in Tagish Lake meteorite via high spatial resolution synchrotron-based FTIR microspectroscopy", *Meteoritics & Planetary Science*, 51: 584–595, (2016).
- [14] Nasse M. J., Mattson E. C., Reiningger R., Kubala T., Janowski S., El-Bayyari Z. and Hirschmugl C. J., "Multi-beam synchrotron infrared chemical imaging with high spatial resolution: Beam line realization and first reports on image restoration", *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section a-Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment*, 649:172–176, (2011).
- [15] Storrie-Lombardi M. C., Muller J. P., Fisk M. R., Griffiths A. D., and Coates A. J. "Potential for non-destructive astrochemistry using the ExoMars PanCam", *Geophysical Research Letters*, 35: L12201, doi:10.1029/2008GL034296, (2008).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



Bending analysis of two directional functionally graded beams using a four-unknown shear and normal deformation theory

Dört bilinmeyenli kayma ve normal deformasyon teorisi kullanılarak iki yönlü fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin eğilme analizleri

Yazar(lar)(Author((s))): Armağan KARAMANLI

ORCID: 0000-0003-3990-6515

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Karamanlı A., “Bending Analysis of Two Directional Functionally Graded Beams Using A Four-Unknown Shear and Normal Deformation Theory”, *Politeknik Dergisi*, 21(4): 861-874, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.389616

Bending Analysis of Two Directional Functionally Graded Beams Using A Four-Unknown Shear and Normal Deformation Theory

Araştırma Makalesi / Research Article

Armağan KARAMANLI*

Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul Gelişim Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 12.07.2017 ; Kabul/Accepted : 23.08.2017)

ABSTRACT

The bending behaviour of two-directional functionally graded beams (FGBs) subjected to various sets of boundary conditions is investigated by using a shear and normal deformation theory and the Symmetric Smoothed Particle Hydrodynamics (SSPH) method. A simply supported conventional FGB problem is studied to validate the developed code. The comparison studies are performed along with the analytical solutions and the results from previous studies. The numerical calculations in terms of maximum dimensionless transverse deflections, dimensionless axial and transverse shear stresses are performed for various gradation exponents, aspect ratios (L/h) and sets of boundary conditions. The effects of the gradation exponents on the accuracy and the robustness of the SSPH method are also investigated for the two directional functionally graded beams which are having clamped-free boundary condition..

Keywords: Meshless method, Functionally graded beam, SSPH method, Shear and normal deformation theory.

Dört Bilinmeyenli Kayma ve Normal Deformasyon Teorisi Kullanılarak İki Yönlü Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kirişlerin Eğilme Analizleri

ÖZ

Kesme ve normal deformasyon teorisi ve Simetrik Düzgünleştirilmiş Parçacık Hidrodinamiği (SSPH) kullanılarak, çeşitli sınır koşullarına tabi tutulmuş iki yönlü fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin (FGBs) eğilme davranışı araştırıldı. Geliştirilen kodun doğrulanması için basit mesnetlenmiş bir fonksiyonel derecelendirilmiş kiriş problem üzerinde çalışıldı. Karşılaştırma çalışmaları, analitik çözümler ve daha önceki çalışmaların sonuçları vasıtasıyla gerçekleştirildi. Çeşitli üst dereceleri, en-boy oranları (L/h), ve sınır koşulları için maksimum boyutsuz çökme değerleri, boyutsuz eksenel ve kayma gerilmeleri şeklinde numerik hesaplamalar yapıldı. Ankastre-serbest uç şeklinde sınır koşullarına sahip iki yönlü fonksiyonel derecelendirilmiş kirişler için, üst derecelerin, SSPH yönteminin doğruluğu ve gücü üzerindeki etkileri de araştırıldı.

Anahtar Kelimeler: Ağsız yöntem, Fonksiyonel derecelendirilmiş kiriş, SSPH yöntemi, Kayma ve normal deformasyon teorisi.

1. INTRODUCTION

In recent years, the use of the structures which are made of composite materials have been increasing in many modern engineering applications such as aerospace, marine, automotive, and civil engineering due to attractive properties in strength, stiffness and lightness.

Researchers have been developed various beam theories for analysis of the structural behaviour of the composite beams during the last decade, the review of these theories is given in [1]. The Euler-Bernoulli beam theory (EBT) is widely used to solve the bending behaviour of the thin beams. When the beam is thick or short, the effect of the transverse shear deformation cannot be neglected and refined shear deformation theories are needed. One of the theories which have been developed to eliminate the

assumption which is Functionally Graded Materials (FGMs) are composite materials which can be classified as advanced materials. The FGMs are inhomogeneous and made up of two (or more) different materials combined in solid states with varying properties as the dimension changes. There is a rapid increase in the use of these materials especially in the following areas; the aerospace, biomedical, defense, energy, optoelectronics, automotive, turbine blade, reactor components and etc. Since the FGMs have lower transverse shear stresses, high resistance to temperature shocks and no interface problems through the layer interfaces, they have advantages over the conventional and classical composite materials.

Due to the significant shear deformation effects especially for the thick FGBs, three main theories that are first-order shear deformation theory, higher-order shear deformation theory and shear and normal deformation

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : armagan_k@yahoo.com

theory have been employed by the researchers to predict and to understand the static, vibration and buckling responses of these structures during the last decade [1-24]. On the other hand, the conventional FGMs (or 1D-FGM) with material properties which vary in one direction used in practical engineering applications are not efficient to fulfill the technical requirements such as the temperature and stress distributions in two or three direction for aerospace craft and shuttles [25].

A new type FGM with material properties varying in two or three directions is needed to overcome this deficiency of the conventional FGM. To eliminate the drawback of the conventional FGM, the mechanical and thermal behaviours of two-directional FG structures have been investigated so far. 2D steady-state free and forced vibrations of two-directional FGBs by using the Element Free Galerkin Method are analyzed in [26]. The state-space based differential quadrature method is employed to obtain the semi-analytical elasticity solutions for bending and thermal deformations of FGBs with various end conditions [27]. A symplectic elasticity solution for static and free vibration analyses of two-directional FGBs with the material properties varying exponentially in both axial and thickness direction is presented in [28]. The buckling of Timoshenko beams composed of two directional FGM is studied in [29]. The static behavior of the two directional FGBs by using various beam theories is presented in [30]. The flexure of the two directional FG sandwich beams is analyzed in [31].

As it is seen from above discussions, the studies employing a shear and normal deformation theory which includes both shear deformation and thickness stretching effects related to static and dynamic analysis of the two-directional FGBs are very limited according to the author knowledge. Since, thickness-stretching effect becomes very important especially for the thick two directional FGBs, a shear and normal deformation theory should be considered for this complicated problem with various end conditions, aspect ratios and gradation exponents. One may easily show that the numerical methods such as finite element methods (FEM), meshless methods, GDQM, etc. can be used to overcome this problem which have complex governing equations.

Meshless methods are the most promising and have attracted considerable attention for the analysis of engineering problems with intrinsic complexity. Meshless methods are widely used in static and dynamic analyses of the isotropic, laminated composite and FGM beam problems [32-38]. However, the studies are very limited regarding to the analysis of two directional FG structures by employing a meshless method [26, 30, 39-41].

The main novelty of this paper is that the flexure behavior of the two directional FGBs is analyzed based on a quasi-3D theory by using the SSPH method with four different end conditions. Moreover, the weight (kernel) functions used for the numerical computations by employing the SSPH method given in [30, 42-45] cannot provide

satisfactory results for the solution of these complex engineering problems. To overcome this deficiency, a weight function [46] which is used for the interpolation by employing the compactly supported radial basis function is introduced. And finally, the thickness stretching effect is important and should be considered especially for the thick beams.

In section 2, the formulation of the basis function of the SSPH method is given. In section 3, the homogenization of material properties of the two directional FGB is presented. The formulation of the shear and normal deformation theory is given in Section 4. In Section 5, numerical results are given for the problems with four different boundary conditions which are simply supported (SS), clamped- simply supported (CS), clamped-clamped (CC) and clamped-free (CF).

2. FORMULATION OF SYMMETRIC SMOOTHED PARTICLE HYDRODYNAMICS METHOD

Taylor Series Expansion (TSE) of a scalar function for 1D case can be given by

$$f(\xi) = f(x) + (\xi - x)f'(x) + \frac{1}{2!}(\xi - x)^2 f''(x) + \frac{1}{3!}(\xi - x)^3 f'''(x) + \frac{1}{4!}(\xi - x)^4 f^{(IV)}(x) + \frac{1}{5!}(\xi - x)^5 f^{(V)}(x) + \frac{1}{6!}(\xi - x)^6 f^{(VI)}(x) + \dots \quad (1)$$

where $f(\xi)$ is the value of the function at ξ located in near of x . If the seventh and higher order terms are neglected, the Eq. (1) can be expressed as

$$f(\xi) = \mathbf{P}(\xi, x)\mathbf{Q}(x) \quad (2)$$

where

$$\mathbf{Q}(x) = \left[f(x), \frac{df(x)}{dx}, \frac{1}{2!} \frac{d^2 f(x)}{dx^2}, \dots, \frac{1}{6!} \frac{d^6 f(x)}{dx^6} \right]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{P}(\xi, x) = [1, (\xi - x), (\xi - x)^2, \dots, (\xi - x)^6] \quad (4)$$

The order of the governing equations play an important role to define the number of terms assigned in the Taylor series expansion. If the number of terms in the TSE is increased, there will be an increment in the CPU time and one may expect that the accuracy will increase. However, in some cases it may not be true and determination of the number of terms depends on the researcher's experience. To determine the unknown variables given in the $\mathbf{Q}(x)$, both sides of Eq. (2) are multiplied with $W(\xi, x)\mathbf{P}(\xi, x)^T$ and evaluated for every node in the CSD. In the global numbering system, let the particle number of the j^{th} particle in the compact support of $W(\xi, x)$ be $r(j)$. The following equation is obtained

$$\sum_{j=1}^{N(x)} f(\xi^{r(j)}) W(\xi^{r(j)}, x) \mathbf{P}(\xi^{r(j)}, x)^T = \sum_{j=1}^{N(x)} \left[\mathbf{P}(\xi^{r(j)}, x)^T W(\xi^{r(j)}, x) \mathbf{P}(\xi^{r(j)}, x) \right] \mathbf{Q}(x) \quad (5)$$

where $N(x)$ is the number nodes in the compact support domain (CSD) of the $W(\xi, x)$ as shown in Figure 1.

Then, Eq. (5) can be given by

$$\mathbf{C}(\xi, x)\mathbf{Q}(x) = \mathbf{D}(\xi, x)\mathbf{F}^{(x)}(\xi, x) \quad (6)$$

Where $\mathbf{C}(\xi, x) = \mathbf{P}(\xi, x)^T \mathbf{W}(\xi, x) \mathbf{P}(\xi, x)$ and $\mathbf{D}(\xi, x) = \mathbf{P}(\xi, x)^T \mathbf{W}(\xi, x)$.

The solution of Eq. (6) is given by

$$\mathbf{Q}(x) = \mathbf{K}(\xi, x)\mathbf{F}(\xi) \quad (7)$$

where $\mathbf{K}^{(x)}(\xi, x) = \mathbf{C}(\xi, x)^{-1} \mathbf{D}(\xi, x)$.

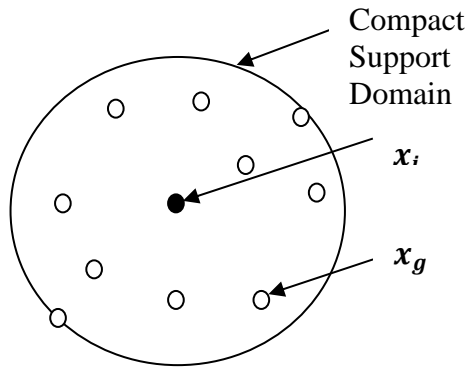


Figure 1. Compact support of the weight function $W(\xi, x)$ for the node located at $x = (x_i, y_i)$.

Eq. (7) can be also written as follows

$$Q_I(x) = \sum_{J=1}^M K_{IJ} F_J, \quad I = 1, 2, \dots, 7 \quad (8)$$

where M is the number of nodes and $F_J = f(\xi^J)$. Seven components of Eq. (8) for 1D case are written as

$$f(x) = Q_1(x) = \sum_{J=1}^M K_{1J} F_J$$

$$\frac{df(x)}{dx} = Q_2(x) = \sum_{J=1}^M K_{2J} F_J$$

$$\frac{d^2 f(x)}{dx^2} = 2! Q_3(x) = 2! \sum_{J=1}^M K_{3J} F_J$$

$$\frac{d^3 f(x)}{dx^3} = 3! Q_4(x) = 3! \sum_{J=1}^M K_{4J} F_J$$

$$\frac{d^4 f(x)}{dx^4} = 4! Q_5(x) = 4! \sum_{J=1}^M K_{5J} F_J$$

$$\frac{d^5 f(x)}{dx^5} = 5! Q_6(x) = 5! \sum_{J=1}^M K_{6J} F_J$$

$$\frac{d^6 f(x)}{dx^6} = 6! Q_7(x) = 6! \sum_{J=1}^M K_{7J} F_J \quad (9)$$

Details of the SSPH method can be found in [30, 42-45].

3. HOMOGENIZATION OF MATERIAL PROPERTIES

We assume that the two-directional functionally graded beam of length L , width b , thickness h is made of two different constituents. Further, the material properties vary not only in the z direction (thickness direction) but also in the x direction (along the length of the beam) as shown in Fig. 2. The rule of mixture is used to find the effective material properties at a point. According to the rule of mixtures, the effective material properties of the beam, Young's modulus E and shear modulus G can be given by In Figure 2.

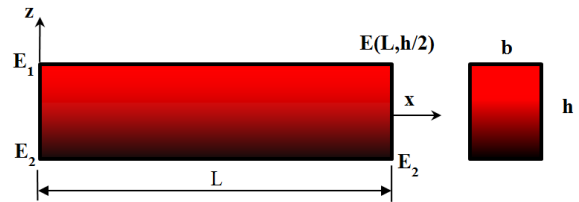


Figure 2. Geometry and coordinate of a two-directional FGB.

The stress-strain relationship of a k^{th} orthotropic lamina in the material coordinate axes is given by:

$$E(x, z) = E_1 V_1(x, z) + E_2 V_2(x, z)$$

$$G(x, z) = G_1 V_1(x, z) + G_2 V_2(x, z) \quad (10)$$

where E_1, E_2, G_1 and G_2 are the material properties of two constituents, V_1 and V_2 are volume fractions of the constituents. The relation of the volume fractions can be expressed as follows;

$$V_1(x, z) + V_2(x, z) = 1 \quad (11)$$

According to the power law form, the volume fraction of the constitute 1 can be given

$$V_1(x, z) = \left(1 - \frac{x}{2L}\right)^{p_x} \left(\frac{1}{2} + \frac{z}{h}\right)^{p_z} \quad (12)$$

where p_x and p_z are the gradation exponents (power-law index) which determine the material properties through the thickness (h) and length of the beam (L), respectively. When the p_x and p_z are set to zero then the beam becomes homogeneous. The effective material properties can be found by using the Eqs. (10), (11) and (12) as follows

$$E(x, z) = (E_1 - E_2) \left(1 - \frac{x}{2L}\right)^{p_x} \left(\frac{1}{2} + \frac{z}{h}\right)^{p_z} + E_2$$

$$G(x, z) = (G_1 - G_2) \left(1 - \frac{x}{2L}\right)^{p_x} \left(\frac{1}{2} + \frac{z}{h}\right)^{p_z} + G_2 \quad (13)$$

Fig.3 illustrates the variation of the dimensionless modulus of elasticity through the depth of the beam for various values of the gradation exponent (p_z) in the z direction. The variation of the dimensionless modulus of elasticity through the length of the beam for different gradation exponent (p_x) in the x direction is presented in Fig. 4.

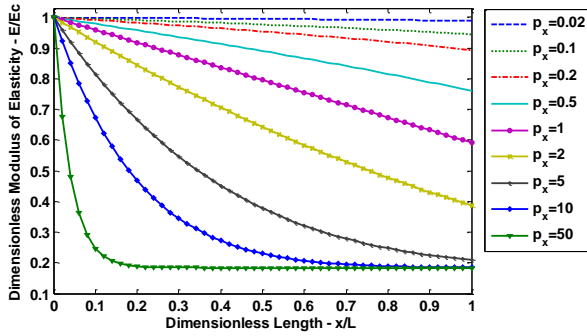


Figure 3. Variation of the dimensionless modulus of elasticity through the depth of the beam for various values of the gradation exponent (p_z) in z direction

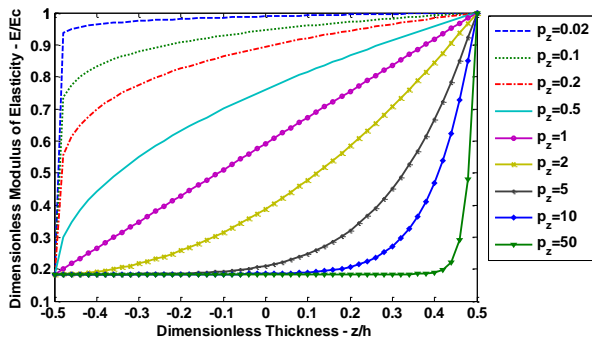


Figure 4. Variation of the dimensionless modulus of elasticity through the length of the beam for different gradation exponent (p_x) in x direction

4. MATHEMATICAL FORMULATION

The axial and transverse displacements of a beam by using the present shear and normal deformation theory [17] including both shear deformation and thickness stretching effects are given by

$$U(x, z) = u(x, t) - z \frac{dw_b(x)}{dx} - \frac{4z^3}{3h^2} \frac{dw_s(x)}{dx}$$

$$= u(x) - zw'_b(x) - f(z)w'_s(x) \tag{14a}$$

$$W(x, z) = w_b(x) + w_s(x) + \left(1 - \frac{4z^2}{h^2}\right)w_z(x)$$

$$= w_b(x) + w_s(x) + g(z)w_z(x) \tag{14b}$$

where u, w_b, w_s and w_z are four variables to be determined.

The only nonzero strains associated with the displacement field given in Eq. (14) can be written by:

$$\epsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x} = u' - zw''_b - f(z)w''_s \tag{15a}$$

$$\epsilon_z = \frac{\partial W}{\partial z} = g'(z)w_z \tag{15b}$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial z} = g(z)(w'_s + w'_z) \tag{15c}$$

The following linear elastic constitutive equation can be written by using the related stresses and strains:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_z \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix} = \frac{E(x,z)}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} \tag{16}$$

To obtain the governing equations, the virtual strain energy of the beam can be written as:

$$\delta U = \int_0^L \int_A (\sigma_x \delta \epsilon_x + \sigma_{xz} \delta \gamma_{xz} + \sigma_z g' \delta \epsilon_z) dA dx \tag{17}$$

The stress resultants $N_x, M_x^b, M_x^s, Q_{xz}$ and R_z can be written respectively as follows:

$$N_x = \int_{-h/2}^{+h/2} b \sigma_x dz \tag{18a}$$

$$M_x^b = \int_{-h/2}^{+h/2} b \sigma_x z dz \tag{18b}$$

$$M_x^s = \int_{-h/2}^{+h/2} b \sigma_x f dz \tag{18c}$$

$$Q_{xz} = \int_{-h/2}^{+h/2} b \sigma_{xz} g dz \tag{18d}$$

$$R_z = \int_{-h/2}^{+h/2} b \sigma_z g' dz \tag{18e}$$

Using the Eq. (18), one can rewrite the Eq. (17) as:

$$\delta U = \int_0^L [N_x \delta u' - M_x^b \delta w''_b - M_x^s \delta w''_s + Q_{xz} (\delta w'_s + \delta w'_z) + R_z \delta w_z] dx \tag{19a}$$

The virtual potential energy of the transverse load $q(x)$ is given by

$$\delta V = - \int_0^L q (\delta w_b + \delta w_s) dx \tag{20}$$

Since the total virtual work done equals zero and the coefficients of $\delta u, \delta w_b, \delta w_s$ and δw_z are zero in $0 < x < L$, one can obtain the following governing equations,

$$\frac{dN_x}{dx} = 0 \tag{21a}$$

$$\frac{d^2 M_x^b}{dx^2} + q(x) = 0 \tag{21b}$$

$$\frac{d^2 M_x^s}{dx^2} + \frac{dQ_{xz}}{dx} + q(x) = 0 \tag{21c}$$

$$\frac{dQ_{xz}}{dx} - R_z = 0 \tag{21d}$$

Using Eq. (16), the stress resultants given in Eq. (18) can be expressed as,

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ M_x^b \\ M_x^s \\ Q_{xz} \\ R_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & B_s & X & 0 \\ B & D & D_s & Y & 0 \\ B_s & D_s & H & Y_s & 0 \\ X & Y & Y_s & Z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u' \\ -w''_b \\ -w''_s \\ w_z \\ w'_s + w'_z \end{Bmatrix} \tag{22}$$

where

$$(A, B, B_s, D, D_s, H, Z) = \int_{-h/2}^{+h/2} \frac{E(x,z)b}{1-\nu^2} (1, z, f, z^2, fz, f^2, g'^2) dz \tag{23a}$$

$$A_s = \int_{-h/2}^{+h/2} \frac{E(x,z)b}{2(1+\nu)} g^2 dz \tag{23b}$$

$$(X, Y, Y_s) = \int_{-h/2}^{+h/2} \frac{E(x,z)vb}{1-\nu^2} g'(1, z, f) dz \tag{23c}$$

The governing equations of the quasi-3D theory can be obtained by substituting Eq. (22) into Eq. (21) as:

$$Au'' + A'u' - (Bw_b'''' + B'w_b''') - (B_s w_s'''' + B'_s w_s''') + Xw'_z + X'w_z = 0 \tag{24a}$$

$$Bu'''' + 2B'u'' + B''u' - (Dw_b^{(IV)} + 2D'w_b'''' + D''w_b''') - (D_s w_s^{(IV)} + 2D'_s w_s'''' + D''_s w_s''') + Yw'_z + 2Y'w'_z + Y''w_z - q = 0 \tag{24b}$$

$$\begin{aligned}
 & B_s u'''' + 2B_s' u'' + B_s'' u' - (D_s w_b^{(IV)} + 2D_s' w_b'' + D_s'' w_b') - (H w_s^{(IV)} + 2H' w_s'' + H'' w_s') + Y_s w_z'' + 2Y_s' w_z' + Y_s'' w_z + A_s (w_s'' + w_z'') + A_s' (w_s' + w_z') - q = 0 \quad (24c) \\
 & -X u' + Y w_b'' + Y_s w_s'' + A_s (w_s'' + w_z'') + A_s' (w_s' + w_z') - Z w_z = 0 \quad (24d)
 \end{aligned}$$

The natural boundary conditions are given as follows:

$$\delta u : N_x \quad (25a)$$

$$\delta w_b : M_x^{b'} \quad (25b)$$

$$\delta w_b' : M_x^b \quad (25c)$$

$$\delta w_s : M_x^{s'} + Q_{xz} \quad (25d)$$

$$\delta w_s' : M_x^s \quad (25e)$$

$$\delta w_z : Q_{xz} \quad (25f)$$

5. NUMERICAL RESULTS

The static behaviour of the two directional FGBs is investigated by using a quasi-3D shear deformation theory. The numerical results are obtained by using the SSPH method for various gradation exponents in both direction, x and z respectively, different aspect ratios and boundary conditions. Since there is no available previous results based on a higher order shear deformation theory and a shear and normal deformation theory for the bending analysis of two-directional FGBs with power law rule, as the first, the developed code is verified by solving a simply supported conventional FGB problem subjected to uniformly distributed load. The numerical solutions are compared with the solutions from previous studies [16-17] along with the analytical solutions. The dimensionless maximum transverse deflections, axial and shear stresses are calculated to make the comparisons on a fair ground. For each problem studied here, the physical parameters of the beam are L=2m and b=0.1m. Two different two aspect ratios (L/h), 5 and 20 are considered for the boundary conditions defined as SS, CS and CC. The numerical solutions could not be obtained for the aspect ratio (L/h) which is greater than 5 for the boundary condition defined as CF. The possible reasons behind this case are discussed in section 5.2.4. The distributed load q_0 is set to 10000 N/m. The material properties of the two constitutes are given

$$\text{Ceramic (Al}_2\text{O}_3) : E_1 = 380\text{GPa and } \nu_1 = 0.3$$

$$\text{Metal (Aluminium) : } E_2 = 70\text{GPa and } \nu_2 = 0.3$$

The following non-dimensional quantities are used for the representation of the results;

Non-dimensional maximum transverse deflection of the beam:

$$\begin{aligned}
 \bar{w} &= \frac{100E_2bh^3}{q_0L^4} W(x, 0) \text{ for SS, CS and CC beams} & \bar{w} &= \\
 \frac{100E_2bh^3}{q_0L^4} W(L, 0) & \text{ for CF beam} & & (26)
 \end{aligned}$$

Non-dimensional axial and shear stresses of the beam:

$$\begin{aligned}
 \bar{\sigma}_x &= \frac{bh}{q_0L} \sigma_x\left(\frac{L}{2}, z\right) \\
 \bar{\sigma}_z &= \frac{bh}{q_0L} \sigma_z\left(\frac{L}{2}, z\right) \\
 \bar{\sigma}_{xz} &= \frac{bh}{q_0L} \sigma_{xz}(0, z) \quad (27)
 \end{aligned}$$

5.1 Verification and Comparison Studies

To verify the developed code, a simply supported FGB under uniformly distributed load is considered. For numerical calculations to be performed by the SSPH method uniformly distributed 201 nodes for the SS, CS and CC beams and 247 nodes for the CF beam are used in the problem domain $x \in [0, 2]$. As a weight function, the following function proposed in [46] is used,

$$W(x, \xi) = \left\{ \begin{aligned} & \left(1 - \frac{d}{\rho}\right)^7 35 \left(\frac{d}{\rho}\right)^6 + 245 \left(\frac{d}{\rho}\right)^5 + 720 \left(\frac{d}{\rho}\right)^4 + \\ & 1120 \left(\frac{d}{\rho}\right)^3 + 928 \left(\frac{d}{\rho}\right)^2 + 336 \left(\frac{d}{\rho}\right) + 48 \quad \begin{matrix} 0 \leq d \leq \rho \\ d > \rho \end{matrix} \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

where $d = |x - \xi|/h$, h is the smoothing length and ρ is the scaling factor that determines the size of the support domain. The numerical calculations are performed according to the following meshless parameters; the radius of the support domain (ρ) is chosen as 8 and the smoothing length (h) equals to 1.1Δ where Δ is the minimum distance between two adjacent nodes for SS, CS and CC beams. For CF beam, the radius of the support domain (ρ) is chosen as 5.302 and the smoothing length (h) equals to 1.2Δ . All the meshless parameters are found by using the trial and error method. The maximum non-dimensional transverse deflections, axial, normal and shear stresses obtained based on the present shear and normal deformation theory, various aspect ratios and various gradation exponents in the z direction are given in Table 1-4 along with the results from previous studies and the analytical solution of the problem. It is clear that the results obtained by using the SSPH method agree completely with those of previous papers [16-17]. Table 1-4 show that the results obtained by the SSPH method are in excellent agreement with the results given in [16-17]. And finally, because of stretching effect, the transverse deflections computed based on the shear and normal deformation theory are slightly smaller than those obtained from TBT. Due to this agreement, the verification of the developed code is established.

Table 1. Verification studies of the developed meshless code for SS FGB, dimensionless maximum transverse deflections for various gradation exponents.

Method	Theory	ε_z	p = 0	p = 1	p = 2	p = 5	p = 10
L/h=5							
Li et al. [16]	TBT	= 0	3.1657	6.2599	8.0602	9.7802	10.8979
Vo et al. [17] Navier	TBT	= 0	3.1654	6.2594	8.0677	9.8281	10.9381
	Present	≠ 0	3.1397	6.1338	7.8606	9.6037	10.7578
Vo et al. [17] FEM	TBT	= 0	3.1654	6.2590	8.0668	9.8271	10.9375
	Present	≠ 0	3.1397	6.1334	7.8598	9.6030	10.7572
SSPH	Present	≠ 0	3.1402	6.1343	7.8602	9.6041	10.7571
L/h=20							
Li et al. [16]	TBT	= 0	2.8962	5.8049	7.4415	8.8151	9.6879
Vo et al. [17] Navier	TBT	= 0	2.8962	5.8049	7.4421	8.8182	9.6905
	Present	≠ 0	2.8947	5.7201	7.2805	8.6479	9.5749
Vo et al. [17] FEM	TBT	= 0	2.8963	5.8045	7.4412	8.8173	9.6899
	Present	≠ 0	2.8947	5.7197	7.2797	8.6471	9.5743
SSPH	Present	≠ 0	2.8952	5.7215	7.2826	8.6485	9.5745

Table 2. Verification studies of the developed meshless code for SS FGB, dimensionless axial stress $\bar{\sigma}_x(\frac{L}{2}, \frac{h}{2})$ for various gradation exponents.

Method	Theory	ε_z	p = 0	p = 1	p = 2	p = 5	p = 10
L/h=5							
Li et al. [16]	TBT	= 0	3.8020	5.8837	6.8812	8.1030	9.7063
Vo et al. [17] Navier	TBT	= 0	3.8020	5.8836	6.8826	8.1106	9.7122
	Present	≠ 0	3.8005	5.8812	6.8818	8.1140	9.7164
Vo et al. [17] FEM	TBT	= 0	3.8040	5.8870	6.8860	8.1150	9.7170
	Present	≠ 0	3.8020	5.8840	6.8860	8.1190	9.7220
SSPH	Present	≠ 0	3.8005	5.8815	6.8821	8.1145	9.7170
L/h=20							
Li et al. [16]	TBT	= 0	15.0130	23.2054	27.0989	31.8112	38.1372
Vo et al. [17] Navier	TBT	= 0	15.0129	23.2053	27.0991	31.8130	38.1385
	Present	≠ 0	15.0125	23.2046	27.0988	31.8137	38.1395
Vo et al. [17] FEM	TBT	= 0	15.0200	23.2200	27.1100	31.8300	38.1600
	Present	≠ 0	15.0200	23.2200	27.1100	31.8300	38.1600
SSPH	Present	≠ 0	15.0147	23.2099	27.1122	31.8070	38.1252

Table 3. Verification studies of the developed meshless code for SS FGB, dimensionless transverse shear stress $\bar{\sigma}_{xz}(0,0)$ for various gradation exponents.

Method	Theory	ε_z	p = 0	p = 1	p = 2	p = 5	p = 10
L/h=5							
Li et al. [16]	TBT	= 0	0.7500	0.7500	0.6787	0.5790	0.6436
Vo et al. [17] Navier	TBT	= 0	0.7332	0.7332	0.6706	0.5905	0.6467
	Present	≠ 0	0.7233	0.7233	0.6622	0.5840	0.6396
Vo et al. [17] FEM	TBT	= 0	0.7335	0.7335	0.6700	0.5907	0.6477
	Present	≠ 0	0.7291	0.7291	0.6661	0.5873	0.6439
SSPH	Present	≠ 0	0.7246	0.7234	0.6618	0.5840	0.6396
L/h=20							
Li et al. [16]	TBT	= 0	0.7500	0.7500	0.6787	0.5790	0.6436
Vo et al. [17] Navier	TBT	= 0	0.7451	0.7451	0.6824	0.6023	0.6596
	Present	≠ 0	0.7432	0.7432	0.6809	0.6010	0.6583
Vo et al. [17] FEM	TBT	= 0	0.7470	0.7470	0.6777	0.6039	0.6682
	Present	≠ 0	0.7466	0.7466	0.6776	0.6036	0.6675
SSPH	Present	≠ 0	0.7425	0.7432	0.6789	0.6037	0.6606

Table 4. Verification studies of the developed meshless code for SS FGB, dimensionless normal stress $\bar{\sigma}_z \left(\frac{L}{2}, \frac{h}{2} \right)$ for various gradation exponents.

Method	Theory	ϵ_z	p = 0	p = 1	p = 2	p = 5	p = 10
L/h=5							
Vo et al. [17] Navier	Present	$\neq 0$	0.1352	0.0670	0.0925	0.0180	-0.0181
Vo et al. [17] FEM	Present	$\neq 0$	0.1352	0.0672	0.0927	0.0183	-0.0179
SSPH	Present	$\neq 0$	0.1352	0.0671	0.0925	0.0182	-0.0180
L/h=20							
Vo et al. [17] Navier	Present	$\neq 0$	0.0337	-0.5880	-0.6269	-1.1698	-1.5572
Vo et al. [17] FEM	Present	$\neq 0$	0.0338	-0.5874	-0.6261	-1.1690	-1.5560
SSPH	Present	$\neq 0$	0.0338	-0.5880	-0.6266	-1.1706	-1.5589

Table 5. Boundary conditions used for the numerical computations.

BC	x=0	x=L
SS	$u = 0, w_b = 0, w_s = 0, w_z = 0, M_x^b = 0, M_x^s = 0$	$u = 0 \text{ or } N_x = 0, w_b = 0, w_s = 0, w_z = 0, M_x^b = 0, M_x^s = 0$
CS	$u = 0, w_b = 0, w_s = 0, w_z = 0, w_b' = 0, w_s' = 0$	$u = 0 \text{ or } N_x = 0, w_b = 0, w_s = 0, w_z = 0, M_x^b = 0, M_x^s = 0$
CC	$u = 0, w_b = 0, w_s = 0, w_z = 0, w_b' = 0, w_s' = 0$	$u = 0, w_b = 0, w_s = 0, w_z = 0, w_b' = 0, w_s' = 0$
CF	$u = 0, w_b = 0, w_s = 0, w_z = 0, w_b' = 0, w_s' = 0$	$N_x = 0, M_x^b = 0, M_x^s = 0, M_x^{b'} = 0, M_x^{s'} + Q_{xz} = 0, Q_{xz} = 0$

Table 6. Dimensionless maximum transverse deflections of the SS two-directional FGB for various gradation exponents in both directions and aspect ratios.

Aspect Ratio (L/h)	p _z	p _x				
		0	1	2	5	10
5	0	3.1402	3.9791	4.9566	8.2264	12.2258
	1	6.1343	7.2342	8.3430	11.2590	14.0759
	2	7.8602	8.8636	9.8333	12.3067	14.6466
	5	9.6041	10.4721	11.3126	13.4239	15.3073
	10	10.7571	11.6165	12.4207	14.2924	15.8037
20	0	2.8952	3.6662	4.5679	7.6257	11.4111
	1	5.7215	6.7299	7.7469	10.4640	13.1101
	2	7.2826	8.1853	9.0653	11.3622	13.5589
	5	8.6485	9.4397	10.2153	12.2531	14.0626
	10	9.5745	10.3974	11.1716	12.9851	14.4938

Table 7. Dimensionless axial stress $\bar{\sigma}_x \left(\frac{L}{2}, \frac{h}{2} \right)$ of the SS two-directional FGB for various gradation exponents in both directions.

Aspect Ratio (L/h)	p _z	p _x				
		0	1	2	5	10
5	0	3.8005	3.7945	3.7703	3.6740	3.6146
	1	5.8815	5.6196	5.3454	4.6207	3.9726
	2	6.8821	6.4155	5.9789	4.9475	4.0813
	5	8.1145	7.4802	6.8933	5.4784	4.2515
	10	9.7170	8.8501	8.0301	6.0444	4.4015
20	0	15.0147	14.9895	14.8909	14.5014	14.2517
	1	23.2099	22.1731	21.0861	18.2136	15.6904
	2	27.1122	25.2728	23.5505	19.4770	16.1494
	5	31.8070	29.3394	27.0385	21.5344	16.7800
	10	38.1252	34.7636	31.5736	23.9702	17.3768

5.2 Elastostatic Analysis of Two-Directional FGBs

Four different boundary conditions, SS, CS, CC and CF are considered respectively for the bending analysis of two directional FGBs subjected to uniformly distributed load. The transverse deflections, axial, normal and shear stresses are computed based on the present quasi-3D theory for different gradation exponents in both directions and aspect ratios. The details of the boundary conditions (BCs) used for the numerical analysis are given in Table 5.

5.2.1 SS Two-Directional FGB

A simply supported two directional FGB under uniformly distributed load is analyzed. The dimensionless transverse deflections and stresses are computed for various gradation exponents in both directions and different aspect ratios.

As it is seen from Table 6, the computed transverse deflection value decreases as the aspect ratio increases. With the increasing of the gradation exponents in both directions, the deflection values are increasing. In Table 7, the dimensionless axial stress values are presented. It is clear that the stress decreases as the gradation exponents in both directions increases. The maximum dimensionless shear stress value is obtained when p_z is set to zero and p_x is set to 5 as shown in Table 8. It is found in Table 9 that the dimensionless normal stress almost vanishes when the aspect ratio is 20 and the gradation exponent in the z direction is set to zero.

Figs. 5 and 6 are plotted for different aspect ratios to show the variation of the dimensionless axial and normal stresses through the thickness for different values of the gradation exponent in the x direction, when the gradation exponent in the z direction is determined as 2. The maximum axial stress value is observed at the top surface of the beam. The axial stress increases as the gradation exponent in the x direction decreases. The beam with $p_z=2$ and $p_x=0$ yields the maximum normal stress as seen in Figs. 5 and 6. In Figs. 5 and 6, it is also clear that the computed shear stress values are zero on the top and the bottom surfaces of the beam, as it is expected. The minimum shear stress value is obtained when the p_z is set to 10.

5.2.2 CS Two-Directional FGB

The dimensionless maximum transverse deflections and the axial, normal and shear stresses of the clamped-simply supported FGBs are investigated. The computed results are given in Table 10 and Figs. 7-8. It is clear in Table 10 that the transverse deflections increase as the gradation exponent increases. Lower aspect ratio has the larger dimensionless transverse deflections than the higher one.

In Figs. 7-8, the axial, normal and shear stresses are presented for various gradation exponents and aspect ratios. It is found that the maximum axial stress increases as the gradation exponent in the x direction increases.

The maximum normal stress is obtained at the bottom surface of the beam. The normal stress values are decreasing as the gradation exponent in the x direction is decreasing at the bottom surface of the beam. The maximum shear stress is observed for $p_z=1$ when the p_x is set to 2.

5.2.3 CC Two-Directional FGB

The dimensionless maximum transverse deflections and the axial, normal and shear stresses of the clamped-clamped FGBs are considered. The results are given in Table 11 and Fig. 9 for different gradation exponents and aspect ratios. It is clear from Table 11 that, as the gradation exponents increase, the transverse deflections increase. The computed results are in very well agreement along with the previous study.

The axial and normal stresses are plotted in Fig.9 for various gradation exponents in the x direction as the aspect ratio is set 5 and $p_z=0$. As the gradation exponent set to zero in the z direction, the maximum axial stresses obtained for $p_x=0$ and $p_x=1$ are almost indistinguishable. The maximum normal stress values are seen on the top surface of the beam and they are also indistinguishable. The maximum normal stress is found for $p_x=10$. As it is expected, the shear stress values are zero at the bottom and top surface of the beam. The maximum shear stress is observed for $p_z=1$.

5.2.4 CF Two-Directional FGB

Finally, the results of elastostatic analysis of the CF FGBs under uniformly distributed load are given for various gradation exponents and aspect ratios. For this example, accurate and agreed results cannot be obtained when the aspect ratio is greater than 5 and the gradation exponent is x direction greater than 2. However, the results found by using the aspect ratio lower than 6 are acceptable and agreed along with the analytical solutions. This point is important to determine future studies based on the present shear and normal shear deformation theory and the SSPH method. It is not clear that increasing the gradation exponent in the x direction deteriorates the accuracy of the present shear and normal deformation theory with higher aspect ratios. The robustness and accuracy of the SSPH method could be lost by using the gradation exponent in the x direction greater than 5 with CF boundary conditions as well.

As it is seen from Table 12, the transverse deflections increase as the gradation exponents increase. Three different aspect ratios are employed to investigate the inefficiency of the theory and the numerical method. It is not found a concrete reason that may explain the loss of accuracy when the aspect ratio is set to above 5. However, the computed results agree very well along with the analytical solutions based on the TBT.

Table 8. Dimensionless transverse shear stress $\bar{\sigma}_{xz}(0,0)$ of the SS two-directional FGB for various gradation exponents in both directions.

Aspect Ratio (L/h)	p _z	p _x				
		0	1	2	5	10
5	0	0.7246	0.7923	0.8484	0.9278	0.9195
	1	0.7234	0.7780	0.8186	0.8662	0.8560
	2	0.6618	0.7017	0.7290	0.7582	0.7523
	5	0.5840	0.6001	0.6099	0.6203	0.6200
	10	0.6396	0.6457	0.6494	0.6542	0.6557
20	0	0.7425	0.8125	0.8718	0.9580	0.9467
	1	0.7432	0.7993	0.8415	0.8901	0.8778
	2	0.6789	0.7199	0.7486	0.7792	0.7740
	5	0.6037	0.6223	0.6364	0.6385	0.6414
	10	0.6606	0.6686	0.6749	0.6738	0.6791

Table 9. Dimensionless normal stress $\bar{\sigma}_z(\frac{L}{2}, \frac{h}{2})$ of the SS two-directional FGB for various gradation exponents in both directions.

Aspect Ratio (L/h)	p _z	p _x				
		0	1	2	5	10
5	0	0.1352	0.1350	0.1346	0.1331	0.1328
	1	0.0671	0.0553	0.0498	0.0636	0.1085
	2	0.0925	0.0583	0.0422	0.0577	0.1110
	5	0.0182	0.0108	0.0205	0.0772	0.1253
	10	-0.0180	0.0157	0.0498	0.1176	0.1396
20	0	0.0338	0.0338	0.0337	0.0333	0.0331
	1	-0.5880	-0.6015	-0.5864	-0.4229	-0.1163
	2	-0.6266	-0.7108	-0.7197	-0.5044	-0.1138
	5	-1.1706	-1.1012	-0.9656	-0.5067	-0.0843
	10	-1.5589	-1.2682	-0.9862	-0.3459	-0.0493

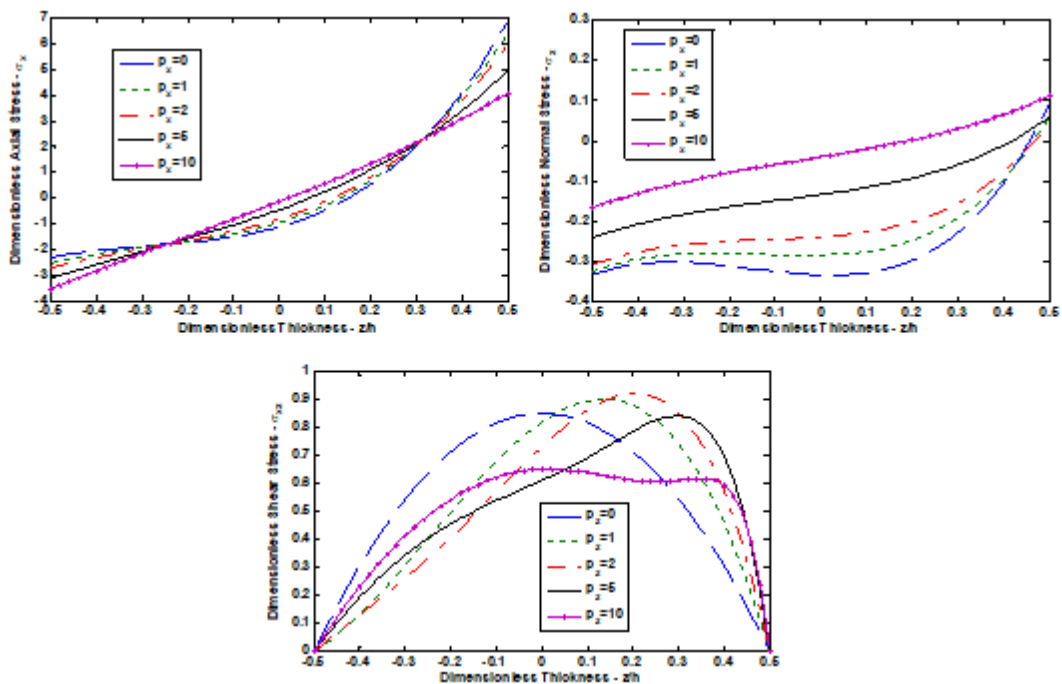


Figure 5. Dimensionless axial $\bar{\sigma}_x(\frac{L}{2}, z)$, normal $\bar{\sigma}_z(\frac{L}{2}, z)$ and shear stress $\bar{\sigma}_{xz}(0, z)$ through the thickness of the SS FGB for $p_z=2$ and $p_x=2$, $L/h=5$

Table 10. Dimensionless maximum transverse deflections of the CS two-directional FGB for various gradation exponents in both directions.

Aspect Ratio (L/h)	p_z	p_x				
		0	1	2	5	10
5	0	1.4497	1.7984	2.1844	3.3256	4.4754
	1	2.7943	3.2536	3.7003	4.7672	5.6600
	2	3.6053	4.0375	4.4382	5.3676	6.1134
	5	4.5443	4.9024	5.2356	5.9811	6.5451
	10	5.1527	5.4762	5.7665	6.3852	6.8235
20	0	1.2572	1.5297	1.8335	2.7508	3.6922
	1	2.2574	2.6612	3.0403	3.8831	4.7242
	2	2.8623	3.2657	3.6266	4.3313	4.9949
	5	3.2451	3.6310	3.8925	4.5933	5.2977
	10	3.8213	4.1552	4.3400	4.9688	5.6261

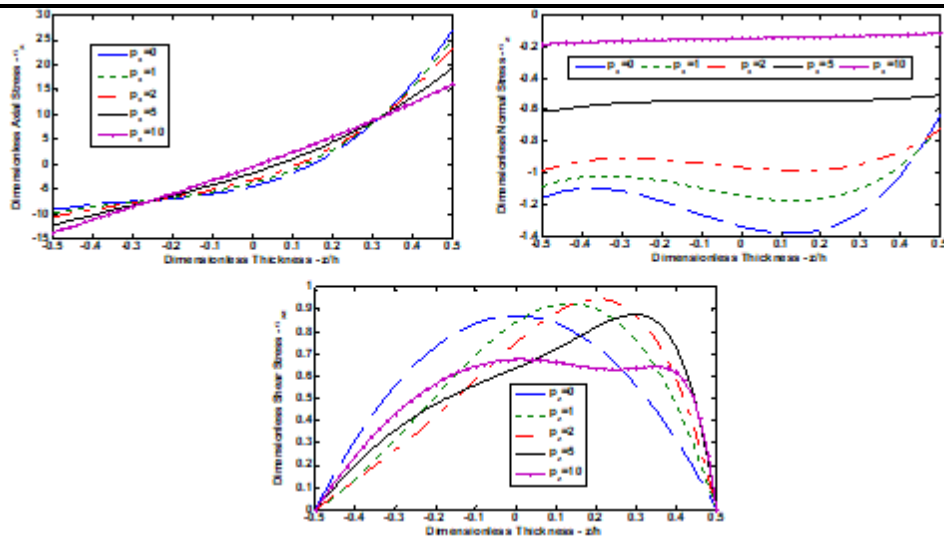


Figure 6. Dimensionless axial $\bar{\sigma}_x(\frac{L}{2}, z)$, normal $\bar{\sigma}_z(\frac{L}{2}, z)$ and shear stress $\bar{\sigma}_{xz}(0, z)$ through the thickness of the SS FGB for $p_z=2$ and $p_x=2$, $L/h=20$

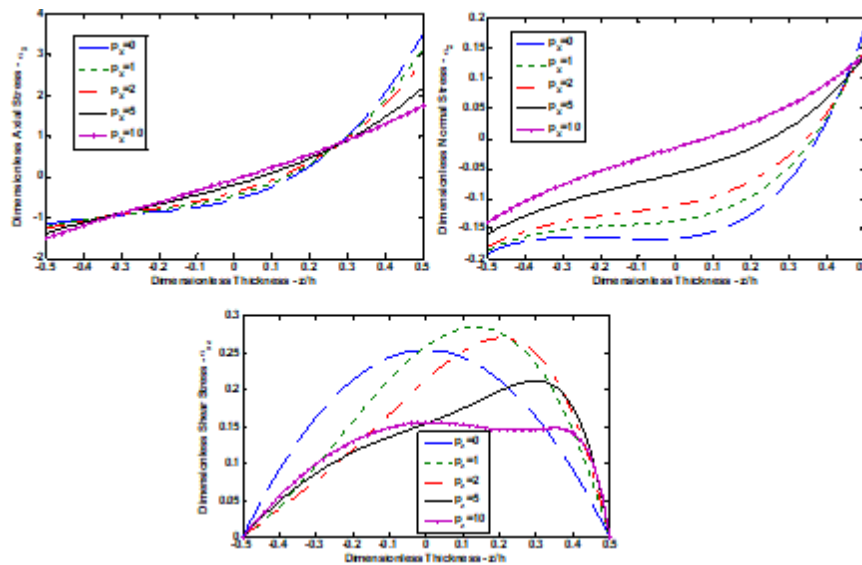


Figure 7. Dimensionless axial $\bar{\sigma}_x(\frac{L}{2}, z)$, normal $\bar{\sigma}_z(\frac{L}{2}, z)$ and shear stress $\bar{\sigma}_{xz}(0, z)$ through the thickness of the CS FGB for $p_z=2$ and $p_x=2$, $L/h=5$

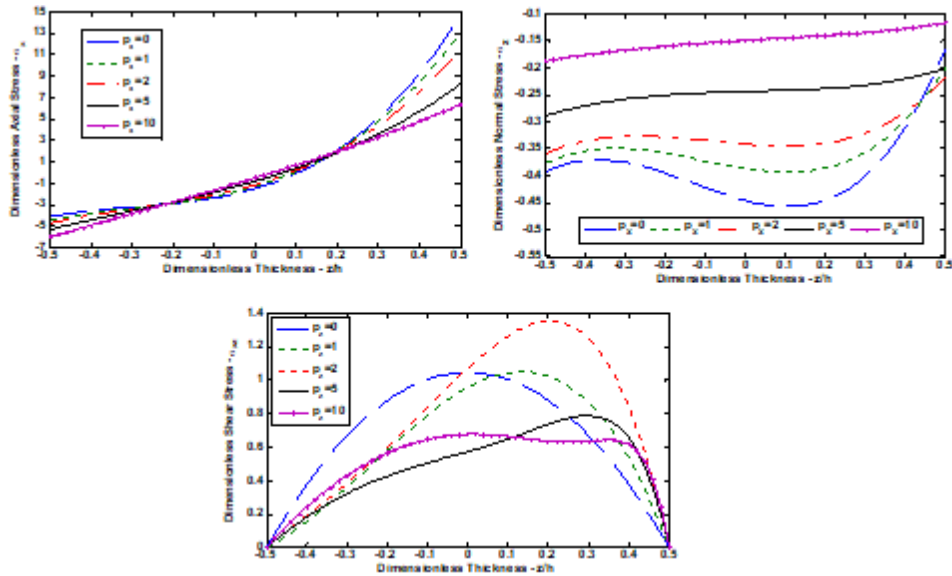


Figure 8. Dimensionless axial $\bar{\sigma}_x(\frac{L}{2}, z)$, normal $\bar{\sigma}_z(\frac{L}{2}, z)$ and shear stress $\bar{\sigma}_{xz}(0, z)$ through the thickness of the CS FGB for $p_z=2$ and $p_x=2$, $L/h=20$

Table 11. Dimensionless maximum transverse deflections of the C-C two-directional FGB for various gradation exponents in both directions.

Aspect Ratio (L/h)	p_z	Vo et al. [17]					
		$p_x = 0$	0	1	2	5	10
5	0	0.8327	0.8349	1.0660	1.3187	2.0188	2.6766
	1	1.5722	1.5868	1.8836	2.1655	2.8106	3.3063
	2	2.0489	2.0810	2.3585	2.6100	3.1762	3.5770
	5	2.6929	2.7180	2.9393	3.1597	3.5873	3.8630
	10	3.1058	3.1104	3.3217	3.4988	3.8290	4.0292
20	0	0.5894	0.5898	0.7532	0.9315	1.4187	1.8575
	1	1.1613	1.1630	1.3754	1.5737	2.0112	2.3388
	2	1.4811	1.4906	1.6764	1.8510	2.2307	2.5065
	5	1.7731	1.7762	1.9474	2.1065	2.4409	2.6534
	10	1.9694	1.9734	2.1479	2.2997	2.5867	2.7617

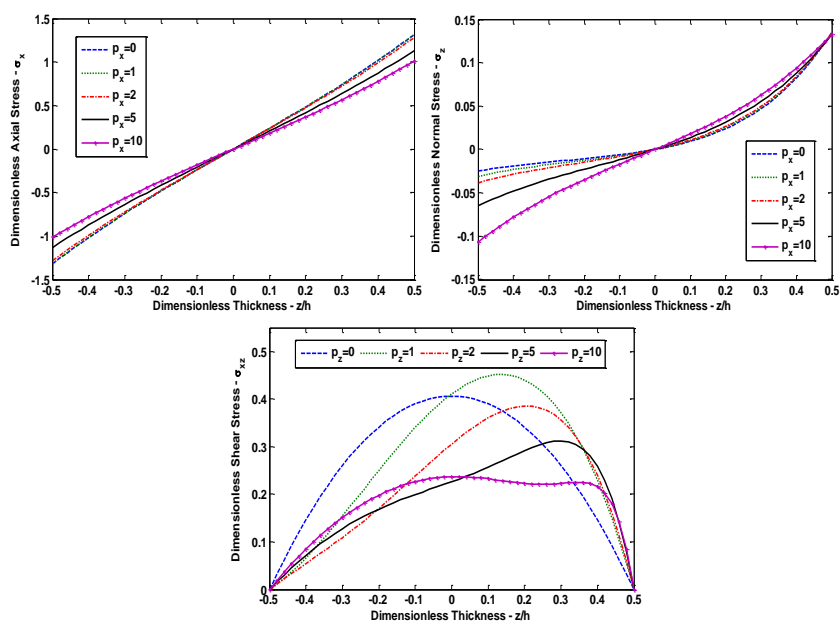


Figure 9. Dimensionless axial $\bar{\sigma}_x(\frac{L}{2}, z)$, normal $\bar{\sigma}_z(\frac{L}{2}, z)$ and shear stress $\bar{\sigma}_{xz}(0, z)$ through the thickness of the CC FGB for

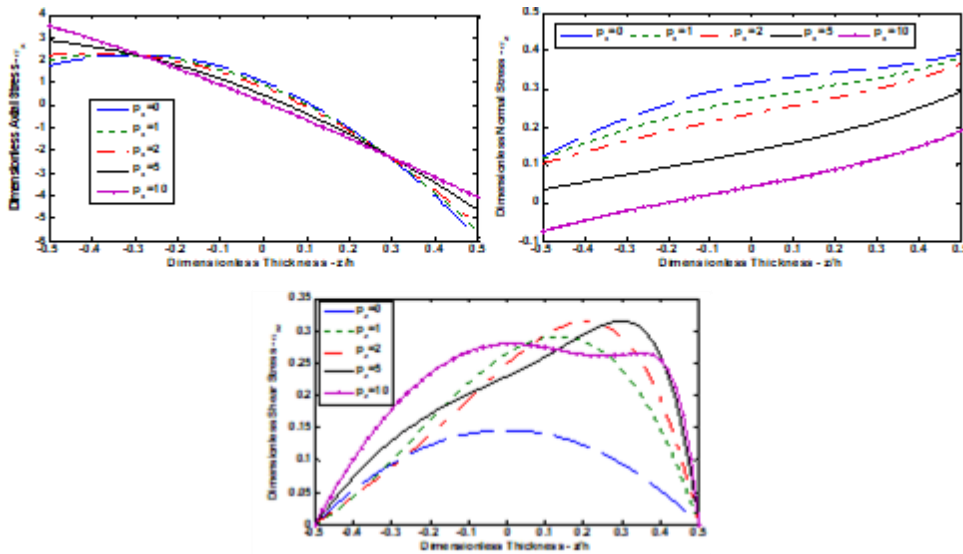


Figure 10. Dimensionless axial $\bar{\sigma}_x(\frac{L}{2}, z)$, normal $\bar{\sigma}_z(\frac{L}{2}, z)$ and shear stress $\bar{\sigma}_{xz}(0, z)$ through the thickness of the CF FGB for $p_z=1$ and $p_x=2$, $L/h=5$

Table 12. Dimensionless maximum transverse deflections of the C-F two-directional FGB for various gradation exponents in both directions.

Aspect Ratio (L/h)	p_z	Li et al. [16]	Vo et al. [17]	p_x				
		$p_x = 0, \epsilon_z = 0$	$p_x = 0, \epsilon_z \neq 0$	0	1	2	5	10
2	0	38.4079		35.2697	38.8074	43.3814	58.5072	83.8566
	1	73.6361		67.7056	72.5379	78.1133	94.2687	116.6278
	2	96.4165	-	87.2699	91.4037	96.5571	109.5350	128.8880
	5	124.3960		109.6762	113.0652	116.5574	126.9298	141.5556
	10	143.2723		124.4861	127.9787	135.0984	137.1212	151.2053
3	0	32.4211		30.8511	33.7188	37.1688	49.7066	70.9790
	1	63.5249		59.6712	63.7506	68.1217	81.3383	100.2031
	2	82.3200	-	75.7549	80.0420	84.1371	96.7912	111.4601
	5	101.9579		92.9652	96.3159	100.7895	107.7395	122.6167
	10	114.9451		105.4147	109.0172	112.5187	119.6471	131.2405
5	0	29.3558	28.5524	27.6636	30.4944	33.6062	44.5715	63.7455
	1	58.3481	56.2002	56.7975	60.2980	64.0033	75.5193	93.3406
	2	75.1027	71.7295	71.6238	75.2135	78.7156	88.8993	103.9447
	5	90.4697	86.1201	86.5866	89.8121	92.9513	102.7237	114.2047
	10	100.3961	95.7582	97.6667	101.0233	104.1912	113.5742	123.2930

It is observed in Fig. 10 that the dimensionless axial stress values computed by using the shear and normal deformation theory formulation increases as the gradation exponent in the x direction decreases. It is clear that the maximum normal stress values are found at the top surface of the beam. As the gradation exponent in the x direction decreases, the maximum normal stress increases. The dimensionless shear stress values are shown in Fig. 10. As it is seen, the minimum shear stress value is obtained when the gradation exponent in the z direction is set to zero. The shear stress values are zero at the bottom and top surfaces of the beam.

6. CONCLUSION

The SSPH basis functions are employed to analyze the elastostatic behaviour of the two directional functionally graded beams subjected to different sets of boundary conditions and uniformly distributed load by using strong formulation of the problem. A shear and normal deformation theory which includes both shear deformation and thickness stretching effect is used to evaluate the transverse deflections, axial, normal and shear stresses of two directional FGBs. The developed code is verified by studying a simply supported FGB problem and comparing the results with previous studies and the analytical solutions. Four different boundary conditions (SS, CS, CC and CF) are considered with different gradation exponents in both directions and

various aspect ratios. The effect of the normal strain is investigated and it is found that it is important and should be considered in the static behavior of the two directional functionally graded beams including sandwich structures which may be a subject of the future studies.

Another important point is that for CF beam, the computed results for the aspect ratio which is higher than 5 are not agree very well with the previous studies as the gradation exponent in the x direction is set to higher than 2. At least within the scope of this work, it may be told that by using the SSPH method and present shear and normal deformation theory, it is not recommended to use a gradation exponent in the x direction greater than 2 as the aspect ratio increases with CF boundary condition and this should be investigated in future studies.

It is found that the SSPH method provides satisfactory results at least for the problems studied here. Based on the results of the four numerical examples, it is recommended that the SSPH method can be applied for solving linear two directional functionally graded beam problems by employing different shear deformation theories including shear and normal deformation theories.

REFERENCES

- [1] Kadoli R., Akhtar K., Ganesan N., "Static analysis of functionally graded beams using higher order shear deformation theory", *Appl Math Model*, 32:2509-2525, (2008).
- [2] Li X.F., "A unified approach for analyzing static and dynamic behaviors of functionally graded Timoshenko and Euler–Bernoulli beams", *Journal of Sound and Vibration*, 318:1210-1229, (2008).
- [3] Mena R., Tounsi A., Mouaici F., Mechab I., Zidi M., Bedia E.A.A., "Analytical solutions for static shear correction factor of functionally graded rectangular beams", *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 19:641-652, (2012).
- [4] Li S.R., Cao D.F., Wan Z.Q., "Bending solutions of FGM Timoshenko beams from those of the homogenous Euler–Bernoulli beams", *Appl Math Model*, 37:7077-7085, (2013).
- [5] Jing L.L., Ming P.J., Zhang W.P., Fu L.R., Cao Y.P., "Static and free vibration analysis of functionally graded beams by combination Timoshenko theory and finite volume method", *Compos Struct*, 138:192-213, (2016).
- [6] Aydogdu M., Taskin V., "Free vibration analysis of functionally graded beams with simply supported edges", *Materials&Design*, 28:1651–1656, (2007).
- [7] Simsek M., "Fundamental frequency analysis of functionally graded beams by using different higher-order beam theories", *Nuc Eng and Des*, 240:697–705, (2010).
- [8] Simsek M., "Vibration analysis of a functionally graded beam under a moving mass by using different beam theories", *Compos Struct*, 92:904–17, (2010).
- [9] Pradhan K.K., Chakraverty S., "Free vibration of Euler and Timoshenko functionally graded beams by Rayleigh-Ritz method", *Compos Part B*, 51:175–184, (2013).
- [10] Su H., Banerjee J.R., Cheung C.W., "Dynamic stiffness formulation and free vibration analysis of functionally graded beams", *Compos Struct*, 106:854–862, (2013).
- [11] Li S.R., Wan Z.G., Zhang J.H., "Free vibration of functionally graded beams based on both classical and first-order shear deformation beam theories", *Applied Mathematics and Mechanics*, 35:591–606, (2014).
- [12] Aydogdu M., "Thermal buckling analysis of cross-ply laminated composite beams with general boundary conditions", *Composite Science and Technology*, 67:1096–1104, (2007).
- [13] Akgöz B., Civalek Ö., "Buckling analysis of functionally graded microbeams based on the strain gradient theory", *Acta Mechanica*, 224:2185–2201, (2013).
- [14] Aydogdu M., "Semi-inverse method for vibration and buckling of axially functionally graded beams", *Journal of Reinforced Plastics&Composites*, 27:683–91, (2008).
- [15] Huang Y., Li X.F., "Buckling analysis of nonuniform and axially graded columns with varying flexural rigidity", *Journal of Engineering Mechanics*, 137(1):73–81, (2011).
- [16] Li X.F., Wang B.L., Han J.C., "A higher-order theory for static and dynamic analyses of functionally graded beams", *Archieve of Applied Mechanics*, 80:1197-1212, (2010).
- [17] Vo T.P., Thai H.T., Nguyen T.K., Inam F., Lee J., "Static behaviour of functionally graded sandwich beams using a quasi-3D theory", *Compos Part B*, 68:59-74, (2015).
- [18] Filippi M., Carrera E., Zenkour A.M., "Static analyses of FGM beams by various theories and finite elements", *Compos Part B*, 72:1-9, (2015).
- [19] Mashat D.S., Carrera E., Zenkour A.M., Khateeb S.A.A., Filippi M., "Free vibration of FGM layered beams by various theories and finite elements", *Compos Part B*, 59:269–278, (2014).
- [20] Vo T.P., Thai H.T., Nguyen T.K., Inam F., Lee J., "A quasi-3D theory for vibration and buckling of functionally graded sandwich beams", *Compos Struct*, 119:1–12, (2015).
- [21] Mantari J.L., Yarasca J., "A simple and accurate generalized shear deformation theory for beams", *Compos Struct*, 134:593–601, (2015).
- [22] Mantari J.L., "A refined theory with stretching effect for the dynamics analysis of advanced composites on elastic foundation", *Mech Mater*, 86:31–43, (2015).
- [23] Mantari J.L., "Refined and generalized hybrid type quasi-3D shear deformation theory for the bending analysis of functionally graded shells", *Compos Part B*, 83:142–152, (2015).
- [24] Nguyen T.K., Vo T.P., Nguyen B.D., Lee J., "An analytical solution for buckling and vibration analysis of functionally graded sandwich beams using a quasi-3D shear deformation theory", *Compos Struct*, 156:238-252, (2016).
- [25] Nemat-Alla M., "Reduction of thermal stresses by developing two-dimensional functionally graded materials", *Int Journal of Solids and Structures*, 40:7339–56, (2003).
- [26] Goupee A.J., Vel S.S., "Optimization of natural frequencies of bidirectional functionally graded beams", *Struct Multidisc Optim*, 32:473–84, (2006).
- [27] Lü C.F., Chen W.Q., Xu R.Q., Lim C.W., "Semi-analytical elasticity solutions for bidirectional functionally graded beams", *Int Journal of Solids and Structures*, 45:258–275, (2008).

- [28] Zhao L., Chen W.Q., Lü C.F., “Symplectic elasticity for two-directional functionally graded materials” *Mech Mater*, 54:32–42, (2012).
- [29] Simsek M., “Buckling of Timoshenko beams composed of two-dimensional functionally graded material (2D-FGM) having different boundary conditions”, *Compos Struct*, 149:304–314, (2016).
- [30] Karamanli A., “Elastostatic analysis of two-directional functionally graded beams using various beam theories and Symmetric Smoothed Particle Hydrodynamics method”, *Compos Struct*, 160:653–669, (2017).
- [31] Karamanli A., “Bending behaviour of two directional functionally graded sandwich beams by using a quasi-3d shear deformation theory”, *Compos Struct*, 174:70–86, (2017).
- [32] Donning B.M., Liu W.K., “Meshless methods for shear-deformable beams and plates”, *Comp Meth in Appl Mech and Eng*, 152:47–71, (1998).
- [33] Gu Y.T., Liu G.R., “A local point interpolation method for static and dynamic analysis of thin beams”, *Comp Meth in Appl Mech and Eng*, 190(42):5515–5528, (2001).
- [34] Ferreira A.J.M., Roque C.M.C., Martins P.A.L.S., “Radial basis functions and higher-order shear deformation theories in the analysis of laminated composite beams and plates”, *Compos Struct*, 66:287–293, (2004).
- [35] Ferreira A.J.M., Fasshauer G.E., “Computation of natural frequencies of shear deformable beams and plates by an RBF-pseudospectral method”, *Comp Meth in Appl Mech and Eng*, 196:134–146, (2006).
- [36] Moosavi M.R., Delfanian F., Khelil A., “The orthogonal meshless finite volume method for solving Euler–Bernoulli beam and thin plate problems”, *Thin Walled Structures*, 49:923–932, (2011).
- [37] Wu C.P., Yang S.W., Wang Y.M., Hu H.T., “A meshless collocation method for the plane problems of functionally graded material beams and plates using the DRK interpolation”, *Mechanics Research Communications*, 38:471–476, (2011).
- [38] Roque C.M.C., Figaldo D.S., Ferreira A.J.M., Reddy J.N., “A study of a microstructure-dependent composite laminated Timoshenko beam using a modified couple stress theory and a meshless method”, *Compos Struct*, 96:532–537, (2013).
- [39] Qian L.F., Batra R.C., “Design of bidirectional functionally graded plate for optimal natural frequencies”, *Journal of Sound and Vibration*, 280:415–424, (2005).
- [40] Pilafkan R., Folkow P.D., Darvizeh M., Darvizeh A., “Three dimensional frequency analysis of bidirectional functionally graded thick cylindrical shells using a radial point interpolation method (RPIM)”, *European Journal of Mechanics A/Solids*, 39:26–34, (2013).
- [41] Yang Y., Kou K.P., Lu V.P., Lam C.C., Zhang C.H., “Free vibration analysis of two-dimensional functionally graded structures by a meshfree boundary–domain integral equation method”, *Compos Struct*, 110:342–353, (2014).
- [42] Zhang G.M., Batra R.C., “Symmetric smoothed particle hydrodynamics (SSPH) method and its application to elastic problems”, *Comp Mech*, 43:321–340, (2009).
- [43] Batra R.C., Zhang G.M., “SSPH basis functions for meshless methods, and comparison of solutions with strong and weak formulations”, *Comp Mech*, 41:527–545, (2008).
- [44] Tsai C.L., Guan Y.L., Batra R.C., Ohanehi D.C., Dillard J.G., Nicoli E., Dillard D.A., “Comparison of the performance of SSPH and MLS basis functions for two-dimensional linear elastostatics problems including quasistatic crack propagation”, *Comp Mech*, 51:19–34, (2013).
- [45] Tsai C.L., Guan Y.L., Ohanehi D.C., Dillard J.G., Dillard D.A., Batra R.C., “Analysis of cohesive failure in adhesively bonded joints with the SSPH meshless method”, *Int Journal of Adhesion & Adhesives*, 51:67–80, (2014).
- [46] Wong S.M., Hon Y.C., Golberg M.A., “Compactly supported radial basis functions for shallow water equations”, *Applied Mathematics and Computation*, 127:79–101, (2002).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



Mars gezgini prototipi Merih-2

Mars rover prototype Merih-2

Yazar(lar) (Author(s)): Barış BALCI¹, Mehmet C. YILDIRIM², Özkan BEBEK³

ORCID¹: 0000-0001-5371-2325

ORCID²: 0000-0002-2545-1962

ORCID³: 0000-0003-2721-9777

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Balcı B., Yıldırım M. C., ve Bebek Ö., "Mars gezgini prototipi Merih-2", *Politeknik Dergisi*, 21(4): 875-885, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.385545

Mars Gezginini Prototipi Merih-2

Araştırma Makalesi / Research Article

Barış BALCI¹, Mehmet C. YILDIRIM², Özkan BEBEK^{2*}

¹ Özyeğin Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Çekmeköy, İstanbul, Türkiye

² Özyeğin Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Çekmeköy, İstanbul, Türkiye

(Geliş/Received : 24.07.2017 ; Kabul/Accepted : 23.08.2017)

ÖZ

Merih-2, Özyeğin Üniversitesi Rover Takımı tarafından University Rover Challenge 2016 ve European Rover Challenge 2016'ya katılmak ve Mars koşullarında görev yapmak için tasarlanan gezgindir. Sürüş için Merih-2'nin 6 adet özel tasarım tekeri bulunmaktadır. Yüksek çekiş için bütün tekerler elektrik motorlarıyla tahrik edilmiştir. Gezginin ilerlerken yön değiştirmesi, ön ve arka tekerlerin beraber yönlerinin değiştirilmesiyle mümkün kılınmıştır. Tekerlerden en az dördünün yere basmasını sağlayan bir Külbütör-Boji mekanizması ve bu mekanizmanın dengeleyicisi bir diferansiyel bulunmaktadır. Merih-2 ayrıca, çevredeki objelerin manipülasyonu için 4 serbestlik dereceli bir robot kola sahiptir. Bu robotik kola çok fonksiyonlu bir tutucu takılmış ve tornavida alma, şalterleri açma ve kapama gibi astronotlara yardım görevlerini yapması planlanmıştır. Bu makalede; Merih-2'nin tasarım ayrıntıları, üretilen prototipten elde edilen kazanımlar ve gezginin operasyon ve yaşanan olumsuzlukları ortadan kaldıracak öneriler anlatılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Gezegen gezginleri, kara robotları, robot mekanik tasarımı.

Mars Rover Prototype Merih-2

ABSTRACT

Merih-2 is designed to serve under the Mars conditions and to join the University Rover Challenge 2016 and the European Rover Challenge 2016 by the Özyeğin University Rover Team. For locomotion, the Merih-2 has 6 specially designed wheels. All wheels are driven by electric motors for high traction. The steering of the rover is provided by changing the directions of the front and rear wheels together. A Rocker-Bogie Mechanism that allows at least four wheels to keep ground contact, and a differential that assumes the task of balancing this mechanism is used. Merih-2 also has a 4-degree-of-freedom robot arm for manipulating objects in the surroundings. This robotic arm is equipped with a multifunctional holder and is intended to assist astronauts in tasks such as tool retrieval, turning on and off of switches. This article describes the design details of Merih-2 and the gains from the prototype produce. Moreover, the article focuses on the test results that are obtained at ERC 2016 and discusses the roadmap for a better prototype.

Keywords: Planetary rovers, field robots, mechanical robot design.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Akıllı sistemler uzay araştırmalarının bel kemiğini oluşturmaktadır. İnsanlı görevlerin beraberinde getirdiği maddi yükler ve insan hayatı üzerinde oluşturduğu riskler, gök cisimlerine (gezegen, kuyruklu yıldız, uydusu vb.) yönelik gerçekleştirilen görev ve araştırmaların insansız cihazlar ile sürdürülmesine neden olmuştur. Araştırılan gök cisimlerinin Dünya'ya olan uzaklıklarından ötürü gerçek zamanlı kontrolün mümkün olmaması, sistemde oluşabilecek her türlü aksaklığın yine sistemin kendi tarafından giderilme ihtiyacından ötürü, uzay robotiği çeşitlilik ve tasarım zorluklarını içerisinde bulundurmaya sürdüren bir araştırma alanıdır. Yakın uzayda araştırılması gerekli gezegen ve uyduların büyüklüğü, mobil robotların uzay robotiğinde kullanım ihtiyacını doğurmuştur [1].

Gezegen gezginleri (Planetary Rovers) Ay ve Mars üzerinde araştırma amacıyla 1970'li yıllardan itibaren farklı görevlerde kullanılmıştır. Bu bağlamda ilk başarılı görev olarak 1970 yılında SSBC'nin Lunokhod 1 adlı aracının

Ay'ın yüzeyine ulaşması ile sağlanmıştır. Gezginler gönderildikleri gök cisminin yapısı ve gönderilme gerekçeleri olan bilimsel görevin gerektirdiği koşullara göre sistemsel değişiklikler göstermektedirler. Bu araçların geliştirilmesi büyük bütçeli projelerdir. İlki doksanlı yıllarda olmak üzere şimdiye kadar Mars yüzeyinde dört gezgin keşif yapmaktadır [2]-[5].

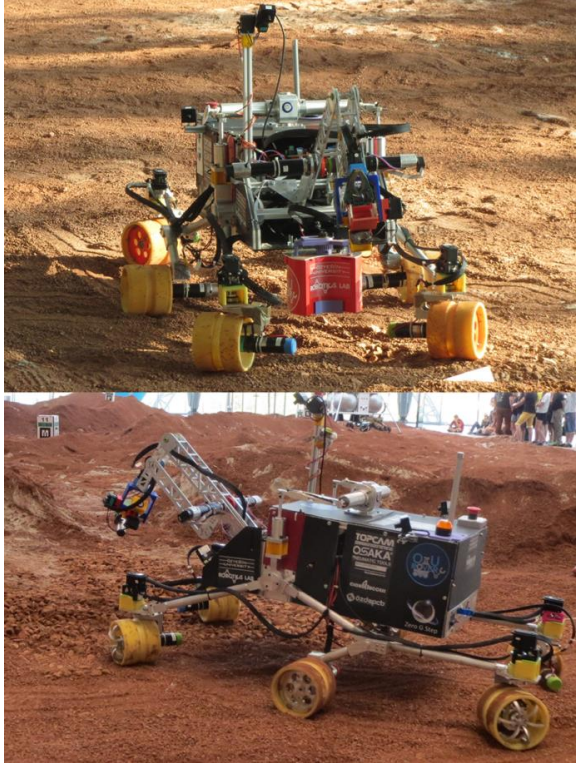
Gönderilen robotlara olan ilgiyi arttırmak ve uzay mühendisliğine öğrencilerin ilgisini çekmek için Mars gezginini temalı yarışmalar da düzenlenmektedir [6]-[9]. Üniversiteler arası gezgin yarışmaları 2007 senesinde ABD'de University Rover Challenge (URC) ile başlamış olup Mars yüzey koşullarına benzer özelliklere sahip yüzeylerde gerekli görev simülasyonlarının gerçekleştirilmesinin amaçlandığı organizasyonlardır. URC'yi takiben European Rover Challenge (ERC) 2012 ve United Kingdom University Rover Challenge (UKURC) yarışması da 2016 senesinden itibaren benzer amaçla ancak farklı görev yapılanmaları ile düzenlenmektedirler. Yarışmalar sırasında olası insanlı bir Mars görevine yönelik senaryolar özgün platformlarla denetlenmektedir.

Merih-2, Özyeğin Üniversitesi Rover Takımı tarafından University Rover Challenge (URC) ve European Rover

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : ozkan.bebek@ozyegin.edu.tr

Challenge (ERC)'ya katılmak ve Mars koşullarında görev yapmak için tasarlanan gezgindir. Bu yarışmalarda, keşif yapmak ve astronotlara yardım etmek amacıyla kurulan görevler bulunmaktadır. Görevlerin çoğu yarı-otonom veya otonom olarak, uzaktan ve kısmi olarak kumanda ile yapılabilen görevlerdir.

Merih-2 bu yarışmalar için görev odaklı olarak tasarlanmış ve ERC 2016'ya katılmıştır. Merih-2'nin ERC 2016'da oluşturulan yapay Mars yüzeyi üzerindeki fotoğrafı Şekil 1'de görülebilir. Bu makalede, Merih-2'nin mekanik tasarımı, elektronik altyapısı ve denetim sistemi ayrıntılarıyla verilmiştir.



Şekil 1. Merih-2'nin European Rover Challenge yarışmasında oluşturulan Mars yüzeyi simülasyon sahasında çekilmiş fotoğrafı (Merih-2's photo taken on the simulated Mars surface during the European Rover Challenge contest)

2. SİSTEM GEREKSİNİMLERİ (SYSTEM REQUIREMENTS)

Merih gezegen gezgini prototipleri, Özyeğin Üniversitesi Rover Takımı (OZU Rover) tarafından yarışmaların belirledikleri teknik kısıtlamalara göre geliştirilmektedir. Merih-2, yetenekleriyle yarışabilmek ve aynı zamanda gezgin sınıfına üye olabilmesi için bazı sistem gereksinimleriyle donatılmış ve bu doğrultuda tasarlanmıştır. En temel gereksinimi kendi başına ayakta durabilmesi ve bir yere fiziksel olarak bağlılığı olmadan hareket edebilmesidir.

2.1. Mekanik Kısıtlar (Mechanical Restrictions)

Üretilecek olan gezginin çalışma anında hiçbir şekilde bir yere bağlı olmaması veya bir yerden destek almaması ge-

rekmetedir. Bir başka gereksinim ise ağırlık sınırlamasıdır. Merih-2'nin içinde bulunmuş olduğu gezgin sınıfı belli bir ağırlık sınırına gereksinim duymaktadır. Yarışmaya katılan gezginler 50 kg ağırlık sınırını geçmeyecek şekilde tasarlanmalıdır [10]. Aynı zamanda bir başka sistem gereksinimi ise hız ile alakalıdır. Hız limiti 3 km/h olarak belirlenmiş ve bu gereksinime göre donanım tasarlanmalıdır. Gezginlerin asıl kullanım amacı astronotlara destek vermek ve gerekli görevleri yerine getirebilmektir. Bu görevlerden en fazla önem arz edeni bulunduğu ortamdan örnek toplayıp, onları muhafaza edilmiş bir şekilde istenilen yere ulaştırılmasıdır, bu gerekçe ile toplanan örneklerin zarar görmemesi adına, taşınma sırasında izole bir şekilde örnekler uygun şekilde tasarlanmış bir muhafazada saklanmalıdır. Bu muhafaza en az 3 bölmeden oluşmalı ve her koşula dayanıklı olmakla birlikte kullanılacak muhafaza en az 100 gr taş örneği ve/veya 200 gr toprak örneği taşıyabilmelidir.

2.2. Elektronik Kısıtlar (Electronic Restrictions)

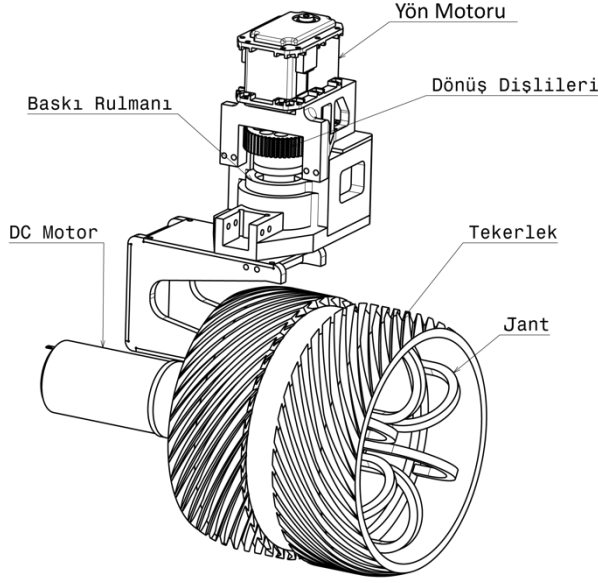
Gezginin üzerinde bir güç ünitesi bulunmalıdır, gezgine harici bir kablo yoluyla güç beslemesi yapılamaz. Aynı şekilde gezgin kablosuz olarak kontrol edilebilmeli ve denetim masasıyla haberleşebilmelidir. Denetim sistemi tasarımı gezginin 100 m çapında bir alanda operasyonunu destekleyecek biçimde olmalıdır. Otonom görevler esnasında gezginler denetim masasından yönlendirilemez, gezgine sadece görev için tetikleyici komutlar (başla, bekle, sürdür, dur vb.) yollanabilir. Robot ve denetim masası arasındaki haberleşme WiFi ile sağlandığı takdirde, sinyal frekansı 2,4 veya 5,6 GHz olmalı ve yayın yapılan kanal kolayca ayarlanabilmelidir. Yayın en yüksek 100 mW mertebesinde yapılabilir. Acil durumlarda herhangi bir kazaya sebebiyet vermemek için, gezginin aktivitesini durduracak bir acil durum butonu gezgin üzerinde hazır bulunmalıdır.

3. MERİH-2'NİN TASARIMI (DESIGN OF MERIH-2)

Merih-2 bütünleşik bir sistem olarak tasarlanmıştır ve birçok alt bileşeni bulunmaktadır. Bütün robotik veya mekatronik sistemler gibi iki ana başlık altında bu bileşenler irdelenebilir. Tasarım sırasında gezginin öncelikle mekanik aksamı tamamlanmıştır. Elektronik aksam bu yapıya uygun olarak tasarlanmış ve eyleyiciler seçilmiştir. Yazılım da son olarak bu mekatronik sistemin denetimi için hazırlanmıştır.

3.1. Mekanik Tasarım Ve Üretim (Mechanical Design And Production)

Merih-2'nin mekanik tasarımı yarışmanın belirlediği hedefler doğrultusunda oluşturulmuştur. Bu hedefler irdelenerek en temel tasarım parametresi olan robotun ölçüsü belirlenmiştir. Daha sonra aşağıdan yukarıya doğru bir tasarım mimarisi planlanmış ve öncelikle tekerler, ertesinde diferansiyel sistemi, sonrasında gövde ve kol tasarlanmıştır. Bu bileşenler aşağıda ayrıntılı olarak anlatılmaktadır.



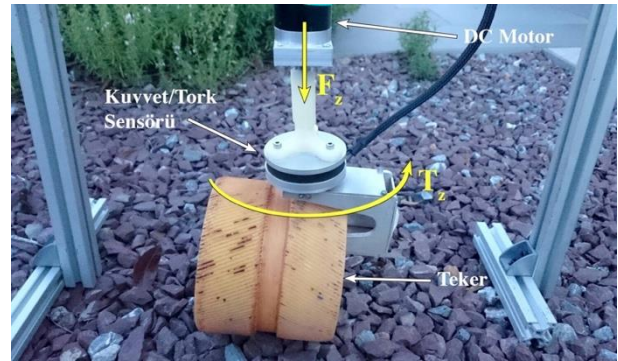
Şekil 2. Merih-2 Tekerinin Montaj Çizimi (Assembly drawing of Merih-2 Wheel).

3.1.1. Tekerlek (The Wheel)

Merih-2'nin sürüş sisteminde 6 adet özel üretim tekerlek bulunmaktadır. Bunların ön ve arkadaki toplam dört adedi yön ekseninde de dönebilme kabiliyetine sahiptir. Bu özellik gezginin yönlendirilmesi için kullanılmaktadır. Mars yüzey koşulları kumdan keskin taşlara kadar farklı yüzey özellikleri göstermektedir. Aracın yüzeyle buluşmasını sağlayan bölümü olan tekerlekler, bu çeşitliliğe uyum gösterecek yapıda olmak zorundadır. Yarışma ve genel olarak gezginlerin çalışma prensipleri göz önünde bulundurulduğunda havalı tekerlekler yerine özel tasarım tekerleklere ihtiyaç duyulmuştur. Faal gezgin sistemleri incelendiğinde, karşılaşılan tasarımlarda katı yapıya sahip ve yüzeye temas alanı büyük tekerleklerin yaygın olarak tercih edildiği görülmektedir [5]. Merih-2 için de katı yapı bir tekerlek sistemi geliştirilmiştir. Katı tekerler seçilirken sıkça kullanılan havalı tekerleklerin aksine bölgesel hasarların bütün tekerlek yapısını etkilemiyor oluşudur. Tekerleğin tasarım süreci diş teker, jant ve yön sistemi olarak üç aşamada incelenebilir. Şekil 2 'de Merih-2'nin teker tasarımı gösterilmektedir.

Merih-2 gezgininde bir sönümlendirici sistemi bulunmamaktadır. Yüzeydeki çukur, tümsek ve benzeri yapıların hareket sırasında aracı etkilememesi için gerekli sönümlendirici ve yay özellikleri tamamen tekerler tarafından sağlanmaktadır. Çeşitlilik gösterebilen yüzey koşulları bir araya geldiğinde bu şartlar tekerleğin tasarımını zorlu bir süreç haline getirmiştir. Gezginin temel ölçüleri, görev ve sınırlamalar üzerinden çıkarıldıktan sonra tekerlek başına 3 kg ağırlık sınırlaması getirilmiştir. Karşılaşılabilecek en kötü senaryonun 1 metrelik serbest düşüş olacağına karar verilmiş ve durumun sistemde oluşturacağı etkilere göre CAD modellerine Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) uygulanmıştır. En kritik parçalar Şekil 2'de görülen jantlar olmuştur. Bunların maruz kalacağı en yüksek

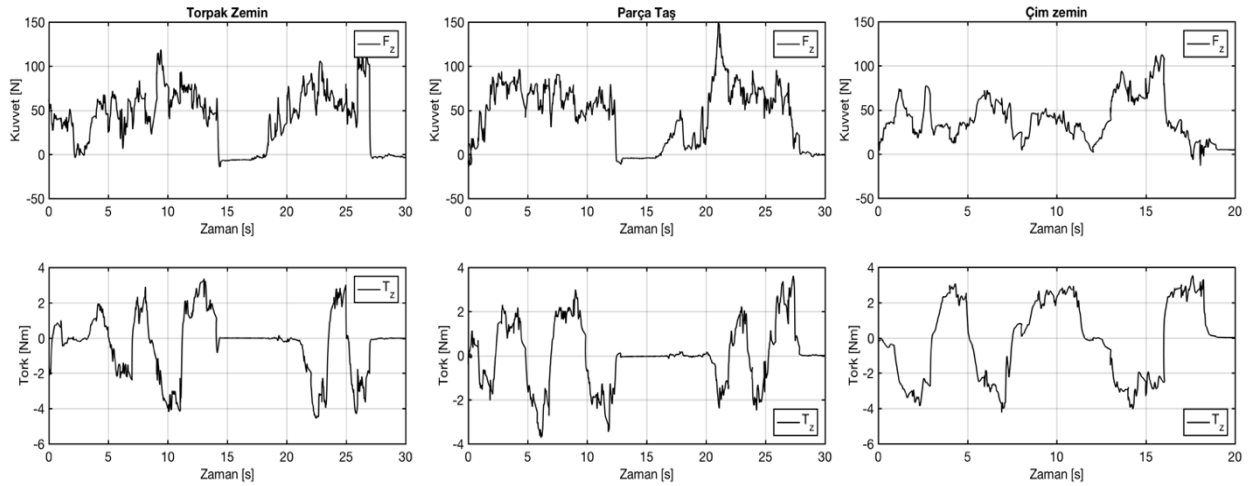
von Mises stresleri analiz ile 23,8 MPa olarak bulunmuştur. Tekerleklerin sürekli hareket halinde olması nedeniyle aynı parçaların dayanıklılık kısıtlamaları hesaplanmış ve tasarım güvenlik katsayısı 3,36 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda tekerleğin ana şekli ortaya çıkmıştır. Üretim yapılmadan önce, uygun çekişi sağlayabilecek bir teker yüzeyi elde edilip edilmediğini görmek adına tasarım farklı teker kanalları deneyerek 3 boyutlu yazıcı ile üretilmiştir. Test sonucunda edinilen bilgiler değerlendirilerek tekerleğin dış yüzeyi azdırma tezgahında et kalınlığına uygun en büyük freze kesici modülü ile şekillendirilerek tekerlerin yüzeye tutunması arttıracak nitelikte olan Nylon 6/6 malzemeden üretilmiştir. Tekerleklerin kenarlarına eğim verilerek kenarlarda oluşabilecek stres yoğunluğu azaltılmış ve tekerlerin yüzey teması artırılmıştır.



Şekil 3. Yön torkunun belirlenmesi için kurulan düzeneğin parça taşlar üzerinde testi (Test of the installed base on the stone pieces to determine directional torque.)

Düzenekte, Şekil 2'de görünen alt bölüm OptoForce HEX-70-CE-2000N altı eksen kuvvet-tork sensörüne bağlanarak üç farklı zemin üzerinde tekere uygulanan ağırlık (F_z) değiştirilerek yön torku (T_z) ölçülmüştür. Toprak zemin, parçalı taş zemin ve çim zemine ait ölçüm grafikleri Şekil 4'de gösterilmektedir

Dış tekerin üretimine paralel olarak yay görevi görecektir olan jantların tasarım ve imalatı gerçekleştirilmiştir. SEA sonucunda elde edilen tasarım üzerinden jantlar CNC Laser Tezgahında üretilmiştir. İmalat sonrasında yön sisteminde kullanılmak üzere gerekli motor seçiminin yapılması için Şekil 3'de gösterilen deney düzeneği kurulmuştur. Deneyde amaçlanan çıktı tekerin farklı yüzeylerde hareketi sırasında ihtiyaç duyacağı yön torkunu bulabilmektir. Gerekli sonuçları elde edebilmek adına görevi yerine getirmek için gerekli olacak eyleyiciden mümkün oldukça büyük bir eyleyici kullanılarak tekerlek yön ekseninde hareket ettirilmiştir. Eyleyiciye rampa girdisi verilerek eyleyicinin tam olarak harekete geçtiği nokta bulunmaya çalışılmıştır (Coulomb sürtünme). Aynı şekilde sistem hareket etmeye başladığından sonraki değerler ile de sistemin hareket esnasında hızına bağlı olarak yönde uğrayacağı tepki gözlemlenmeye çalışılmıştır. Çalışma sırasında z eksenindeki kuvvet de ele alınarak yön torku ile tekerleğe binen yük arasındaki bağlantı incelenmiştir.



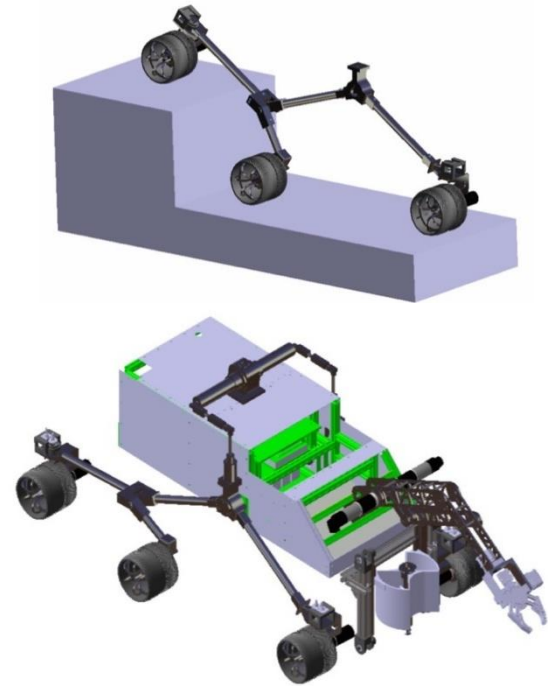
Şekil 4. Yön için farklı açılal hızlar verilerek toprak, çim ve çakıllı yüzeylerde yapılan yön torku deneylerinin sonuçlar (Results of direction torque tests performed on soil, turf and gravel surfaces with different angular velocities for direction)

Test sonuçları üzerinden yön motorunun maruz kalacağı sürtünme modellenirken beraberinde de sistem üzerinden oluşabilecek en yüksek tork ihtiyaçları ortaya çıkarılmıştır. Ölçümler sonucunda torkun en yüksek değerinin 3,63 Nm olduğu gözlemlenmiş ve sistem için güvenli olan Dynamixel MX-64 servo motorların kullanılmasına karar verilmiştir. Ancak saha testleri sırasında yaşanan aksaklıkları aza indirerek sistemin güvenilirliğini arttırmak adına, tasarıma 3:1 oranlı redüktör dişli sistemi eklenmiştir. Böylece dış etkenlerden gelebilecek torkların oluşturacağı sorunlara karşı sistem güvenceye alınmıştır.

3.1.2. Süspansiyon (Suspension)

Merih-2 tasarımında Külbütör-Boji (Rocker-Bogie mechanism) Mekanizması kullanılmıştır (Şekil 5). Bu mekanizma özetle gezginin yürüyen aksamıdır. Merih-2'nin Külbütör-Boji tasarımında tekerlekler, diferansiyel çubuk ve ana gövde arasındaki bağlantıyı en iyi şekilde yapmak hedeflenmiştir. Külbütör ve boji birbirine serbest dönüş yapan bir shaft ile bağlanmıştır. Zorlu ve eğimli yüzeylerde gezginin yer ile bağlantısının kesilmemesi hedeflenip ve gezginin denge mekanizmasını sağlamak amacı ile, sağ ve sol Külbütör-Boji birbirine diferansiyel çubuk ile bağlanmıştır.

Merih-2'nin tasarımında kullanılan Külbütör-Boji mekanizmasının çok önemli 2 avantajı vardır. Bunlardan ilki, Merih-2 ilerlediği yüzeylerde engelleri aşarken sağ ve sol külbütör bojiler orantısız şekilde dönüş yaparak Merih-2'nin tekerleklerinin her zaman yüzey ile bağlantı kurmasını sağlar [11]. Külbütör-Boji tasarımının diğer önemli avantajı ise, Merih-2'nin yük dağılımını 6 tekerleğe eşit şekilde paylaşmasıdır [12]. Külbütörün ana gövdeye monte edileceği konum, diferansiyel çubuğun kuvvet dağılımı yapabilmesi ve üzerine binen strese dayanabilmesi için gerekli uzunluklarda üretilmesi tasarımın en önemli hususları olmuştur.



Şekil 5. Merih-2 Külbütör-Boji mekanizması ve Merih-2'nin modeli (Merih-2's rocker-bogie mechanism and model of Merih-2)

Merih-2 Külbütör-Boji tasarımı CAD ortamında gerçekleştirilmiştir. Sistemin her bacağında iki temel serbestlik noktası bulunmaktadır. Bunlar sistemin merkez shaftı ile Külbütör ile Bojiyi birbirine bağlayan ikince yardımcı shafttır. Sistem üzerindeki ana kesme gerilimleri bu iki nokta taşımaktadır. Gezgin durağan pozisyondayken sistem ağırlığının yarısını ve yine 1 metrelik serbest düşüşlerde oluşan şokun yarısını ana shaftlar taşımaktadır. Sistemin geometrik sınırlamaları yarışma kısıtlamaları baz alınarak çıkarıldığında Külbütör-Boji'nin tasarımına

bu iki taşıyıcı şaftın tasarım ve analizi ile başlanmıştır. Ana şaft gezginin içine girerek olası bir hizasızlığın önüne geçmek için üç rulmanlı bir sistem ile desteklenmiştir. Benzer bir şekilde ikinci destek şaftı da bisikletme mekanizması ile karşılıklı iki rulman ile desteklenecek şekilde tasarlanmıştır.

Sistemde toplam dört adet uzun bağlantı bulunmaktadır. Kütle dayanıklılık göz önüne alınarak bağlantılar silindirik biçimde yapılmıştır. Bağlantıların ara parçalarla birleşmesi için bağlantıların uç kısımlarına traşlama yapılmıştır. Yapılan bu işlem stresi bu bölgelerde yoğunlaştırmıştır. SEA ile GF'ü 4 olacak şekilde bu bağlantılar tasarlanmıştır.

Külbütör ve boji modülerlik göz önünde bulundurularak dilendiği zaman sistemden tamamen çıkarılacak şekilde tasarlanmıştır.

3.1.3. Diferansiyel (Differential)

Merih-2 Külbütör-Boji mekanizmasının yanında bir çubuk diferansiyel sisteme sahiptir. Otomobillerde kullanılan diferansiyel sistemler, her iki aks aynı zamanda çalışırken tekerlere devir dengesi sağlamak için üretilmiştir. Merih-2'de bu sistemin görevi iki Külbütör-Boji arasındaki moment farkını eşitleyerek gezginin dengede kalmasını sağlamaktır [13]. Dişli diferansiyel sisteminin gezginin içinde yer kaplaması, mekanik boşlukları olması ve gerekli serbestlik derecesini sağlayamamasından dolayı tercih edilmemiştir. Bu nedenle, bu tür boşluklardan kaçınan, basit bir yapısı olmakla beraber 5 serbestlik derecesi sağlayabilen çubuk diferansiyel sistemi kullanılmıştır (Şekil 5). İçi boşaltılmış 7000 serisi alüminyumdan üretilmiş kollar ile Külbütör-Boji sistemine hareket yatay düzlem kullanılarak aktarılmıştır [14]. Mars koşullarına uygun ve tamamen mekanik olan diferansiyel çubuk sistemi, Külbütör-Boji mekanizmasını destekler ve hareketleriyle uyumlu olarak çalışır. Gezgin için aynı zamanda süspansiyon görevi gören sistem, gezgini her türlü arazide dengeli bir şekilde tutmaktadır.

Merih-2 diferansiyel sistemine CATIA v5 ortamında SEA uygulanmıştır. Külbütör-Boji'nin moment farkını dengelemek amacı ile yüke maruz kalan elemanın (Şekil

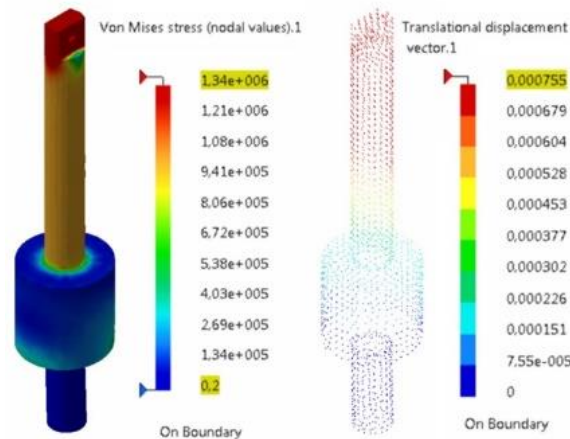
6) modeline SEA yapılarak yer değiştirme ve von Misses Stres analizleri yapılmıştır (Şekil 5). Bunun sonucunda en yüksek yer değiştirme 0,0016 mm ve en yüksek stres 2,34 MPa olarak bulunmuştur. Bu değerler ön görülen güvenlik katsayısı olan 3'ü sağlamaktadır.

3.1.4. Robot Kol (Robotic Arm)

Çevredeki objelerin manipülasyonu, şalter açma/kapama gibi astronotlara yardım görevlerinin yapılabilmesi için bir manipülatöre ihtiyaç duyan Merih-2, 5-çubuk mekanizması ile çalışan 4 serbestlik dereceli bir kola sahiptir (Şekil 5 ve Şekil 11). 5-çubuk mekanizması, 1. ve 2. serbestlikleri tahrik eden motorları aynı eksende çalıştırmak ve ağırlıkları kolun kadesine yakın tutmak amacı ile PHANTOM projesinden esinlenilmiştir [15]. Dört serbestlik derecesi sırası ile yunuslama, yunuslama, yuvarlanma, yunuslama şeklindedir (Şekil 10). Üçüncü ve dördüncü serbestlikler çok fonksiyonlu tutucunun takılması sonucu kazanılmıştır. Tutucu iki parmaklı olmak üzere çeşitli görevlerde kullanılmaktadır.

Kol, Merih-2'nin şasesine 45 derece eğim sağlanarak takılmıştır. Böylece uzayda daha fazla noktaya, daha kısa bağlantılarla erişim sağlanabilmektedir. İkinci serbestliği harekete geçirmek için kullanılan uzuv, bu eksen tahrik eden motorun gövdeye daha yakın olmasını sağlamaktadır. Böylece kasnak/kayış sisteminin kullanılmasıyla güç kaybı yaşanmamıştır. Ayrıca, elektrik motorunun bu eksen yerine merkeze yakın pozisyonlanmasıyla birinci eksen tahrik eden motor için gerekli olan dönme momenti ihtiyacı da azalmaktadır.

Kolun temel tasarımı belirlenen özelliklerle görevler sırasında yapılması gereken işlemlerin gerektirdiği hacimleri tarayabilecek şekilde yapılmıştır. Sistem tasarlanırken diğer mekanik bölümlerde olduğu üzere 5 kg limiti üzerinden yola çıkılarak ihtiyaç duyulacak yapı ortaya çıkarılmıştır. Kolun 5-çubuk mekanizması karşılıklı plakalar kullanılarak oluşturulmuştur. Plaka kesimleri lazer ile yapıldıktan sonra karşılıklı tornada üretilen bağlantılar ile birleştirilmiştir bu süreçte 6000 serisi alüminyum sistemde kullanılmış olup malzeme



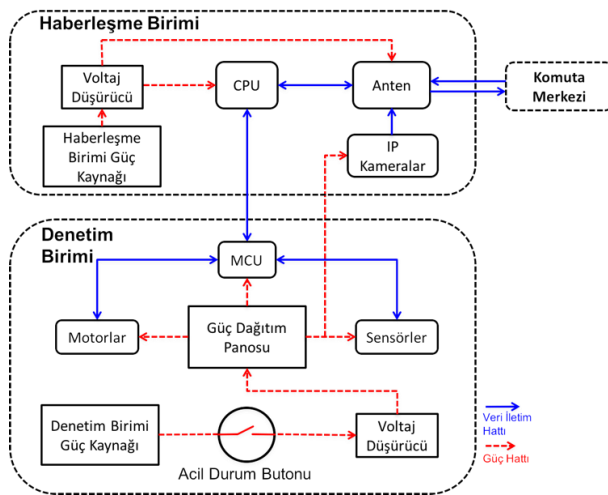
Şekil 6. Merih-2 Diferansiyeli Alt Uzun Şaft Yer Değiştirme ve von Misses Stres Analizleri (Merih-2 Differential Lower Shaft's displacement and von Misses stress analysis)

ihtiyacı ve geometrik şekillere SEA sonucu karar verilmiştir.

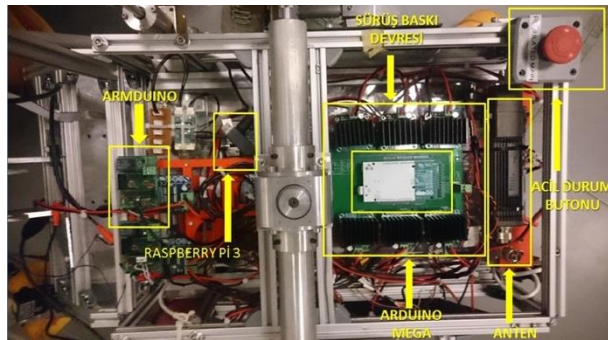
İki parmaklı tutucu sisteminin merkezinde VEX Robotic Clawbot Kit'inin tutucu mekanizması sistemin gerektirdiği tork değerleri için modifiye edilerek kullanılmıştır. Bu işlem için prototipi üretilen sistem farklı objeler ile teste tabi tutulmuştur.

3.2. Elektronik (Electronics)

Merih-2'nin elektronik sistemi temel olarak iki ana bölümden oluşur; haberleşme ve denetim. Haberleşme biriminin temel görevi gezgin ve yer istasyonu arasında veri transferinin gerçekleşmesini sağlamaktır. Denetim birimi ise motor sürüşünün sağlanması ve sensör verilerinin toplanmasından sorumludur. Elektronik sisteminin veri-güç akış şeması Şekil 7'de görülebilir



Şekil 7. Merih-2 veri-güç akış şeması (Merih-2 power-data flow diagram).



Şekil 8. Merih-2'nin elektronik bileşenleri (Electronic components of Merih-2).

3.2.1. Haberleşme (Communication)

Merih-2 haberleşme birimi, merkezi işlem birimi (CPU), güç kaynağı, 4 kamera ve antenden oluşmaktadır. İşlemci olarak Raspberry Pi 3 kullanılmıştır. Kullanıcıdan gelen veriler CPU aracılığıyla Merih-2 denetim ünitesinde bulunan mikro denetleyicilere (MCUs) gönderilir. Merih-2, WiFi ağı üzerinden bağlı olduğu 4 adet ELP-IP1881 IP kamera ile etrafını gözetlemekte, gerektiği

takdirde yüksek çözünürlüklü video ve fotoğraf çekebilmektedir. IP kameranın seçilme nedeni, CPU üzerinde bir işlem olmaksızın, görüntünün ağ üzerinden iletilmesine olanak sağlamasıdır. Robotun üzerinde 2,4 GHz frekansla çalışan bir MikroTik Metal 2SHPn L4 WiFi modemi bulunmaktadır. Bu modemde, 6 dBi'lık kazancı olan çok yönlü bir harici anten yer almaktadır ve bu sayede kötü şartlarda bile gezgin ile yer istasyonu arasında düzgün veri iletimi sağlanmaktadır.

Haberleşme biriminin gücü 18,5V, 8 Ah, 30C kapasiteli bir Li-Po pilden sağlanmaktadır. Pil kesintisiz olarak işlemciyi ve WiFi modemi 2 saat çalıştırabilmektedir. Çıkış voltajı bir aç-kapa butonu ile devrelenir ve özel olarak tasarlanmış bir regülatör baskı devresi aracılığıyla 5 V seviyesine indirilerek gezgin üzerinde bulunan CPU'nun beslenmesi sağlanır. WiFi modem ise doğrudan pil üzerinden beslenmektedir.

3.2.2. Denetim (Control)

Denetim birimi 3 mikro denetleyici (MCU), güç kaynağı, toplamda 18 DC ve servo motor, güç dağıtım panosu ve sensörlerden oluşur. Kablo karışıklığını önlemek ve elektronik ekipmanların kapladığı alanı azaltmak amacıyla sistem özel tasarlanmış baskı devrelerden oluşmaktadır. Şekil 8'de Merih-2'nin elektronik sistemini göstermektedir. Merih-2 üzerindeki mikro denetleyiciler robotun denetiminden sorumludur. Tüm mikro denetleyiciler USB kablo aracılığıyla Raspberry Pi 3'e bağlıdır ve bu şekilde veri iletimi sağlanmaktadır. Mikro denetleyicilerden biri Arduino Mega'dır ve Merih-2'nin motor sürüşünü gerçekleştirir. Arduino Mega özel tasarlanmış bir baskı devreye (Sürüş Baskı Devresi) monte edilmiştir ve bu devre sayesinde motor sürücüler ile bağlantı kurabilmektedir. Baskılı devre 5V ile çalışıp motor sürücülere gerekli enerjiyi sağlar. Baskı devre buna ek olarak üzerindeki işlemsel yükselteçler (op-amp) ile pil voltajının gösterilmesini sağlamaktadır. Ayrıca Merih-2 üzerinde görevlerde kullanılmak üzere pil voltajını gösteren 2 tane 7 bölmeli gösterge de bulunmaktadır. Bunun yanı sıra yine görevlerde kullanılan ısı ve toprak nem sensörleri de Sürüş Baskı Devresi'ne bağlıdır. Geri kalan 2 mikro denetleyici, Atmel Atmega 328p, gezginin kolunu kontrol etmekte kullanılan ve ArmDuino olarak adlandırılan baskı devreye entegre edilmiştir. ArmDuino (Şekil 8) bir Atmel mikrodenetleyici, kolda kullanılan motorların frenlerini açıp kapama işlemini gerçekleştiren bir röle ve kodlayıcı verilerini okumak için bir hat sürücüsünden (line driver) oluşur. Böyle bir devre tasarlanmasının nedeni hem yerden tasarruf etmek hem de kullanım kolaylığı sağlamaktır.

Merih-2 denetim biriminin güç kaynağı 14,8 V, 8 Ah, 30C kapasiteli 4 Li-Po pilden oluşur. Elektronik ekipmanın çalışması için gerekli enerji, güç dağıtım panosu aracılığıyla ilgili birimlere iletilir. Güç kaynağı, robotun denetim birimini normal akım değerleri altında 2 saate yakın bir süre çalıştırmaya yetmektedir. Robotta Li-Po pil kullanılmasının sebebi, Li-Po pillerin yüksek deşarj kabiliyetine sahip olmalarıdır. Bu durum, özellikle

sürüş sisteminde kullanılan motorların anlık yüksek akım çekme ihtiyaçlarının rahatlıkla karşılanabilmesine olanak vermektedir. Motorların zorlanması durumunda ihtiyaç duyabilecekleri akım değerleri rahatlıkla sağlanabildiği literatürde de yer almıştır [16].

Çizelge 1. Merih-2’de kullanılan fırçalı DC ve servo motor sayılarının bileşenlere dağılımı (Distribution of brushed DC and servo motor numbers used in Merih-2)

Bileşen	Motor Adedi	
	DC	Servo
Kol	2	3
Sürüş	6	4
Kamera açısı	-	2
Örnek kutusu	-	1
Toplam	8	10

Çizelge 1’de verildiği üzere Merih-2’de iki farklı motor çeşidi eşit sayılarda kullanılmıştır. Yüksek hassasiyet gereken eksenlerde (sağ-sol dönüşler, tutucunun takıldığı bilek eksenlerinde) dahili kodlayıcılı servo motorlar, geri kalan eksenlerde ise DC motorlar tercih edilmiştir.

3.2.3. Güvenlik (Safety)

Merih-2 ve benzeri tasarımlar olası insan ile etkileşim senaryolarını göz önünde bulundurarak geliştirilmektedir. Bu nedenle muhtemel kazaları önlemek amacıyla güç dağıtım panosuna giden enerjiyi kesen bir acil durum butonu vardır. Haberleşme birimini besleyen hat ile motorları besleyen hat birbirinden bağımsız olduğundan, acil durumda enerji kesildiğinde (Şekil 7) gerekli uzaktan kontroller için CPU ile yer istasyonu arasındaki haberleşme bağlantısı koparılmamış olmaktadır. Bu sayede sistem kendini yeniden başlatmak zorunda kalmaz ve sorun giderildiğinde gezgin kaldığı yerden görevine devam edebilir.

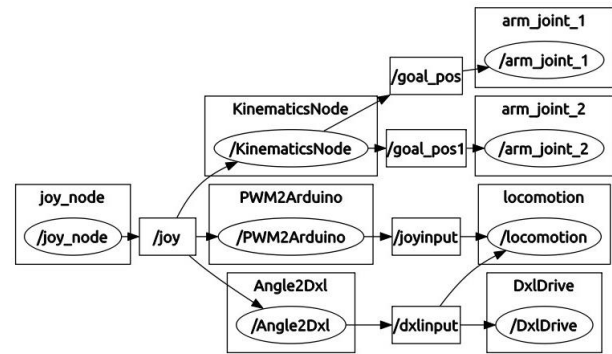
3.2.4. Yazılım (Software)

Merih-2’nin denetim sistemi Robot İşletim Sistemi’ne (ROS–Robot Operating System) dayanmaktadır [17]. Robotun çalışmasını sağlayan kodlar Python ve C dilinde yazılmıştır. Merih-2 robotun üzerindeki Raspberry Pi 3 ve denetim masasındaki Linux bilgisayar ile denetim edilmektedir. Raspberry Pi 3’ün içinde kurulmuş olan işletim sistemi Ubuntu Mate 16.04 LTS’dir ve ROS’un Kinetic Kame versiyonu kullanılmaktadır. Linux bilgisayarın işletim sistemi ise Ubuntu 14.04 LTS’tir ve sistem ROS Indigo Igloo kullanır. Bu iki sistem birbirlerine 2,4 GHz frekansla, 20 dBmW gücünde iletim yapan modemlerle WiFi üzerinden bağlantı kurmaktadır. Merih-2 denetleme sistemi yöneten-yönetilen (Master-Slave) ilişkisi üzerine kuruludur. Bütün kullanıcı komutları kullanıcı bilgisayarı vasıtasıyla toplanır ve robota aktarılır. Bu durumda kullanıcı bilgisayarı yöneten, gezgin üzerindeki Raspberry Pi 3 yönetilen rolündedir. ROS bu ilişkinin tam ters yönde olmasına da olanak vermektedir. Kontrol bilgisayarının yöneten olarak seçilmesinin nedeni ise fazla işlem gücü gerektiren operasyonların tamamının Raspberry Pi 3’ü

etkilemeyecek şekilde gerçekleştirilmek istenmesidir. Başka bir neden ise gezginin operasyonu esnasında kodların değiştirilmesi gerekirse bunun kontrol bilgisayarı üzerinden daha kolay bir şekilde gerçekleştirilebilmesidir. Komutlar yöneten kontrol bilgisayarından ağa aktarıldıktan sonra, Raspberry Pi 3 gelen komutları değerlendirir ve gerekli motor hareketleri için MCU’larla haberleşir. Bu durumda ise Raspberry Pi 3 yöneten olurken, MCU’lar yönetilen görevindedir. MCU’lar Raspberry Pi 3 ile USB kablolar aracılığı ile bağlıdır. Veri alışverişi seri haberleşme protokolü üzerinden sağlanır.

Şekil 9 Merih-2’nin kullandığı ROS haberleşme haritasını göstermektedir. Şekilde Merih-2 üzerinde çalışan düğümler ile bu düğümlerin yayın yaptığı ve abone olduğu başlıklar görülebilir.

Merih-2’yi kontrol etmekte kullanılan oyun kumandası için oluşturulmuş ROS başlığı ile, sürüş, kol ve servo düğümleri arasında bağlantı kurulmuştur. Bu düğümler gerekli manipülasyonları tamamladıktan sonra, yeni ROS başlıkları aracılığıyla Raspberry Pi 3 üzerinden mikrodenetleyicilere gönderilmiştir.



Şekil 9. Merih-2 ROS Düğüm Şeması (Merih-2 ROS Node Diagram)

ROS’un Merih-2 üzerinde kullanılmasının nedeni birçok aygıtı kolayca başlıklar üzerinden birbirine bağlayabilmesi ve her programın ağ üzerindeki veriye kolayca ulaşabilmesidir. Bununla beraber ROS bünyesinde bulunan kütüphane ve programlar geliştirmenin daha hızlı olmasını sağlamaktadır.

3.2.5. Hareket Sistemi (Locomotion System)

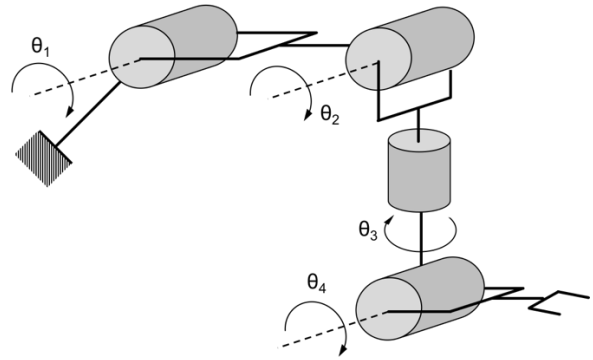
Sürüş sistemi iki ana fiziksel operasyonu gerçekleştirir: ileri-geri hareket ve dönüş hareketi. İleri-geri hareket motor sürücülere bağlanmış olan 6 DC motor tarafından gerçekleştirilir. ROS ağından gelen kumanda kolu verilerini Raspberry Pi 3’ten toplayan Arduino Mega, motor sürücülere doğru rotasyona getirerek ve darbe genişlik moderasyonu (PWM) sinyalleri üreterek motorların denetimini sağlar. Arduino 8 bitlik darbe genişlik moderasyonu sinyalleri almaktadır. Bu değer denetim kolu değerlerine göre hesaplanır. Ayrıca ileri – geri gidişlerde yüzey şekillerine göre 4 farklı çekiş modu (normal, ön çekiş, arka çekiş, dört çeker) oluşturulmuştur ve her modda tekerlere beslenen sinyal değerleri

farklıdır. Yine robotun dönüş hareketi sırasında bütün tekerleri aynı hızda döndürmek Külbütör-Boji sistemine kaldıramayacağı bir güç yükleyeceği için, ROS'tan gelen dönüş açısına oranla sanal bir diferansiyel oluşturulmuştur. Böylelikle içeride kalan tekerler dışarıda kalan tekerlere göre daha yavaş dönmektedir. Dönüş hareketi ise ön ve arka iki tekerdeki 4 Dynamixel MX-64 servo motorları ile sağlanır. Bu servo motorlar yazılım geliştirme ortamı olarak Phyton'ı destekleyen ROBOTIS USB2Dynamixel ile denetim edilir. Servo denetimi için yazılan kodlar Dynamixel adlı kütüphanede yazılmıştır. Tekerlerin dönüşü için 3 farklı açı seçeneği belirlenmiştir: 15°, 30°, 45°. Bu açılar kumanda kolu üzerindeki 3 buton sayesinde ayarlanabilir. Bu butonlardan biri artı yönde, biri eksi yönde dönüşü sağlarken diğer buton da tekerlerin sıfır dereceye gelmesini sağlar. Belirli açı aralıklarının seçilme nedeni sistemdeki gecikmelerden kaynaklı kullanıcı kaynaklı salınımları engellemektir. Kullanıcı ROS üzerinden servo motorların açısına karar verebilir ve gerektiği durumda tek tek manipüle de edebilir.

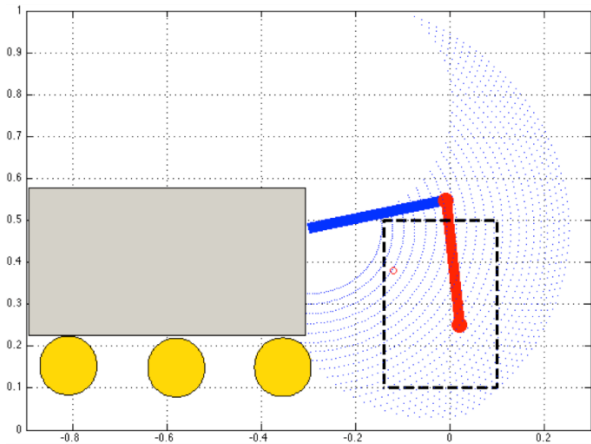
3.2.6. Robotik Kolum Denetimi (Control Of Robotic Arm)

Merih-2'nin robotik kolu, klasik bir geri besleme denetleyicisi olan oransal-integral-türevsel (OIT) ile denetlenir. 2 DC motor sayesinde kolun motor eksenleri yunuslama ekseninde hareket edebilir, bu da kolun ucunun yukarı-aşağı ve ileri-geri hareketini sağlar. Robotun ağırlık problemi düşünülerek üçüncü yön eksen eklenmemiştir. Yapılan testlerde de robotun dönüş kapasitesi sayesinde üçüncü eksenin eksikliği de hissedilmemiştir. Kolun ucunda örnek almak ve gerekli destek görevlerinde kullanılmak üzere tutucu ve kepece takılmıştır. Bu tutucunun hareketleri robot işletim sisteminden gelen açı değerleri ile eksenleri çakışık 2 servo motor tarafından gerçekleştirilir. Bu servoların dönüşleri kumanda kolundan veya gerekli olursa kullanıcı ara yüzü üzerinden sağlanabilir.

Merih-2'nin kolunun kinematik yapısı Şekil 10'da gösterilmiştir. Ters kinematik (TK) operasyonu ve PID robot kolun kontrolünün temelini oluşturur. Ters kinematik için denklemler literatürden [15] alınmıştır. Robot kolun kontrol döngüsü başlatılmadan önce robot kol frenleri açılmak suretiyle daha önceden belirlenen başlangıç pozisyonuna getirilir. Kolun çalışma alanında en çok kullanılan noktalar göz önüne alınarak başlangıç pozisyonuna karar verilmiştir. Kolun çalışma alanı ise kolun iki ana ekseninde hareketini sağlayan DC motorlara takılı çözümleyicilerden toplanan verilerle hesaplanmıştır. İki eksenin iki ayrı yönde limit açıları tespit edildikten sonra ters kinematik kullanılarak kolun en uç noktasının ulaşabileceği nokta bulutu oluşturulmuştur. Hesaplanan çalışma alanı gerekli olandan daha geniş olduğundan, robotun çalışma alanı sınırlayıcı bir kutu ile ihtiyaca göre belirlenmiştir. Sınırlayıcı kutu aynı zamanda kolun sınırlarının zorlanması ve istenmeyen hareketlerin gerçekleşmesi ihtimallerini azaltmıştır. Kolun çalışma alanı ve sınırlayıcı kutu Şekil 11'de görülebilir.



Şekil 10. Dört serbestlik dereceli Merih-2 Robot Kolumun kinematik yapısı. (Kinematic structure of the four degrees of freedom Merih-2 Robot Arm).



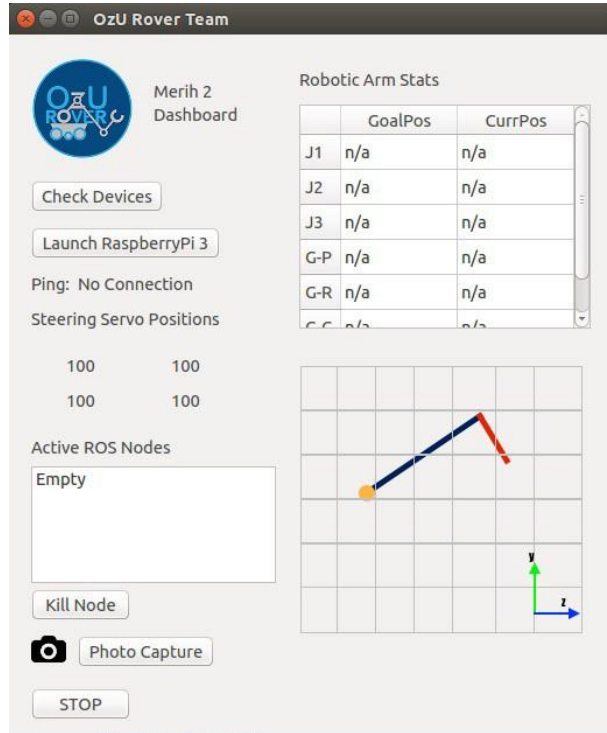
Şekil 11. Merih-2'nin kolunun çalışma alanı noktalarla, sınırlanmış çalışma alanı da kesik çizgiyle gösterilmiştir. (The working area of Merih-2's arm is shown with dots, and the limited working area is shown with dashed lines.)

Robotik kol bir oyun kumandası ile kontrol edilmektedir. Oyun kumandasından gönderilen referans verileri kolun en uç noktasının iki boyutlu uzaydaki koordinatlarını değiştirmektedir. Bu referans değişikliği gerçekleştiğinde ters kinematik işlemi devreye girer. İşlemler sonucunda hedef nokta sınırlayıcı kutu içerisinde ve hesaplanan açılar limitler arasında ise hedef açılar ROS üzerinden yayınlanır. Hedef açılar bahsedilen gerekliliklere uygun değilse kol sınırlarda hesaplanan noktalar için hedef açı yayınlar.

Daha sonra bu referans bilgisi motorlara iletilir. Bu işlem Merih-2 için özel tasarlanan ArmDuino'lar ile gerçekleştirilir. Hedef açılar ROS üzerinden yayınlanır ve ArmDuino'lar bu yayından aldıkları veriye göre motorları hareket ettirir. ArmDuino içerisindeki PID kontrol döngüsü için Arduino PID kütüphanesi kullanılmıştır. Döngü ROS üzerinden gelen hedef açı, kendi bünyesinde tuttuğu anlık açı ve çözümleyici üzerinden gelen açı değişimi verilerini kullanarak motorlara beslemek üzere bir PWM sinyali belirler. Hedef açı ile anlık açı arasındaki fark 0,5 derece oluncaya kadar bu döngü devam eder. Her motor için ayrı bir ArmDuino olması DC motorların servo motor gibi

kullanılabilirliğini sağlamıştır. Bu özellik aynı zamanda iki kontrol döngüsünün eş zamanlı olarak çalışabilmesine de olanak sağlamıştır. PID için denetim sabitleri deneme yanılma yolu ile tayin edilmiştir.

Sistemdeki karmaşıklığı düşürmek ve kullanıcıya daha fazla kontrol alanı sunmak adına tutucu üzerindeki servo motorlar ters kinematik işlemlerine eklenmemiştir. Ana eksenlerdeki hareket tamamlandıktan sonra kullanıcı kamera görüntülerini kullanarak gerekli manipülasyonları oyun kolu ve kullanıcı ara yüzü yoluyla yapabilmektedir.



Şekil 12. Merih-2'nin kumandası için geliştirilen kullanıcı arayüzü (User interface developed for the control of Merih-2).

3.2.7. Kullanıcı Ara Yüzü (User Interface)

Robot işletim sisteminin rahat denetimi için özel olarak tasarlanmış kullanıcı ara yüzü kullanılmaktadır (Şekil 12). Servo denetimi kumanda kolunun yanı sıra, kullanıcı ara yüzü üzerinden servo numarası ve açısı girilerek manuel olarak da sağlanabilir. Ayrıca kullanıcı ara yüzü üzerindeki 4 yön butonu ile hareketli kameranın yönü ayarlanır. Fotoğraf çekmek için de bir buton bulunmaktadır. Böylece belirli bölgeler ve toplanan numuneler fotoğraflanabilir (Şekil 13). Aynı zamanda ara yüz üzerinden istenildiği zaman kolun o anki pozisyonu ve o an istenilen pozisyonu görüntülenebilir.

4. KAZANIMLAR (OUTCOMES)

Kendi başına ayakta durabilen ve fiziksel bağımsızlık ile hareket edebilen Mars Gezgin Merih-2, Ağustos 2016'da tamamlanmıştır. Nylon 6/6'dan üretilmiş dış tekerlere sahip olan gezgin dış darbelerle karşı yay görevi görecek

olan jantlara sahiptir. Ancak, söz konusu jantlarda vida gevşeme problemi yaşanmıştır. Probleme etki eden nedenlerden biri, zorlu yüzey koşullarında elektrik motorunun uyguladığı yüksek dönme momentidir. Bu sebeple bir dahaki tasarımlarda yekpare jantlar kullanılmamasına karar kılınmıştır. Merih-2 tekerinin tasarımında sürüş için kullanılan elektrik motorlarının pozisyonlanmalarının hatalı olduğu saha testlerinde fark edilmiştir. Söz konusu motorlar sürüş arazisine çok yakın olduğundan dolayı çeşitli taş ve kaya gibi engellerde problem teşkil etmektedir. Gezginin tekerleklerinin daimi olarak yüzey ile bağlantı kurmasını sağlayan Külbütör-Boji dışa doğru açı ile tasarlanıp, gezginin zorlu arazi koşullarında devrilmesini engellemiştir. 5 serbestlik derecesi sağlayan ve iki Külbütör-Boji arasındaki moment farkını eşitleyen diferansiyel sistemi, gezgini çeşitli arazi tiplerinde dengede tutmaktadır. Gezginin şasesine 45 derece eğim ile montajı yapılan robot kol, 5 çubuk mekanizması ile çalışır 4 serbestlik derecesine sahiptir. Böylece kısa bağlantılar kullanılarak uzayda daha fazla noktaya erişilebilmektedir.



Şekil 13. Merih-2'nin IP kameralardan alınan sahanın görüntüsü (Image of the scene taken from the IP cameras of Merih-2).

Elektronik olarak, kablo karmaşıklığını önlemek amacıyla kolun denetimini sağlayan bir devre tasarlanmıştır. Kolun hareketini sağlayacak yüksek torklu servo motorlar bulunamadığı için, DC motorlar geliştirilen sürücü devresi ve yazılımı ile servo motor gibi kullanılmıştır. Robotun uzaktan ve hızlı kumandası için yeni bir kullanıcı ara yüzü oluşturulmuştur. Böylece yalnızca robotun kullanışı kolaylaşmakla kalmayıp, denetim sırasında zamandan da tasarruf edilmiştir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu makalede bir Mars gezgini prototipi olan Merih-2'nin tasarım ayrıntıları verilmiştir. Bir çok bileşenden oluşan bu gezgin robotun tasarımında bütün bileşenler ayrı önem taşımaktadır. Merih-2'nin ana bileşenleri üç başlıkta toplanabilir: Sürüş Mekanizması, Kol Mekanizması ve Denetim Modülü. Bu bileşenler bir bütün olarak değerlendirildiğinde Merih-2 ERC ve URC yarışmalarının sistem gereksinimlerini sağlayarak görevlerini yerine getirebilen bir Mars gezgini prototipidir. Bu bileşenler, ERC 2016 yarışmasındaki performans göz önüne alınarak ayrı ayrı olarak değerlendirilebilir.

Sürüş mekanizması içinde bulunan Külbütör-Boji ve diferansiyel tasarımlarına uygun olarak işlevlerini yerine getirmiş ve bu sistemlerde herhangi bir sorunla karşılaşmamıştır. Tekerlek-motor bağlantısındaki tasarım sürüş performansını düşüren tek faktör olarak tespit edilmiştir. Kol mekanizması, sürüş mekanizmasına benzer olarak tasarım beklentilerini karşılamıştır. Tutucu etrafında kullanılan 3B baskı ile imal edilmiş parçalar, kol mekanizmasının denetim hassasiyetini düşürmüş ve kolun operasyonunu zorlaştırmıştır. Metalden imal edilen parçalarla ilgili hassasiyet problemi yaşamamıştır. Gezginin operasyonunu kontrol eden denetim modülü kablosuz olarak tüm sistemi yönetebilmiş ve gezgini kontrol edebilmiştir. Ortaya çıkan yazılım-donanım uyumsuzlukları, yazılımın kompleksliği düşürülerek kontrol edilmeye çalışılmıştır. Ancak gelecek tasarımlarda bu uyumsuzluğun önüne geçilmesi, gezgine fiziksel olarak zarar verecek operatör hatalarına izin vermeyen bir yazılımın yaratılmasına olanak sağlayacaktır.

Yarışma sırasında elde edilen tecrübeler ışığında sistemin başarılı çalışması için her bileşenin güvenilirliğinin büyük önem taşıdığı anlaşılmıştır. Bazı görevlerde basit algoritmaların veya bileşenlerin çok daha karmaşık yapıya sahip rakiplerini geride bıraktığı görülmüştür. Probleme sonuç odaklı yaklaşıldığında yalın sistemlerin daha güvenilir olduğu ve başarıyı artırdığı görülmüştür. Ancak fazlasıyla çok bileşenli olan Merih-2'nin yalın bir sistem olmaktan çok uzaktır ve tasarım sırasında bileşen bazında sistemin güvenilirliğinin yüksek tutulması Merih-2'nin başarılı olmasını sağlamış ve Merih-2, 2016 European Rover Challenge'da 44 takım arasından 10. olarak yarışmayı tamamlamıştır. Ayrıca sistem Özerk Sürüş Görevinde diğer yarışmacı takımları geride bırakarak tam puan almış ve bu kategoride birinci olmuştur.

Yarışmadaki ilk dokuz takım incelendiğinde sistemin daha da iyi bir derece yapamamasındaki temel etken olarak daha önce yapılan saha çalışmalarında karşılaşılmayan saha engelleri ön plana çıkmaktadır. Belirtildiği üzere Mars yüzey koşulları geniş bir yelpazede değişiklik gösterebilmekte ve organizatörler her yıl farklı bir yüzey engeline odaklanarak araziye oluşturabilmektedirler. Bu yıl yapılan yarışmada daha önce benzer yarışmalardan farklı olarak ince kumlu bir

yüzey seçilmiştir. Merih-2'nin özellikle bu yüzey için saha çalışmalarında testlerinin yetersiz olduğu yarışma sırasında ortaya çıkmıştır. Başta tekerleklerin yüzey alanlarının yetersiz olmasından ötürü ve yine açık jantlı sistemden dolayı sürüşte verimsizliği düşürecek şekilde kumun etkileri gözlemlenmiştir. Bu sorunlar yarışmanın görevleri arasında ekipmanları tekrar tekrar sökülerek temizlenmesine ve zaman içinde modülerliğe uygun olmayan sistemlerde tasarlanan süreçten önce yıpranmalara ve kırılmalara neden olmuştur. Yarışma sürecindeki üretim ekipman ve kaynaklarının kısıtlılığı nedeniyle de tam verimli olarak bu sorunlar giderilememiştir.

Benzer sorunlar ile karşılaşılması adına gelecekte benzer çalışmalar için profesyonel ekiplerin kullandığına benzer yapay bir Mars sahası yapılması düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Merih-2 robotu Özyeğin Üniversitesi, Karaca Makina Hır. San. ve Tic. Ltd. Şti., Topçam Makine Müh. San. Tic. Ltd. Şti., Cloud4Success, ÖzdePCB, Elsim Elektronik A.Ş. firmaları tarafından kısmi olarak desteklenmiştir. Yazarlar çalışmada yoğun emekleri bulunan Özyeğin Üniversitesi Rover Takımı 2015-2016 dönemi ekibine teşekkürlerini sunmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Lee G. K., "System requirements for planetary rovers" in *Proceeding of Sensor Fusion and Aerospace Applications Conf.*, 70, (1956).
- [2] JPL and NASA. "Mars Pathfinder-Sojourner Rover," [Online]. Available: <http://www.jpl.nasa.gov/missions/marspathfinder-sojourner-rover/>
- [3] JPL and NASA. "Mars exploration rover-spirit." [Online]. Available: <http://www.jpl.nasa.gov/missions/marsexplorationroverspiritmer>
- [4] JPL and NASA. "Mars exploration rover-opportunity." [Online]. Available: <http://www.jpl.nasa.gov/missions/details.php?id=5909>
- [5] JPL and NASA. "Curiosity Rover." [Online]. Available: http://www.nasa.gov/mission_pages/msl/index.html
- [6] UK Mars Society. "UK University Rover Challenge." [Online]. Available: <https://marsoc.uk/ukurc>
- [7] Mars Society. "The University Rover Challenge (URC)." [Online]. Available: <http://urc.marsociety.org>
- [8] Mars Society. "European rover challenge 2016." [Online]. Available: <http://roverchallenge.eu/en/>
- [9] NASA. "Revolutionary aerospace systems concepts academic linkage, NASA." [Online]. Available: <http://rascal.nianet.org>
- [10] Mars Society and European Space Foundation.. "European Rover Challenge (ERC) Rules," [Online]. Available: <http://roverchallenge.eu/en/rules-2/>
- [11] Li S., Gao H. and Deng Z., "Mobility performance evaluation of lunar rover and optimization of rocker-bogie suspension parameters," in *2nd International Symposium*

- on Systems and Control in Aerospace and Astronautics*, 1–6, (2008).
- [12] Ullrich R., A. Goktogan H., and Sukkarieh S., “Design optimization of a mars rover’s rocker-bogie mechanism using genetic algorithms,” in *Proceedings from 10th Australian Space Science Conference*, 199–210, (2010).
- [13] Barlas F., “Design of a Mars rover suspension mechanism,” *Yüksek Lisans*, İzmir Yüksek Teknoloji, (2004).
- [14] Jordan E., “Mars science laboratory differential restraint : the devil is in the details,” in *Proceedings of the 41st Aerospace Mechanisms Symposium*. Pasadena, (2012).
- [15] Çavuşoğlu M. C., Feygin D., and Tendick F., “A critical study of the mechanical and electrical properties of the phantom haptic interface and improvements for high performance control,” *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 11: 555–568, (2002).
- [16] MIT Electric Vehicle Team, "A guide to understanding battery specifications". [Online]. Available: http://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf
- [17] Open Source Robotics Foundation. “Open source robot operating system ROS,” [Online]. Available: <http://ros.org>, (2017).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



Isı pompalı kurutma tekniği ile toz elma ve elma cipsi üretimi: performans analizi

Production of powder apple and apple chips with heat pump drying technique: performance analysis

Yazar(lar) (Author(s)): Meltem TOKDEMİR¹, Kurtuluş BORAN², Mustafa AKTAŞ³, Simge Pelin ALKAÇ⁴

ORCID¹: 0000-0003-0530-3214

ORCID²: 0000-0003-0184-8233

ORCID³: 0000-0003-1187-5120

ORCID⁴: 0000-0003-1213-1414

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Tokdemir M., Boran K., Aktaş M., ve Alkaç S. P., “Isı pompalı kurutma tekniği ile toz elma ve elma cipsi üretimi: performans analizi”, *Politeknik Dergisi*, 21(4): 887-894, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.417750

Isı Pompalı Kurutma Tekniği ile Toz Elma ve Elma Cipsi Üretimi: Performans Analizi

Araştırma Makalesi / Research Article

Meltem TOKDEMİR^{1*}, Kurtuluş BORAN², Mustafa AKTAŞ³, Simge Pelin ALKAÇ⁴

¹ Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

² Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

³ Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

⁴ Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 25.07.2017 ; Kabul/Accepted : 15.10.2017)

ÖZ

Bu çalışmada, Starking Delicious elma çeşidinin dilimlenerek ve rendelenerek ısı pompalı bir kurutucuda kurutulması deneysel olarak incelenmiştir. Kurutulan rendelenmiş elma toz haline getirilmiştir. Kurutma proseslerinin sonunda elma cipsi ve toz elma elde edilmiştir. Ülkemizde uzun yıllardan beri üretimi yapılan elmanın önemli yetiştiricilik alanları Kuzey Anadolu, Karadeniz kıyı bölgeleri ile İç Anadoludur. Tarımsal ürünlerin değerlendirilmesinde kullanılan bir yöntem olan kurutma 5 mm kalınlığında dilimlenmiş ve rendelenerek eşit bir kalınlıkta tepsiyeye serilmiş elmalara uygulanmıştır. Elmalara herhangi bir ön işlem yapılmamıştır. Deneyler 40°C kurutma havası sıcaklığında ve 1 m/s hava hızında yapılmıştır. Deneyler sonucunda tüm sistem performans katsayısı (COPws) değerleri ortalama olarak elma dilimleri için 2,82 rendelenmiş elma için ise 3,02 olarak hesaplanmıştır. Elma dilimleri 9 saatte 5,06 gsu/gkatı madde nem miktarından, rendelenmiş elmalar ise 4 saatte 5,06 gsu/gkatı madde nem miktarından 0.17 gsu/gkatı madde nem miktarına kadar kurutulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Kurutma, elma cipsi, rendelenmiş elma, elma tozu, ısı pompası.

Production of Powder Apple and Apple Chips with Heat Pump Drying Technique: Performance Analysis

ABSTRACT

In this study, drying of the Starking Delicious apple variety by slicing and grated in a heat pump dryer was experimentally investigated. The dried grated apple was powdered. At the end of the drying process, apple cips and powder apples were obtained. The most important cultivation areas of apple, which has been produced in our country for many years, are North Anatolia, Black Sea coastal regions and Central Anatolia. Drying, which is a method used in the evaluation of agricultural products, was sliced to a thickness of 5 mm and grated and applied with a uniform layer of padded apples. No pretreatment had been done with the handmade. Experiments were carried out at a drying air temperature of 40°C and air velocity of 1 m/s. As a result of the experiments, all system performance coefficients (COPws) were calculated as 2.82 for apple slices and 3.02 for grated apple. The apple slices were dried from a moisture content of 5.06 g water / g solid matter at 9 hours, and the grated apples were dried at 4 hours from 5.06 g water / g solid matter to a moisture content of 0.17 g water / g solid matter.

Keywords: Drying, apple cips, grated apple, apple powder, heat pump

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kurutma, ürünlerdeki nemin ısı ve kütle aktarımı yardımıyla uzaklaştırılması işlemidir. Kurutma sistemi ise belli zaman aralığında kurutulması istenen maddenin içerdiği nemin istenen kuruma değerine gelmesini sağlayan ve nem alma, ısıtma, buharlama gibi değişik birimlerden oluşan ünitelerin bütünüdür [1].

Kurutma işleminde kullanılan sistemler çimento, gıda, kereste, kağıt, kimya, boya ve ilaç endüstrisi gibi birçok sanayi dallarında uygulanmaktadır [2].

Tarım ürünlerinin içerdiği bazı organik maddeler ve yüksek yüzdeli su (%60-80) kimyasal ve mikrobiyolojik bozulmalara neden olmaktadır [3].

Ürünlerin hasadından tüketimine kadar geçen sürede birçok ürün kaybı söz konusudur. Bu nedenle gıdaların kurularak muhafaza edilmesi yöntemi, yüzyıllardır uygulanan bir koruma yöntemidir [4].

Türkiyede gıda maddelerinin çoğu doğal kurutma yöntemi ile kurutulmaktadır. Kurutulan gıda maddelerinde bu durum, ekonomik olarak dış ve iç pazarda kalite ve değer kaybı gibi problemlerenden olmaktadır [5]. Ayrıca açık havada kurutulan gıda maddeleri, böcek ve zararlıların yanı sıra toz, toprak gibi dış etkilere maruz kalmaktadır. Bu nedenlerle günümüzde kurutmanın kapalı ortamda kontrollü yapılması, ürün kalitesinin artmasını, işçilik, ürün kaybının ve kurutma zamanının azalmasını sağlamıştır [6].

Türkiyede gıda maddelerinin çoğu doğal kurutma yöntemi ile kurutulmaktadır. Kurutulan gıda maddelerinde bu durum, ekonomik olarak dış ve iç pazarda kalite ve değer

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : mlmtkdmr@gmail.com

kayıbı gibi problemlerenden olmaktadır [5]. Ayrıca açık havada kurutulan gıda maddeleri, böcek ve zararlıların yanı sıra toz, toprak gibi dış etkilere maruz kalmaktadır. Bu nedenlerle günümüzde kurutmanın kapalı ortamda kontrollü yapılması, ürün kalitesinin artmasını, işçilik, ürün kaybının ve kurutma zamanının azalmasını sağlamıştır [6].

Kurutma işleminin amaçları; ürünlerin taşınması, kullanılması ya da daha sonra uygulanması gereken işlemlerin ekonomik olması için hacim veya ağırlığının azaltılması, ekonomik değeri daha fazla olan bir ürün elde etmek, ürünleri sterilize etmek veya korumak, çözeltiler veya atık sulu karışımlardan yan ürünleri geri kazanmaktır [7]. Kurutmayı belirleyen fiziksel faktörler bağıl nem, sıcaklık, basınç ve hava hızıdır. Bunların kurutma parametrelerini karşılayacak şekilde belirlenmesi ve uygulanması, kurutucu performansında ve son ürün kalitesinde etkilidir [3].

Kurutma işlemi kurutulan maddenin cinsine, şekline ve katının sıcaklığına bağlıdır. Bu nedenle endsütride birçok durumda kurutma işlemi, suyun kaynama sıcaklığının altında bir sıcaklıkta yapılmaktadır [7].

Endüstride kurutma işleminin yapıldığı proseslerde toplam maliyetin büyük bir kısmı kurutma maliyetidir. Bu nedenle kurutma sanayisinde hedef, istenilen özelliklerde kuru ürün elde etmek için en üst düzeydeki suyu en az enerji kullanımı ile uzaklaştırmaktır [8].

Dünyada yenilenemez enerji kaynaklarının azalması ve elektrik enerjisinin maliyetli olması kurutma işlemlerinde ısı pompalı kurutucuların tercih edilmesini sağlamıştır. Isı pompalı kurutucuların hemotomatik kontrolünün kolay uygulanabilir olması hem de enerji verimli olması sanayileşmiş ülkelerde kurutma dahil birçok alanda kullanılmasının önünü açmıştır [9].

Ülkemizde uzun yıllardan beri üretimi yapılan elma, gülgillerden olup humuşça zengin ve nemli topraklarda yetişmektedir. Elmanın anayurdu, Türkiye’de kapsayan Güney Kafkaslardır [10]. Ülkemizde pek çok elma çeşidinin yetiştiriciliği yapılmaktadır. Bu nedenle ülkemiz ekonomisinde önemli yere sahiptir. Tarım Bakanlığı verilerine göre elma 2013 yılında 3.128.450 ton ile dünya üretiminde %3,9’luk bir pay ile 3. sırada, 2014 yılında ise 2.480.444 ton ile dünya üretiminde %3’lük bir pay ile 5. sırada yer almıştır. TÜİK ve Tarım Bakanlığı’nın 2016 verilerine göre ise 2015 yılında üretilen elma miktarı 2.569.759 ton ile yaklaşık %130 yeterlilik oranına ulaşmıştır [11].

Elma içerdiği vitaminler ve mineraller sayesinde beslenmede önemli bir yer almaktadır. Elmada yaklaşık olarak %85 su, %12 şeker, %0,45 protein, %0,4 yağ, %1 azotlu maddeler, pektin, organik asitler, kalsiyum, demir, potasyum, magnezyum, silisyum, sodyum, manganez, çinko, bakır, fosfor ve A, B1, B2, B5, B6, B9, C, G, E, K ve PP vitaminleri bulunmaktadır [12].

Ülkemizde üretilen elmanın bir kısmı taze elma, elma kuru, elma püresi, elma suyu şeklinde hasattan hemen sonra piyasaya sürülürken, bir kısmı depolanmaktadır. Türk Standartları Enstitüsünün 2007 yılında yayınladığı

standarda göre elmanın ihracatı yapılmaktadır. İstanbul İhracatçı Birlikleri Genel Sekreterliği tarafından hazırlanan rapora göre 2014 yılında elma kuru ihracat miktarı 2.542.323 kg ile 5.297.294 dolarken 2015 yılında 3.252.340 kg ile 5.417.094 dolar olmuştur. Değerdeki değişim %2,26 ve paydaki değişim ise %0,40 olarak belirtilmiştir [13].

Literatürde gıda ürünlerinin kurutulması esnasında, havanın akış hızı, bağıl nem, hava sıcaklığı gibi parametrelerin kuruma özelliklerine etkilerinin incelendiği araştırmalar mevcuttur. Özgen [4], konvektif bir kurutma sistemi tasarlamış ve bu sistemi elma kurutulmasında kullanmıştır. Hava sıcaklığı ve hava hızının kuruma zamanı üzerindeki etkisini incelemiştir. Heybeli ve Ertekin [3], sanayi tipi prototip rafli kurutucuda elma dilimleri kurutmuşlardır. Belirledikleri kurutma havası sıcaklığının değişimi ile ürünün kuruma hızı, kurumasüresi, hacimsel büzülme, hacim ağırlığı, yeniden su alma, duysal ve renk özellikleri üzerine etkisini incelemiştir. Abuşka ve Doğan [6], çekirdeksiz üzümün kurutulması üzerinde çalışmışlardır. Bunun için endüstriyel tip ısı pompalı kurutucu kullanmışlardır. Çekirdeksiz üzümün kurutulmasında ortalama ısıtma tesir katsayısını COP_{sistem} değerini 2,81 olarak bulmuşlardır. Ceylan ve diğerleri [2], ısı pompalı kurutma odasında elma kurutulmasını deneysel olarak incelemiştir. Kuruma işleminde nem değişimini ağırlık ölçüm metodu ile belirlemiştir. Kuruma sonrası kurutulan ürünün fiziksel özelliklerini duysal olarak incelemiştir. Deneyde kullanılan elmalar 4 mm kalınlığında dilimlenmiş ve 2.8 m/s hava hızında elmaların kuruma süresi 3.5 saat olarak bulmuşlardır. Aktaş ve diğerleri [1], kurutma fırınlarının fındık kurutulmasına uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Fındık için kurutma havası parametreleri belirlenerek, ağırlık, nem ve sıcaklık kontrollü nem yoğunlaşmalı bir fındık kurutma fırınının modellenmesini yapmışlardır. Aktaş ve diğerleri [9], portakal kabuğu kurutmuşlar ve kurutma sonucunda elde edilen sonuçları irdelenmiştir. Kurutma işlemi için ısı pompalı bir kurutucu kullanmışlardır. Deney sonucunda COP_{ws} değerini ortalama olarak 3,83 olarak bulmuşlardır. Tarhan ve diğerleri [5] Amasya elması kurutmuşlardır. Farklı kurutma şartlarının Amasya elmasının kurutma kalitesi ve süresi üzerine etkilerini incelemiştir. Gürlek ve diğerleri [8], ısı pompalı kurutucuların gıda kurutulmasında kullanımını ve elma kurutulmasında uygulanmasını incelemiştir. Huang ve diğerleri [14], patatesin ve elmanın karıştırılarak yeniden yapılan cipslerinin, doku, renk, rehidrasyon, duysal, mikroyapı ve diğer kalite parametreleri üzerinde dört farklı kurutma yöntemini uygulamışlar ve sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Saçılık ve Eliçin [15], yaptıkları araştırmada organik elma dilimlerini konveksiyonlu sıcak hava kurutucusunda kuruma hava sıcaklığının 40-60°C aralığında 5 ve 9 mm kalınlıklarında tek kat olarak kurutmuşlardır. Kurutma havası sıcaklığının ve dilim kalınlığının kurutma özellikleri ve kurutulmuş elma dilimlerinin kalite parametreleri üzerindeki etkisini belirlemiştir. Shyu ve Hwang [16], önışlem ve işleme

koşullarının vakum altında kurutulmuş elma parçalarının kalitesi üzerine etkilerini araştırmışlardır. Teeboonma ve Soponronnarit [17], ısı pompası kullanarak kurutulmuş papaya ve mango şekerlemelerinin matematiksel modellerini deneysel olarak geliştirmişlerdir. Fatouch ve diğerleri [18], çeşitli bitkilerde kurutma özelliklerini deneysel olarak araştırmak için ısı pompası destekli bir kurutucu tasarlamış ve yapmışlardır. Aktaş ve diğerleri [19], kapalı devre ısı pompası kurutucusunda kurutulmuş defne yapraklarının performans analizini ve modellemesini yapmışlardır. Darıcı [20], dilimlenmiş kivi örneklerine kurutma havası hızının kurumaya etkisini incelemek amacıyla kurutma havasının farklı hızları için deneyler yapmıştır.

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte gıda ürünlerinin toz haline getirilerek gıda katkı maddesi olarak kullanımı ile ilgili araştırmalar sürmektedir. Toz haline getirilen kurutulmuş elmanın gıda katkı maddesi olarak tatlandırıcı, çay, kek gibi ürünlerin içine eklenerek kullanılması kullanım alanını genişletecektir.

Yapılan deneylerde açık çevrim ısı pompalı bir kurutma sistemi kullanılmıştır. Sistemde bağıl nem kontrolü sağlanmış, yoğuşturucudan atılan ısı kurutma havasının ısıtılmasında kullanılmıştır.

Bu çalışmada, elma dilimlerinin ve rendelenmiş elmanın kurutulmasında kullanılan kurutucunun performans analizi yapılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

2.1. Metot (Method)

2.1.1. Nem içeriği (Moisture content)

Nem içeriği, kurutulacak maddenin içerdiği bağıl nemin bir ölçüsüdür. Aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$MC_{db} = \frac{M_i - M_d}{M_d} \quad (1)$$

2.1.2. Nem oranı (Moisture ratio)

Nem oranı aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmaktadır [22].

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} \quad (2)$$

Burada M nem içeriğini, M_e denge nem içeriğini, M_o ise başlangıçtaki nem içeriğidir. Bununla birlikte, taze ürünün yüksek nem içeriği nedeniyle aşağıdaki eşitlik yazılabilir [22].

$$MR = \frac{M}{M_o} \quad (3)$$

2.1.3. Kuruma hızı (Drying rate)

Kurutma deneyleri boyunca ürünlerin kuruma hızı aşağıdaki Eş. 4 ile hesaplanmaktadır .

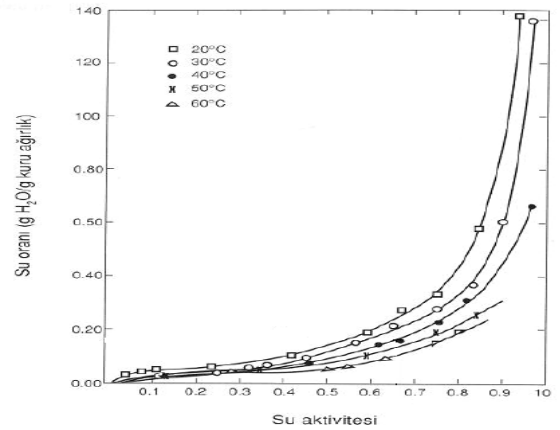
$$DR = \frac{MC_{t-dt} - MC_t}{dt} \quad (4)$$

2.1.4 Su aktivitesi (Water activity)

Su aktivitesi (a_w) Eş. 5 yardımıyla hesaplanmaktadır [2]. Su aktivitesi değeri, çevre havası bağıl neminin (ÇBN) 100'e bölünmesi ile bulunmaktadır.

$$a_w = \frac{CBN}{100} \quad (5)$$

Gıdaların kurutulmasında su aktivitesi değeri önemli bir faktördür. Kurutulmuş ürünlerde mikrobiyolojik veya biyokimyasal bozulmaların meydana gelmemesi için su aktivitesi değerinin yardımıyla bulunan su oranının altındaki bir değere kadar kurutmak gerekmektedir [2].



Şekil 1. Farklı sıcaklıklardaki elmanın su oranı - su aktivitesi değerleri (The Water activity values - water content of the apple at different temperatures) [2]

2.1.5. Isı Pompalı Kurutucu (Heat pump dryer)

Isı pompasında kompresör, yoğuşturucu (kondenser), genişleme vanası ve buharlaştırıcı (evaporatör) bulunmaktadır. Kurutma sisteminde, yoğuşturucudan kurutma havasına verilen ısı miktarı \dot{Q}_K aşağıdaki Eş. 6 ile hesaplanmaktadır [9].

$$\dot{Q}_K = \dot{m}_{ia} \cdot c \cdot (T_{oa} - T_{ia}) \quad (6)$$

$$\dot{m}_{ia} = \rho_{ia} \cdot \dot{V}_i \quad (7)$$

Bir ısı pompası sisteminde ısıtma tesir katsayısı (COP_{hp}) aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmaktadır [9].

$$COP_{hp} = \frac{\dot{Q}_K}{\dot{W}_C} \quad (8)$$

Tüm sistem için ısıtma tesir katsayısının (COP_{ws}) bulunmasında Eş. 9 kullanılmaktadır [9].

$$COP_{ws} = \frac{\dot{Q}_K}{\dot{W}_C + \dot{W}_f} \quad (9)$$

Özgül nem çekme oranı ($SMER$) 1 kg nemi buharlaştırmak için harcanması gereken enerjidir [9]. Eş. 10 ile gösterilmiştir.

$$SMER = \frac{\dot{m}_d}{\dot{W}_C} \quad (10)$$

Tüm sistem için özgül nem çekme oranı ($SMER_{ws}$) ise Eş. 11 ile hesaplanmaktadır.

$$SMER_{ws} = \frac{\dot{m}_d}{\dot{W}_C + \dot{W}_f} \quad (11)$$

2.1.6. Belirsizlik Analizi (Uncertainty analysis)

Yapılan deneylerin sonuçlarına ait sistematik hataların bulunması için geliştirilen bir yöntemdir. Eş. 12 ile hesaplanmaktadır [22].

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} W_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} W_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} W_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

Eş. 12’de n bağımsız değişken sayısı, R ölçülmesi gereken büyüklük, x de bağımsız değişkendir.

2.2. Materyal (Material)

Kurutma işlemi Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Bölümü Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde Starking Delicious çeşidi elma kullanılmıştır. Boyut ve Renk olarak aynı olanlar seçilmiştir.

Kurutma işlemine başlamadan önce elmaların nem içeriğinin belirlenmesi için etüv yöntemi kullanılmıştır. Etüvde 70°C sıcaklıkta kurutulmuş elmaların kurutma işlemi boyunca ağırlığındaki değişimler ölçülerek kaydedilmiştir. Son iki tartım arasındaki fark %1 oluncaya kadar deneye devam edilmiştir. Kurutma deneyi 2 kez tekrar edilmiştir.

Ağırlık ölçümlerinde Mettler Toledo marka 0,01g hassasiyette dijital ağırlık ölçer kullanılmıştır. Yapılan ölçümler sonunda nem içeriği yaş baza göre 0,835 gsu/g yaş ağırlık olarak, kuru baza göre 5,06 gsu/g kuru ağırlık olarak hesaplanmıştır.

Isı pompalı kurutucu kullanarak kurutma işlemine başlamadan önce elmalar ortam sıcaklığında bekletilmiştir. Daha sonra elmaların kabukları soyulmuş ve çekirdekleri temizlenmiştir. Elmalara herhangi bir ön işlem yapılmamıştır. Birinci deneyde elmalar 5 mm kalınlığında kesilmiştir. İkinci deneyde ise elmalar rendelenmiş ve 50x13 cm’lik 3 bölmeli eleğe serilmiştir. Her iki deneyde de elmalar hava akışına dik şekilde asılmıştır. Kurutma işlemine başlamadan önce sistem 45 dakika kadar çalıştırılarak sistemin kararlı hale gelmesi sağlanmıştır.

Yapılan deneylerin akım şeması Şekil 2 ile gösterilmiştir.



Şekil 2. Elma tozu ve elma cipsi üretimi akım şeması (Flow chart of apple powder and apple cips production)

Deneylerin yapıldığı günler çevre havası ortalama 20°C sıcaklıkta ve ortalama % 50 bağıl nemdedir.

Deneylerde bu değer baz alınarak kurutma yapılmıştır. Deney setinin görünümü Şekil 3’ de verilmektedir.



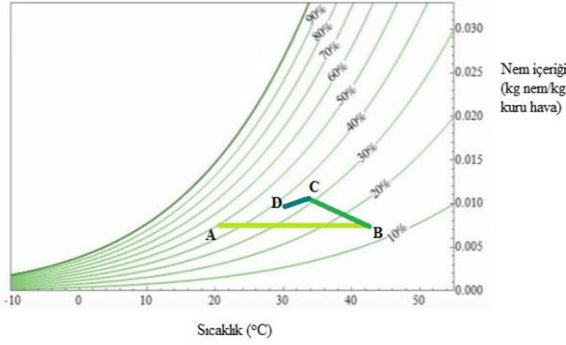
Şekil 3. Deney seti (The test set)

Deney seti dijital ağırlık ölçer, kurutma kabini, kontrol ünitesi termostat, ayarlı damper, buharlaştırıcı (evaporatör), kompresör, yoğuşturucu (kondenser), fan ve genişleme valfinden oluşmaktadır. Kullanılan sistem elemanlarının teknik özellikleri Çizelge 1’ de verilmiştir. Deney süresince ölçülen parametrelerin farklı değişkenler nedeniyle ortaya çıkan toplam hataları Eş. 12 yardımıyla hesaplanmış ve Çizelge 1’de sunulmuştur.

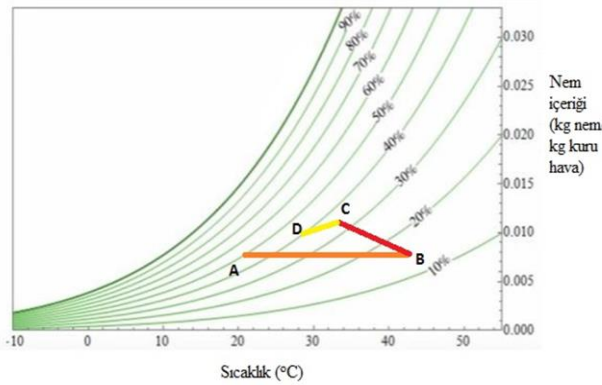
Çizelge 1. Sistem elemanlarının teknik özellikleri (Technical specifications of system components)

Sistem elemanı	Teknik özellikler	Doğruluk	Belirsizlik
Hava akışı ölçüm cihazı	Hız 0-20 m/s	±0.01m/s	±0.0173 m/s
Elektrik ölçer	220 V	±1 %	±1.41 %
Sıcaklık ve bağıl nem ölçüm cihazı	0-100 % bağıl nem, -40’tan +70°C’ye	±2% RH±1°C	± 1.73 % RH± 1.41°C
Isıl çift	Skala 0-70°C, besleme 24V-DC, çıkış 4-20 mA	±0.4°C	±0.412°C
Dijital tartı	Maksimum ölçüm kapasitesi, 6100 g	±0.01g	±0,02 g

Buharlaştırıcı kurutma odasından çıkan havanın ısısını çekmiştir. Yoğuşturucudan atılan ısı kurutma havasının ısıtılmasında kullanılmaktadır. Yoğuşturucuda sıvı faza geçen soğutucu akışkan genişleme valfinden geçerek tekrar buharlaştırıcıya gelmektedir. Aynı çevrim deney süresince devam etmektedir. Deney süresince kurutma kabini yer alan ağırlık ölçer ile elmaların ağırlık değişimi gözlemlenmiş ve her 10 dakikada bir not edilmiştir. Kurutma sistemi hava akışının taslak psikrometrik diyagramı her iki deney için çizilerek Şekil 4 ve 5’te gösterilmiştir.



Şekil 4. Elma dilimi kurutulması deneyi taslak psikrometrik diyagramı (Apple slice drying experiment draft psychrometric diagram)



Şekil 5. Rendelenmiş elmanın kurutulması deneyi taslak psikrometrik diyagramı (Grated apple drying experiment draft psychrometric diagram)

Deney sisteminde “A” taze hava girişi, “B” kondenser çıkışı, “C” kurutma kabini çıkışı, “D” buharlaştırıcı çıkışındaki havanın sıcaklık ve bağıl nem değerleridir.

3. DENEY VE ANALİZ SONUÇLARI (EXPERIMENT AND ANALYSIS RESULTS)

Kurutma işlemi için önce elmaların nem içeriği Eş. 1. 5.06 g_{su}/g kuru madde olarak hesaplanmıştır. Deneyler 40°C kurutma havası sıcaklığında ve 1 m/s hava hızında yapılmıştır. Kurutma deneyleri sonrası elmaların görünümü Şekil 5 ve 6 ‘da verilmiştir. Kurutulan dilimlenmiş elmaların görünümünde renk değişimi olmazken, rendelenmiş elmalarda kararmalar meydana gelmiştir. Kurutulan rendelenmiş elmalar ayrıca havanda dövülerek toz haline getirilmiştir.

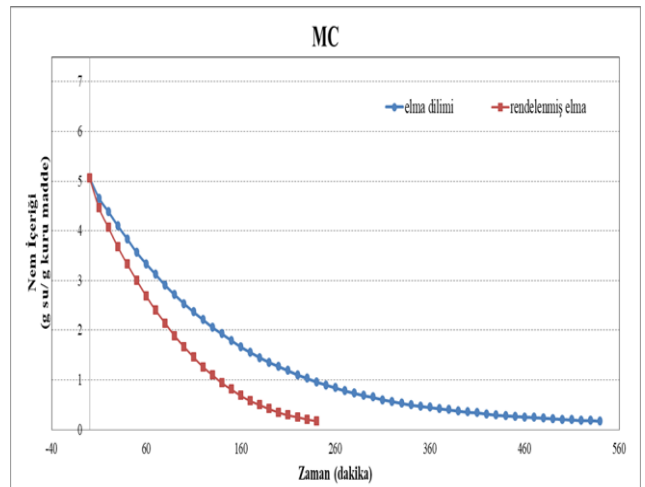


Şekil 6. Kurutma öncesi elmaların görünüşü (Appearance of the apples before drying)



Şekil 7. Kurutma işlemi sonrası elmaların görünüşü (Appearance of the apples after the drying process)

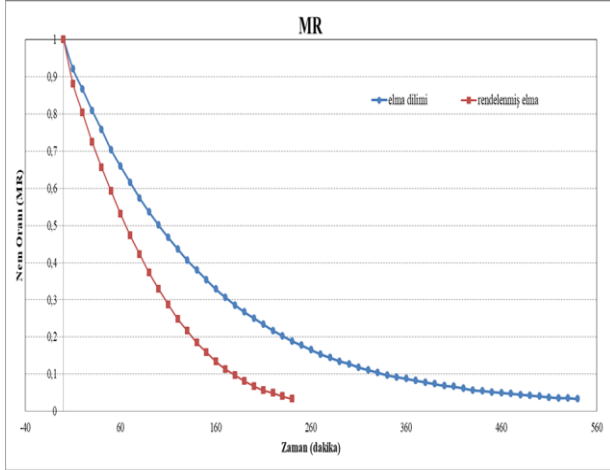
Isı pompalı kurutucuda yapılan bu deneyler sonucunda elma dilimleri ve rendelenmiş için ayrı ayrı nem içeriğinin zamana göre değişimi hesaplanmış ve Şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 8. Zamana göre nem içeriğinin değişimi (Change of moisture content according to time)

Şekil 8’de görüldüğü gibi deneylerin son nem içeriğine ulaşmaları elma dilimi için 9 saat sürerken, dilimlenmiş elmada 4 saat sürmüştür.

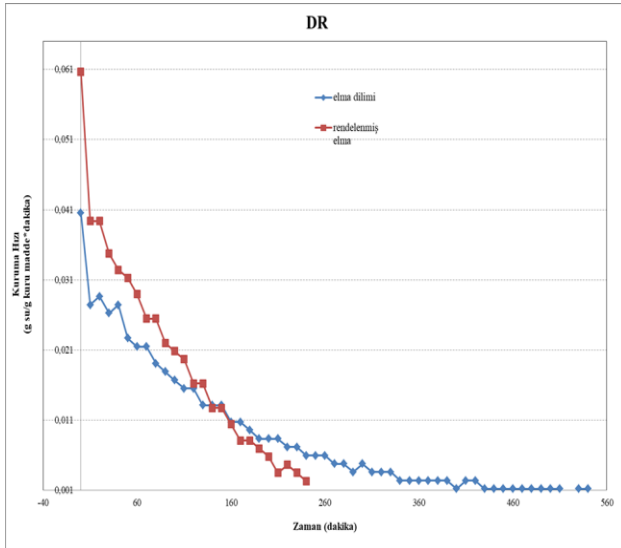
Ayrı ayrı hesaplanan MR değerleri Eş. 2 kullanılarak bulunmuş ve zamana göre değişimi hesaplanmıştır. Hesaplanan MR değerleri Şekil 9’de çizelge olarak verilmiştir.



Şekil 9. Zamana göre nem oranının değişimi (Change of moisture ratio according to time)

Deneylerin nem oranlarındaki değişim $1 \text{ g}_{\text{su}}/\text{g}_{\text{kati madde}}$ ’den başlayarak $0.17 \text{ g}_{\text{su}}/\text{g}_{\text{kati madde}}$ ’ye kadar sürmüştür.

Deneyler süresinde her 10 dakikada bir ölçümler yapılmıştır. Ölçümler sonucu kuruma hızı değerleri Eş 4 ile hesaplanmıştır. Şekil 10’da zamana göre DR değerleri verilmiştir

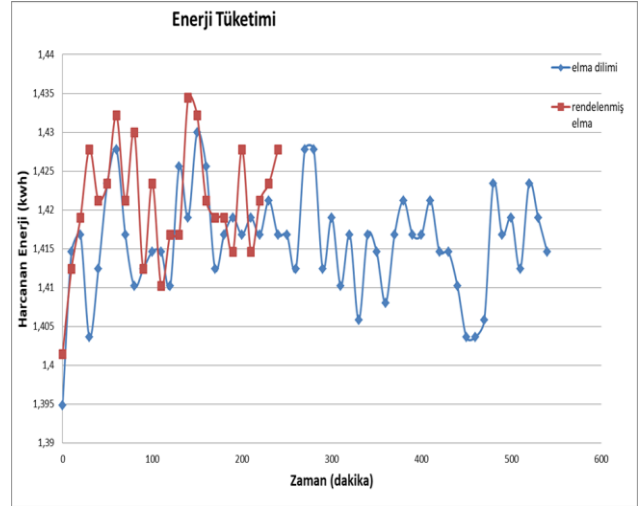


Şekil 10. Zamana göre kurutma hızının değişimi (Change of drying rate according to time)

Şekil 10 yardımıyla elma diliminin ve rendelenmiş elmanın kurutma hızının zamana göre değişimi görülmektedir. Yüzey alanı fazla olan rendelenmiş elmanın kurutma hızı elma dilimine göre daha fazladır. Her iki deneyde 150. dakikada kurutma hızı eşitlenmiştir

ve yaklaşık olarak aynı olmuştur. Uzaklaştırılması gereken nem miktarı azaldıkça kurutma hızı da azalmıştır. Elma diliminin kurutma hızı zamanla azalarak kurutma süresinin 9 saat sürmesine neden olurken rendelenmiş elma 4 saatte kurutulmuştur. Rendelenmiş elmanın kurutulmasında daha kısa sürede daha fazla nem uzaklaştırılmıştır.

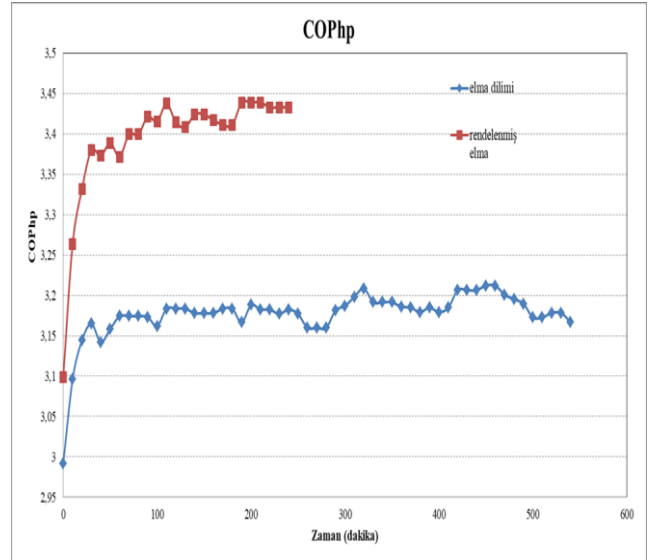
Deneylerde tüketilen enerjilerin karşılaştırması Şekil 11 ile gösterilmiştir.



Şekil 11. Zamana göre harcanan enerji değişimi (Energy exchange by time)

Şekil 11 ile görülen zamana göre harcanan enerji grafikleri deney süresince her 10 dakikada bir sayaçtan okunarak çizilmiştir.

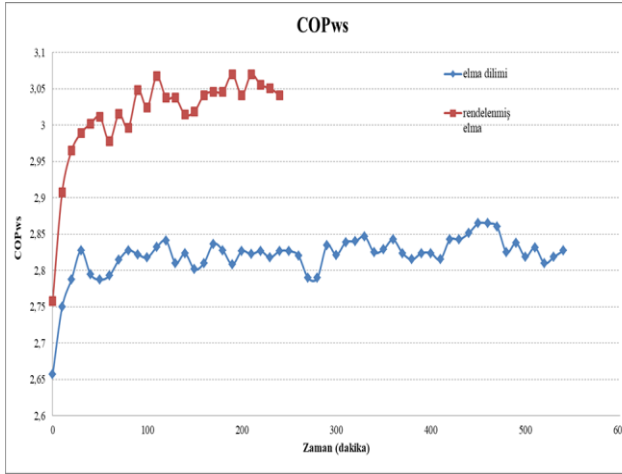
Deney setinde ısıtma tesir katsayısı (COP_{hp}) Eş. 8 yardımıyla hesaplanmıştır. Zamana göre değişimi Şekil 12’de gösterilmiştir.



Şekil 12. Zamana göre COP_{hp} ’nin değişimi (Change of COP_{hp} by time)

Deney sisteminde ısı pompası için ortalama COP değerleri elma dilimi için COP_{hp} 3.17 bulunurken, rendelenmiş elmanın COP_{hp} 'si 3.39 olarak bulunmuştur.

Tüm sistem için ısıtma tesir katsayısı (COP_{ws}) Eş. 9 yardımıyla hesaplanmıştır. Zamana göre değişimi Şekil 13 ile gösterilmiştir.



Şekil 13. Zamana göre COP_{ws} 'nin değişimi (Change of COP_{ws} by time)

Eş. 9 yardımıyla hesaplanan COP_{ws} değerleri ortalama olarak elma dilimi için 2.82 bulunurken, rendelenmiş elma için ise 3.02 olarak hesaplanmıştır. COP_{ws} değerlerinin COP_{hp} değerlerinden daha küçük çıkması sistemde bulunan tüm tüketim cihazlarının hesaplamaya katılmasından dolayıdır.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Kurutma işlemlerinin sonucunda aşağıdaki verilere ulaşılmıştır.

- Elma dilimlerinin $5,06 \text{ g}_{su}/\text{g}_{kuru \text{ madde}}$ miktarından $0,17 \text{ g}_{su}/\text{g}_{kuru \text{ madde}}$ miktarına gelmesi 9 saat sürmüştür. Aynı şartlarda rendelenmiş elmanın $5,06 \text{ g}_{su}/\text{g}_{kuru \text{ madde}}$ miktarından $0,17 \text{ g}_{su}/\text{g}_{kuru \text{ madde}}$ miktarına gelmesi ise 4 saat sürmüştür.
- Eş. 9 yardımıyla yapılan hesaplama sonucunda elma dilimlerinin kurutulmasındaki ortalama COP_{ws} 2,82 olarak, rendelenmiş elmanın kurutulmasındaki COP_{ws} ise 3,02 olarak bulunmuştur. Bulunan COP_{ws} değerleri ile elmanın rendelenerek kurutulmasının daha verimli olduğu görülmüştür.
- Kuruma süreleri rendelenmiş elma için az olmasına rağmen rendelenmiş elmanın hazırlama aşaması dilimlenmiş elmaya göre daha uzun sürmektedir.
- Rendelenmiş elmanın kuruma hızı dilimlenmiş elmaya göre daha yüksektir. Bunun nedeni yüzey alanının geniş olmasıdır.

- Rendelenmiş elmanın kuruma süresi daha az olduğu için dilimlenmiş elmanın kurutulmasına göre daha az enerji harcanmıştır.
- Şekil 6'da görüldüğü gibi rendelenmiş elmaların kurutulmasında kararına meydana gelmiştir. Bu nedenle rendelenmiş elmalardan üretilen elma tozunun da rengi kurutma öncesindeki elmaya göre çok farklıdır. Bu durumun ürünlerin pazarlanmasında ve tüketiminin olumsuz yönde etkileyeceği düşünülmektedir.
- Toz haline getirilen elmanın hem depolanması hem de taşınması elma cipsine göre daha kolaydır.
- Deney sisteminde farklı maddeler de kurutulabilir.
- Sisteme güneş enerjisi eklenebilir. Böylece enerji tasarrufu sağlanabilir.
- Sistemde kurutulacak yaş maddelerin hareketi sağlanarak daha kısa sürede kurumaları sağlanabilir.

SİMGELER (SYMBOLS)

a_w : Su aktivitesi

c : Havanın özgül ısısı, $\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$

COP_{hp} : Isı pompasının performans katsayısı

COP_{ws} : Bütün sistemin performans katsayısı

ÇBN : Çevre havası bağıl nemi

DR : Kurutma hızı, $\text{g su}/\text{g kuru madde dakika}$

MC_{db} : Nem içeriği, $\text{g su}/\text{g kuru madde}$

M_i : Başlangıçtaki yaş ağırlık, g

\dot{m}_d : Buharlaştırılan su miktarı, kg/h

M_d : Kuru ağırlık, g

MC_t : t anına göre nem içeriği, $\text{g su}/\text{g kuru madde}$

MC_{t+dt} : t+dt anına göre nem içeriği, $\text{g su}/\text{g kuru madde}$

MR : Nem oranı

M : Ürünün herhangi bir seviyede ve zamandaki nem içeriği, $\text{g su}/\text{g kuru madde}$

M_e : Denge nem içeriği, $\text{g su}/\text{g kuru madde}$

M_o : Başlangıçtaki nem içeriği, $\text{g su}/\text{g kuru madde}$

\dot{m}_{ia} : Havanın kütleli debisi, kg/s

ρ : Havanın yoğunluğu, kg/m^3

$SMER_{hp}$: Isı pompasının özgül nem çekme oranı, kg/kWh

$SMER_{ws}$: Tüm sistemin özgül nem çekme oranı, kg/kWh

T_{ia} : Giriş havası sıcaklığı, $^\circ\text{C}$

T_{oa} : Çıkış havası sıcaklığı, $^\circ\text{C}$

\dot{V} : Hava debisi, m^3/h

\dot{Q}_K : Yoğuşturucudan kurutma havasına verilen ısı gücü, kW

\dot{W}_c : Kompresör gücü, kW

\dot{W}_f : Fan gücü, kW

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Aktaş M., Ceylan İ. ve Doğan H., “Isı pompalı endüstriyel fındık kurutma fırınının modellenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 8:329-336,(2005).
- [2] Ceylan İ., Aktaş M. ve Doğan H., “Isı pompalı kurutma odasında elma kurutulması”, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 25:9-14, (2005).
- [3] Heybeli N.ve Ertekin C., “Elma dilimlerinin ince tabaka halinde kuruma karakteristiği”, *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 3: 179-187, (2007).
- [4] Özgen F., “Elma kurutulmasında kullanılan konvektif tip bir kurutma sisteminin tasarımı”, *Mühendis ve Makina Dergisi*, 55: 42-49, (2014).
- [5] Tarhan S., Ergüneş G., Güneş M. ve Mutlu A., “ Farklı kurutma koşullarının amasya elmasının kuruma süresi ve kalitesi üzerine etkileri”, *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*, 2: 1-6, (2009).
- [6] Abuşka M. ve Doğan H., “Endüstriyel tip ısı pompalı kurutucuda çekirdeksiz üzümün kurutulması”, *Politeknik Dergisi*, 13: 271-279, (2010).
- [7] EİEİ Ulusal Enerji Tasarruf Merkezi, “Sanayide enerji yönetimi esasları”, 4, Ankara, (1997).
- [8] Gürlek G., Akdemir Ö. Ve Güngör A., “Gıda kurutulmasında ısı pompalı kurutucuların kullanımı ve elma kurutmada uygulanması”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21: 398-403, (2015).
- [9] Aktaş M., Menlik T., Boran K., Aktekeli B. ve Aktekeli Z.,” Isı pompalı bir kurutucuda portakal kabuğu kurutulması”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2: 229-238, (2014).
- [10] Türkiye Ziraat Odaları Birliği, “Türkiye Ziraat Odaları Birliği Elma Raporu”, 2003.
- [11] T.C. Gıda Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı Bitkisel Üretim Genel Müdürlüğü, “BÜGEM FAALİYETLERİ”, Mart, 2017.
- [12] TC Isparta Valiliği Gıda Tarım ve Hayvancılık İl Müdürlüğü, “Günde 1 elma obez olma”, (2014).
- [13] İstanbul İhracatçılar Birlikleri Genel Sekreterliği, “Türkiye geneli ve İİB mal grupları ve ülkeler bazında kuru meyve ve mamulleri ihracatı”, (2014).
- [14] Huang L., Zhang M., Mujumdar A. ve Lim R., “Comparison of four drying methods for re-structured mixed potato with apple chips”, *Journal of Food Engineering*, 103: 279-284, (2011).
- [15] Saçılık K. ve Eliçin A., “The thin layer drying characteristics of organic apple slices”, *Journal of Food Engineering*, 73: 281-289, (2006).
- [16] Shyu S. ve Hwang L., “Effects of processing conditions on the quality of vacuum fried apple chips”, *Food Research International*, 34: 133-142, (2001).
- [17] Teeboonma U., Tiansuwan J. ve Soponronnarit S., “Optimization of heat pump fruit dryers”, *Journal of Food Engineering*, 59: 369-377, (2003).
- [18] Fatouch M., Metwally M., Helali A. ve Shedid M., “ Herbs drying using a heat pump dryer”, *Energy Conversion and Management*, 47: 2629-2643, (2006).
- [19] Aktaş M., Şevik S., Özdemir B. ve Gönen E., “Performance analysis and modeling of a closed-loop heat pump dryer for bay leaves using artificial neural network”, *Applied Thermal Engineering*, 87: 714-723, (2015).
- [20] Darıcı S., “Kivi meyvesinin kurutulmasında kurutma havası hızının kurumaya etkisinin incelenmesi”, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 120: 51-58, (2012).
- [21] Aktaş M., Khanlari A., Aktekeli B. ve Amini A.,” Analysis of a new drying chamber for heat pump mint leaves dryer”, *International Journal of Hydrogen Energy*, (2017).
- [22] Aktaş M., Gönen E.,”Isı pompalı nem kontrollü bir kurutucuda defne yaprağı kurutulması”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29: 433-441, (2014).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



Fizyolojik sinyallerin askerî amaçlı kullanılabilirliği: elektroensefalografi ve yakın kızılaltı spektroskopisi örnekleri

Usability of physiological signals for military purpose: examples of electroencephalography and near infrared spectroscopy

Yazar (Author): Ali Bülent UŞAKLI

ORCID: 0000-0001-6963-2776

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Uşaklı A. B., “Fizyolojik sinyallerin askerî amaçlı kullanılabilirliği: elektroensefalografi ve yakın kızılaltı spektroskopisi örnekleri”, *Politeknik Dergisi*, 21(4): 895-900, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.385474

Fizyolojik Sinyallerin Askerî Amaçlı Kullanılabilirliği: Elektroensefalografi ve Yakın Kızılaltı Spektroskopisi Örnekleri

Araştırma Makalesi / Research Article

Ali Bülent UŞAKLI*

KTO Karatay Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Konya,

(Geliş/Received : 26.07.2017 ; Kabul/Accepted : 07.09.2017)

ÖZ

İnsan beynindeki nöronlar vücut fonksiyonlarıyla ilişkili olarak elektriksel aktivite üretirler. Oluşan potansiyel dağılımı, saçlı deri üzerine yerleştirilen elektrotlar ile ölçülebilmektedir (elektroensefalografi, EEG). EEG sinyalleri; spontan, olaya ilişkin veya uyarılmış potansiyel kayıtları ile ilişkili olabilmekte ve tetikte olma, dinlenme veya uyku durumlarında değişmektedirler. μ ve P300 dalgalarının işlenmesiyle dış dünya ile iletişim kurulabilmekte ve bilgisayar ya da başka bir cihazın kontrolü yapılabilmektedir. Bu sistemler insan beyin ara yüzleri ya da etkileşimleri (BCI) olarak geniş uygulama alanı bulmaktadır. Beyindeki oksijenlenme fonksiyonel kızılaltı spektroskopisiyle (fNIRS) gözlemlenebilmektedir. Bu sistemlerin kullanımıyla yüksek dikkat gerektiren görevlerde çalışan personelin beyin fonksiyonlarının takibi mümkün olabilmektedir. Bu çalışmada EEG ve fNIRS'in askerî amaçlı olarak kullanılabilmesi önerilmektedir. Baskı altında hızlı ve doğru karar vermek zorunda kalınan ve bilinç kaybının yaşanabileceği jet pilotluğu gibi görevlerde, hassas bölge ya da cihazlar için takip ve kontrol görevi yapan personelin durumları, bir merkez tarafından izlenerek gerektiğinde ikaz edilebilmeleri, görevin tam olarak yapılmasını destekleyecektir. Ayrıca EEG sinyallerinin, savaş sonrasında gazilerin beyin travmalarının incelenmesinde, beyin fonksiyonları normal olan ancak konuşma ve hareket zorluğu çekenlerin yaşamlarını kolaylaştırmak için iletişim ve kontrol için kullanılması mümkündür.

Anahtar Kelimeler: Elektroensefalografi, EEG'nin askerî uygulamaları, fonksiyonel yakın kızılaltı spektroskopisi.

Usability of Physiological Signals for Military Purpose: Examples of Electroencephalography and Near Infrared Spectroscopy

ABSTRACT

The neurons of the human brain generate electrical activities related to body functions. The generated potential distribution can be measured with electrodes placed on the scalp (electroencephalography, EEG). EEG signals can be related to spontaneous, event related or evoked potential recordings. The EEG pattern change in situations of alertness, resting or sleep. It is possible to communicate with the environment and control a computer or another device, by using μ and P300 waves. These systems are called brain computer interfaces or interactions, and widely used. Oxygenation in the brain can be observed with functional near-infrared spectroscopy (fNIRS). By using these systems, brain functions of people whose work require attention, can be monitored. In this study, EEG and fNIRS are proposed for some military purpose. A person whose task requires high alertness can be monitored using their brain functions. Observance of a person by a command center in some critical tasks such as the jet piloting where it is required to give rapid and correct decisions under stress or under the risk of loss of conscious, or the surveillance of critical areas or devices would highly support the performance of the mission. In addition, it is possible to use EEG signals to make easier the lives of veterans who have normal brain functions but suffer from physical or speech disabilities or in the investigation of their brain trauma.

Keywords: Electroencephalography, EEG in military applications, functional near-infrared spectroscopy

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnsan beynindeki sinir hücreleri; işitme, görme veya dokunma gibi vücut fonksiyonlarıyla ilişkili olarak beyindeki farklı bölgelerde elektriksel aktivite üretirler. Bu aktiviteler sonucunda oluşan elektriksel potansiyel dağılımı, saçlı deri yüzeyine yerleştirilen elektrotlarla ölçülebilmektedir (Elektroensefalografi, EEG). Beyin aktivitesi ile EEG sinyallerinin frekansı ve genliği arasında bir ilişki vardır. Aktivite arttıkça frekans yükselmekte bununla birlikte genlik düşmektedir. EEG'nin spektral analizi incelendiğinde bu ayırım daha açık olarak görülebilmektedir. İlk kayıt edildiğinden (Berger, 1929) günümüze, EEG ile ilgili temiz sinyal alma, yüksek çözünürlükte analiz için çok kanallı kayıt ve sinyal sınıflandırma konularında çalışmalar yapılmaktadır.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : abulent.usakli@karatay.edu.tr

Genel olarak, insan beyninin elektriksel sinyalleri ve özellikleri aşağıdaki gibidir.

Delta (0,5-4 Hz, <100 µV): Derin uykuda, süt çocuğu çağında ve ciddi organik beyin hastalıklarında, cerrahi anestezi ve uykuda ortaya çıkmaktadırlar. Bu dalgalar, beyinin alt bölgelerinden bağımsız olarak, doğrudan beyin kabuğunun aktifleşmesiyle ortaya çıkarlar.

Teta (4-8 Hz, <100 µV): Özellikle çocuklarda parietal ve temporal bölgelerde, psikomotor epilepsi, süt çocuklarında ve yetişkinlerde ise gerginlik durumlarında görülmektedirler.

Alfa (8-13 Hz, ~10 µV): Uyanırken, sakin ve tam dinlenme durumunda, oksipital bölgede ortaya çıkarlar, uyku durumunda görülmemektedirler.

Beta (13-30 Hz, nadiren 50 Hz, <20 µV): Dinlenme durumunda merkezi bölgede baskındırlar. Gerginlik durumunda ve merkezi sinir sisteminin aktivasyonunda, yoğun mental aktivite dönemlerinde gözlenmektedirler.

Gama (22-30 Hz, <2 µV): Yüksek dikkat durumunda veya uyarım esnasında ortaya çıkmaktadırlar.

Hareket veya harekete niyet edildiğinde azalan μ dalgaları, alfa bandında olmasına rağmen motor korteks üzerinde motor davranışlarıyla ilişkili dalgalar. μ dalgaları ve P300 dalgaları beyin-bilgisayar arabirimlerinde (BCI) kullanılmaktadır. BCI, EEG sinyalleri kullanılarak; sadece beyin fonksiyonları olan felçli hastalar için dış dünya ile iletişim kurabilmelerinde yeni bir haberleşme kanalı oluşturmaktadır.

Teşhis amaçlı EEG kaydının genel olarak kullanıldığı başlıca alanlar: 1) Beyin lezyonlarının tespiti ve yerlerinin belirlenmesi (EEG izlerinde asimetri veya düzensizlikten), 2) Epilepsi çalışmaları (nöbetlerin ve epileptik bölgenin tespiti), 3) Bilinç durumu incelemesi, uyuşturucu nöbeti incelemeleri, 4) Koma durumu ve menenjit gibi bulaşıcı hastalıkların incelenmesi, 5) Şizofreni, alzheimer ve parkinson gibi hastalıkların teşhisi, 6) Depresyon, dikkat toplayamama durumlarıyla ilgili beyin bölgelerinin araştırılması, 7) Uyku bozukluklarının incelenmesi, 8) Beyin ölümü ya da anestezi derinliği tespiti, 9) Uyarı algılamalarının gözlenmesi ve 10) Beyin haritalanması ve kaynak yeri tespitidir. Ayrıca EEG sinyalleri kullanılarak kişilik bozuklukları ile ilgili çalışmalar yapılabilmektedir.

Bu çalışmada uygulaması kolay, noninvaziv, düşük çözünürlükte EEG ve fNIRS'in askerî amaçlı olarak kullanılabilirliği tartışılmıştır. Gelecekteki savaşlarda kritik personel için vücut sıcaklığı, kalp atım hızı, bilinç ve algı durumu gibi fizyolojik özelliklerinin anlık takibi; kaçılmaz olarak değerlendirilmektedir. Askerî personelin özellikle muharebe şartlarında görevini yaparken kendisine ve komutanların hızlı ve doğru kararlarında etkili olabilecek anlık EEG verisinin kullanılabilirliği üzerinde durulmuş ve gerçekleştirilen bir ölçme sisteminden bazı durumlar için alınan gerçek kayıtlar verilmiştir.

2. ASKERİ UYGULAMALAR

(MILITARY APPLICATIONS)

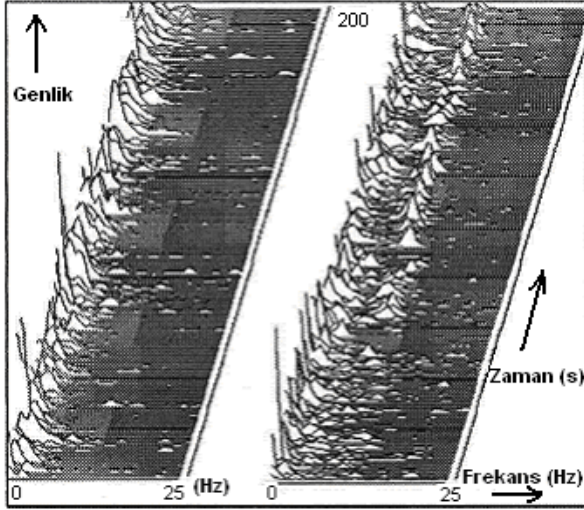
Gelişen teknolojiyle beraber gündeme gelen Ağ Merkezli Savaş (AMS)'in bir girdisi olarak savaşçıların muharebe performanslarına yönelik olarak, nabız, vücut sıcaklığı, dikkat durumlarını anlık ölçebilecek elbiseye monteli; giyilebilir küçük elektro fizyolojik ölçme sistemlerinin geliştirilmesi mümkündür. Ölçülen biyolojik sinyaller sınıflandırılarak personelin fizyolojik durumu takip edilebilecektir. EEG sinyallerinin askerî amaçlı uygulamalarında sinyallerin sınıflandırılması konusu öne çıkmaktadır. EEG sinyalleri askerin dikkat durumu, bilinci, yorgunluk ve uykusuzluğu takip edilerek muharebede karar vermeye destek olarak kullanılabilir. Ölçülen her bir sinyalden belirgin özellik çıkarılmasına yetecek sayıda kullanılacak sözcüğü başlığa monteli elektrotlarla; yüksek hassasiyet gerektirecek görev yapan personelin, zihinsel etkinliğine dayalı eylemleri takip edilebilecektir.

Geliştirilen akıllı başlıktan alınan EEG ve göğüs üzerinden alınan elektrokardiyograf (EKG) sinyalleri işlenerek yaşam sinyallerinin takip edilebildiği çalışmada [1] ve muharebe alanlarında kullanılmak üzere geliştirilen ve üzerinde gömülü elektrotların bulunduğu başlık kullanılarak beyin yaralanmalarının hızlı tespiti amaçlanmış böylece tedavinin çabuklaştırılması hedeflenmiştir [2]. Bu çalışmada uyarılmış potansiyeller kullanılmıştır. Pilotlara yönelik bir çalışmada [3], pilottan kaynaklanan osilasyonların sınıflandırılması yapılmıştır. Bu çalışmada uçuş esnasında kuru tip elektrotlardan alınan EEG sinyalleri sınıflandırılmıştır.

Amerika Birleşik Devletlerinin İleri Araştırma Projeleri Ajansı (DARPA)'nın 1970'li yılların başından beri beyin bilgisayar arabirimleri (BCI) üzerinde araştırmalar yaptığı açık kaynaklardan bilinmektedir. Non-invaziv yöntem olarak EEG'nin yanı sıra kafatası açılarak beyin kabuğuna elektrotların yerleştirilerek sinyal alınan invaziv bir yöntem olarak elektrokortigrofi (ECoG) kullanılan diğer etkili bir yöntemdir. Ayrıca beyinin ilgililenen bölgelerine elektrotların yerleştirildiği cerrahi müdahale gerektiren yöntemler kullanılmaktadır. Kafatasının altından doğrudan beyin kabuğundan ya da beyinin derinliklerinden alınan sinyaller saçlı deri üzerinden alınan EEG sinyallerine göre daha yüksek Sinyal-Gürültü Oranına (SNR) sahiptir. Dolayısıyla bu sinyallerin sınıflandırılmaları daha kolay yapılabilmektedir.

Uykusuz kalmış insanların EEG kayıtlarında dinlenmiş durumdakine göre farklılık ortaya çıkmaktadır. Bu durumda EEG sinyallerinin spektral analizi yapıldığında, uykusuzluk durumunda alfa bandında (8-13 Hz), delta

bandına göre (<4Hz) yükselme olduğu Şekil 1’de görülmektedir [4]. Uzun süreli konvoy yolculuklarında, öndeki araçla aynı mesafeyi korumak zorunda olan ve monoton bir sürüş rejimi içerisinde kalan sürücülerin beyin sinyallerinin takip edilerek uykulu duruma geçtiklerinde ikaz verebilecek bir sistemin araç içerisinde bulunması kazaları önleyecektir. Bu konuda Sandia Laboratuvarında gerçekleştirilen deneylerde (Şekil 2) başarılı sonuçlar alınmıştır [5].



Şekil 1. Tetikte (sol) ve uykusuzluk çekilirken (sağ) alınan EEG kayıtları. Uykusuzluk durumunda alfa bandındaki yükselme görülmektedir [4].



Şekil 2. Sürücünün beyin sinyallerinin takip edildiği aracın test sürüşü [5].

Bu çalışmada sürücünün beyin sinyallerinin takip edildiği bir sistem geliştirilmiştir. Sistem, sürücünün uykulu duruma geçmesi durumunda ikaz vermektedir. Çalışmada kullanılan çok kanallı EEG başlığının uzun süreli kullanımında sıkıntı vereceğinden, sürücünün rahatlığı bakımından sistemin başlıkla bütünleştirilmiş bir kaç kanallı ve kablosuz olarak tasarlanmasının mümkün olduğu değerlendirilmektedir. Uykusuzluğun tespiti ile ilgili

başka bir çalışmada da yapay sinir ağları kullanılarak beyin sinyallerinden gerçek zamanlı olarak uyarı üretilebilmektedir [6].

Uçuş esnasında pilotun EEG sinyallerindeki değişimin gözlemine dayalı çalışmalar uzun zamandır yapılmaktadır. EEG kayıtları ile askerî jet pilotlarının düşüşleri arasındaki ilişkinin incelendiği bir çalışmada, düşme oranının EEG’si anormal olarak işaretlenen pilotlarda, normallere göre üç kat daha fazla bir düşüş oranı tespit edilmiştir. Bu oran pilotaj hatası olarak kabul edilen durumlarda daha da belirleyici olmaktadır [7]. Jet pilotlarında, ivmelenme anında yaşanan baskının EEG sinyalleri üzerindeki etkisinin analiziyle; bilinç kaybının önlem alınması için uygun bir süre önceden tespiti için yapılan çalışmada, EEG sinyalleri özbağlanımlı (autoregressive) süreç kabul edilerek spektral kestirim yöntemi önerilmiştir [8]. Pilotların uçuş esnasındaki solunum, kalp atış hızı, göz hareketleri ve beyin dalgaları gibi fizyolojik ölçümleri uçuşla ilgili bilgi vermektedir. Bu konuda yapılan çalışmalarda uçuş esnasında pilottaki fizyolojik ölçümlerdeki farklılaşma gözlemlenmiştir [9]. Laboratuvar ve uçuş anında yapılan deneylerde, EEG sinyallerinin izlenmesi ile merkezi sinir sistemi ve g kuvveti etkisinin performans ilişkisini ortaya çıkaran başarılı sonuçlar alınmıştır [10].

Günümüzde yüksek teknoloji ürünü modern askerî sistemler, muharebe şartlarının ağır baskısı altında bile kullanıcıların yüksek algılama yeteneğini gerektirmektedir. EEG tabanlı sistemlere alternatif olarak yakın infrared spektroskopisi (fNIRS) de ucuz ve pratik bir sistem olarak kullanılabilir. İnfrared görüntüleme ile beyin kabuğu (korteks) üzerindeki hemodinamik (kan akışı ile ilgili) değişiklikler görüntülenebilmektedir. Beyin kabuğundaki oksijen harcama miktarı ile beyin fonksiyonları arasında bir ilişki vardır. Beyindeki aktivasyon bir kaç saniye içerisinde serebral kan akışını dolayısıyla oksijen harcanmasını artırmaktadır. Oksijen harcanmasındaki fark, beyin fonksiyonu hakkında bilgi vermektedir [11]. Bu çalışmadaki sistem Şekil 2’de gösterilmiştir. Bir silah sisteminin kullanılması esnasında beyinde ortaya çıkan aktivasyondan kaynaklanan oksijen harcama farkı,



Şekil 2. Fonksiyonel yakın infrared (fNIRS) görüntüleme için veri toplama sistemi[11].

özellik çıkarma ve örüntü algılama algoritmalarıyla ayırt edilebilmesi mümkündür. Usta avcı ya da keskin nişancı eğitimlerinde bu yaklaşımın önemli bir pozitif etki yaratabilecektir.

Çeşitli nedenlerle travmatik beyin yaralanması geçiren yaralılar için EEG sinyallerinden elde edilen indeks ayırtecdici özellik olarak kullanılabilir. [12] Askerî amaçlı olarak yapılan bir çalışmada askerî bilgisayar oyunu oynayan deneklerin P300 dalgaları ölçülmüştür. Çalışmanın ikinci aşamasında deneklere kontrollü olarak; kokain, amfetamin ve özellikle methylfenidate gibi merkezî sinir sistemini etkileyen uyarıcılar verildiğinde P300 sinyalleri ölçülerek her iki durumda benzer kayıtlar elde edilmiştir [13]. Modern muharebe şartlarında komutanlara hızlı karar vermeye yardımcı olacak şekilde çeşitli algılayıcılardan gelen veriler kullanılmaktadır. Gelecekte ağ merkezli savaşta (AMS) kullanılan algılayıcıların sayısı ve çeşidinin artacağı öngörülmelidir. Savaşan askerlerin stres, yorgunluk, uykusuzluk ve dikkat gibi durumlarının anlık olarak izlenmesi mümkündür. Personelin tek tek durumlarının takip edilerek hızlı ve doğru karar verilmesine destek oluşturması gelecekteki harekâtlarda önemli bir katkı sağlayacaktır.

Askerin muharebe şartlarındaki algısına dayalı performans ölçüleri olarak: 1) Tetikte olma durumu, 2) Tepki süresi, 3) Reaksiyon seçenekleri içerisinde doğru olanın seçilmesi, 4) Dikkat durumu ve 5) Yaşanan olayın tekrar hatırlanması sayılabilir. Savaş gemisinde komutanın göreviyle ilgili eğitiminde, tetikte olma, algı durumu ve hafıza konuları ile ilişkili indeks elde etmek üzere geliştirilmiş bir EEG sisteminde öğrenme, hafıza ve algıya dayalı başarılı sonuçlar alınmıştır [14]. Doğru ve yanlış tercihlerin anlaşılmasında değişen beyin sinyalleri ileri seviye eğitimlerin verilmesinde önemli bir girdi olabilecektir.

3. EEG KAYITLARI (EEG RECORDINGS)

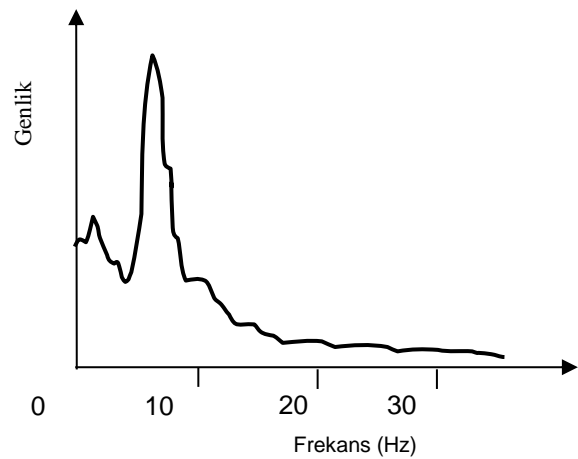
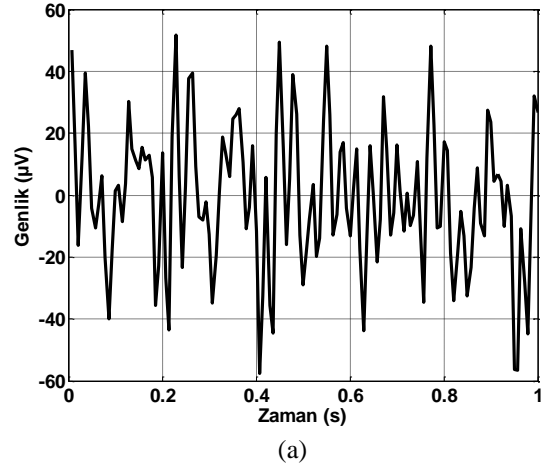
EEG sinyalleri ortalama $100 \mu V$ 'tan küçük ve 0,5-70 Hz arasında sinyallerdir. Bu sinyallerin zaman, frekans analizi kolayca yapılabilir ve oluşan potansiyel dağılımına göre beyin haritası çizilebilmektedir. Beyinde ortaya çıkan aktivite ile bağlantılı olarak modellenen akım dipolleri vücut fonksiyonu ile ilişkilidir. Bu modeller kullanılarak küresel ya da gerçekçi kafa modelleri üzerinde kaynak görüntülemesi yapılabilmektedir. Bu analizler oluşan aktivitenin yerinin doğru bir şekilde tespiti için önemlidir. Şekil 4'te, geliştirilen elektriksel kaynak görüntüleme amaçlı EEG veri toplama sisteminden [15] alınan örnek bir EEG kaydı, frekans spektrumu ve işitsel bir uyarıcı için çizilen

beyin haritası gösterilmiştir. Şekil 5'te ise bazı vücut fonksiyonlarıyla ilişkili olarak alınan kayıt örnekleri gösterilmiştir.

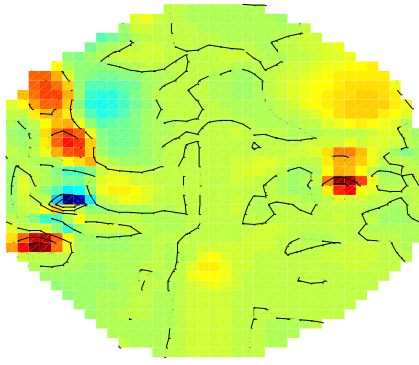
4. SONUÇ ve TARTIŞMA

(CONCLUSION and DISCUSSION)

Modern savaş teknolojileri, muharebe ortamıyla ilgili olarak algılayıcılardan karargahlara daha hızlı bilgi akmasını sağlamaktadır. AMS kapsamında bir ağla birbirine bağlı unsurlar, gelecekte daha fazla sayıda algılayıcıdan alınan verinin etkili bir düzenlemeyle karargaha ulaştırılarak, komutanların doğru ve hızlı karar vermesinde etkili olacaktır. Akan verinin sadece muharebe sahası ile sınırlı kalmayıp tek tek savaşçıların ve hassas görev yürüten personelin fizyolojik durumlarının takibi kaçınılmaz bir şekilde gündeme gelecektir.

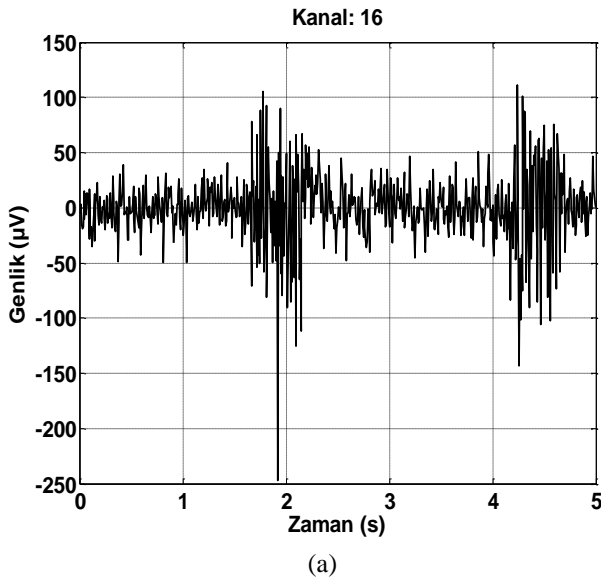


(b)

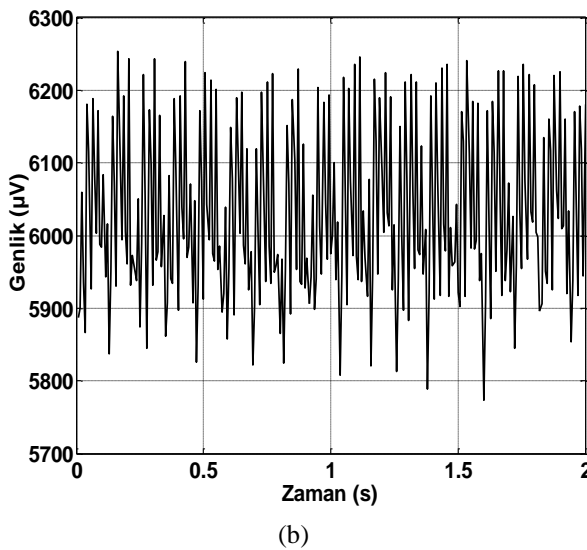


(c)

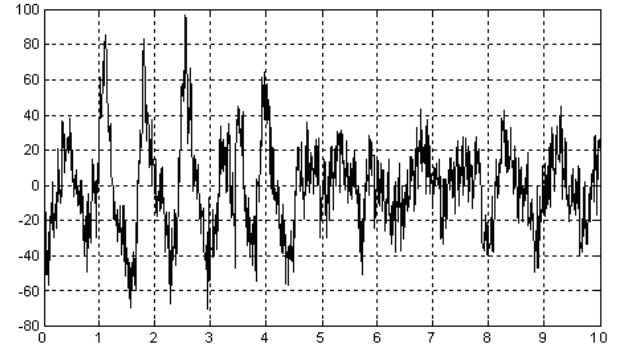
Şekil 4. EEG kaydı. a) Spontane EEG kaydı (27 yaşındaki erkek deneğin sol kulak üzerinden alınan 1 s'lik sinyal. b) Spontane bir EEG dalgasının frekans spektrumu. c) Sol kulaktan verilen işitsel uyarı (klik) için beyin haritası.



(a)



(b)



Gözler kapalı

Gözler açık

Şekil 5. Bazı vücut fonksiyonlarıyla ilgili olarak farklı kanallardan alınan EEG kayıtları (27 yaşındaki erkek deneğin sol kulak üstünden): a) Yaklaşık 1~2 saniye aralıklarla dişlerin sıkılması durumu. b) Dişlerin sürekli sıkılması durumu. c) Gözlerin aralıklarla açılıp kapanması durumu.

Geliştirilen prototip sistemle insan vücuduna ait bazı fonksiyonların beyinde oluşturduğu EEG sinyalleri, başarılı bir şekilde ölçülmüştür. Daha az sayıda kanal sayısı ile daha hafif olacak şekilde tasarlanacak sistemle EEG kayıtlarının askerî amaçlı farklı durumlar için geliştirilecek deneylerde ölçümlerin alınması ve analizi gelecekte yapılması planlanan çalışmalardır. Ayrıca etkili ve hibrid beyin-bilgisayar arabirimi geliştirme çalışmalarından başarılı sonuçlar alınmıştır [16] ve etkili sistem geliştirmeye yönelik çalışmalar devam etmektedir. Bu tür çalışmalarda uygulamaya özel tasarımın, donanım ve yazılımıyla bütünleşik ve kullanımı kolay olması gerekmektedir. Elektronik gürültünün azaltılması, uygun bir sayısallaştırma, kablosuz veri iletimi ve mümkün olan en az güç sarfiyatının sağlanması önemlidir.

Beynin elektriksel sinyalleri ya da oksijenlenme seviyesine yönelik sinyaller; etkili öznitelik çıkarma ve yüksek başarımlı hızlı sınıflandırma algoritmalarıyla işlenerek personelin durumuyla ilgili bilgi vermesi görev performansının takibi açısından önem arz etmektedir. Askerî başlığa monte edilebilecek elektrotlarla fazla güç harcamayan hafif ve giyilebilir cihazlarla beyin sinyallerinin gerektiğinde izlenmesi ve kablosuz olarak gönderilmesi mümkündür. Bu şekilde tek er seviyesinde personel takibi, uçuş gibi dikkat gerektiren hassas görevin yürütülmesi ve nişancılık eğitimine benzer konularda zihinsel fonksiyonlar anlık izlenebilecektir ve böylece başarının yükseltilmesine katkı sağlanabilecektir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Rosenberg, W.V., Chanwimalueang, T., Goverdovsky, V., Looney, D., Sharp, D., and Mandic, D.P., "Smart Helmet: Wearable Multichannel ECG and EEG", **IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine**, 4, (2016).
- [2] Fisher, J.A.N., Huang, S., Ye, M., Nabili, M., Wilent, W.B., Krauthamer, V., Myers, M.R. and Welle, C.G., "Real-Time Detection And Monitoring Of Acute Brain Injury Utilizing Evoked Electroencephalographic Potentials", **IEEE Transactions On Neural Systems And Rehabilitation Engineering**, 24(9): (2016).
- [3] Scholl, C.A., Chi, Y.M., Elconin, M., Gray, W.R., Chevillet, M.A., and Pohlmeier, E.A., "Classification of Pilot-Induced Oscillations during In-Flight Piloting Exercises Using Dry EEG Sensor Recordings", 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), (2016).
- [4] Egan, B.F., Mizutani, T., Thurlow, A., "Data Fusion for Wearable Physiological Sensor Platforms", Information Fusion, 2005 8th International Conference, 2: 1412-1419, (2005).
- [5] Guizzo, E., "Smart Cars That Can Tell When You're Bored To Death", Albuquerque, Sandia National Laboratories, **IEEE Spectrum**, (2007).
- [6] Belenky, G., Sing, H.C., Thomas, M.L., Shaham, Y., Balwinski, S., Redmond, D.P., Balkin, T.J., "Discrimination of rested from sleep-deprived EEG in awake normal humans by artificial neural network", Proc. IEEE Int Conf Neural Networks, **IEEE Piscataway**, NJ, 3521-3524, (1994).
- [7] Lennox-Buchthal, M., Buchthal, F., Rosenfalck, P., "Correlation of Electroencephalographic Findings with Crash Rate of Military Jet Pilots" **Epilepsia**, 1(1-5): 366-372, (1959).
- [8] Yarman-Vural, F., Onaral, B., Çetin, E., "Enhanced Parametric Estimation of Electroencephalograms Under Acceleration Stress", Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 12(2): 837-839, (1990).
- [9] Wilson, G.F., Purvis, B., Skelly, J., Fullenkamp, P., Davis, I., "Physiological data used to measure pilot workload in actual flight and simulator conditions", **Proceedings of the Human Factors Society**, 779-783, (1987).
- [10] Serman, B., Schummer, G., Dushenko, T., Smith, J., "Electroencephalographic correlates of pilot performance: simulation and flight studies" Jesse, K. (editor) **Electrical and Magnetic Activity of the Central Nervous System: Research and Clinical Applications in Aerospace Medicine** AGARD, CP 432, (1987).
- [11] Izzetoglu, K., Bunce, S., Izzetoglu, M., Onaral, B., Pourrezaei, K., "fNIR spectroscopy as a measure of cognitive task load", Engineering in Medicine and Biology Society, 2003. Proceedings of the 25th Annual International Conference of the IEEE 4, 3431- 3434 (2003).
- [12] Thatcher, R.W., North, D.M., Curtin, R.T., Walker, R.A., Biver, C.J., Gomez, J.F., Salazar, A.M. "An EEG Severity Index of Traumatic Brain Injury" **J Neuropsychiatry Clin Neurosci**, 13(1): 77-87, (2001).
- [13] Stefan, A., "America's Army Game: Its (Virtual) Reality Representation and Cocaine", **Proceedings of the International Conference on Cyberworlds (CW'04)**, (2004).
- [14] Berka, C., Levendowski, D.J. Cvetinovic, M., Petrovic, M., Miroslav, M., et al. "Real-time analysis of EEG indexes of alertness, cognition, and memory acquired with a wireless EEG headset", **International Journal of Human- Computer Interaction**, Norwood, 17(2): 151, (2004).
- [15] Usakli, A.B. Gencer, N.G. "USB-Based 256-Channel Electroencephalographic Data Acquisition System for Electrical Source Imaging of the Human Brain", **Instrumentation Science & Technology**, 35(3): 255-273, (2007).
- [16] Uşaklı, A.B., Gurkan, S., Aloise, F., Vecchiato, G., Babiloni, F., "A hybrid platform based on EOG and EEG signals to restore communication for patients afflicted by progressive motor neurons diseases", Engineering The Future of the Biomedicine IEEE EMBC 2009 Conference, Minneapolis USA, 543 - 546 DOI 10.1109/IEMBS.2009.5333742, (2009).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



A formulation for scanning soil-water characteristic curves

Zemin-su geçiş karakteristik eğrileri için bir formülasyon

Yazar(lar) (Author(s)): Melih Birhan KENANOĞLU¹, Nabi Kartal TOKER²

ORCID¹: 0000-0001-7453-2286

ORCID²: 0000-0001-8858-0510

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Kenanoğlu M. B. ve Toker N. B., "A formulation for scanning soil-water characteristic curves", *Politeknik Dergisi*, 21(4): 901-906, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.389619

Zemin-Su Geçiş Karakteristik Eğrileri İçin Bir Formülasyon

Araştırma Makalesi / Research Article

Melih Birhan KENANOĞLU*, Nabi Kartal TOKER

¹Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 10.08.2017 ; Kabul/Accepted : 08.01.2018)

ÖZ

Zemin-su karakteristik eğrisinin (ZSK eğrisi) histeretik doğası, deneysel veya literatürdeki uyum denklemleri ile elde edilebilen bakir ıslanma (su tutma) ve bakir kuruma eğrilerinin bir rejimden diğerine geçiş sırasındaki olası tüm değerleri sınırladığı varsayımı yapılarak elde edilmiştir. Bakir ZSK eğrileri arasındaki rejim değişimleri olan geçiş eğrileri geometriye dayalı ilişkilerle elde edilmiştir. Bu ilişkiler literatürde verilmiş çeşitli deney datasının şekilleri gözlemlenerek elde edilmiştir. Önerilen ilişkiler infiltrasyon ve buharlaşma gibi olaylar ile ilgili fiziksel problemlerin modellenmesinde artımlı olarak kullanılabilir. İlişkilerde verilen K parametresi için ampirik bir denklem önerilmiştir. Böylece geliştirilen denklemler ile sadece bakir kuruma ve ıslanma ZSK eğrileri ve rejim geçiş noktası kullanılarak geçiş eğrileri modellenebilir.

Anahtar Kelimeler: Zemin-su karakteristik eğrisi, su tutma eğrisi, geçiş eğrisi, histeresis.

A Formulation for Scanning Soil-water Characteristic Curves

ABSTRACT

The hysteretic nature of soil water characteristic curve (SWCC) is captured assuming the virgin drying and virgin wetting (a.k.a. imbibition) curves; which can be obtained from experiments or various fitting equations in the literature, bound all possible values during transition from one regime to the other. The scanning curves (transitions between virgin wetting and drying SWCC) are modelled by using geometry-based relations, which are devised by means of the observations on the shapes of graphs of experimental data found in the literature. The proposed relations can be used in incremental form to predict suction in different frameworks (e.g. infiltration, evaporation) and related physical problems. An empirical equation is proposed for power parameter (K), which is introduced in the relations. Only virgin wetting and virgin drying SWCCs and regime reversal point suffice to model a scanning curve in the developed formulations.

Keywords: Soil-water characteristic curve, retention curve, scanning curve, hysteresis.

1. INTRODUCTION

The relationship between the soil water pressure (suction) and water content is described by soil-water characteristic curve (SWCC) (also called “retention curve”) for partly saturated soils. One of the most significant features of the SWCC is its hysteretic behaviour (Fig.1). The drying path (e.g. decrease of water content, usually due to evaporation) differs from the wetting path (e.g. increase of water content due to imbibition or infiltration). Experimental studies have shown closed hysteresis loops emerge between wetting and drying branches of the SWCC during variation of water content [1,2,3,4,5,6]. These transition curves are called scanning curves. The hysteretic nature of SWCCs complicates modelling of various unsaturated soil mechanics problems since there can be endless number of possible transition paths between virgin drying and virgin wetting curves depending on the wetting-drying history, initial water content and soil type.

Hysteresis models were proposed in the literature in order to trace scanning curves [7,8]. In this study, novel formulations for scanning curves were developed in the incremental form.

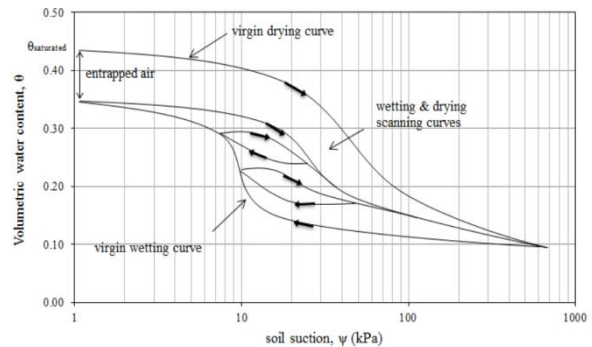


Figure 1. Schematic illustration hysteretic nature of SWCC and scanning curves.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : melih.kenanoglu@metu.edu.tr

2. FORMULATION

The hysteretic nature of SWCC is captured assuming virgin drying and virgin wetting curves (which can be obtained from experiments or various fitting equations in the literature) bound all possible values following regime reversals. Two separate formulas (one for drying and another for wetting) were developed for modelling of scanning soil-water characteristic curves. Formulas were developed by interpolation of a power of volumetric water content ratios over ratios of logarithms of suction, devised from the observations on the shapes of graphs of experimental data (Equ. 1).

$$\frac{a}{b} = \frac{c}{d} \left(\frac{e}{f} \right)^K \tag{1}$$

The point of regime reversal and a ultimate point constitute the extent of a scanning curve. The residual state of soil water is considered as ultimate point in case of drying; however, entrapment of air complicates defining a ultimate point during wetting. The ultimate point, which is between the saturated water content of virgin drying and maximum water content of virgin wetting SWCC, is determined by interpolation between these water content values of zero suction, based on regime reversal water content (Equ. 2).

$$\theta_{max} = \theta_{max,w} + \frac{\theta_{sat} - \theta_{max,w}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} (\theta_{rr} - \theta_{res}) \tag{2}$$

where, θ_{max} is the maximum volumetric water content of wetting scanning curve, $\theta_{max,w}$ is the maximum volumetric water content of the virgin wetting curve, θ_{sat} is the drying saturated volumetric water content of the virgin drying curve, θ_{res} is the residual volumetric water content and θ_{rr} is the value of volumetric water content at the beginning of this cycle of wetting.

For each point on the scanning curve, the suction values on the virgin drying and virgin wetting SWCC correspond to preceding and current water content are determined. Unknown suction value for current water content should lie in between these suction values and following relations are devised. The proposed relations are given in the form such that subscript j refers to temporal variation. In the following Fig.2 variables of the developed relations are illustrated.

The relation of scanning curve in the direction of wetting is given in equation [3].

$$\log(\psi_j) = \log(\psi_j^w) + \frac{\log\left(\frac{\psi_{j-1}^d}{\psi_{j-1}^w}\right)}{\log\left(\frac{\psi_{j-1}^d}{\psi_{j-1}^w}\right)} \left(\frac{\theta_{max} - \theta_j}{\theta_{max} - \theta_{j-1}} \right)^K \log\left(\frac{\psi_j^d}{\psi_j^w}\right) \tag{3}$$

where, $\log(\psi_j)$ is the logarithm of unknown suction value at present, $\log(\psi_j^w)$ is the logarithm of corresponding value of suction on virgin wetting curve for θ_j , ψ_{j-1} is the

value of suction at previous time step, ψ_{j-1}^w is the corresponding value of suction on virgin wetting curve for θ_{j-1} , ψ_{j-1}^d is corresponding value of suction on virgin drying curve for, θ_{j-1} , θ_{max} is ultimate wetting saturated water content and it can be determined by using equation [2], θ_j is the water content at present condition, θ_{j-1} is the water content at previous condition, ψ_j^d is the corresponding value of suction on virgin drying curve for θ_j , ψ_j^w is the corresponding value of suction on virgin wetting curve for θ_j and K is the power-type parameter, which controls the flatness of the scanning curve. It should be noted that virgin drying and virgin wetting curves can be in the form of retention curve equations such as Van Genuchten (1980), [9].

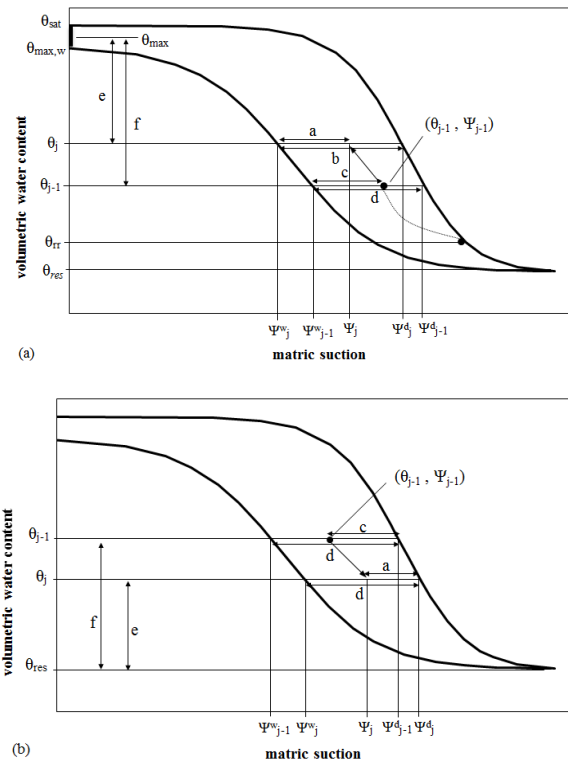


Figure 2. Schematic illustration of variables used in the formulations for wetting (a) and for drying (b).

Similarly, the scanning curve equation in the direction of drying is given equation [4].

$$\log(\psi_j) = \log(\psi_j^d) - \frac{\log\left(\frac{\psi_{j-1}^d}{\psi_{j-1}^w}\right)}{\log\left(\frac{\psi_{j-1}^d}{\psi_{j-1}^w}\right)} \left(\frac{\theta_j - \theta_{res}}{\theta_{j-1} - \theta_{res}} \right)^K \log\left(\frac{\psi_j^d}{\psi_j^w}\right) \tag{4}$$

2.1. Calibration of Proposed Hysteresis Model

Proposed scanning curve equations are fit onto experimental data found in the literature, using the power (K) as fitting parameter (Fig. 3-14). Least square

regression method was used in the calculations. Coefficient of determination (R^2) values were determined by setting logarithm of suction values as independent variable in the regression analysis.

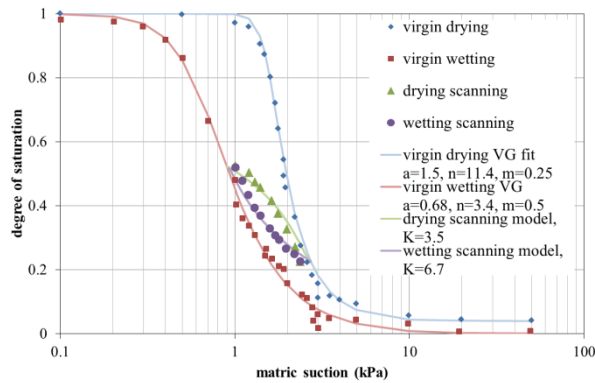


Figure 3. The proposed hysteresis model for a scanning loop (experimental data from [10]), the R^2 values for drying and wetting scanning curves are 0.890 and 0.917, respectively.

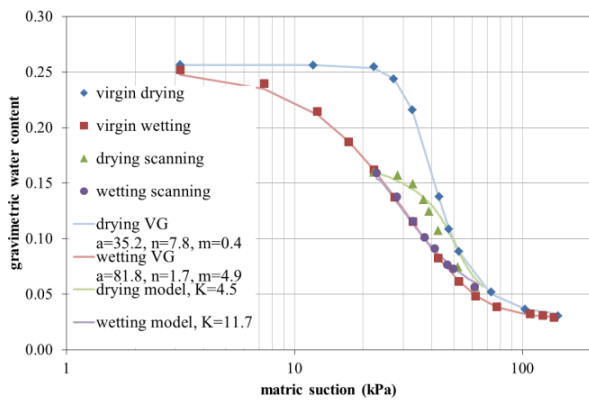


Figure 4. The proposed hysteresis model for a scanning loop (experimental data from [4]), the R^2 values for drying and wetting scanning curves are 0.924 and 0.993, respectively.

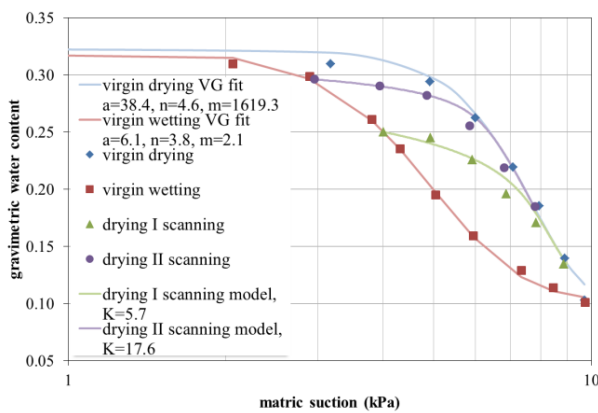


Figure 5. The proposed hysteresis model for drying scanning curves (experimental data from [11]), the R^2 values for drying I and drying II scanning curves are 0.970 and 0.992, respectively.

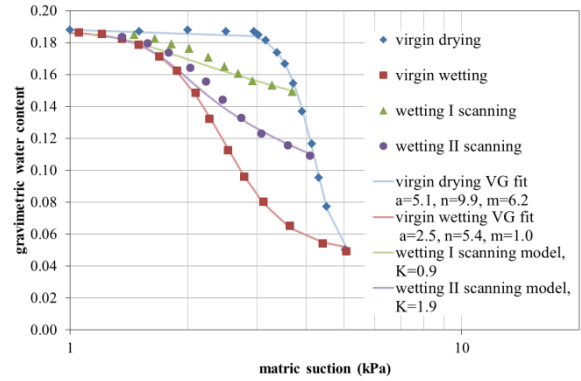


Figure 6. The proposed hysteresis model for wetting scanning curves (experimental data from [12]), the R^2 values for wetting I and wetting II scanning curves are 0.889 and 0.956, respectively.

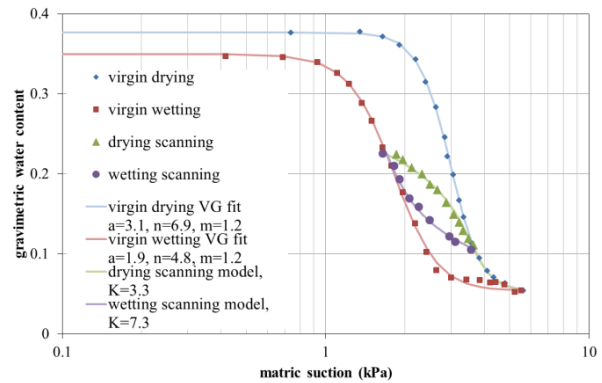


Figure 7. The proposed hysteresis model for a scanning loop (experimental data from [13]), the R^2 values for drying and wetting scanning curves are 0.980 and 0.991, respectively.

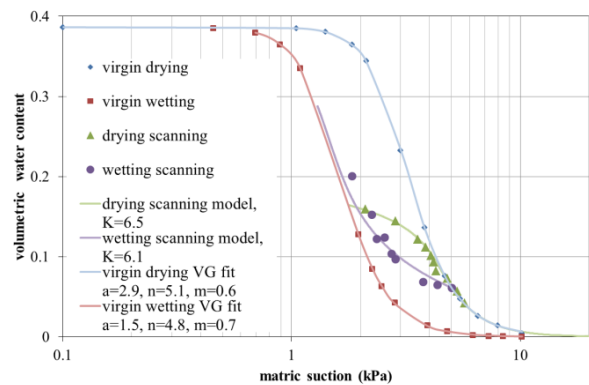


Figure 8. The proposed hysteresis model for a scanning loop (experimental data from [14]), the R^2 values for drying and wetting scanning curves are 0.956 and 0.923, respectively.

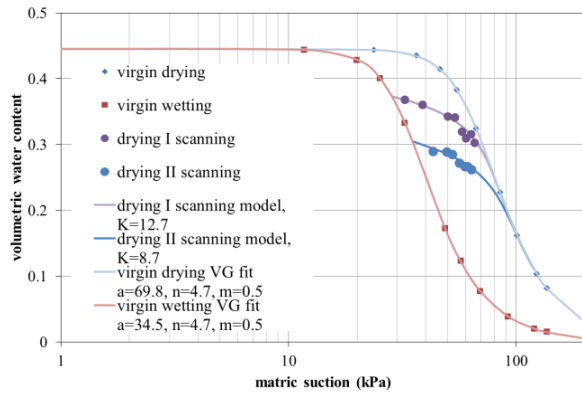


Figure 9. The proposed hysteresis model for drying scanning curves (experimental data from [15]), the R^2 values for drying I and drying II scanning curves are 0.935 and 0.822, respectively.

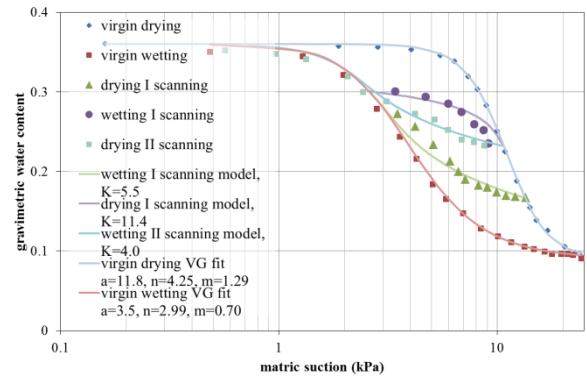


Figure 12. The proposed hysteresis model for scanning loop (experimental data from [17]), the R^2 values for wetting I, drying I and wetting II scanning curves are 0.929, 0.787 and 0.899, respectively.

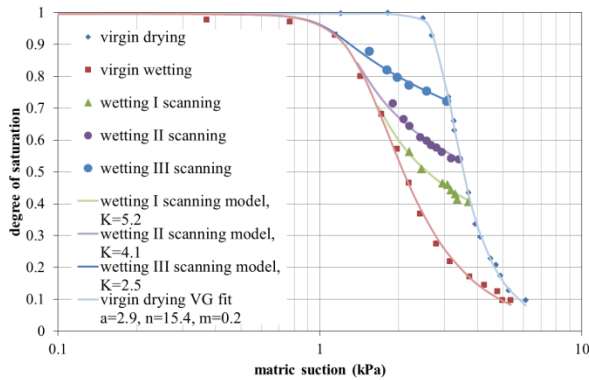


Figure 10. The proposed hysteresis model for wetting scanning curves (experimental data from [16]), the R^2 values for wetting I, wetting II and wetting III scanning curves are 0.958, 0.955 and 0.971, respectively.

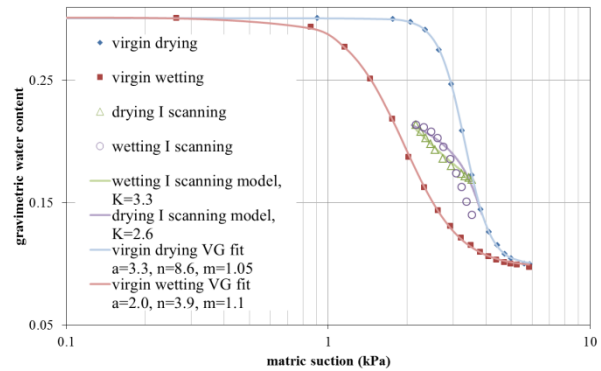


Figure 13. The proposed hysteresis model for scanning loop (experimental data from [17]), the R^2 values for wetting I and drying I scanning curves are 0.979 and 0.838, respectively.

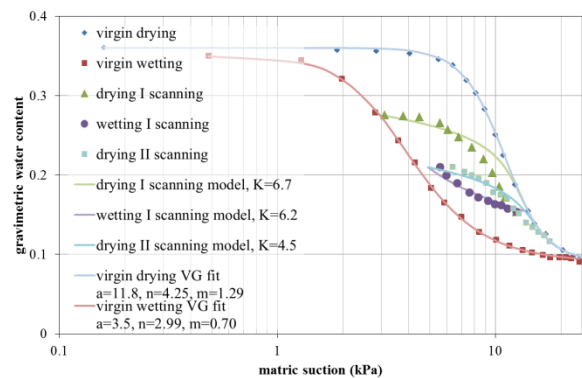


Figure 11. The proposed hysteresis model for scanning loop (experimental data from [17]), the R^2 values for drying I, wetting I and drying II scanning curves are 0.860, 0.908 and 0.901, respectively.

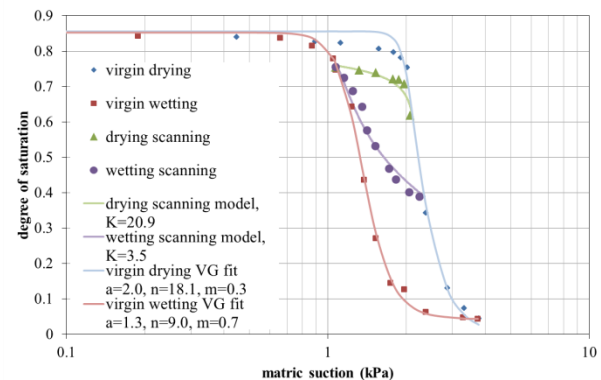


Figure 14. The proposed hysteresis model for a scanning loop (experimental data from [18]), the R^2 values for drying and wetting scanning curves are 0.979 and 0.934, respectively.

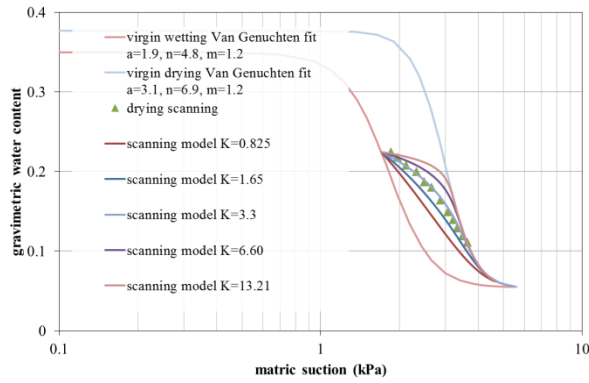


Figure 15. Sensitivity of scanning curves for parameter K (experimental data from [10]), the R^2 values for $K=0.825$, $K=1.65$, $K=3.3$, $K=6.6$ and $K=13.21$ are 0.548, 0.867, 0.980, 0.875 and 0.648, respectively.

The sensitivity of scanning curves to the power parameter K is investigated (Fig. 15). The variation of the power parameter, K only marginally changes the shape and accuracy of the generated scanning curves.

2.2. An Empirical Equation For Parameter K

The power parameter, K in the relations appears to depend on various properties, such as regime (drying or wetting), soil type and regime reversal water content (θ_{rr}). A relationship was found between the K and the ratio of the difference between θ_{rr} and the initial value of water content on the virgin curve of that regime direction (e.g. θ_{res} for wetting and θ_{sat} for drying) to the entire water content range of that virgin curve. An empirical equation based on this relationship was proposed to estimate K parameter for given soil (Fig. 16, Equ. 5-a for wetting regime and Equ. 5-b for drying

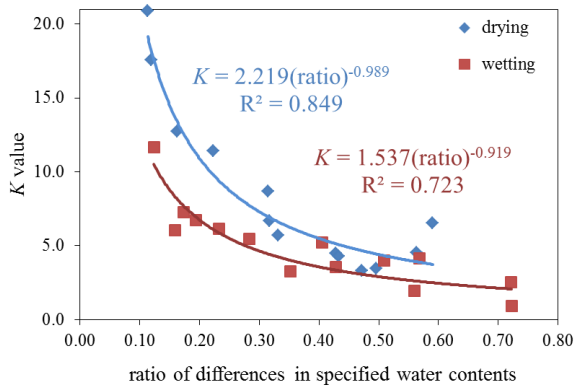


Figure 16. Proposed empirical equations for parameter K .

$$K = 1.537 \left(\frac{\theta_{rr} - \theta_{res}}{\theta_{max,w} - \theta_{res}} \right)^{-0.919} \quad (5-a)$$

$$K = 2.219 \left(\frac{\theta_{sat} - \theta_{rr}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} \right)^{-0.989} \quad (5-b)$$

regime). Therefore, proposed scanning curve equations only require the two virgin soil-water characteristic curves and regime reversal water content value.

2.3. Validation

The proposed scanning curve equations (Equ.3, Equ.4, Equ.5-a, Equ.5-b) were validated by employing empirical equation for K parameter to fit experimental data. R^2 values of both least square fitting and empirical equation based fitting were listed in Table 1. It is seen that results are very close to each other in general.

Table 1. Comparison of R^2 values of least square fitting and empirical equation based fitting.

Reference	Regime	R^2 value (least square)	R^2 value (empirical)
Fig.3, [10]	Wetting	0.917	0.897
Fig.3, [10]	Drying	0.890	0.875
Fig.4, [4]	Wetting	0.993	0.993
Fig.4, [4]	Drying	0.924	0.924
Fig.5, [11]	Drying I	0.970	0.969
Fig.5, [11]	Drying II	0.992	0.991
Fig. 6, [12]	Wetting I	0.889	0.748
Fig. 6, [12]	Wetting II	0.956	0.941
Fig.7, [13]	Wetting	0.991	0.990
Fig.7, [13]	Drying	0.980	0.951
Fig.8, [14]	Wetting	0.923	0.897
Fig.8, [14]	Drying	0.956	0.901
Fig. 9, [15]	Drying I	0.935	0.933
Fig. 9, [15]	Drying II	0.822	0.724
Fig.10, [16]	Wetting I	0.958	0.858
Fig.10, [16]	Wetting II	0.955	0.822
Fig.10, [16]	Wetting III	0.971	0.946
Fig.11, [17]	Drying I	0.860	0.859
Fig.11, [17]	Wetting I	0.908	0.899
Fig.11, [17]	Drying II	0.901	0.901
Fig.12, [17]	Wetting I	0.929	0.926
Fig.12, [17]	Drying I	0.787	0.780
Fig.12, [17]	Wetting II	0.899	0.884
Fig.13, [17]	Wetting I	0.979	0.951
Fig.13, [17]	Drying I	0.838	0.728
Fig. 14, [18]	Drying I	0.979	0.905
Fig. 14, [18]	Wetting I	0.934	0.933

3. CONCLUSION

A formulation for scanning curves was developed, based on interpolation over logarithmic scale of suction and a variable exponent (K) of water contents. An empirical equation for K was devised, based on calibration against experimental data found in several sources from the literature. Consequently, only virgin wetting and virgin drying SWCCs and the point of regime reversal suffice to define the scanning curve. Equations [2], [3] and [5-a] can be merged to model wetting regime scanning curve, whereas equations [4] and [5-b] together define the drying scanning curve. The proposed relations can be used in incremental form to predict changing suction in different frameworks (e.g. elastoplastic constitutive models, infiltration and evaporation models) and related physical problems.

REFERENCES

- [1] Miller, G.A., Khoury, C.N., Muraleetharan, K.K., Liu, C., and Kibbey, T.C.G. "Effects of soil skeleton deformations on hysteretic soil water characteristic curves: Experiments and simulations". *Water Res. Res.* 44, W00C06, (2008).
- [2] Lins, Y., Zou, Y., and Schanz, T. "Physical modelling of SWCC for granular materials". *Theoretical and numerical unsaturated soil mechanics*, Weimar, Germany, 61-74, (2007).
- [3] Hammervold, W.L., Knutsen, Ø., Iversen, J.E., and Skjæveland, S.M. "Capillary pressure scanning curves by the micropore membrane technique". *Journal of Petroleum Science and Engineering* 20: 253-258, (1998).
- [4] Viane, P., Vereecken, H., Diels, J., and Feyen, J. "A statistical analysis of six hysteresis models for the moisture retention characteristic". *Soil Sci.* 157: 345-355, (1994).
- [5] Watson, K.K., Reginato, R.J., Jackson, R.D. "Soil water hysteresis in a field soil". *Soil Sci. Soc. America J.* 157: 345-355, (1975).
- [6] Topp, G.C. "Soil water hysteresis in silt loam and clay loam soils". *Water Res. Res.* 7: 914-920, (1971).
- [7] Li, X.S. "Modelling of hysteresis response for arbitrary wetting/drying paths". *Computers and Geotechnics*, 32(2): 133-137, (2005).
- [8] Pedroso, D.M., and Williams, D.J. "A novel approach for modelling soil- water characteristic curves with hysteresis". *Computers and Geotechnics*, 37(3): 374-380, (2010).
- [9] Van Genuchten, M.T. "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898 ,(1980).
- [10] Lins, Y., Zou, Y., and Schanz, T. "Physical modelling of SWCC for granular materials". *Theoretical and numerical unsaturated soil mechanics*, Weimar, Germany, 61-74, (2007).
- [11] Talsma, T. "Hysteresis in two sands and the independent domain model". *Water Resources Research* 6(3): 964-970, (1970).
- [12] Poulouvassilis, A., and Childs, E.C. "The hysteresis of pore water: The non- indepencc of domains". *Journal of Soil Science*, 112(5): 301-312, (1971).
- [13] Sakai, M., and Toride, N. "Soil water hydraulic functions for sandy soil and an aggregated soil". *J. Jpn. Soc. Soil Ohys.*, 107: 63-77, (2007).
- [14] Dane, J.H., and Hruska, S. "In-situ determination of soil hydraulic properties during drainage". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 4: 619-624, (1983).
- [15] Haverkamp, R., Arrue, J.L., and Soet, M. "Soil physical properties within the root zone of the vine area of Tomelloso". Local and spatial standpoint, *In Final integrated report of EFEDA II (European Field Experiment in a Desertification Area) Spain*, Ed. J. F. Santa Olalla, CEE project n° CT920092, Brussels, chapter 3, (1997).
- [16] Gillham, R.W., Klute, A., and Heermann, D.F. "Hydraulic properties of a porous medium: Measurement and empirical representation." *Soil Science Society of America Journal*, 40: 203-207, (1976).
- [17] Huang, H.C., Tan, Y.C., Liu, C.W., and Chen, C.H. "A novel hysteresis model in unsaturated soil." *Hydrol. Processes* 19:1653-1665. doi:10.1002/hyp.5594, (2005).
- [18] Chen, P., Wei, C. F., and Ma, T. T. (2015). "Analytical model of soil-water characteristics considering the effect of air entrapment." *Int. J. Geomech.*, 10.1061/(ASCE)GM.



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



Soğuk metal transferi ile birleştirilen AA5754 alaşımı ince sacların korozyon davranışı

Corrosion behavior of AA5754 thin sheets welded with cold metal transfer method

Yazar(lar) (Author(s)): Hülya DURMUŞ¹, Nilay ÇÖMEZ²

ORCID¹: 0000-0002-7270-562X

ORCID²: 0000-0002-6432-6582

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Durmul H. ve Çömez N., “Soğuk metal transferi ile birleştirilen AA5754 alaşımı ince sacların korozyon davranışı”, *Politeknik Dergisi*, 21(4): 907-911, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.385926

Soğuk Metal Transferi ile Birleştirilen AA5754 Alaşımı İnce Sacların Korozyon Davranışı

Araştırma Makalesi / Research Article

Hülya DURMUŞ¹, Nilay ÇÖMEZ^{2*}

^{1,2}Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 17.08.2017 ; Kabul/Accepted : 02.10.2017)

ÖZ

AA5754 alüminyum alaşımı, otomobillerin iç ve dış panellerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, soğuk metal transferi (CMT) ile birleştirilen 2 mm kalınlığındaki AA5754 levhaların, kaynak işlemi sonrası korozyon hızının araştırılması amaçlanmıştır. Kaynak işlemi ER5356 dolgu teli kullanılarak 73.97, 86.18, 108.99 J/mm ısı girdisi değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Isı girdisinin korozyon hızına etkisi Tafel ekstrapolasyon yöntemi ile belirlenmiştir. Isı girdisinin artmasıyla korozyon hızının arttığı tespit edilmiştir. Korozyona uğramış yüzeyler taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: AA5754, CMT kaynağı, korozyon.

Corrosion Behavior of AA5754 Thin Sheets Welded with Cold Metal Transfer Method

ABSTRACT

AA5754 aluminium alloy are widely used in outer and inner panels of automobiles. Present study aimed to investigate the corrosion rate of cold metal transfer (CMT) welded 2 mm thick AA5754 sheets. Welded sheets were produced with 73.97, 86.18, 108.99 J/mm heat input values using ER5356 filler wire. Effect of heat input on corrosion rate was determined by Tafel extrapolation method. It was determined that corrosion rate increased with increasing heat input. Corroded surfaces were viewed by SEM. Hardness test was applied and maximum hardness values were observed in weld metal.

Keywords: AA5754, CMT welding, corrosion

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Daha az yakıt tüketen çevre dostu araçlar giderek önem kazanmaktadır. Bu gelişmeyi takiben, otomotiv üreticileri otomobillerin ağırlığını azaltmak için yoğun çaba harcamaktadırlar [1, 2]. Son zamanlarda, özellikle otomobil endüstrisinde AA5754 alüminyum alaşımı, hafifliği, yüksek özgül mukavemet ve kolay geri dönüşüm avantajlarından dolayı araçların ağırlığını azaltmak için yaygın olarak kullanılmaktadır [2, 3, 4].

Otomotiv endüstrisindeki hızlı gelişmeler, ince saclardan oluşan hafif yapıların mekanik özelliklerini iyileştirmek için yeni kaynak yöntemlerine olan ihtiyacı da artırmaktadır [5]. Günümüzde, ince sacların kaynağı için soğuk metal transferi (CMT) kaynağı, AC darbeleri ark ve darbeleri çift elektrot ark kaynağı gibi yöntemler önerilmektedir [6]. CMT yöntemi, otomotiv endüstrisinde (KIA, Opel, Volkswagen, Ford, BMW ve Volvo) ve havacılık endüstrisinde yoğun olarak kullanılmaktadır, çünkü düşük ısı girdisi ile farklı metallerin ve ince sacların estetik bir görünüme sahip olacak şekilde birleştirilmesine olanak tanımaktadır [7, 8]. CMT prosesi düşük akım, düşük voltaj ve düşük ısı girdisi ile karakterize edilmektedir ve kısa devre

(daldırma-dip transferi) modunda çalışmaktadır. Bununla birlikte malzeme transferi, daldırma transfer modunda elektriksel olarak kontrol edilirken, CMT prosesinde mekanik olarak desteklenen yöntemin yanı sıra hem kısa devrenin başlatılması hem de süresi ile kontrol edilmektedir. CMT yönteminin geleneksel gaz metal ark kaynağından en önemli farkı kaynak işleminin tamamen dijital kontrollü olmasıdır [9, 10].

Çeşitli kaynak yöntemleriyle birleştirilen AA5754 alaşımının mekanik özellikleri literatürde pek çok araştırmacı tarafından incelenmiştir [11, 12, 13]. Bununla birlikte AA5754 alaşımının kaynak işlemi sonrası korozyon davranışındaki değişim hakkında literatürde sınırlı sayıda bilgi bulunmaktadır. AA5754 alüminyum alaşımının korozyon özellikleri hakkındaki mevcut çalışmalar genellikle alaşımın kaynaklı durumuna aittir. Örneğin, Halambek ve ark. (2013), inhibitör Laurus nobilis L. yağının, %3 NaCl solüsyonunda AA5754 alüminyum alaşımının korozyonu üzerindeki etkisini araştırmışlardır [14]. Afseth ve ark. (2001), AA5754 alaşımının korozyon davranışı üzerine yüksek sıcaklıkta ısı işlem ve yüzey iyileştirmenin etkisini incelemişlerdir [15].

Kaynak işleminin, oluşan bağlantının korozyon davranışını etkilediği bilinmektedir. Bu çalışmada, CMT

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : nilay.comez@cbu.edu.tr

kaynak parametrelerinin AA5754 alaşımının korozyon davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

2 mm kalınlığında AA5754 (Çizelge 1) levhalar, aln pozisyonda soğuk metal transfer kaynağı ile Çizelge 2’de verilen parametrelerle birleştirilmiştir. Kaynak işlemi için 1.2 mm çapında ER5356 (Çizelge 1) dolgu teli kullanılmıştır.

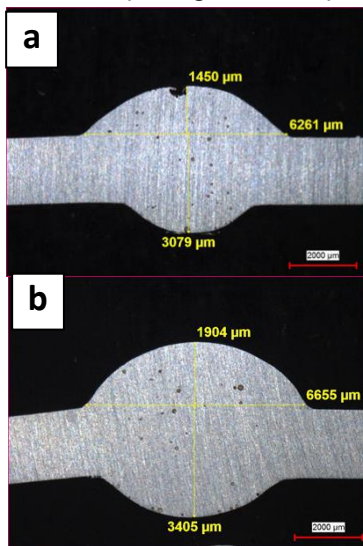
Numuneler parlatıldıktan sonra mikroyapısal incelemeler için Weck’s çözeltisiyle dağlanmıştır. Mikroyapı görüntüleri Clemex yazılımı kullanılarak Nikon Eclipse LV150 optik mikroskop ile çekilmiştir. CMT kaynaklı AA5754 alüminyum alaşımlarının oda sıcaklığında ağırlıkça %3.5’lik NaCl çözeltisindeki elektrokimyasal korozyon hızı, Tafel ekstrapolasyon yöntemi ile AutoLab korozyon test cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Korozyon testinden önce, düz bir yüzey elde etmek için kaynak dikişleri zımparalanmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

3.1. Mikroyapı İncelemeleri (Microstructural Investigations)

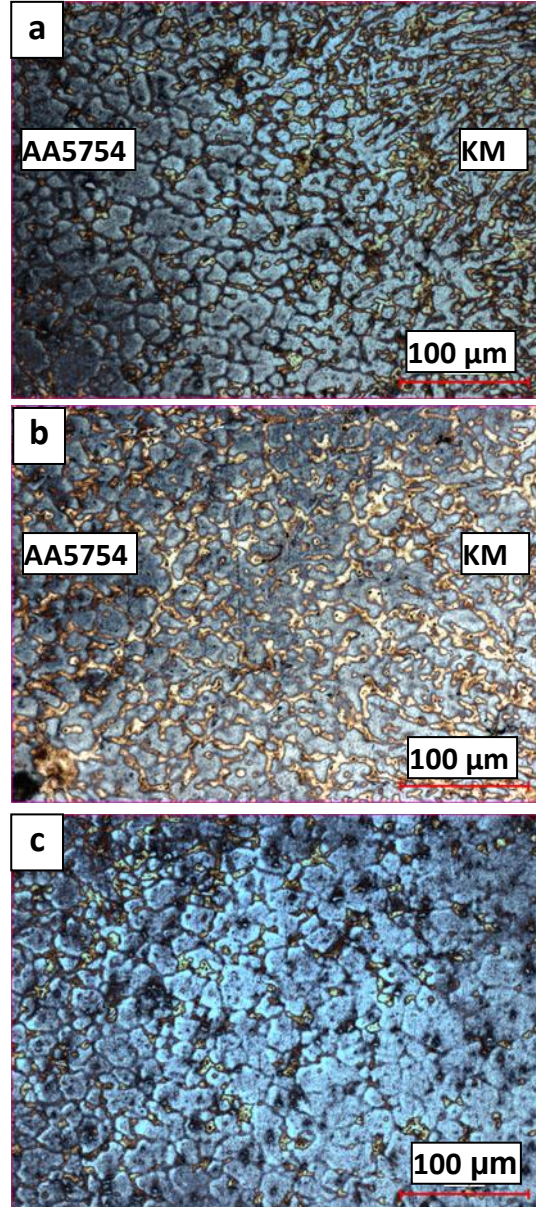
55-A ve 55-C numunelerinin kaynak dikiş geometrilerinin verildiği Şekil 1, ısı girdisinin kaynak dikiş boyutuna etkisini göstermektedir. 55-C numunesinde, kaynak dikişi genişliği ve yüksekliği 55-A numunesine kıyasla daha fazladır.

Şekil 2’de kaynaklı birleştirmelerin ve AA5754 ana metalinin mikro yapısı görülmektedir. Kaynak metali (KM)/ ana metal arayüzleri (Şekil 2a ve 2b), AA5754 ana metali (Şekil 2c) ile karşılaştırıldığında AA5754 ince saclarının CMT kaynağı sonrasında ısı tesiri altındaki bölgede tane kabalaşması gözlenmemiştir.



Şekil 1. Kaynak dikiş geometrisi: a) 55-A, b) 55-C (Weld bead geometry: a) 55-A, b) 55-C)

Kaynak metalinde az miktarda gözenek oluşumu gözlenmiştir (Şekil 3). Gözeneklilik, hidrojenin sıvı ve katı haldeki alüminyum içerisindeki çözünürlüğünde meydana gelen büyük değişimden kaynaklanır ve alüminyum alaşımlarının kaynağında yaygın bir sorundur. Hidrojen ergimiş haldeki alüminyumda yüksek bir çözünürlüğe sahipken, çözünürlük katılma oluştuğunda 20 kat azalmaktadır [16, 17, 18]. AA5754 ana malzemesinden alınan EDX analizinde, intermetalik parçacığın Al-Fe-Mn ve eser miktarda Si içerdiği görülmüştür (Şekil 3).



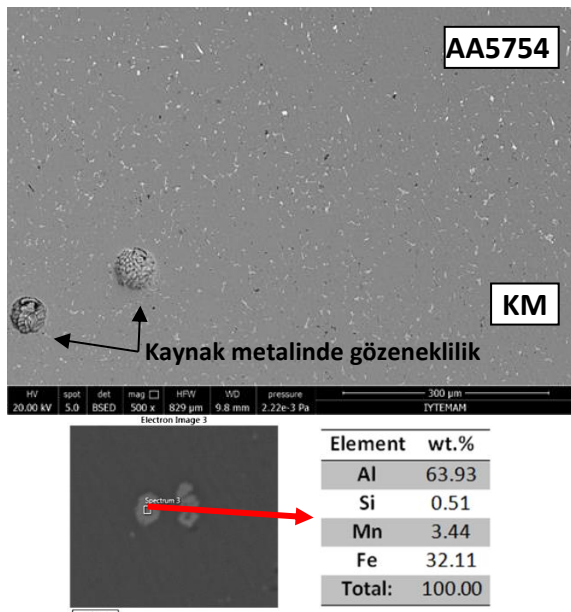
Şekil 2. Mikroyapı görüntüleri: a) 55-A, b) 55-C, c) AA5754 ana malzemesi (Images of microstructure: a) 55-A, b) 55-C, c) AA5754 base metal)

Çizelge 1. AA5754 alaşımının ve ER5356 kaynak telinin kimyasal kompozisyonu (% ağırlık) (Chemical compositions of AA5754 base metal and ER5356 filler wire (wt. %))

Element	Mg	Si	Cr	Cu	Fe	Zn	Mn	Ti	Al
AA5754	3.14	0.22	-	-	0.35	-	-	-	Rest
ER5356	5	0.1	<0.07	<0.01	<0.2	<0.03	<0.1	<0.06	

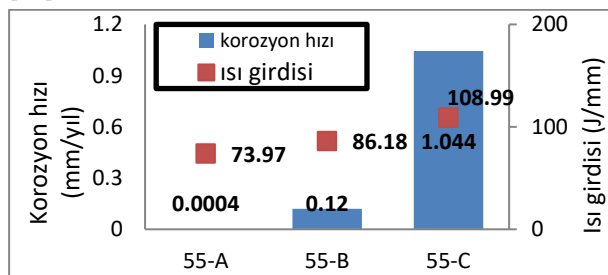
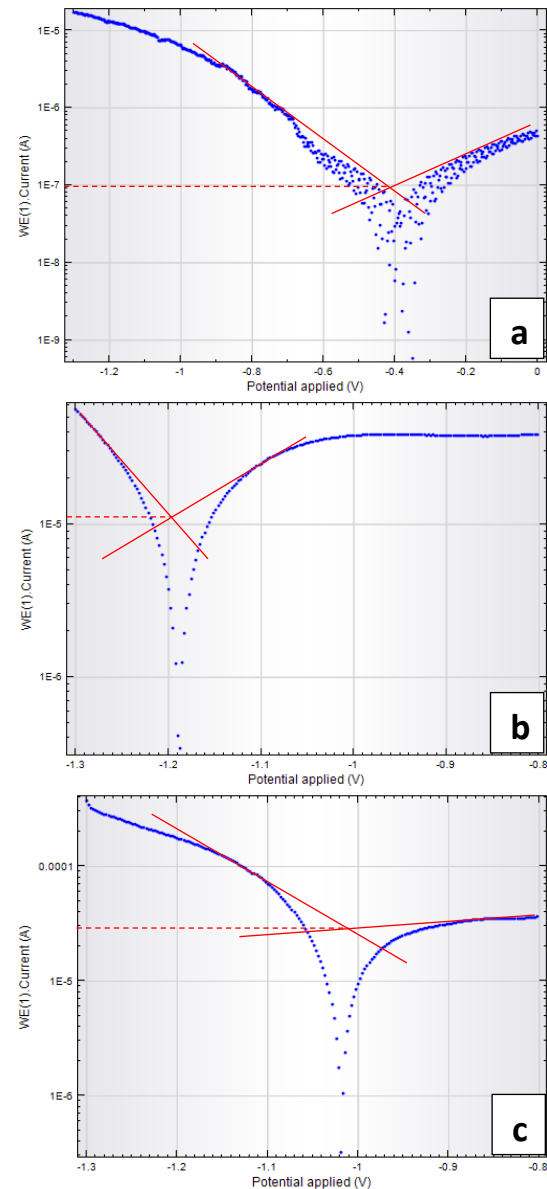
Çizelge 2. Kaynak parametreleri ve ısı girdisi (Welding parameters and heat input)

Numune	Akım (A)	Voltaj (V)	Kaynak hızı (m/min)	Isı girdisi (J/mm)
55-A	103	13.3	1	73.97
55-B	114	14	1	86.18
55-C	87	11.6	0.5	108.99

**Şekil 3.** 55-B numunesinin SEM görüntüsü ve intermetalik fazın EDX analizi (SEM image of 55-B and EDX analysis of intermetallic phase)

3.2. Korozyon Hızı (Corrosion Rate)

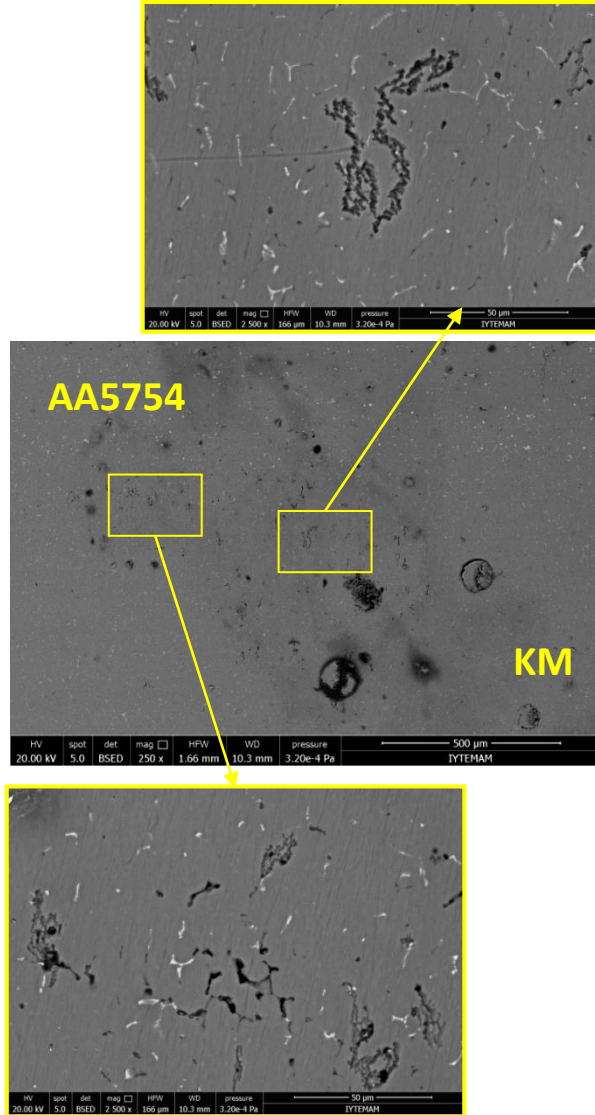
AA5754 gibi 5xxx serisi alaşımlarında ana metal, kısmi ergime bölgesi ve ergime bölgesi boyunca meydana gelen kompozisyon gradyanları demir ve mangan gibi yüksek ergime noktasına sahip safsızlıkların, yeni oluşan katı kaynak metalinden, katılaşmanın başlangıcındaki ergiye doğru itilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu durum, alaşımın korozyon davranışını değiştirmektedir [19].

**Şekil 4.** CMT kaynaklı AA5754 alaşımlarının ısı girdisi-korozyon hızı ilişkisi (Heat input-corrosion rate relation of CMT welded AA5754 alloy)**Şekil 5.** AA5754 kaynaklı bağlantıların Tafel eğrileri (Tafel plots of AA5754 joints)

Korozyon hızı ve ısı girdisi arasındaki ilişki Şekil 4'te verilmektedir. Buna göre artan ısı girdisinin korozyon direncini azalttığı görülmektedir. En düşük korozyon hızı 55-A numunesinde tespit edilirken, en yüksek ısı girdisi

ile üretilen 55-C numunesinde bu değer 1 mm/yıl değerini aşmıştır.

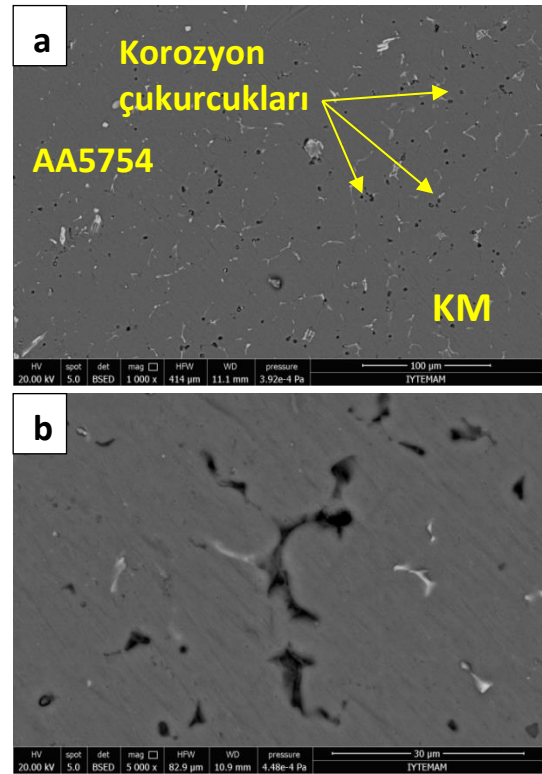
Tafel eğrileri incelendiğinde (Şekil 5), 55-A ve 55-B numunelerinin korozyon akım değerlerinin 55-C numunesinden daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu durum, korozyon hızının da daha düşük olacağına işaret etmektedir [20].



Şekil 6. 55-B numunesinin korozyona uğrayan yüzeyi (Corrosion surface of 55-B)

AA5754 ana malzemesinde meydana gelen korozyon çukurcuklarının, Şekil 3'te EDX analizi yapılan intermetalik parçacıklar etrafında meydana gelmesi beklenmektedir. Bununla birlikte, korozyonun tane sınırlarında meydana geldiği tespit edilmiştir (Şekil 6 ve Şekil 7). Magnezyum içeriğinin % 3-4'ü geçtiği Al-Mg alaşımlarında, β (Al_8Mg_5 ya da Al_3Mg_2) fazı, alüminyumca zengin α fazının tane sınırlarına küçük aralıklarla sürekli bir ağ oluşturarak çökeltme eğilimindedir. Özellikle alaşımın 400 °C üzerindeki sıcaklıklardan yavaş olarak soğuması, diğer bir deyişle uzun süre ısıya maruz kalması, β fazının tane sınırlarına çökeltmesini tetiklemektedir. β fazı, kendisini çevreleyen

α fazına göre elektrokimyasal olarak daha anodiktir ve deniz suyu gibi korozyon ortamlarında seçici korozyona uğramaktadır [14, 21, 22, 23, 24]. Özellikle ısı girdisinin yüksek ve kaynak dikişinin geniş olduğu 55-C numunesinde, Mg içeriği AA5754 ana malzemesine göre daha yüksek olan kaynak telinde, katılaşma esnasında anodik karakteristiğe sahip β fazının daha fazla çökeltmiş olduğu düşünülmektedir. Dolayısıyla, artan ısı girdisiyle genişleyen kaynak dikişi, korozyon ölçümü yapılan alandaki β fazı miktarını artırmaktadır ve yüksek ısı girdisi bu fazın çökeltmesi için gerekli sıcaklık koşullarının daha uzun süreli etki etmesini sağlamaktadır. Buna bağlı olarak da 55-C numunesinde korozyon hızının arttığı tahmin edilmektedir. Şekil 7a'da 55-C numunesinin korozyona uğrayan yüzeyinde çok sayıda çukurcuk olduğu görülmektedir. 55-A numunesinin hem kaynak dikişi daha dardır (Şekil 1) hem de düşük ısı girdisi sebebiyle daha az β fazı çökeceği düşünülmektedir. Bunun yanı sıra kaynak ısı düşük olduğunda katılaşma da nispeten hızlı gerçekleşeceğinden, kaynak metalinde korozyon davranışını olumsuz yönde etkileyen mikrosegregasyon oluşumu da azalacaktır. Bu sebeplerden dolayı 55-A numunesinde korozyon hızı çok düşüktür.



Şekil 7. 55-C numunesinin korozyona uğrayan yüzeyi: a) KM/AA5754 ana malzemesi arayüzeyi, b) kaynak metal (Corrosion surface of 55-C: a) interface of weld metal/AA5754 base metal, b) weld metal)

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

2 mm kalınlığındaki AA5754 alaşımından levhaların CMT kaynağı tam nüfuziyet sağlanarak başarılı bir

şekilde gerçekleştirilmiştir. Kaynak metalinde az miktarda gözenek oluşumuna rastlanmıştır. Isı girdisinin yükselmesi ile kaynak dikisinin boyutu artmıştır. Artan ısı girdisi, kaynaklı bağlantının korozyon direncini azaltmıştır. AA5754 alaşımının kaynak işlemi sonrasında yeterli korozyon direncine sahip olabilmesi için 85 J/mm ısı girdisinin altındaki değerlerde birleştirilmesi önerilmektedir. Ayrıca korozyon dayanımını azaltan β fazı oluşumunun sınırlandırılması için Mg içeriği daha düşük olan kaynak tellerinin kullanımı tavsiye edilmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Manisa Celal Bayar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından CBU-BAP 2014-109 numaralı proje ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Simoncini, M., Forcellese, A., "Effect of the welding parameters and tool configuration on micro-and macro-mechanical properties of similar and dissimilar FSWed joints in AA5754 and AZ31 thin sheets", *Materials & Design*, 41: 50-60, (2012).
- [2] Han, L., Thornton, M., Boomer, D., Shergold, M., "A correlation study of mechanical strength of resistance spot welding of AA5754 aluminium alloy", *Journal of Materials Processing Technology*, 211(3): 513-521, (2011).
- [3] Liu, A., Tang, X., Lu, F., "Study on welding process and prosperities of AA5754 Al-alloy welded by double pulsed gas metal arc welding", *Materials & Design*, 50: 149-155, (2013).
- [4] Jin, H., Saimoto, S., Ball, M., Threadgill, P. L., "Characterisation of microstructure and texture in friction stir welded joints of 5754 and 5182 aluminium alloy sheets", *Materials science and technology*, 17(12): 1605-1614, (2001).
- [5] Taşkın, M., Çalgülü, U., "AISI 430/1010 Çelik Çiftinin Lazer Kaynağında Kaynak Gücünün Birleşmeye Etkisi", *Firat University Journal of Engineering*, 21 (1): 11-22, (2009).
- [6] Kang, M., Kim, C., "Joining Al 5052 alloy to aluminized steel sheet using cold metal transfer process", *Materials & Design*, 81: 95-103, (2015).
- [7] Grzybicki, M., Jakubowski, J., "Comparative tests of steel car body sheet welds made using CMT and MIG/MAG methods", *Welding International*, 27(8): 610-615, (2013).
- [8] Cao, R., Sun, J. H., Chen, J. H., Wang, P., "Weldability of CMT Joining of AA6061-T6 to Boron Steels with Various Coatings", *Welding Journal*, 93: 193-204, (2014).
- [9] Kah, P., Suoranta, R., Martikainen, J., "Advanced gas metal arc welding processes", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(1-4): 655-674, (2012).
- [10] Rajeev, G. P., Kamaraj, M., Bakshi, S. R., "Al-Si-Mn Alloy Coating on Aluminium Substrate Using Cold Metal Transfer (CMT) Welding Technique", *JOM*, 66(6): 1061-1067, (2014).
- [11] Casalino, G., Mortello, M., Leo, P., Benyounis, K. Y., Olabi, A. G., "Study on arc and laser powers in the hybrid welding of AA5754 Al-alloy", *Materials & Design*, 61: 191-198, (2014).
- [12] Barlas, Z., Özsaç, U., "Effects of FSW Parameters on Joint Properties of AlMg3 Alloy", *Welding Journal*, 91: 16-22, (2012).
- [13] Costa, M. I., Verdera, D., Costa, J. D., Leitao, C., Rodrigues, D. M., "Influence of pin geometry and process parameters on friction stir lap welding of AA5754-H22 thin sheets", *Journal of Materials Processing Technology*, 225: 385-392, (2015).
- [14] Halambek, J., Berković, K., Vorkapić-Furač, J., "Laurus nobilis L. oil as green corrosion inhibitor for aluminium and AA5754 aluminium alloy in 3% NaCl solution", *Materials Chemistry and Physics*, 137 (3): 788-795, (2013).
- [15] Afseth, A., Nordlien, J. H., Scamans, G. M., Nisancioglu, K., "Influence of heat treatment and surface conditioning on filiform corrosion of aluminium alloys AA3005 and AA5754", *Corrosion Science*, 43 (12): 2359-2377, (2001).
- [16] Luijendijk, T., "Welding of dissimilar aluminium alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, 103(1): 29-35, (2000).
- [17] Maters, G. "The Welding of Aluminium and Its Alloys", Woodhead Publishing Limited, Cambridge, İngiltere, 2002.
- [18] Kumar, N. P., Vendan, S. A., & Shanmugam, N. S., "Investigations on the parametric effects of cold metal transfer process on the microstructural aspects in AA6061", *Journal of Alloys and Compounds*, 658: 255-264, (2016).
- [19] Abouarkoub, A., Thompson, G. E., Zhou, X., Scamans, G., "Microstructure and Corrosion Properties of the Plasma-MIG Welded AA5754 Automotive Alloy", *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 3: 318-325, (2015).
- [20] El-Etre, A. Y., "Inhibition of aluminum corrosion using Opuntia extract", *Corrosion Science*, 45(11): 2485-2495, (2003)
- [21] Katsas, S., Nikolaou, J., Papadimitriou, G., "Corrosion resistance of repair welded naval aluminium alloys", *Materials & Design*, 28(3): 831-836, (2007).
- [22] Ghali, E., "Corrosion resistance of aluminum and magnesium alloys: understanding, performance, and testing", Vol. 12, Revie, R. W., John Wiley & Sons, 2010.
- [23] Martienssen, W., Warlimont, H., "Springer handbook of condensed matter and materials data", Springer Science & Business Media, New York, 2006.
- [24] Vargel, C., "Corrosion of Aluminium", Elsevier, New York, 2004.



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



Kinetic studies of biogas generation using chicken manure as feedstock

Tavuk gübresi kullanılarak biyogaz üretiminde kinetik çalışmalar

Yazar(lar) (Author(s)): Ayşe Hilal ULUKARDEŞLER¹, Ferhan Sami ATALAY²

ORCID¹: 0000-0001-6563-5785

ORCID²: 0000-0001-8211-9635

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Ulukardeşler A.H., Atalay F.S., "Kinetic studies of biogas generation using chicken manure as feedstock", *Politeknik Dergisi*, 21(4): 913-917, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.389622

Kinetic Studies of Biogas Generation Using Chicken Manure as Feedstock

Araştırma Makalesi / Research Article

Ayşe Hilal ULUKARDEŞLER^{1*}, Ferhan Sami ATALAY²

¹Vocational School of Technical Sciences, Machinery and Metal Technologies Department, Uludag University, Turkey

²Faculty of Engineering, Chemical Engineering Department, Ege University, Turkey

(Geliş/Received : 19.08.2017 ; Kabul/Accepted : 15.11.2017)

ABSTRACT

The gas generated by anaerobic fermentation of organic wastes is called biogas. Since it contains methane, it can be burnt and so it can be used as an alternative energy source. The production of biogas is an anaerobic treatment process, it is important to understand the basic biochemistry and microbiology of anaerobic systems. This study demonstrates the kinetic study to find out the best microbial kinetics which will be necessary for the design of an anaerobic fermenter. For this purpose, chicken manure and chicken manure with inoculation culture were used. Experiments were operated under mesophilic conditions in laboratory type glass fermenters each having a volume of ten liters.

Keywords: Biogas, renewable energy, chicken manure, microbial kinetics.

Tavuk Gübresi Kullanılarak Biyogaz Üretiminde Kinetik Çalışmalar

ÖZ

Organik atıkların anaerobik fermentasyonu ile oluşan gazı biyogaz denir. Biyogaz, metan içerdiğinden yanabilir ve alternatif bir enerji kaynağı olarak kullanılabilir. Biyogaz üretimi bir anaerobik arıtma sürecidir, anaerobik sistemlerin temel biyokimyasını ve mikrobiyolojisini anlamak önemlidir. Bu çalışma bir anaerobik fermentörün tasarımı için gerekli olan en iyi mikrobiyal kinetiği bulmak için kinetik çalışmayı göstermektedir. Bu amaçla, aşı kültürü ile tavuk gübresi ve tavuk gübresi kullanılmıştır. Deneyler, her biri on litre hacimli laboratuvar tipi cam fermenterlerde mezofilik koşullar altında çalıştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Biyogaz, yenilenebilir enerji, tavuk gübresi, mikrobiyal kinetik

1. INTRODUCTION

The energy crisis in the last years resulted in the growth of researches and applications on the new energy sources. So, for the past two decades, many researches have been studied rapid depletion of fossil fuel resources and gradual climate changes resulted from excessive greenhouse gases emissions have increasingly attracted people's attention, worldwide [1]. In today's energy demanding life style, need for exploring and exploiting new sources of energy which are renewable as well as eco-friendly is a must [2]. Biogas production and utilisation is an emerging alternative energy technology [3]. Biogas is produced in different environments, e.g., in landfills, sewage sludge and biowaste digesters during anaerobic degradation of organic material [4]. Anaerobic digestion converts plant biomass, crop residues, animal manures, and other organic wastes into methane-rich biogas, which is widely used as a source of renewable energy [5]. Methane, which is the main component of biogas, is a valuable renewable energy source, but also a harmful greenhouse gas if emitted into the atmosphere.

Methane, upgraded from biogas, can be used for heat and electricity production or as biofuel for vehicles to reduce environmental emissions and the use of fossil fuels [4].

Biogas generally contains between 40% and 70% methane, with the balance of the gas consisting of carbon dioxide and anywhere from 100 to more than 3000 ppmv of hydrogen sulphide (H₂S). Owing to the high levels of methane, biogas can be used as a heating fuel, and can even be used in an engine to generate electricity [6]. This process can be carried out at two different temperature ranges, namely mesophilic (35-40°C) and thermophilic (55-60°C) [7]. Conventional anaerobic digestion is carried out at mesophilic temperatures, that is, 35-37°C. Although thermophilic temperature range is worth considering because it will lead to give faster reaction rates, higher gas production, and higher rates of the destruction of pathogens and weed seeds than the mesophilic temperature range, it is more sensitive to environmental changes than the mesophilic process [8].

In order to fully model the anaerobic digestion process, the kinetics of bacterial growth, substrate degradation and product formation have to be taken account [9]. Markowski et al., used the Monod approach to find the

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : ahulukardesler@gmail.com

optimal diameter of the two cylinder-separated stages of the reactor that maximizes the amount of biogas produced per unit of time [10]. Mathematical model based on the kinetic parameters obtained from the growth kinetics of separated acidogenic and methanogenic bacterial consortia has been developed by Biswas et al. [11]. Some researchers studied the chemical kinetics of the biogas production. Yusuf and Ify developed the chemical kinetics of biogas yield from the co-digestion of cow dung and water hyacinth. The use of first order kinetics and maximum biogas yield in reactor design may compliment other design approach available in literature [12]. Kinetic modeling revealed the reaction to generally proceeds by first order kinetics with respect to the substrate concentration was studied by Abdullahi et al. They obtained that, rise in both temperature and seeding parameters enhanced biogas production, with temperature effect outweighing by at least 25 % [13]. For the biogas fermentation co digestion salvinia molesta and rice straw in a batch anaerobic digesters at mesophilic range, Cone model was used to design the anaerobic batch digester volume and develop the kinetic model of volatile solid degradability rate by Syaichurrozi [14].

In present study, biogas production from chicken manure was investigated. Microorganism growth kinetics and substrate consuming and gas production rates should be determined to design an anaerobic fermenter. So, in order to obtain kinetic model of the microorganisms, the results of the experiments done with chicken manure and chicken manure with inoculation culture were tested to the six different microbial kinetics indicated in literature. The best fitted model relating the specific growth rate of microorganisms was determined by using nonlinear regression method.

2. MATERIAL and METHOD

The laboratory set up is consisted of a rectangular prism heating room, control elements and fermenters. An agitation system has two electrical motors and constructed to mix the fermenter contents. The compositions of the produced biogas was measured using infra-red gas analyzer purchased from Geotechnical Instruments, U.K. The details of the experimental set-up can be found in literature [15,16].

During the experiments chicken manure and chicken manure mixed with inoculation culture was used as organic matter. Inoculation culture was maintained from an anaerobic wastewater treatment system of a yeast

factory in Izmir. The amount of produced biogas and its compositions were recorded daily. By this way, the produced biogas amount in grams were calculated with respect to time. Standard methods given in literature [17] were used to calculate the initial substrate (S₀) and microorganism (X₀) amounts, as the organic contents of solid waste and inoculum sludge. The operating conditions and the calculated values was given in Table 1.

3. KINETIC STUDY (MICROORGANISM GROWTH KINETICS)

There exist two ways to investigate the kinetics of microorganisms growth. First one is measuring the substrate concentrations during experiment [18]. However, measuring substrate concentration is bothering and requires long time. Second way is measuring the gas production rates during experiments. This method is easier then the first one and also measuring time is shorter [16]. Firstly material balances should be written around the batch fermenter.

Microorganism Balance: Accumulation=Net growth;

$$\frac{dX}{dt} = \mu X \tag{1}$$

Substrate Balance: $\frac{dS}{dt} = -\text{consumed} \tag{2}$

Substrate consumption rate can be written using the growth yield constant for microorganisms as follows:

$$-\frac{dS}{dt} = \frac{\mu X}{Y} \tag{3}$$

Then by using Equations 1 and 3

$$Y = -\frac{dX}{dS} \tag{4}$$

is obtained.

After Equation (4) is integrated using initial conditions and applying total material balance, Equation (5) is obtained. The details of the calculations can be found in literature [9, 10].

$$\frac{dS}{dt} = -\alpha \frac{dG}{dt} \tag{5}$$

The specific growth rate equations used in modeling studies are given in Table 2. An example of the procedure in the development of the mathematical models is given step by step in [16]. Equation (6) is derived for the mass gas production rate of Contois Equation and it includes three kinetic parameters (μ_m, B, K).

Table 1. Specifications of manure and inoculation culture

Material	Volume (L)	Inoculation (mL)	Dry Solid (%)	Organic Dry Solid (%)	S ₀ (g)	X ₀ (g)
Chicken manure	7	-	26.975	33.7	281.77	-
Inoculation	7	20	10.9	51.42	281.77	1.121

$$\frac{dG}{dt} = \frac{1}{Y\alpha} \left[\frac{\mu_m (S_0 - \alpha G)(X_0 + Y\alpha G)}{BX_0 + S_0 + \alpha G(K-1)} \right] \quad (6)$$

manure was calculated using the volumetric gas production rates for the experiments. Gas production rate (dG / dt) is calculated by taking the first derivative G using the method of numerical differentiation. The results

Table 2. Specific growth rate (model) and derived equations

Name	Model	Derived equation
Monod Equation	$\mu = \mu_m S(K_s + S)^{-1}$	$\frac{dG}{dt} = \frac{\mu_m (S_0 - \alpha G)(X_0 + Y\alpha G)}{Y\alpha(K_s + S_0\alpha G)}$
Monod Equation With Decay Rate	$\mu = [\mu_m S(K_s + S)^{-1} - b]$	$\frac{dG}{dt} = \frac{1}{Y\alpha} \left[\frac{\mu_m (S_0 - \alpha G)}{K_s + S_0 - \alpha G} - b \right] (X_0 + Y\alpha G)$
Contois Equation	$\mu = \mu_m S(BX + S)^{-1}$	$\frac{dG}{dt} = \frac{1}{Y\alpha} \left[\frac{\mu_m (S_0 - \alpha G)(X_0 + Y\alpha G)}{BX_0 + S_0 + \alpha G(K-1)} \right]$
Contois Equation With Decay Rate	$\mu = [\mu_m S(BX + S)^{-1} - b]$	$\frac{dG}{dt} = \frac{1}{Y\alpha} \left[\frac{\mu_m (S_0 - \alpha G)}{BX_0 + S_0 + \alpha G(K-1)} - b \right] (X_0 + Y\alpha G)$
Substrate Inhibition	$\mu = \mu_m [1 + (K_s / S) + (S / K_i)]^{-1}$	$\frac{dG}{dt} = \frac{\mu_m}{Y\alpha} \left[\frac{X_0 + Y\alpha G}{1 + \frac{K_s}{S_0 - \alpha G} + \frac{S_0 - \alpha G}{K_i}} \right]$
Substrate Inhibition With Decay Rate	$\mu = \mu_m [1 + (K_s / S) + (S / K_i)]^{-1} - b$	$\frac{dG}{dt} = \frac{1}{Y\alpha} \left[\frac{\mu_m}{1 + \frac{K_s}{S_0 - \alpha G} + \frac{S_0 - \alpha G}{K_i}} - b \right] (X_0 + Y\alpha G)$

4. RESULTS and DISCUSSION

The model equations for gas production for all specific growth rates presented in Table 2 are derived by using the same method and can be seen also in Table 2. The mass of gas produced by the fermentation of chicken

were applied to the model equations presented in Table 2 using nonlinear regression technique and the best fit model relating the specific growth rate of microorganism for each waste was determined. The results of the modeling studies and the kinetic parameters obtained from the best model equation for the waste are presented

Table 3. The kinetic parameters calculated for the best fit model equations.

Waste	Best fit model equation	Kinetic parameters						
		α	μ_m	B	K	b	K_s	K_i
Chicken manure	Contois equation with decay rate	7	0.3	15	1	0.5	-	-
Chicken manure with inoculation	Substrate inhibition	7	0.7	-	-	-	236.91	100

in Table 3. Figure 1 and Figure 2 shows the results of the experimental study and model equations for the best fitted models.

AVI-CT94-0005 entitled on “Integrated Concept For The Fermentation Of Sewage Sludge And Organic Waste As A Source Of Renewable Energy And For The Use Of The

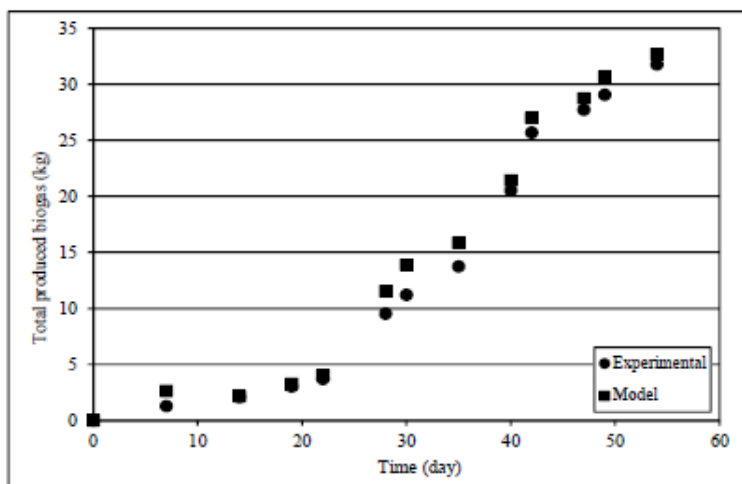


Figure 1. Results of the experimental study and model equation for chicken manure.

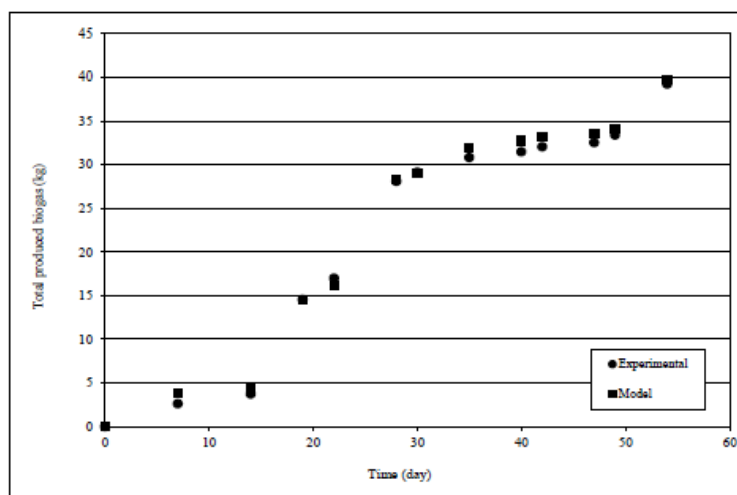


Figure 2. Results of the experimental study and model equation for chicken manure with inoculation rate

5. CONCLUSION

In order to investigate the correlations between substrate concentrations and gas production rates, the equations presented in Table 2 were derived. For the organic matters used in the experiments which were chicken manure and chicken manure with inoculation culture the kinetic models were determined. For chicken manure Contois equation with decay rate was obtained as best fitted model whereas for chicken manure with inoculation culture substrate inhibition was obtained. Degree of integration between the experimental and model results were quite well as shown in Figure 1 and Figure 2. Also, related kinetic parameters were calculated.

ACKNOWLEDGEMENT

This study was held at Ege University, Chemical Engineering Department, Izmir-Turkey. This project,

Fermented Product As A Hygienic Fertilizer And Soil Improver” was supported by European Community.

NOMENCLATURE

B	coefficient of Contois Equation	(-)
K_i	inhibition coefficient	(g/L)
K_s	saturation concentration	(g/L)
S	substrate concentration	(g/L)
X	microorganism concentration	(g/L)
Y	growth yield of microorganism	(g/g)

Greek Letters

μ	specific growth rate of
-------	-------------------------

	microorganism	(day ⁻¹)
μ_m	maximum specific growth rate	(day ⁻¹)

REFERENCES

- [1] Chang, I.S., Zhao, J., Yin, X., Wu, J., Jia, Z. and Wang, L., "Comprehensive utilizations of biogas in Inner Mongolia", *Renew. and Sust. Energy Rev.*, 15: 1442-1453, (2011).
- [2] Yadvika, Santosh, Sreekrishnan, T.R., Kohli, S. and Rana, V., "Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques-a review", *Bioresour. Technol.*, 95: 1-10, (2004).
- [3] Makaruk, A., Miltner, M. and Harasek, M., "Membrane biogas upgrading processes for the production of natural gas", *Sep. Pur. Tech.*, 74: 83-92, (2010) .
- [4] Rasi, S., Veijanen, A. and Rintala, J., "Trace compounds of biogas from different biogas production plants", *Energy*, 32: 1375-1380, (2007).
- [5] Wang, X., Yang, G., Feng, Y., Ren, G. and Han, X., "Optimizing feeding composition and carbon-nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw", *Bioresour. Technol.*, 120: 78-83, (2012).
- [6] White, A.J., Kirk, D.W. and Graydon, J.W., "Analysis of small-scale biogas utilization systems on Ontario cattle farms", *Renew. Energy.*, 36: 1019-1025, (2011).
- [7] Fezzani, B. and Cheikh, R.B., "Two-phase anaerobic co-digestion of olive mill wastes in semi-continuous digesters at mesophilic temperature", *Bioresour. Technol.*, 101(6): 1628-1634, (2010).
- [8] Kim, J.K., Oh, B.R., Chun, Y.N. and Kim, S.W., "Effects of temperature and hydraulic retention time on anaerobic digestion of food waste", *J. Biosci. Bioeng.*, 102(4): 328-332, (2006).
- [9] Kythreotou, N., Florides, G. and Tassou, S.A., "A review of simple to scientific models for anaerobic digestion", *Renew. Energy*, 71: 701-714, (2014).
- [10] Markowski, M., Bialobrzeski, I., Zielinski, M., Debowski, M. and Krzemieniewski, M., "Optimizing low-temperature biogas production from biomass by anaerobic digestion", *Renew. Energy*, 69: 219-225, (2014).
- [11] Biswas, J., Chowdhury, R. and Bhattacharya, P., "Kinetic studies of biogas generation using municipal waste as feed stock", *Enzyme Microb. Technol.*, 38: 493-503, (2006).
- [12] Yusuf, M.O.L. and Ify, N.L., "The effect of waste paper on the kinetics of biogas yield from the co-digestion of cow dung and water hyacinth", *Biomass Bioenergy.*, 35: 1345-1351, (2011).
- [13] Abdullahi, I., Ismail, A., Musa, A. O. and Galadima, A., "Effect of kinetic parameters on biogas production from local substrate using a batch feeding digester", *Eur. J. Sci. Res.*, 57(4): 626-634, (2011).
- [14] Syaichurrozi, I., "Biogas production from co-digestion salvinia molesta and rice straw and kinetics", *Renew. Energy.*, 115: 76-86, (2018).
- [15] Yilmaz, A.H., "Fermentation of organic solid wastes as a source of renewable energy and the use of the product as fertilizer", *MSc. Thesis*, Ege University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, (1998).
- [16] Yilmaz, A.H. and Atalay, F.S., "Modeling of the anaerobic decomposition of solid wastes", *Energy Source*, 25: 1063,1072, (2003).
- [17] Eaton, A. D., Clesceri, L.S. and Greenberg, A.E., "Standard methods for the examination of water and wastewater", *Water Environment Federation*, 2: 3-58, (1995).
- [18] Beba, A. and Atalay, F.S., "Mathematical models for methane production in batch fermenters", *Biomass*, 11: 173-184, (1986).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



The analysis of inhomogeneous barrier height in In/SnTe/Si/Ag diode

In/SnTe/Si/Ag diyotunda homojen olmayan engel yüksekliği analizi

Yazar(lar) (Author(s)): Hasan Hüseyin GÜLLÜ¹, Dilber Esra YILDIZ²

ORCID¹: 0000-0001-8541-5309

ORCID²: 0000-0033-2212-199x

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Güllü, H.H. and Yıldız, D.E., “The analysis of inhomogeneous barrier height in In/SnTe/Si/Ag diode”, *Politeknik Dergisi*, 21(4): 919-925, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.389625

The Analysis of Inhomogeneous Barrier Height in In/SnTe/Si/Ag Diode

Araştırma Makalesi / Research Article

Hasan Hüseyin GÜLLÜ^{1,2}, Dilber Esra YILDIZ^{3,*}

¹Central Laboratory, Middle East Technical University, Ankara, Turkey

²Center for Solar Energy Research and Applications (GÜNAM), Middle East Technical University, Ankara, Turkey

³Faculty of Arts and Science, Department of Physics, Hitit University, Çorum, Turkey

(Geliş/Received : 02.10.2016 ; Kabul/Accepted : 26.08.2017)

ABSTRACT

SnTe thin film layer was fabricated by magnetron sputtering technique on n-Si substrate, and the electrical properties of the In/SnTe/Si/Ag diode structure was investigated by using temperature dependent forward bias current-voltage (I-V) measurements. The main diode parameters were calculated according to the thermionic emission (TE) model and they were found in an abnormal behavior with change in temperature in which zero-bias barrier height (Φ_{B0}) increases and ideality factor (n) decreases with increasing temperature. Therefore, the total current flow through the junction was expressed by the Gaussian distribution (GD) of barrier height. The plot of Φ_{B0} vs $q/2kT$ showed the existence of inhomogeneous barrier formation and evidence for the application of Gaussian function to identify the distribution of low barrier height patches. The mean barrier height was found as 1.274 with the 0.166 eV standard deviation. From the modified Richardson plot, Richardson constant was calculated as $119.5A/cm^2K^2$ in very close agreement with the reported values. Additionally, the effects of the series resistance (R_S) were analyzed by using Cheung's function. Distribution of the interface states (D_{it}) were extracted from the I-V characteristics and found in increasing behavior with decreasing temperature.

Keywords: Sputtering technique, barrier height, Gaussian distribution, interface states.

In/SnTe/Si/Ag Diyotunda Homojen Olmayan Engel Yüksekliği Analizi

ÖZ

SnTe ince film katmanı magnetron saçırma tekniği ile n-Si alttaş üzerine büyütüldü, ve In/SnTe/Si/Ag diyot yapısının elektriksel özellikleri, sıcaklık bağımlı düz besleme akım-voltaj (I-V) ölçümleri kullanılarak incelendi. Temel diyot parametreleri termiyonik emisyon (TE) modeli temel alınarak hesaplandı ve sıcaklık artışı ile sıfır-potansiyel engel yüksekliğinin (Φ_{B0}) artışı ve idealite faktörünün (n) azalışı gibi ideal olmayan bir davranışta oldukları bulundu. Bu nedenle, eklemdeki toplam akım iletimi, engel yüksekliğinin Gauss dağılımı (GD) ile açıklandı. Φ_{B0} vs $q/2kT$ eğrisi, yapıdaki homojen olmayan engel oluşumunu ve GD kullanılarak düşük bariyerli local bölgelerin dağılımının açıklanabileceğini gösterdi. 0.166 eV standart sapma ile birlikte ortalama engel yüksekliği 1.274 eV olarak bulundu. Etkin Richardson eğrisinden, Richardson sabiti, literatürdeki değerlere yakın bir şekilde, $119.5A/cm^2K^2$ olarak hesaplandı. Ayrıca, Cheung fonksiyonu kullanılarak yapıdaki seri direnç (R_S) etkisi analiz edildi. Arayüzey durumların yoğunluğu (D_{it}) diyot yapısının I-V karakteristiğinden elde edildi ve azalan sıcaklık değerlerine göre artış yönünde bir davranış gösterdiği bulundu.

Anahtar Kelimeler: Saçırma tekniği, engel yüksekliği, Gauss dağılımı, arayüzey durumları

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

In recent years, chalcogenide Sn-based thin film structures have attracted considerable interest due to their promising properties in a wide range of device applications including microelectronics, batteries and photovoltaics [1, 2]. Especially, these binary IV-VI compounds have been point of interest due to their electrical and optical properties. Although there are standard current-voltage (I-V) analysis under the consideration of determining intrinsic and contact parameters of Si-based diode structures, SnS, SnSe and SnTe have generated a great deal of interest as an

important narrow band gap IV-VI layered compounds for efficient solar energy conversion through solar cells [5,6]. According to the concern in supply of constituent elements in large scale applications, their major advantage is the abundance of Sn [7]. Among these new compounds (SnSe and SnS), for efficient solar energy conversion through solar cells, SnTe have a great potential in device applications to construct high-performance, broadband photodetectors with a spectrum range from ultraviolet to infrared [8]. Although SnTe thin film layer can be evaluated as a candidate on photovoltaic device applications with its large photocurrents responsivity, it has been popular as a topological crystalline insulator in photodetectors for near-infrared detection [8-10].

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : desrayildiz@hitit.edu.tr

In this work, SnTe thin film layer was deposited on mono-crystalline n-Si wafer substrate by magnetron sputtering technique. Since Si has been widely used in photovoltaic devices, photodetectors, and imaging devices, In/SnTe/Si/Ag structure was introduced as a preliminary step toward forming a SnTe-based diode. In a better understanding of electrical properties of this structure, experimental investigation was focused on the temperature dependence of I-V characteristics of In/SnTe/Si/Ag structure.

2. MATERIAL and METHOD (MATERYAL VE METOD)

The In/SnTe/Si/Ag structure was fabricated by sputtering of SnTe film layer on 600 μm thick, (111) oriented n-type (P-doped) crystalline Si wafer with the resistivity value of 1-10 ($\Omega\text{-cm}$). Before deposition processes, Si substrates were chemically etched to remove native oxide and then rinsed in deionized water. The back ohmic contact on the Si wafer was formed by elemental Ag evaporation onto the whole back surface of the wafer and subsequent annealing treatment at 450°C under the nitrogen atmosphere. The SnTe film was deposited on n-Si wafer substrate using RF magnetron sputtering system from a high-purity SnTe target. During the deposition process, the substrate temperature was kept constant at 200°C and the deposition rate was controlled at around 1.0 $\text{\AA}/\text{s}$. The rate and thickness values were monitored and controlled by Inficon XTM/2 deposition monitor and the final thickness was measured by Veeco Dektak 6M thickness profilometer. Atomic composition of the film layer was determined by Quanta 400 FEG model scanning electron microscope (SEM) equipped with energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) system. The surface morphology of thin films was monitored by means of AFM analysis using Veeco Multimode V. Electrical characteristics of the film was evaluated by using Keithley 2400 sourcemeter to apply bias voltage and also to measure the resultant current.

In addition, a shadow mask in circular dot contact shape

100°C under the nitrogen atmosphere. The diode characteristics were analyzed by temperature dependent I-V using a Keithley 2401 sourcemeter as a source/measure unit and CTI-Cryogenics Model 22 refrigerator system combined with Model SC helium compressor to scan the diode temperature from 220 to 360 K with the help of Lakeshore DRC-91C controller.

3. RESULTS AND DISCUSSION (SONUÇLAR VE TARTIŞMA)

From EDS analysis, the chemical composition of the film confirms the presence of Sn and Te in the structure with a stoichiometric composition in 1:1 ratio of component elements. The final thickness of the deposited film layer was measured by profilometer and it was found as about 350 nm. AFM morphological surface characterization is used to study the surface of the thin film and it was observed as being a smooth, compact, and densely packed morphology. In addition, AFM imaging reveals that the root-mean-square (RMS) roughness of the film surface was about 1.66 nm. From the XRD spectrum of the film, deposited film layer was found in polycrystalline structure along (111) orientation direction exhibiting cubic crystal geometry [9]. Applying four-point probe technique, I-V measurements at room temperature showed that the deposited film layer is in high resistive characteristics with the value of about $10^2 \Omega\text{-cm}$.

The experimental forward and reverse bias I-V characteristics of the In/SnTe/Si/Ag diode carried out at the ambient temperature range of 220-360 K under dark condition is presented as semi-logarithmic I-V plot in Fig.1.

I-V measurements are used in order to investigate the rectifying behavior of the fabricated diode, determine the main diode parameters and identify the conduction mechanisms in current transport through the junction. From Fig.1, the rectifying behavior in I with V can be evaluated as an indication of a typical junction diode [11]

Table 1. Calculated diode parameters of In/SnTe/Si/Ag diode by using TE model

Temperature (K)	Ideality factor (n)	Saturation current (I_0)	Barrier Height (Φ_{B0})
360	1.928	6.39×10^{-7}	0.827
340	2.080	3.05×10^{-7}	0.799
320	2.440	8.67×10^{-8}	0.783
300	3.350	4.70×10^{-8}	0.747
280	3.926	4.22×10^{-8}	0.696
260	4.196	2.11×10^{-8}	0.659
240	5.096	1.88×10^{-8}	0.607
220	5.769	1.23×10^{-8}	0.561

of 2 mm diameter was used to deposit 200 nm In top contact layer onto SnTe film surface by thermal evaporation; then the complete structure was annealed at

and these characteristics show about two order in magnitude of rectification factor (ratio of forward to reverse current).

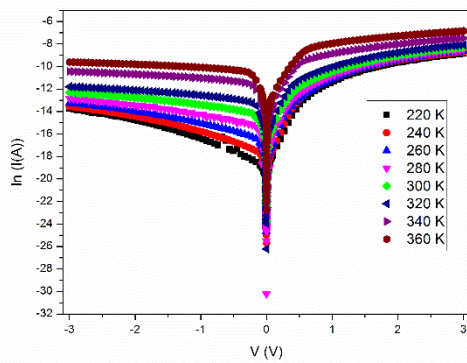


Figure 1. Semi-logarithmic I-V plots of In/SnTe/Si/Ag diode at different ambient temperatures

The current through the junction barrier at forward bias region can be expressed with the deviation from ideality as;

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \tag{1}$$

where I_0 is the reverse-saturation current, q is the electronic charge, V is the voltage value in the forward bias region, k is the Boltzmann constant, n is the ideality factor and T is the diode temperature. This expression was applied in the case of $V > 3kT/q$ in order to neglect the reverse current contribution [12]. According to the thermionic emission (TE) theory, unity in n corresponds to the ideal case, on the other hand, a deviation from pure TE model is usually observed in which $n > 1$ indicates the contribution of the other conduction mechanisms to the carrier transport in the junction region.

The temperature dependent I-V analysis was carried out under the assumption of predominant effect of TE to determine the diode parameters of the In/SnTe/Si/Ag diode, as Φ_{B0} , n and I_0 , as a function of temperature. Therefore, I_0 values were calculated at forward bias region under the assumption of homogeneous barrier height as,

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_{B0}}{kT}\right) \tag{2}$$

where A is the effective diode area and A^* is the effective Richardson constant, Φ_{B0} is the barrier height at zero bias point. With TE assumptions on I-V behavior, A^* can be described according to the nearly free electrons in vacuum and it is reported as $112 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$ for n-Si [11]. By using Eq.2, I_0 values were obtained from the straight line intercept value of $\ln(I)$ at zero-applied voltage for each temperature step and tabulated in Table 1.

Based on TE model, the apparent Φ_{B0} values were estimated at each temperature according to the Richardson constant of n-Si layer from Eq.2. As listed in Table 1, these values show an abnormal behavior in which they are directly proportional to change in temperature. This temperature dependence indicates the

inhomogeneous barrier formation in the diode, and the current flow can be explained by the existence of low barrier height patches [13,14]. In this case, charge carriers gain enough energy to overcome the higher barrier with increase in ambient temperature whereas they can pass over the lower barriers that triggers the current flow through patches having lower barrier height [15]. Therefore, this barrier differences over the whole temperature can be explained with TE modified under the consideration of barrier inhomogeneity.

n is evaluated as an expression of the barrier in the diode structure which is expected to be uniform for homogenous barrier formation and increases for an inhomogeneous barrier [16]. According to the Eq.1, it can be written as,

$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{dV}{d\ln(I)} \right) \tag{1}$$

The values were calculated from the slope of the linear region of the forward bias semi-logarithmic I-V plot, and found as to be greater-than-unity which indicates non-ideal diode behavior deviated from TE (Table 1). The high value of n can be attributed to presence of a particular distribution of interface states localized at the junction interface and barrier inhomogenities with a wide distribution of low barrier patches [15, 17]. Consideration of the deformation of the barrier distribution and thus modifying TE model can explain the behavior of n with temperature.

The higher values of n can be evaluated as a result of the deformation of spatial barrier distribution when a bias voltage is applied and related to this fact, a linear correlation between Φ_{B0} and the n dependent on temperature as shown in Fig.2 [18]. As listed in Table 1, Φ_{B0} decreases and n increases, with increase in temperature. It was approximated by an examination of the degree of barrier height variation under the consideration of Tung's model and a linear relationship between Φ_{B0} and the n [19]. The extrapolation of the straight line shown in Fig.3 for $n = 1$ indicates a homogeneous barrier height around 0.88 eV. As a result, the decrease of Φ_{B0} and increase of the n especially at lower temperatures can be explained by the possible causes depending on the inhomogeneity in barrier height [20]. The same behavior of the ideality factor is observed in the literature and has been interpreted in terms of interface state density distribution (D_{it}) [21].

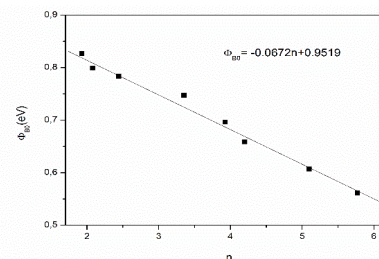


Figure 2. Barrier height vs. ideality factor for In/SnTe/Si/Ag diode

The obtained non-ideal I-V characteristics in TE theory can be analyzed by considering the fluctuations due to the barrier inhomogeneity and suggesting Gaussian distribution (GD) in barrier height, Φ_B [13-15]. This model estimated to analyze the transport properties of In/SnTe/Si/Ag diode, helps to explain the barrier differences and also n with their temperature dependence. According to the Werner’s model, these observed potential fluctuations is assumed to be a continuous barrier distribution at the interface [22]. In this approach, the diode with Φ_B was approximated to be made of parallel diodes with different barrier heights which effect the current transport in the junction independently [14]. Therefore, the total current flow through the barrier at forward bias can be re-written as,

$$I = AA^*T^2 \exp\left[\left(-\frac{qV}{kT}\right)\left(\bar{\Phi}_{B0} - \frac{q\sigma_0^2}{2kT}\right)\right] \times \exp\left(\frac{qV}{n_{sp}kT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right)\right] \quad (4)$$

with modified reverse saturation current expression as,

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{ap}}{kT}\right) \quad (5)$$

In this relation given in Eq.4, barrier height distribution is expressed in terms of Gaussian function with a standard deviation around a mean $\bar{\Phi}_{B0}$ and standard deviation σ_0 in temperature dependence of barrier height. In addition, σ_0 is used to measure the deviation from the homogeneity of barrier height in the junction [14], and Φ_{ap} and n_{ap} are the apparent barrier height and apparent ideality factor, respectively.

By using the Gaussian function to explain the inhomogeneous barrier height formation in the diode, the temperature variation of Φ_{B0} distribution can be represented as,

$$\Phi_{ap} = \bar{\Phi}_{B0} - \frac{q\sigma_0^2}{2kT} \quad (6)$$

from the modified barrier height expression [24]. The Φ_{B0} vs $q/2kT$ (Fig.8) indicates the expected linear relation given in Eq.6 and from the intercept and slope, $\bar{\Phi}_{B0}$ and σ_0 were calculated. The value of σ_0 is found to be 0.166 eV which is about 13% of $\bar{\Phi}_{B0}$, 1.274 eV. It shows that the investigated the fabricated In/SnTe/Si/Ag diode has an interfacial layer with inhomogeneities having a GD of barrier heights [22]. The single straight line observed in Fig.3 also verifies a presence of a single GD of barrier height [15].

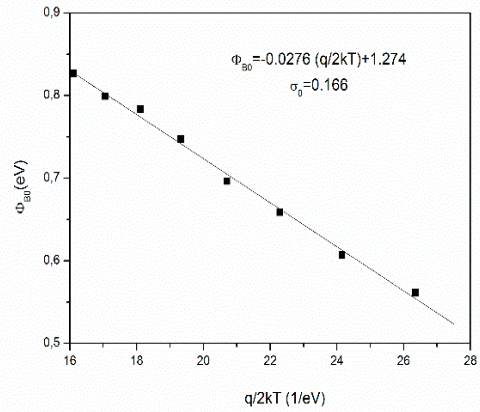


Figure 3. Plot of barrier height vs $q/2kT$ of In/SnTe/Si/Ag diode

The assumption on GD functions in barrier height expression can be related with n , and the voltage effect in n values can be formulated by the bias dependent Gaussian coefficients as,

$$\left(\frac{1}{n_{ap}} - 1\right) = -\rho_2 + \frac{q\rho_3}{2kT} \quad (7)$$

where n_{ap} is the voltage independent [13-15]. Use of $(n^{-1} - 1)$ predicts a general understanding on the dependence of n of the diode structure with inhomogeneous barrier formation in which it is expected to be inversely proportional to temperature. The barrier distribution and the identification of the voltage deformation of the this distribution can be discussed in terms of n_{ap} with the parameters, ρ_2 and ρ_3 ; and they also express the bias dependence of $\bar{\Phi}_{B0}$ and σ_0 , respectively.

The temperature dependence of n was investigated by linear fitting of the relation observed in Fig.4. Thus, the linear relation found in $(n^{-1} - 1)$ vs $q/2kT$ plot confirms voltage deformation of the GD of the barrier height in terms of calculated n values[15]. The voltage coefficients were calculated from the slope and intercept as, $\rho_2 = 0.0346$ V and $\rho_3 = 0.0315$, respectively.

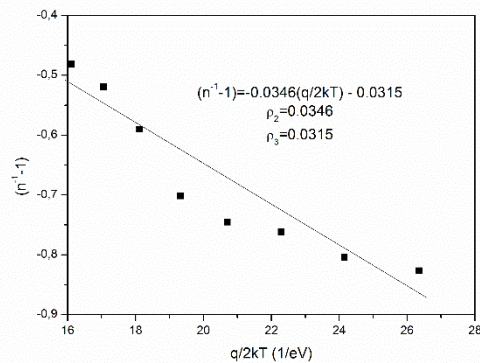


Figure 4. Plot of $(n^{-1} - 1)$ vs $q/2kT$ of In/SnTe/Si/Ag diode

The Richardson plot under the assumption of TE model deviates from linearity with the inhomogeneity of the barrier. Therefore, the value of this constant was approximated from the modified current relation given in Eq.4 as,

$$\left(\frac{I_0}{T^2}\right) - \left(\frac{q^2 \sigma_s^2}{2k^2 T^2}\right) = \ln(AA^*) - \frac{q\bar{\Phi}_{B0}}{kT} \quad (8)$$

According to this relation, the modified Richardson plot is presented in Fig.5. The values obtained from this analysis show a good linear relationship. The slope of the straight line directed to $\bar{\Phi}_{B0}$ and extrapolation value was used to determine A^* for a given diode area, A . The result of the fitting process in Fig.5 pointed approximately same $\bar{\Phi}_{B0}$ value as about 1.274 eV and A^* was found as 119.5 A/cm²K² which is in close agreement with the expected value of 112 A/cm²K² [11].

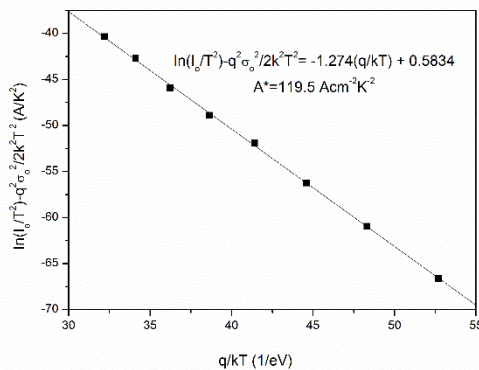


Figure 5. $\ln(I_0/T^2) - (q^2 \sigma_s^2)/(2k^2 T^2)$ vs q/kT of In/SnTe/Si/Ag diode

The series resistance (R_s) values that is the resistance effect in the direction of the current flow in the diode structure, were calculated with using the model proposed by Cheung and Cheung [23]. This model is used to examine the effect of R_s under the TE approximation in I-V characteristics, and this values can be expressed by Cheung's function as,

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = IR_s + n \left(\frac{kT}{q}\right) \quad (9)$$

and

$$H(I) = V - n \left(\frac{kT}{q}\right) \ln \left(\frac{I}{AA^* T^2}\right) = n\bar{\Phi}_{B0} + IR_s \quad (10)$$

As shown in Fig.6, both of $dV/d(\ln I)$ vs I and $H(I)$ vs I plots show linear characteristics for the data of downward curvature region in the forward bias I-V. According to these two relations (Eq.9 and Eq.10), R_s values were calculated from the slope of the corresponding figures; and the temperature dependent values are listed in Table 2 and also presented in Fig.7.

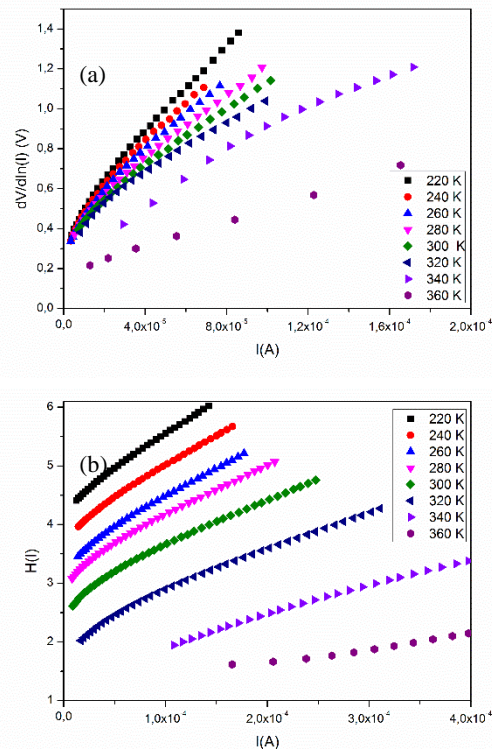


Figure 6. $dV/d(\ln I)$ vs I (a) and $H(I)$ vs I (b) plots of In/SnTe/Si/Ag diode

As shown in Fig. 7, the obtained R_s are in decreasing behavior with increasing temperature. This variation in R_s values with temperature is one of the reason for increase of n and lack of free carrier concentration at low temperatures [24]. As given in this figure, the results are

Table 2. Series resistance, R_s and density of interface states, D_{it} obtained from In/SnTe/Si/Ag diode

Temperature (K)	R_s (kΩ) ($dV/d\ln(I)$ vs I plot)	R_s (kΩ) ($H(I)$ vs I plot)	D_{it} (eV ⁻¹ cm ⁻²)
360	3.543	2.565	1.06x10 ¹³
340	5.408	4.539	1.12x10 ¹²
320	6.887	7.346	1.23x10 ¹³
300	7.725	8.613	1.36x10 ¹²
280	8.772	9.633	2.29x10 ¹³
260	8.762	10.465	2.70x10 ¹³
240	10.385	11.047	6.93x10 ¹²
220	11.963	12.177	7.35x10 ¹³

in a good agreement with each other and confirms the consistency of Cheung's function [23, 25].

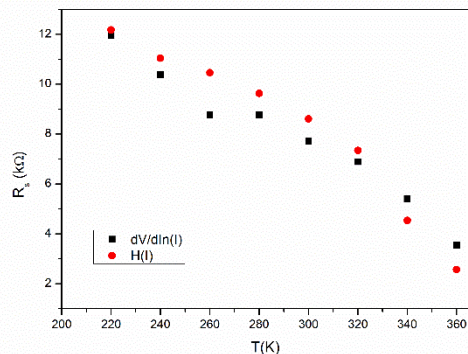


Figure 7. Plot of temperature dependent R_s values for In/SnTe/Si/Ag diode

The presence of insulator layer at the interface can be affected on the barrier height distribution in the junction [13-14] and this charge density can arise through a net charge in interface states or through mobile carriers accumulated at the junction interface [24, 25]. The interface states are determined as to exist at the Si-SiO₂ interface [26]. According to the Card and Rhoderick, the density distribution curves of the interface state D_{it} in equilibrium with the semiconductor can be determined from the forward bias I-V characteristics at each temperature [12]. Fig.8 illustrates distribution profiles of D_{it} values as a function the energy of interface states with respect to the conduction band, $E_c - E_{ss}$ for each temperature, extracted from the forward bias I-V characteristics taking into account both the bias dependence of the effective barrier height and with and without R_s obtained from the forward bias I-V characteristics of the diode. It was observed that the values of D_{it} increase with decreasing temperature [27].

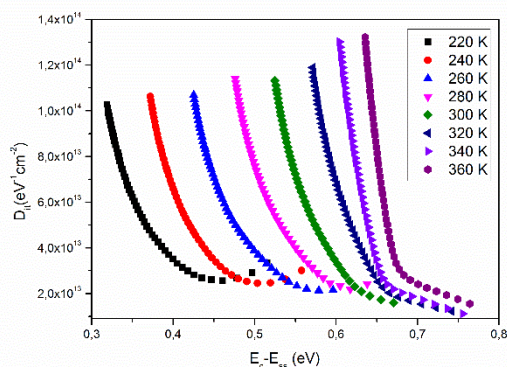


Figure 8. D_{it} as a function of $E_c - E_{ss}$ obtained from In/SnTe/Si/Ag diode

6. CONCLUSION (SONUÇ)

In this study, the temperature dependence of I-V characteristics of the In/SnTe/Si/Ag diode structure was

analyzed under the assumption of GD of the barrier height to explain the temperature dependence of Φ_{B0} and n . Main diode parameters as n , Φ_{B0} , R_s and D_{it} of the fabricated diode structure were calculated from the forward bias I-V measurements. Variation in diode parameters with ambient temperature was explained by barrier inhomogeneity with low barrier patches. The distribution of the inhomogeneous barrier height was represented by the existence of Gaussian type function on barrier heights around 1.274 eV mean value. GD approach also achieved to provide a satisfactorily explanation and Richardson constant from the modified $\ln(I_0/T^2) - (q^2\sigma_0^2)/(2k^2T^2)$ vs q/kT plot, was found in a close agreement for the reported values as 119.5 A/cm²K². R_s values were approximated by the help of Cheung's function and found in decreasing behavior with increase in temperature. In addition, taking into account of the presence of insulator layer at the junction interface, distribution profile of the density of interface states was investigated.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Lewis, D.J., Kevin, P., Bakr, O., Muryn, C.A., Malik, M.A., Brien, P.O., "Routes to tin chalcogenide materials as thin films or nanoparticles: a potentially important class of semiconductor for sustainable solar energy conversion", *Inorg. Chem. Front.*, 1: 577-598 (2014).
- [2] Thompson, J.R., Ahmet, I.Y., Johnson, A.L., Kociok-Köhn, G., "Tin(IV) Chalcogenide Complexes: Single Source Precursors for SnS, SnSe and SnTe Nanoparticle Synthesis", *Eur. J. Inorg. Chem.*, 2016 (28): 4711-4720, (2016).
- [3] Tugluoglu, N., Karadeniz, S., Sahin, M., Safak, H., "Temperature dependence of current-voltage characteristics of Ag/p-SnSe Schottky diodes", *Appl. Surf. Sci.*, 233: 320-327, (2004).
- [4] Safak, H., Sahin, M., Yuksel, O. F., "Analysis of I-V measurements on Ag/p-SnS and Ag/p-SnSe Schottky barriers", *Solid-State Electron.*, 46: 49-52, (2002).
- [5] Reddy, K.T.R., Reddy, N.K., Miles, R.W., "Photovoltaic properties of SnS based solar cells", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 90: 3041-3046, (2006).
- [6] Abd El-Rahman, K.F., Darwish, A.A.A., El-Shazly, E.A.A., "Electrical and photovoltaic properties of SnSe/Si heterojunction", *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 25: 123-129, (2014).
- [7] Reddy, N. K., Reddy, K.T.R., "SnS films for photovoltaic applications: Physical investigations on sprayed SnxSy films", *Physica B*, 368: 25-31, (2005).
- [8] Gu, S., Ding, K., Pan, J., Shao, Z., Mao, J., Zhang, X., Jie, J., "Self-driven, broadband and ultrafast photovoltaic detectors based on topological crystalline insulator SnTe/Si heterostructures", *J. Mater. Chem. A*, 5: 11171-11178, (2017).
- [9] Zhang, H., Man, B., Zhang, Q., "Topological Crystalline Insulator SnTe/Si Vertical Heterostructure Photodetectors for High-Performance Near-Infrared Detection", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 9: 14067-14077, (2017).

- [10] Shu, T., Ye, Z., Lu, P., Chen, L., Xu, G., Zhou, J., Wu, H., "Band alignment at the interface of PbTe/SnTe heterojunction determined by X-ray photoelectron spectroscopy", *Europhys. Lett.*, 116: 37006, (2016).
- [11] Sze, S.M., *Physics of Semiconductor Devices*, Wiley, New York, 1981.
- [12] Card, H.C., Rhoderick, E.H., "Studied of tunnel MOS diodes – I. Interface effects in silicon Schottky diodes", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 4: 1589-1601, (1971).
- [13] Ozer, M., Yıldız, D.E., Altındal, S., Bulbul, M.M., "Temperature dependence of characteristic parameters of the Au/SnO₂/n-Si (MIS) Schottky diodes", *Solid State Electron.*, 51: 941-949, (2007).
- [14] Yıldız, D.E., Altındal, S., Kanbur, H., "Gaussian distribution of inhomogeneous barrier height in Al/SiO₂/p-Si Schottky diodes", *J. Appl. Phys.*, 103 (12), 124502, (2008).
- [15] Tataroglu, A., Pur, F.Z., "The Richardson constant and barrier inhomogeneity at Au/Si₃N₄/n-Si (MIS) Schottky diodes", *Phys. Scr.*, 88: 015801, (2013).
- [16] Yamamoto, T., Suzuki, S., Kawaguchi, K., Takjashashi, K., "Temperature Dependence of the Ideality Factor of Ba_{1-x}K_xBiO₃/Nb-doped SrTiO₃ All-Oxide-Type Schottky Junctions", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 37: 4737-4746, (1998)
- [17] Altuntas, H., Altındal, S., Shtrikman, H., Ozcelik, S., "A detailed study of current-voltage characteristics in Au/SiO₂/n-GaAs in wide temperature range", *Microelectron. Reliab.*, 49: 904-911, (2009).
- [18] Cetin, H., Ayyıldız, E., "Temperature dependence of electrical parameters of the Au/n-InP Schottky barrier diodes", *Semicond. Sci. Technol.*, 20 (6): 625-631, (2005).
- [19] Tung, R.T., "Electron transport of inhomogeneous Schottky barriers", *Appl. Phys. Lett.*, 58: 2821-2823, (1991).
- [20] Dokme, I., Altındal, S., Bulbul, M.M., "The barrier height inhomogeneity in Al/p-Si Schottky barrier diodes with native insulator layer", *Appl. Surf. Sci.*, 252(22): 7749-7754, (2006).
- [21] S. Chand, J. Kumar, "Current-voltage characteristics and barrier parameters of Pd₂Si/p-Si(111) Schottky diodes in a wide temperature range", *Semicond. Sci. Technol.*, 10: 1680-1688, (1995).
- [22] Werner, J.H., Güttler, H.H., "Barrier inhomogeneities at Schottky contacts", *J. Appl. Phys.*, 69 (3): 1522-1533, (1991).
- [23] Cheung, S. K., Cheung, N. W., "Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics", *Appl. Phys. Lett.*, 49: 85-84 (1986).
- [24] Chand, S., Kumar, J., "Current transport in Pd₂Si/n-Si(100) Schottky barrier diodes at low temperatures", *Appl Phys A*, 63(2): 171-178, (1996).
- [25] Brotherton, S. D., "Introduction to Thin Film Transistors: Physics and Technology of TFTs", Springer, New York, 2013.
- [26] Helms, C.R., Deal, B.E., "The Physics and Chemistry of SiO₂ and the Si-SiO₂ Interface", Springer, New York, 1988.
- [27] Tataroglu, A., Altındal, S., "The analysis of the series resistance and interface states of MIS Schottky dodes at high temperature using I-V characteristics", *J. Alloys Compd.*, 484: 405-409, (2009)



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



The investigation DO₃-type Fe₃M (M=Al, Ga, Si and Ge) full-heusler alloys within first principles study

İlk prensipler ile DO₃-tipi Fe₃M (M=Al, Ga, Si ve Ge) tam heusler alaşımlarının incelenmesi

Yazar(lar) (Author(s)): Aytac ERKİSİ¹, Gokhan SURUCU²

ORCID¹: 0000-0001-7995-7590

ORCID²: 0000-0002-3910-8575

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Erkisi A. ve Surucu G., “The investigation DO₃-type Fe₃M (M=Al, Ga, Si and Ge) full-heusler alloys within first principles study”, *Politeknik Dergisi*, 21(4): 927-936, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.385443

The Investigation DO₃-type Fe₃M (M=Al, Ga, Si and Ge) Full-Heusler Alloys Within First Principles Study

Research Article / Araştırma Makalesi

Aytac ERKİSİ^{1*}, Gokhan SURUCU^{2,3,4}

¹Department of Physics Engineering, Hacettepe University, Beytepe, Ankara, 06800, Turkey

²Department of Electric and Energy, Ahi Evran University, Kırşehir, 40100, Turkey

³Middle East Technical University, Department of Physics, 06800, Ankara, Turkey

⁴Photonics Application and Research Center, Gazi University, Ankara, 06500, Turkey

(Received : 21.08.2017 ; Accepted : 28.09.2017)

ABSTRACT

Full-Heusler Fe₃M (M=Al, Ga, Si and Ge) alloys whose crystal structure is DO₃-type disordered structure which conforms to $Fm\bar{3}m$ space group, have been investigated by using Local Spin Density Approximation (LSDA) and Generalized Gradient Spin Approximation (GGSA) in the Density Functional Theory (DFT) as implemented in VASP (Vienna Ab initio Simulation Package) software. After the examination of ground states of our materials in DO₃-type structure, their full structural, mechanical properties and electronic band structures have been investigated and made comparison between LSDA and GGSA. The calculated electronic band structures and total electronic density of states (DOS) within both of two approximation show that these alloys have metallic behavior. The calculated elastic constants and estimated mechanical properties depended on these constants indicate that these alloys are stable mechanically and have anisotropic behavior.

Keywords: Full-Heusler; Ab initio calculations, elastic constant, electronic band structure.

İlk Prensipler ile DO₃-tipi Fe₃M (M=Al, Ga, Si ve Ge) Tam Heusler Alaşımlarının İncelenmesi

ÖZ

Kristal yapısı DO₃-tipi düzensiz yapıda olan ve $Fm\bar{3}m$ uzay grubuna uyan tam-Heusler Fe₃M (M=Al, Ga, Si and Ge) alaşımları, Yoğunluk Fonksiyonel Teorisi (DFT) altında Yerel Spin Yoğunluk Yaklaşımı (LSDA) ve Genelleştirilmiş Gradient Spin Yaklaşımı (GGSA) kullanılarak VASP (Vienna Ab initio Simulation Package) yazılımı ile incelenmiştir. DO₃-tipi yapıda olan malzemelerimizin taban durumlarının incelenmesinden sonra tam yapısal, mekaniksel özellikleri ve elektronik band yapıları incelenmiş ve GGSA ve LSDA arasında karşılaştırma yapılmıştır. Her iki yaklaşım içinde hesaplanan elektronik band yapıları ve toplam elektronik durum yoğunlukları (DOS) bu alaşımların metalik davranışa sahip olduklarını göstermektedir. Hesaplanan elastik sabitler ve bu elastik sabitlere bağlı olarak tahmin edilen mekaniksel özellikler bu alaşımların mekaniksel olarak kararlı ve anizotropik davranışa sahip olduklarına işaret eder.

Anahtar Kelimeler: Tam-Heusler, Ab initio hesaplamaları, elastik sabiti, elektronik band yapısı.

1. INTRODUCTION

Heusler type alloys which are ternary intermetallics, were discovered first by Friedrich Heusler in the early 20th century [1]. There is two type Heusler alloys which are called half-Heusler are given XYZ and full-Heusler alloys are given X₂YZ general formulas, respectively. Some researchers have worked on these type alloys and investigated that the composition, chemical order and magnetic properties of these alloys are related with each other [2,3]. In recent years, some scientists have shown great interest in these materials due to the diverse and attractive physical phenomena such as magnetic shape memory effect, magnetocaloric effect, magnetothermal conductivity, magnetic superelasticity, exchange bias, and half-metallic ferromagnetism exhibited by them [4-

9]. Moreover, Heusler alloys can be used such as half-metallic ferromagnets, semiconductors and superconductors [10-13].

The full-Heusler alloys have a fully ordered L₂ type face centered cubic structure which conform $Fm\bar{3}m$ space group at room temperature [14]. There are four interpenetrating sublattices which have face centered cubic (fcc) structures, in the unit cell of these type alloys. Atomic positions with Wyckoff notation in full-Heusler alloys are (0 0 0) for X₁, (1/2 1/2 1/2) for X₂, (1/4 1/4 1/4) for Y and (3/4 3/4 3/4) for Z atom abbreviated A, B, C and D sites, respectively. X and Y elements in compositions are usually a transition metal, Z element can be either a semiconductor or a non-magnetic metal.

When the X, Y and Z atoms are located in their original positions, this type structure of a crystal is called L₂ ordered structure. The partially disordered structure is called B₂-type structure which in the X₁ and X₂ atoms are

*Sorumlu yazar (Corresponding Author)
e-posta : erkisi@hacettepe.edu.tr

positioned in (0 0 0) and (1/2 1/2 1/2) atomic positions with respectively and Y and Z atoms are randomly sited. If there is the distribution of X and Y or X and Z atoms randomly, this crystal behaves DO₃-type disordered structure of full-Heusler alloys [15]. The crystal structure of Fe₃Si is ordered DO₃-type as seen in Fig.1. This alloy possesses two non-equivalent Fe_{A,C} in A and C sites and Fe_B in B sites since magnetic moments of Fe atoms in these sites are different from each other. Therefore, this material sometimes referred to as Fe₂^ACFe^BSi. This is similar to fully ordered full-Heusler alloy in ordered L2₁ crystal structure [16]. Ordered crystal structures show considerable mechanical, electrical, magnetic and physical properties. The type and degree of the atomic order are affected on the electronic band structure of Heusler alloys. A partially disordered crystal structure can lead to seriously changing in their electronic band structure, magnetic and transport properties [17-20]. Therefore, this type of alloys is much important for the technological applications.

In this view, we have examined full-Heusler Fe₃M (M=Al, Ga, Si and Ge) alloys in DO₃-type structure and also made comparison between two approximation which are LSDA and GGSA. The computational details are given in the next section. The examined and calculated some structural, mechanical properties and also electronic band structure with density of states (DOS) of these alloys are discussed in the third section. Finally, we have concluded our calculations in the last section. To the extend we know, there is no detailed study especially for the Fe₃Ga and Fe₃Ge alloys.

2. COMPUTATIONAL DETAILS

In this work, the calculations have been made with VASP (Vienna Ab initio Simulation Package) [21,22] package and utilized linear augmented-plane-wave basis set and pseudopotential approximation. We have used Projected Augmented Wave (PAW) [23,24] with the Perdew-Zunger correlation [25] type pseudopotentials for all atoms in the framework of Local Spin Density Approximation (LSDA) and Perdew, Burke and Ernzerhof (PBE) [26] type pseudopotentials in the framework of Generalized-Gradient Spin Approximation (GGSA) within Density Functional Theory (DFT) [27,28], to approximate exchange-correlation potential. The crystal structure of full-Heusler Fe₃M (M=Al, Ga, Si and Ge) alloys has been examined in $Fm\bar{3}m$ space group. $14 \times 14 \times 14$ k-point mesh has been automatically generated and used to irreducible Brillouin zone yielding 280 k-points centered at Γ -point. Brillouin-zone integrations have been performed following the convention of Monkhorst-Pack [29] scheme. The kinetic energy cut-off value has been took 1100 eV for wavefunctions in plane wave basis sets expansion of eigenfunctions. The crystal structure of DO₃-type full-Heusler Fe₃M (M=Al, Ga, Si and Ge) alloys in cubic ($Fm\bar{3}m$) phase with 4-atom primitive cell is presented in Fig.1. The ionic relaxation process has been went on until

the forces on ions are less than 10^{-8} eV/Å. The lattice parameters and atomic positions of atoms in the primitive cell of the crystal have been optimized by minimizing of the forces and the pressure on these systems.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Firstly, it is determined the primitive cells of Fe₃M (M=Al, Ga, Si and Ge) full-Heusler alloys in DO₃ structure which are modeled by four atoms and whose three dimensional (3D) crystallographic representation is shown in Fig.1.

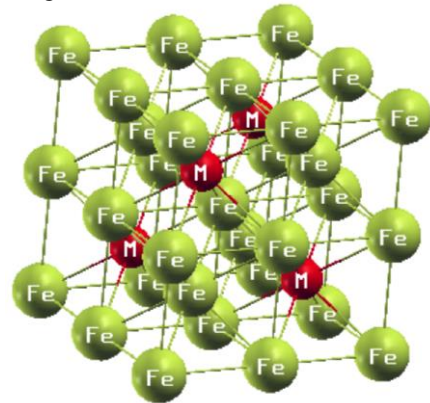


Fig. 1. The three dimensional (3D) crystallographic representation Fe₃M (M=Al, Ga, Si and Ge) full-Heusler alloys in DO₃-type structure with $Fm\bar{3}m$ space group.

Fe₃M (M=Al, Ga, Si and Ge) alloys can be viewed as full-Heusler alloys in DO₃-type structure with $Fm\bar{3}m$ space group as seen in Fig. 1. The A, B and C sites have been occupied by Fe atoms and the D sites have been occupied by M atoms in this crystal system. These alloys have been optimized by using two different type approximation which are LSDA and GGSA. In the next step, the calculated energy and volume datas for our materials have been plotted as a graphic by fitting to Vinet [30] equation of state. After this process; the structural, mechanical properties and also electronic band structures with density of states (DOS) of these sytems have been calculated by using LSDA and GGSA.

3.1. The Calculated structural properties by using GGSA and LSDA approximation

The calculated structural properties of Fe₃M (M=Al, Ga, Si and Ge) full-Heusler alloys by using LSDA and GGSA, have been presented in this section. To examine structural stability of these alloys, the cohesive energies (E_{coh}) [31,32] of them which is given in Eq.1, have been calculated. The cohesive energies of any crystal which has the chemical formula A_xB_y , can be calculated by the following,

$$E_{\text{coh}} = E_{\text{tot}} - (xE_A + yE_B) \quad (1)$$

where, E_{tot} is the total energy of the unit cell of the crystal. E_A and E_B are the energies of the isolated A and

B atoms as seen in Eq. 1. The calculated cohesive energies of these alloys by using two different type approximation have been presented in Table 1. The calculated cohesive energies within both LSDA and GGSA show that, our materials are structurally stable and synthesizable due to the negative values.

After the optimization processes of Fe₃M (M=Al, Ga, Si and Ge) alloys within GGSA and LSDA, energy-volume graphs are plotted by fitting to Vinet equation of state [30] which is given by

$$E(V) = E_0 + \frac{9BV_0}{\xi^2} [1 + \{\xi(1-x) - 1\} \exp\{\xi(1-x)\}] \quad (2)$$

where E_0 and V_0 are the ground state energy and volume, respectively, $x = (V/V_0)^{1/3}$ and $\xi = (3/2)(B' - 1)$, B is the bulk modulus and B' is its pressure derivative. These fitted curves and also calculated some structural parameters of our alloys within GGSA and LSDA are presented in Fig. 2 and in Table 2 with respectively. It has been obtained a well-converged ground state for these alloys with both of GGSA and LSDA due to the asymptotic standard errors in fitting the Vinet equation of state are less than about 1%

The calculated some structural parameters of Fe₃Si alloy in DO₃ structure by using GGSA (a = 5.608 Å, B = 204.79 GPa) and LSDA (a = 5.462 Å, B = 268.93 GPa), are very close to the experimental (a = 5.646 Å [16], B = 187 GPa [33]) and theoretical results (a = 5.630 Å [34], B = 199 GPa [34] within GGA and a = 5.490 Å [34], B = 242 GPa [34] within LDA). The obtained lattice parameter (a) and bulk modulus (B) of this alloy within GGSA are different % 0.67 and % 9.5 from experimental results and % 0.39 and % 2.9 from theoretical results, respectively and also within LSDA are different % 3.3 and % 43 from experimental results and % 0.51 and % 11 from theoretical results, respectively. Similarly, the calculated lattice parameters of Fe₃Al alloy in DO₃ structure within GGSA (a = 5.748 Å) and LSDA (a = 5.560 Å), are very close to the experimental (a = 5.789 Å [35]) and theoretical results (a = 5.761 Å [35] with GGA and a = 5.718 Å [36] with LDA). The obtained lattice parameter (a) of this alloy within GGSA is different % 0.7 from experimental result and % 0.22 from theoretical result, respectively and also within LSDA is different % 3.9 from experimental results and % 2.7 from theoretical result, respectively. Also calculated bulk modulus by

Table 1. The calculated cohesive energies of full-Heusler Fe₃M (M=Al, Ga, Si and Ge) alloys within GGSA and LSDA.

Material	GGSA	LSDA
	E_{coh} (eV)	E_{coh} (eV)
Fe ₃ Al	-27.711	-31.170
Fe ₃ Ga	-26.521	-30.268
Fe ₃ Si	-29.897	-33.778
Fe ₃ Ge	-28.114	-32.029

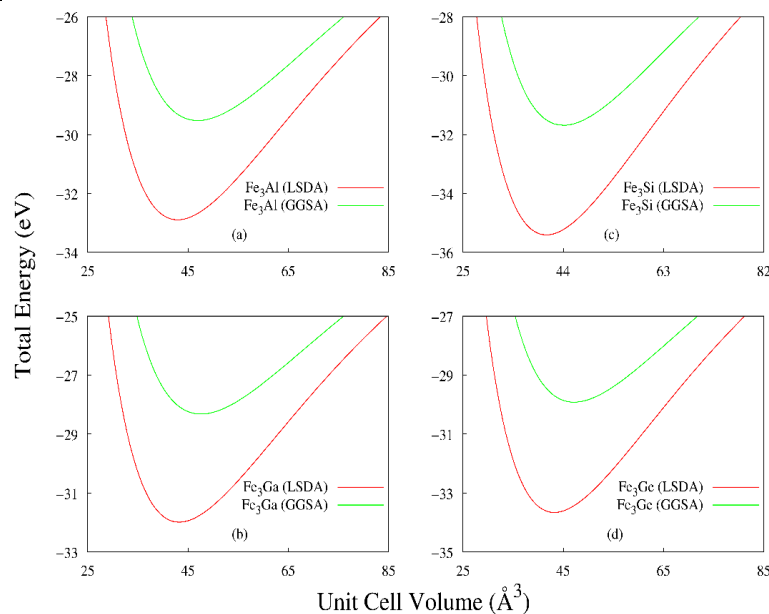


Fig. 2. Total energies as a function of volume of full-Heusler Fe₃M (M=Al, Ga, Si and Ge) alloys within GGSA and LSDA.

using GGA (B=160.99 GPa) is very close to theoretical result (B = 167 GPa [35]). The calculated lattice parameter of Fe₃Ga alloy in DO₃ structure within GGSA (a = 5.772 Å) are very close to the other theoretical result (a = 5.761 Å [37] within GGA) too. It is obviously seen that, the

also the obtained magnetic moments within GGSA is more closer than within LSDA as seen in Table 3.

3.3. The calculated elastic constants and estimated mechanical properties

Elastic constants of a crystal which can be calculated in theoretically by using the “stress–strain” method [38]

Table 2. The optimized structural parameters of full-Heusler Fe₃M (M=Al, Ga, Si and Ge) alloys within GGSA and LSDA.

Material	GGSA			LSDA		
	a (Å)	B (GPa)	B'	a (Å)	B (GPa)	B'
Fe ₃ Al	5.748	160.99	4.375	5.560	213.96	4.598
Fe ₃ Ga	5.772	163.40	4.656	5.575	223.96	4.822
Fe ₃ Si	5.603	205.31	5.122	5.461	268.95	4.886
Fe ₃ Ge	5.733	177.59	5.296	5.568	242.73	5.072

calculations of structural parameters for Fe₃M (M=Al, Ga, Si and Ge) alloys within GGSA seems more accurate than LSDA.

3.2. The calculated magnetic moments within GGSA and LSDA

It can be seen as an fcc Bravais lattice with a basis consisting of four atoms, A, B, C and D, associated with each lattice point for the ordered Fe₃M (M=Al, Ga, Si and Ge) alloys crystallized in the DO₃ structure. For these alloys, Fe atoms which are equivalent, are located at the A (Fe_A) and C (Fe_C) sites. Also the B-sublattice is located with iron atoms (Fe_B) whereas M atoms (M=Al, Ga, Si and Ge) occupy the D sites. The centre of the cube is occupied with Fe_B atom whereas four Fe_A and four Fe_C atoms are located at the corners of cube. So, Fe_B is eightfold coordinated with the other Fe atoms, and the point symmetry is cubic. Therefore, the calculated partial magnetic moment with of Fe_A and Fe_C are equal with each other and the partial magnetic moment of Fe_B is different from them. Moreover, the partial magnetic moments we compute are compatible with the experimental work (for Fe₃Al and Fe₃Si alloys) [36] and

within *ab initio* method, can be used to estimate its some mechanical properties and also to examine dynamical stability of it. The calculated elastic constants of a material can give more and detailed information about its mechanical and dynamical behaviors such as stability, hardness or stiffness of it. C₁₁, C₁₂ and C₄₄ are three independent elastic constants of a cubic crystal [39]. The calculated second order elastic constants of full-Heusler Fe₃M (M=Al, Ga, Si and Ge) alloys within both GGSA and LSDA are presented in Table 4. The mechanical stability of a crystal depends on its elastic constants which is called Born’s stability criteria [40]. This criteria tell about strain energy of this crystal against any homogeneous elastic deformation and this energy value must be positive [41]. For a cubic crystal, Born’s mechanical stability criterias are given by

$$C_{11} - C_{12} > 0; C_{11} + 2C_{12} > 0; C_{11} > 0; C_{44} > 0 \quad (3)$$

The calculated elastic constants within both GGSA and LSDA show that Fe₃M (M=Al, Ga, Si and Ge) alloys in DO₃ structure are stable mechanically due to satisfy these stability criteria.

Table 3. The total magnetic moment (μ) and partial magnetic moments of the atoms of full-Heusler Fe₃M (M=Al, Ga, Si and Ge) alloys in DO₃-type structure within GGSA and LSDA.

Material	GGSA		LSDA	
	μ _{tot} (μ _B)	μ _{atom} (μ _B)	μ _{tot} (μ _B)	μ _{atom} (μ _B)
Fe ₃ Al	6.073	μ _{Fe_{A,C}} = 1.883 μ _{Fe_B} = 2.369 μ _{Al} = -0.061	3.827	μ _{Fe_{A,C}} = 0.888 μ _{Fe_B} = 2.071 μ _{Al} = -0.020
Fe ₃ Ga	6.075	μ _{Fe_{A,C}} = 1.914 μ _{Fe_B} = 2.398 μ _{Ga} = -0.151	5.005	μ _{Fe_{A,C}} = 1.471 μ _{Fe_B} = 2.143 μ _{Ga} = -0.079
Fe ₃ Si	5.110	μ _{Fe_{A,C}} = 1.320 μ _{Fe_B} = 2.517 μ _{Si} = -0.047	3.838	μ _{Fe_{A,C}} = 0.788 μ _{Fe_B} = 2.271 μ _{Si} = -0.009
Fe ₃ Ge	5.450	μ _{Fe_{A,C}} = 1.500 μ _{Fe_B} = 2.528 μ _{Ge} = -0.078	4.670	μ _{Fe_{A,C}} = 1.160 μ _{Fe_B} = 2.390 μ _{Ge} = -0.041

Additionally, some mechanical properties of a crystal such as bulk (B) and shear moduli (G), Young's modulus (E) and Poisson's ratio (ν), can be estimated by using its elastic constants. Voigt [42] - Reuss [43] - Hill [44] relations can be used to estimate the bulk (B) and shear moduli (G) of a crystal. Voigt approximation can be used to calculate the upper limits (B_V , G_V) and Reuss approximation can be used to estimate the lower limits (B_R , G_R) of B and G values of a crystal as in Eq.4-6, respectively.

$$B_V = B_R = B = (C_{11} + 2C_{12})/3 \quad (4)$$

$$G_V = (C_{11} - C_{12} + 3C_{44})/5 \quad (5)$$

$$G_R = 5(C_{11} - C_{12})C_{44}/(4C_{44} + 3C_{11} - 3C_{12}) \quad (6)$$

Hill approximation can be used to calculate the average values of bulk and shear moduli of a crystal which are given by $B = (1/2)(B_V + B_R)$ and $G = (1/2)(G_V + G_R)$, respectively. As seen in Eq.4, upper (B_V), lower limits (B_R) and average value (B) of a cubic crystal are equal to each other.

Moreover, the estimated bulk and shear moduli can be used to calculate Young's modulus (E) [41] and Poisson's ratio (ν) [41] of a cubic crystal as given by Eq.7 and Eq.8, respectively.

$$E = (9BG)/(3B + G) \quad (7)$$

$$\nu = (3B - 2G)/[2(3B + G)] \quad (8)$$

The calculated bulk modulus (B_V , B_R and B), shear modulus (G_V , G_R and G) and Young's modulus (E), B/G and $k = G/B$ (Pugh's ratio) ratios [45] and the calculated

Poisson's ratios (ν) of Fe₃M (M=Al, Ga, Si and Ge) alloys in DO₃ structure within GGSA and LSDA are shown in Table 5 and 6, respectively.

The stiffness of a crystal can be determined with its Young's modulus (E) which is given as the ratio of stress and strain. The calculated shear and Young's moduli of our materials suggest that Fe₃M (M=Al, Ga, Si and Ge) alloys in DO₃ structure are rather hard materials. Moreover, the calculated B/G and Pugh's ratios ($k=G/B$) indicate that these alloys are ductile materials.

It is known that if B/G of a material is ranging from 1.7 to 5.6 and Poisson's ratio is ranging from 0.25 to 0.42, this material show metallic behavior [46]. Therefore, Poisson's ratios and B/G values of Fe₃M (M=Al, Ga, Si and Ge) alloys in DO₃ structure show that the bonding character of our materials are close to metallic.

To determine anisotropic or isotropic behavior of a crystal, shear anisotropy factors [47] can be used. The shear anisotropy factors (A and A_-) in {100} and {110} planes of a cubic crystal can be calculated as in Eq.9 and Eq.10, respectively [47]:

$$A = 2C_{44}/(C_{11} - C_{12}) \quad (9)$$

$$A_- = C_{44}(C_L + 2C_{12} + C_{11})/(C_L C_{11} - C_{12}^2) \quad (10)$$

whereas $C_L = C_{44} + (C_{11} + C_{12})/2$.

These calculated values within GGSA and LSDA for Fe₃M (M=Al, Ga, Si and Ge) alloys are presented in Table 7 and 8, respectively. The shear anisotropy factors A and A_- of our alloys show that for (100) plane, are greater than that for (110) plane as seen in Table 7 and Table 8. All of our alloys in this study show largely mechanical anisotropy.

Table 4. The calculated second order elastic constants of full-Heusler Fe₃M (M=Al, Ga, Si and Ge) alloys within GGSA and LSDA.

Material	GGSA			LSDA		
	C ₁₁ (GPa)	C ₁₂ (GPa)	C ₄₄ (GPa)	C ₁₁ (GPa)	C ₁₂ (GPa)	C ₄₄ (GPa)
Fe ₃ Al	208.46	158.80	140.75	305.42	205.67	171.50
Fe ₃ Ga	187.63	153.97	122.10	271.71	198.18	170.37
Fe ₃ Si	290.21	185.52	145.11	358.84	230.34	175.56
Fe ₃ Ge	187.27	152.37	129.57	296.68	194.57	146.62

Table 5. The estimated bulk moduli, upper and lower limits, average values of shear moduli, Young's moduli and Poisson's ratios of full-Heusler Fe₃M (M=Al, Ga, Si and Ge) alloys in DO₃ structure within GGSA.

Material	B (GPa)	G _V (GPa)	G _R (GPa)	G (GPa)	E (GPa)	B/G	k (G/B)	ν
Fe ₃ Al	175.35	94.38	49.09	71.73	189.38	2.44	0.409	0.320
Fe ₃ Ga	165.19	79.99	34.86	57.43	154.40	2.88	0.348	0.344
Fe ₃ Si	220.42	108.01	84.92	96.46	252.54	2.29	0.438	0.309
Fe ₃ Ge	164.00	84.72	36.30	60.51	161.65	2.71	0.369	0.336

Table 6. The estimated bulk moduli, upper and lower limits, average values of shear moduli, Young’s moduli and Poisson’s ratios of full-Heusler Fe₃M (M=Al, Ga, Si and Ge) alloys in DO₃ structure within LSDA.

Material	B (GPa)	G _V (GPa)	G _R (GPa)	G (GPa)	E (GPa)	B/G	k (G/B)	ν
Fe ₃ Al	238.92	122.85	86.81	104.83	274.37	2.28	0.439	0.309
Fe ₃ Ga	222.69	116.93	69.44	93.18	245.33	2.39	0.418	0.316
Fe ₃ Si	273.17	131.03	103.70	117.37	307.99	2.33	0.430	0.312
Fe ₃ Ge	228.61	108.39	83.84	96.12	252.90	2.38	0.420	0.316

Table 7. The calculated anisotropy shear factors (A and A₋) and longitudinal (v_l), transverse (v_t), and average (v_m) wave velocities in crystal and also Debye temperatures (Θ_D) of full-Heusler Fe₃M (M=Al, Ga, Si and Ge) alloys in DO₃ structure within GGSA.

Material	A	A ₋	v _l (m/s)	v _t (m/s)	v _m (m/s)	Θ _D (K)
Fe ₃ Al	5.668	2.823	6298.2	3240.4	3628.8	474.4
Fe ₃ Ga	7.255	3.081	5407.4	2635.5	2960.8	386.0
Fe ₃ Si	2.772	1.975	6878.2	3615.9	4043.6	541.3
Fe ₃ Ge	7.425	3.121	5357.2	2664.1	2989.6	392.2

Table 8. The calculated anisotropy shear factors (A and A₋) and longitudinal (v_l), transverse (v_t), and average (v_m) wave velocities in crystal and also Debye temperatures (Θ_D) of full-Heusler Fe₃M (M=Al, Ga, Si and Ge) alloys in DO₃ structure within LSDA.

Material	A	A ₋	v _l (m/s)	v _t (m/s)	v _m (m/s)	Θ _D (K)
Fe ₃ Al	3.439	2.226	7043.9	3706.1	4144.2	562.1
Fe ₃ Ga	4.634	2.581	6125.6	3174.6	3553.5	480.9
Fe ₃ Si	2.733	1.958	7336.2	3834.3	4289.4	589.5
Fe ₃ Ge	2.872	2.013	6222.1	3229.6	3614.6	486.7

It can be used Navier’s equation [48] to calculate longitudinal and transverse wave velocities of a crystal. These values of Fe₃M (M=Al, Ga, Si and Ge) alloys are calculated by using Eq.11 and Eq.12 and also the average wave velocities [49] of these alloys were calculated by using Eq.13.

$$v_l = [(B + (4G/3))/\rho]^{1/2} \tag{11}$$

$$v_t = [G/\rho]^{1/2} \tag{12}$$

$$v_m = \left\{ (1/3) \left[(2/(v_t^3)) + (1/(v_l^3)) \right] \right\}^{-1/3} \tag{13}$$

where ρ is the density of the material. The sound velocity of Fe₃Si alloy is highest while Fe₃Ga alloy has lowest value as seen in Table 7 and Table 8.

Many physical properties such as specific heat and melting temperature has relation with the Debye

temperature (Θ_D) of a crystal. Therefore it is an important fundamental parameter [50] and also in this study, we were calculated the Debye temperatures (Θ_D) of our alloys by using Eq.14 [51].

$$\theta_D = (h/k)[(3n/4\pi)(N_A\rho/M)]^{1/3}v_m \tag{14}$$

where h is the Planck’s constant, k the Boltzmann’s constant, N_A is the Avogadro’s number, M is the molecular weight and n is the number of atoms in the molecule. The calculated Debye temperatures (Θ_D) of Fe₃M (M=Al, Ga, Si and Ge) alloys are presented in Table 7 and Table 8. This value of Fe₃Si alloy is higher than the others while Fe₃Ga has lowest Debye temperature as seen in Table 7 and Table 8.

3.4. Electronic band structures

The electronic behavior of a material is determined the calculated electronic band structure and the density of states (DOS) of it. The plotted electronic band structures and total density of states (DOS) of Fe_3M ($M=Al, Ga, Si$ and Ge) alloys in both majority (up) and minority (down) spin channels within LSDA and GGSA are presented

along the high symmetry lines in the first Brillouin zone, respectively, in Fig. 3. It can be clearly seen that, our materials show metallic behavior due to there is no band gap neither for up nor for down spin channels in electronic band structures within both LSDA and GGSA. Additionally, our materials have ferromagnetic nature and this situation is well in agreement with total magnetic moments of our alloys as seen in Table

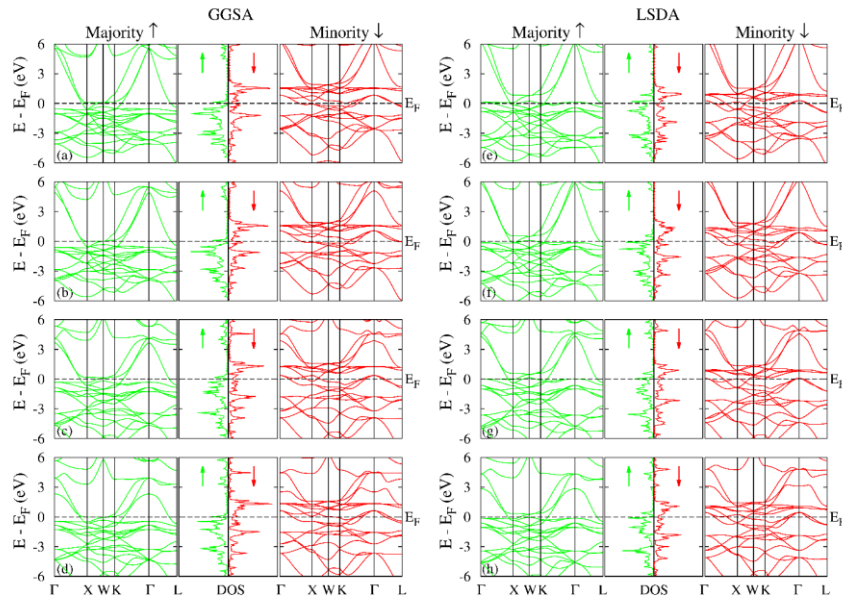


Fig. 3. The calculated energy band structures and the total density of electronic states (DOS) within GGSA for (a) Fe_3Al , (b) Fe_3Ga , (c) Fe_3Si , (d) Fe_3Ge and within LSDA for (e) Fe_3Al , (f) Fe_3Ga , (g) Fe_3Si , (h) Fe_3Ge alloys. The zero of band energy is shifted to Fermi level (E_F).

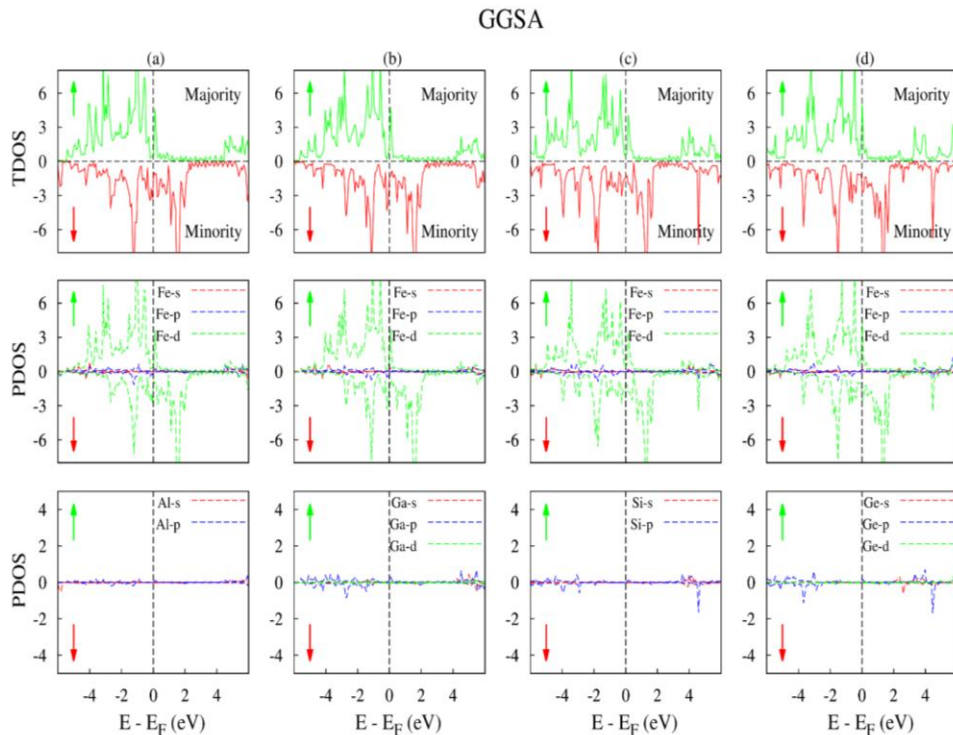


Fig. 4. The total and orbital projected partial density of electronic states of atoms within GGSA for (a) Fe_3Al , (b) Fe_3Ga , (c) Fe_3Si and (d) Fe_3Ge alloy.

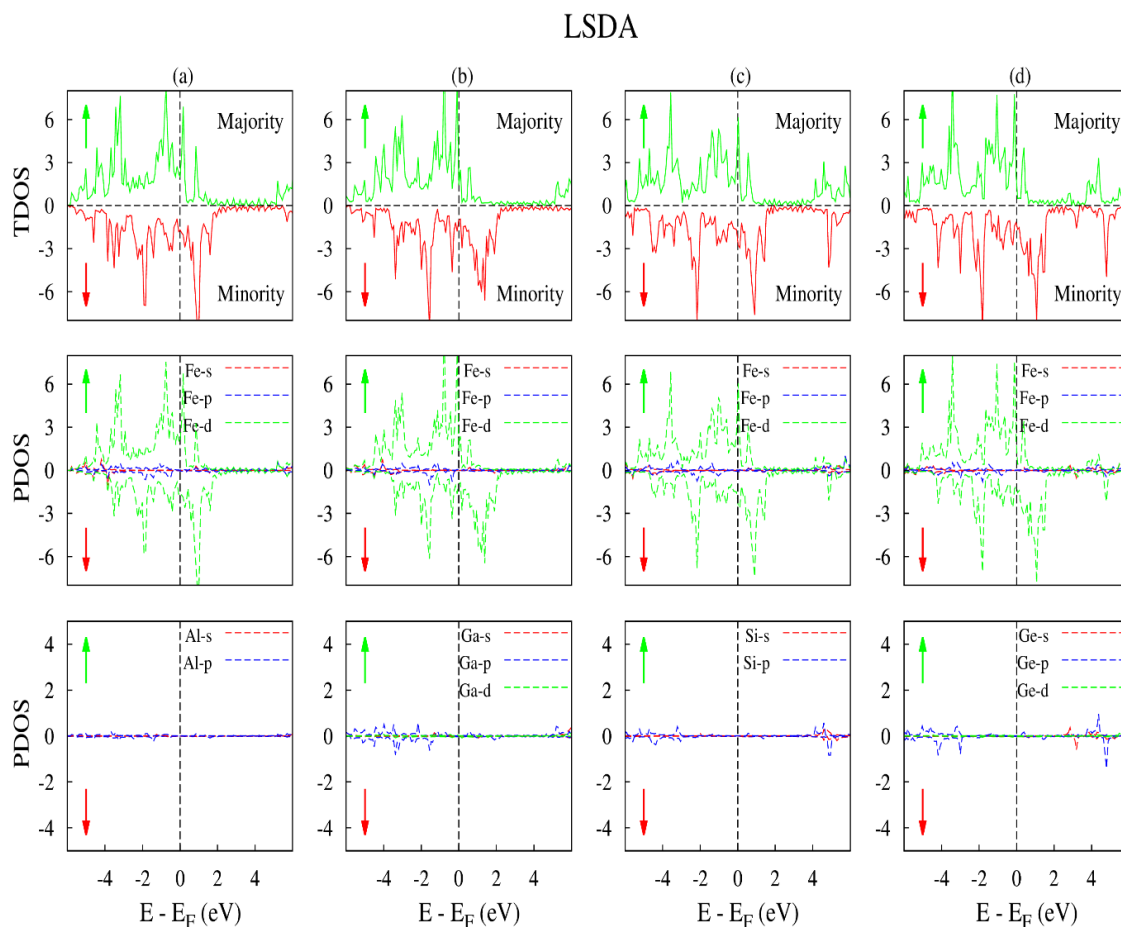


Fig. 5. The total and orbital projected partial density of electronic states of atoms within LSDA for (a) Fe_3Al , (b) Fe_3Ga , (c) Fe_3Si and (d) Fe_3Ge alloy.

The calculated orbital projected partial density of electronic states of atoms within GGSA and LSDA in Fe_3M ($\text{M}=\text{Al}$, Ga , Si and Ge) alloys are given in Figs. 4-5, respectively. For all of our materials, 3d states of Fe atoms cross the Fermi level (E_F), yielding a metallic behavior. In addition, we see that the p orbitals of M ($\text{M}=\text{Al}$, Ga , Si and Ge) atoms has no remarkable effect on bonding features of these systems. In this respect, the metallicity and the bonding properties of these systems can be attributed to d-orbitals of Fe atom in our compositions.

4. CONCLUSION

The structural, magnetic, mechanical properties and electronic band structure of full-Heusler Fe_3M ($\text{M}=\text{Al}$, Ga , Si and Ge) alloys in DO_3 -type structure which conforms to $Fm\bar{3}m$ space group, have been examined in detail in ferromagnetic order and also showed differences between GGSA and LSDA. Especially, the calculated structural parameters for Fe_3M ($\text{M}=\text{Al}$, Ga , Si and Ge) alloys within GGSA are more accurate than within LSDA. The calculated spin-polarized electronic band structures within both GGSA and LSDA of our alloys show that all of our materials have metallic character and

also are ferromagnets due to the differences between majority (up) and minority (down) spin channels. The calculated elastic constants and estimated mechanical properties of these alloys show that these alloys are stable mechanically and have largely anisotropic character.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Ahi Evran University Research Project Unit under Project No PYO-KMY.4001.15.001

REFERENCES

- [1] Heusler F., “*Über magnetische Manganlegierungen*”, Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, German, 12: 219, (1903).
- [2] Potter H. H., “*The X-ray Structure and Magnetic Properties of Single Crystals of Heusler Alloy*”, Proceedings of Physical Society, 41: 135, (1928).
- [3] Bradley A. J., Rogers J. W., “*The Crystal Structure of the Heusler Alloys*”, Proceedings of The Royal Society A, 144 (852): 340, (1934).
- [4] Franco V., Blazquez J. S., Ingale B., Conde A., “*The Magnetocaloric Effect and Magnetic Refrigeration*

- Near Room Temperature: Materials and Models*, Annual Review of Materials Research, 42: 305, (2012).
- [5] Entel P., Buchelnikov V. D., Khovailo V. V., Zayak A. T., Adeagbo W. A., Gruner M. E., Herper H. C., Wassermann E. F., “*Modelling the phase diagram of magnetic shape memory Heusler alloys*”, Journal of Physics D: Applied Physics, 39: 865, (2006).
- [6] Yu S. Y., Liu Z. H., Liu G. D., Chen J. L., Cao Z. X., Wu G. H., Zhang B., Zhang X. X., “*Large magnetoresistance in single-crystalline Ni₅₀Mn_{50-x}In_x alloys (x=14-16) upon martensitic transformation*”, Applied Physics Letters, 89: 162503, (2006).
- [7] Muthu S. E., Rao N. V. R., Rao D. V. S., Raja M. M., Devarajan U., Arumugam S., “*Effect of Ni/Mn concentration on exchange bias properties in bulk Ni_{50-x}Mn_{37+x}Sn₁₃ Heusler alloys*”, Journal of Applied Physics, 110: 023904, (2011).
- [8] Krenke T., Duman E., Acet M., Wassermann E. F., Moya X., Manosa L., Planes A., Suard E., Ouladdiaf B., “*Magnetic superelasticity and inverse magnetocaloric effect in Ni-Mn-In*”, Physical Review B, 75: 104414, (2007).
- [9] Zhang B., Zhang X. X., Yu S. Y., Chen J. L., Cao Z. X., Wu G. H., “*Giant magnetothermal conductivity in the Ni-Mn-In ferromagnetic shape memory alloys*”, Applied Physics Letters, 91: 012510, (2007).
- [10] Kübler J., Williams A. R., Sommers C. B., “*Formation and coupling of magnetic moments in Heusler alloys*”, Physical Review B, 28: 1745, (1983).
- [11] Felser C., Fecher G. H., Balke B., “*Spintronics: a challenge for materials science and solid-state chemistry*”, Angewandte Chemie (International ed. In English), 46: 668, (2007).
- [12] Jung D., Koo H. J., Whangbo M. H., “*Study of the 18-electron band gap and ferromagnetism in semi-Heusler compounds by non-spin-polarized electronic band structure calculations*”, Journal of Molecular Structure (Theochem), 527: 113, (2000).
- [13] Wernick J. H., Hull G. W., Geballe T. H., Bernardini J. E., Waszczak J. V., “*Superconductivity in ternary Heusler intermetallic compounds*”, Materials Letters, 2: 90, (1983).
- [14] Gasi T., Ksenofontov V., Kiss J., Chadov S., Nayak A. K., Nicklas M., Winterlik J., Schwall M., Klaer P., Adler P., Felser C. “*Iron-based Heusler compounds Fe₂YZ: Comparison with theoretical predictions of the crystal structure and magnetic properties*”, Physical Review B, 87: 064411, (2013).
- [15] Felser C., Hirohata A., “*Heusler Alloys: Properties, Growth, Applications*”, Springer Series in Materials Science, Switzerland, (2016).
- [16] Raja M. M., Kamat S. V., “*Structure, Magnetic, and Electrical Properties of Heusler-Type Fe_{3-x}CoxSi Ferromagnetic Alloys*”, Metallurgical and Materials Transactions A, 46A: 4688, (2015).
- [17] Kogachi M., Fujiwara T., Kikuchi S., “*Atomic disorder and magnetic property in Co-based Heusler alloys Co₂MnZ (Z=Si, Ge, Sn)*”, Journal of Alloys and Compounds, 475: 723, (2009).
- [18] Miura Y., Nagao K., Shirai M., “*Atomic disorder effects on half-metallicity of the full-Heusler alloys Co₂(Cr_{1-x}Fe_x)Al: A first-principles study*”, Physical Review B, 69: 14413, (2004).
- [19] Kandpal H. C., Ksenofontov V., Wojcik M., Seshadri R., Felser C., “*Electronic structure, magnetism and disorder in the Heusler compound Co₂TiSn*”, Journal of Physics D: Applied Physics, 40: 1587, (2007).
- [20] Picozzi S., Continenza A., Freeman A. J., “*Role of structural defects on the half-metallic character of Co₂MnGe and Co₂MnSi Heusler alloys*”, Physical Review B, 69: 094423, (2004).
- [21] Kresse G., Hafner, J., “*Ab initio molecular dynamics for liquid metals*”, Physical Review B, 47: 558, (1994).
- [22] Kresse G., Furthmüller J., “*Efficiency of ab-initio total energy calculations for metals and semiconductors using a plane-wave basis set*”, Computational Material Science, 6: 15, (1996).
- [23] Blöchl P. E., “*Projector augmented-wave method*”, Physical Review B, 50: 17953, (1994).
- [24] Kresse G., Joubert J., “*From ultrasoft pseudopotentials to the projector augmented wave method*”, Physical Review B, 59: 1758, (1999).
- [25] Perdew J. P., Zunger A., “*Self-interaction correction to density-functional approximations for many-electron systems*”, Physical Review B, 23: 5048, (1981).
- [26] Perdew J. P., Burke K., Ernzerhof M., “*Generalized Gradient Approximation Made Simple*”, Physical Review Letters, 77: 3865, (1996).
- [27] Kohn W., Sham L. J., “*Self-Consistent Equations Including Exchange and Correlation Effects*”, Physical Review, 140: A1133, (1965).
- [28] Hohenberg P., Kohn W., “*Inhomogeneous Electron Gas*”, Physical Review, 136: B864, (1964).
- [29] Monkhorst H. J., Pack J. D., “*Special points for Brillouin-zone integrations*”, Physical Review B, 13: 5188, (1976).
- [30] Vinet P., Rose J. H., Ferrante J., Smith J. R., “*Universal Features of the Equation of State of Solids*”, Journal of Physics: Condensed Matter, 1: 1941, (1989).
- [31] Feng J., Xiao B., Chen J. C., Zhou C. T., “*Theoretical study on the stability and electronic property of Ag₂SnO₃*”, Solid State Sciences, 11: 259, (2009).
- [32] Matar S. F., Wehrich R., Kurowski D., Pfitzner A., “*DFT calculations on the electronic structure of CuTe₂ and Cu₇Te₄*”, Solid State Sciences, 6: 15, (2004)
- [33] Rausch J. B., Kayser F. X., “*Elastic constants and electrical resistivity of Fe₃Si*”, Journal of Applied Physics, 48: 487, (1977).
- [34] Moroni E. G., Wolf W., Hafner J., Podlocky R., “*Cohesive, structural, and electronic properties of Fe-Si compounds*”, Physical Review B, 59: 12860, (1999).
- [35] Hsu L. S., Wang Y. K., Guo G. Y., Lue C. S., “*Experimental and theoretical study of the electronic structure of Fe₃Al, Fe₂VAl, and Fe₂VGa*”, Physical Review B, 66: 205203, (2002).
- [36] Christensen N. E., Kudrnovsky J., Rodriguez C. O., “*Metamagnetic behavior in Fe₃Si and Fe₃Al*”, International Journal of Material Science, 1: 1-15, (2007).
- [37] Paduani C., Bormio-Nunes C., “*Density functional theory study of Fe₃Ga*”, Journal of Applied Physics, 109: 033705, (2011).

- [38] Page Y. L., Saxe P., “*Symmetry-general least-squares extraction of elastic coefficients from ab initio total energy calculations*”, Physical Review B, 63: 174103.1, (2001).
- [39] Grimvall G., “*Thermophysical Properties of Materials*”, Elsevier, New York, (1999).
- [40] Mouhat F., Coudert F. X., “*Necessary and Sufficient Elastic Stability Conditions in Various Crystal Systems*”, Physical Review B, 90: 224104, (2014).
- [41] Wu D. H., Wang H. C., Wei L. T., Pan R. K., Tang B. Y., “*First-principles study of structural stability and elastic properties of MgPd₃ and its hydride*”, Journal of Magnesium and Alloys, 2: 165, (2014).
- [42] Voigt W., “*Lehrbuch der Kristallphysik*”, Springer, Berlin, (1928).
- [43] Reuss A., “*Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung für Einkristalle*”, Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 9: 49, (1929).
- [44] Hill R., “*The Elastic Behaviour of a Crystalline Aggregate*”, Proceedings of the Physical Society Section A, 65: 349, (1952).
- [45] Pugh S. F., “*XCII. Relations between the elastic moduli and the plastic properties of polycrystalline pure metals*”, Philosophical Magazine Series 7, 45: 823, (1954).
- [46] Greaves G. N., Greer A. L., Lakes R. S., Rouxel T., “*Poisson’s ratio and modern materials*”, Nature Materials, 10: 823, (2011).
- [47] Lau K., McCurdy A. K., “*Elastic anisotropy factors for orthorhombic, tetragonal, and hexagonal crystals*”, Physical Review B, 58: 14, (1998).
- [48] Schreiber E., Anderson O. L., Soga N., “*Elastic Constants and Their Measurements*”, McGraw-Hill, New York, (1973).
- [49] Anderson O. L., “*A simplified method for calculating the debye temperature from elastic constants*”, Journal of Physics and Chemistry of Solids, 24: 909, (1963).
- [50] Johnston I., Keeler G., Rollins R., Spicklemire S., “*Solid State Physics Simulations (Consortium for Upper-Level Physics Software)*”, Wiley, New York, (1996).
- [51] Deligoz E., Colakoglu K., Ciftci Y. O., “*Ab Initio Study on Hypothetical Silver Nitride*”, Chinese Physics Letters, 25: 2154, (2008)



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



On a Study of the Quaternionic Lorentzian curve

Quaternionik Lorentz eğriler üzerine bir çalışma

Yazar(lar) (Author(s)): Müge KARADAĞ¹, Ali İhsan SİVRİDAĞ²

ORCID¹: 0000-0002-5722-5441

ORCID²: 0000-0002-5596-9893

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(To cite to this article): Karadağ M. ve Sivridağ A. İ., “Quaternionik Lorentz eğriler üzerine bir çalışma”, *Politeknik Dergisi*, 21(4): 937-940, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.389626

Quaternionik Lorentz Eğriler Üzerine Bir Çalışma

Araştırma Makalesi / Research Article

Müge KARDAĞ*, Ali İhsan SİVRİDAĞ

Fen Edebiyat Fakültesi, Matematik Bölümü, İnönü Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 02.09.2017 ; Kabul/Accepted : 24.10.2017)

ÖZ

Bu çalışmada öncelikle üç boyutlu Lorentz Uzayda L_Q^3 kuaterniyon ve pseudo-kuaterniyonlar gözönüne alınarak bir uzay-kuaterniyonik eğri için Serret-Frenet Formülleri elde edildi. Daha sonra bunlar kullanılarak bir Kuaterniyonik Lorentz Eğrisi L_Q^4 için Serret-Frenet Formülleri yeniden türetilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Regle yüzeyler, Lorentz uzayı, Minkowski uzayı, distribusyon parametresi, Laplacian ve D'Alembert operatörü.

On a Study of the Quaternionic Lorentzian Curve

ABSTRACT

In this study, Serret-Frenet Formulas for a space-quaternionic curve were obtained by considering quaternions and pseudo-quaternions in three-dimensional Lorentz Space L_Q^3 . The Serret-Frenet Formulas for a Quaternionic Lorentz Curve L_Q^4 were then re-derived using them.

Keywords: Ruled surfaces, lightlike curves, lightlike surfaces, Minkowski space, distribution parameter, Laplacian and D'Alembertian operator.

1. INTRODUCTION

First of all, some basic definitions and concepts related to the algebra of Lorentzian curve are given. Hence, using this relations, the Serret-Frenet vectors of a Lorentzian curve is rederived. Moreover, some relationships between the Euclidean curve and the Lorentzian curve are obtained.

Definition 1.1 Let $\forall x = \sum_{A=1}^4 x_A \vec{e}_A, y = \sum_{A=1}^4 y_A \vec{e}_A \in V$, be any two element of V then, Lie Operation is defined as follows

$$[x, y] = \sum (x_i y_j - x_j y_i) \vec{e}_k \tag{1}$$

where, (i, j, k) is the circular permutation of $(1,2,3)$ [1].

Definition 1.2 Let S and T be defined as;

$$Sx = \sum_{i=1}^3 x_i \vec{e}_i, Tx = x_4 \vec{e}_4$$

$$\text{for } \forall x = \sum_{A=1}^4 x_A \vec{e}_A \in V \tag{2}$$

It is clear that $ST = TS = 0$ and $S + T = I$ [1].

Definition 1.3 Let $\alpha: V \rightarrow V$ be defined as

$$\alpha = -S + T$$

a linear transformation, for $\forall x \in V$,

$$\alpha x = -\sum_{i=1}^3 x_i \vec{e}_i + x_4 \vec{e}_4 = -Sx + Tx. \tag{3}$$

Here if $\alpha^2 = I$ then α is called involutory linear isomorphism [1]. S and T , defined as in (2) are called spatial and temporal projections on V , respectively. α involutory isomorphism which given by (3) is called Hamilton Conjugation on V [1].

Definition 1.4 The two bilinear forms on V , are defined as; for $\forall x, y \in V$ then

$$g(x, y) = \sum_{i=1}^3 x_i y_i - x_4 y_4, h(x, y) = \sum_{A=1}^4 x_A y_A. \tag{4}$$

In this definition; g and h are non-degenere, real, and symmetric bilinear forms. Furthermore; S and T are defined as in (2) with (3) and they are self-adjoint with respect to bilinear forms defined as in (4).

That is, for each $x, y \in V$,

$$g(Sx, y) = g(x, Sy) = h(x, Sy) = h(Sx, y) \tag{5}$$

$$g(Tx, y) = g(x, Ty) = -h(x, Ty) = -h(Tx, y) \tag{6}$$

$$g(\alpha x, y) = g(x, \alpha y) = -h(x, y) \tag{7}$$

[3].

Definition 1.5 Let b be any symmetric bilinear form on V . If, ' \circ ' is a binary operation than define $\forall x, y \in V$,

$$x \circ y = [x, y] + x_4 Sy + y_4 Sx - b(x, y) \vec{e}_4. \tag{8}$$

In this condition, (V, \circ) is a real algebra (In generally, it is non-associative and non-commutative). For this real algebra, if $b = h$ then the quaternion is called pseudo-

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : muge.karadag@inonu.edu.tr

quaternionic algebra, if $b = g$ then the quaternion is called real-quaternionic algebra on V [1].

In the quaternionic condition; binary operation is denote \cdot and the pseudo-quaternionic condition is stand for $*$. Let us consider any $x \in V$, thus $N(x)$ is defined as $x \circ \alpha x \in V$. It is clear that for each $x, y \in V$,

$$N(x) = -b(x, \alpha x)\vec{e}_4. \tag{9}$$

Again, it is clearly seen that,

$$N(x + y) - N(x) - N(y) = x \circ \alpha y + y \circ \alpha x = -\{b(x, \alpha y) + b(y, \alpha x)\}\vec{e}_4. \tag{10}$$

Since α is respect to both g and h self-adjoint then; we have there exist two following equations

$$(x \cdot \alpha y + y \cdot \alpha x) = -2g(x, \alpha y)\vec{e}_4 = 2h(x, y)\vec{e}_4$$

(quaternionic condition)

$$(x * \alpha y + y * \alpha x) = -2h(x, \alpha y) e^{-4} = 2g(x, y) e^{-4}$$

(pseudo – qaternionic condition) [2].

Definition 1.6 Let $x \in V$. The norm of x , $N(x)$ is defined as (9). In the quaternionic condition, $N(x)$ is defined as $h(x, x)\vec{e}_4$. If the another pseudo-quaternionic condition then $N(x)$ is defined as $g(x, x)\vec{e}_4$. Hence; $N(x)$, are used to be, is equal to Euclidean norm $N(x) = \|x\|^2\vec{e}_4$. In the pseudo-quaternionic condition for each $x \in V$, then x is called

$g(x, x) > 0$ then space – like

$g(x, x) = 0$ then null

$g(x, x) < 0$ then time – like (11)

[2].

Definition 1.7 A quaternion x is called a unit quaternion if $\|x\|_L = 1$ then, in addition a pseudo quaternion x is unitary whenever $N(x)$ is either $+\vec{e}_4$ or $-\vec{e}_4$ [4].

Definition 1.8 If two quaternions x and y (or pseudo-quats) are satisfied $x \cdot \alpha y + y \cdot \alpha x = 0$, ($x * \alpha y + y * \alpha x = 0$) then they are called ortogonality. Another equivalent condition for ortogonally is

$$h(x, y) = 0 \text{ or } g(x, y) = 0. \tag{12}$$

Now we define the relationship between quaternionic and pseudo-quaternionic multiplications: Let x and y be two elements of V . By making use of findings (5) and (8) for $x * y - x \cdot y$, we obtain

$$x * y - x \cdot y \equiv \{g(x, y) - h(x, y)\}\vec{e}_4. \tag{13}$$

As a result of equation (13), we have;

$$x * y \equiv x \cdot y - 2x_4y_4\vec{e}_4$$

[1].

In this study L_Q^4 denotes the 4-dimensional pseudo-quaternionic Lorentzian space.

Definition 1.9 Let $M \subset L_Q^4$ be a curve which has s – arc parameter at Lorentzian space. If the velocity vector of M is \dot{x} then

$g(\dot{x}, \dot{x}) < 0$ then $x(s)$ is called time-like curve

$g(\dot{x}, \dot{x}) > 0$ then $x(s)$ is called space-like curve

$g(\dot{x}, \dot{x}) = 0$ then $x(s)$ is called null curve (14)

[4].

Definition 1.10 Let $M \subset L_Q^4$ be a curve. If the Serret-Frenet frame field is $\{V_1(s), V_2(s), V_3(s), V_4(s)\}$ then the k_i function which is defined as

$$k_i(s): I \rightarrow \mathbb{R}, s \rightarrow k_i(s) = g((V_i)^\prime(s), V_{i+1}(s)) \tag{15}$$

is called, i – th curvature function of M curve and, $k_i(s)$, $1 \leq i \leq 3$ real number is called i – th curvature of this curve at the point $M(s)$ [4].

Now we study on pseudo-quaternionic Lorentzian Space with the use of these relations.

2. MATERIAL and METHOD

2.1. The Serret- Frenet formulae of the Pseudo space Quaternionic Lorentzian curve on L_Q^3

Let us show 3-dimensional pseudo-quaternionic Lorentzian space with L_Q^3 . Let M be a pseudo-space quaternionic time-like curve.

Let \tilde{g} and L_Q^3 be shown Lorentzian binary operation as, for $\forall x, y \in L_Q^3$

$$\tilde{g}(x, y) = \sum_{i=1}^2 x_i y_i - x_3 y_3$$

then, \cdot ' binary operation in L_Q^4 is defined as

$$x \circ y = [x, y] + x_4 S y + y_4 S x - b(x, y)\vec{e}_4.$$

If we review the last equation for L_Q^3 ; $b = \tilde{g}$ and if we consider $*$ ' instead of \cdot ' binary operation, we obtain

$$x * y = [x, y] - \tilde{g}(x, y)\vec{e}_4. \tag{16}$$

Let $X: I \rightarrow L_Q^3$ be a time like space-quaternionic curve. Hence; $\dot{X} = t$ then, $N(t) = -1$. So, $N(t)$ be defined as

$$N(t) = \tilde{g}(t, t) = t * \alpha t.$$

If we derive this equation with respect to s ; we obtain

$$\dot{t} * \alpha t + t * \alpha \dot{t} = 0. \tag{17}$$

As a result of this;

\dot{t} is \tilde{g} -orthogonal to t . That is, $\tilde{g}(\dot{t}, t) = 0$.

$\dot{t} * \alpha$

t is a time-like quaternion.

Hence, we define n_1 space-quaternion and k scalar function as they satisfy the following conditions when \dot{t} is a pseudo-quaternion:

$$\dot{t} = k n_1, \quad k = N(\dot{t}). \tag{18}$$

n_1 is \tilde{g} -orthogonal to t from (i) there is a n_2 space-quaternion which is satisfy

$$t * n_1 = n_2 = -n_1 * t. \tag{19}$$

Here, we can write $t * n_2 = -n_1 = -n_2 * t$ and $n_2 * n_1 = -t = -n_1 * n_2$. Hence, t, n_1, n_2 are mutually \tilde{g} -orthogonal unit pseudo space-quaternion in L_Q^3 .

We have derived from (19) and obtained;

$$\dot{n}_2 = (t * n_1)', \quad \dot{n}_2 = t * (-kt + \dot{n}_1) \tag{20}$$

Thus; $\dot{n}_1 - kt$ is \tilde{g} -orthogonal to \dot{t} and n_2 .

$n_1 = \frac{\ddot{X}}{N(\ddot{X})}$ is unit space-quaternion and

$$\dot{n}_1 \in Sp\{t, n_1, n_2\}.$$

As a result of this, we can write

$$\dot{n}_1 = \lambda_1 t + \lambda_2 n_1 + \lambda_3 n_2$$

Hence; $\|\dot{n}_1\|$ is

$$\tilde{g}(\dot{n}_1, \dot{n}_1) = \lambda_1 \tilde{g}(t, \dot{n}_1) + \lambda_2 \tilde{g}(n_1, \dot{n}_1) + \lambda_3 \tilde{g}(n_2, \dot{n}_1),$$

$$\tilde{g}(t, t) = -1.$$

Namely, X is a time-like pseudo-space quaternionic curve. In addition, in a similar way

$$\varepsilon_0 \lambda_1 = \tilde{g}(\dot{n}_1, t) = -\tilde{g}(\dot{t}, n_1) = -k\varepsilon_0 \quad \lambda_1 = -k,$$

$$\frac{1}{\varepsilon_0} = \varepsilon_0$$

$\lambda_1 = -\varepsilon_0 k$ and t is a time like then

$$\varepsilon_0 = -1. \text{ Because of; it obtained } \lambda_1 = k.$$

In addition, $\lambda_2 = \tilde{g}(\dot{n}_1, n_1) = 0$ and $\lambda_3 = \tilde{g}(\dot{n}_1, n_2) = \varepsilon_0 r$, hence \tilde{g} is $\tilde{g}(n_1, n_1) = 1$. Namely, if n_1 is space-like then $\varepsilon_0 = 1$ and $\lambda_3 = r$. So we obtain

$$\dot{n}_1 = kt + rn_2. \tag{21}$$

By substituting (5) in (6), we find

$$\dot{n}_2 = t * (-kt + \dot{n}_1)$$

$$\dot{n}_2 = -rn_1 \tag{22}$$

(19), (21) and (22) equations are called Serret-Frenet Formulae of a curve which is time-like pseudo space-quaternionic curve in L_Q^3 . (t, n_1, n_2, k, r) is called Frenet-Apparatus of this curve.

The matrix form for this Serret-Frenet Apparatus of this curve is given by

$$\begin{bmatrix} \dot{t} \\ \dot{n}_1 \\ \dot{n}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & k & 0 \\ k & 0 & r \\ 0 & -r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t \\ n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \tag{23}$$

[4].

2.2. The Serret- Frenet formulae of Pseudo-Quaternionic Lorentzian curve on L_Q^4

Now, by making use of the Serret-Frenet formulae of a pseudo space-quaternionic Lorentzian curve at L_Q^3 . We have rederived this formulae for one pseudo-quaternionic curve on L_Q^4 : let $\tilde{X} = \sum_{A=1}^4 q_A(s)\tilde{e}_A$ be a time-like curve. The pseudo-quaternionic Lorentzian multiplication is shown by g . We have

$$\dot{T} = K N_1, \quad K = N(\dot{T}), \quad N(T) = -1,$$

$$N(N_1) = -1 \tag{24}$$

If we derive $N(T) = -1$, then we obtain $g(\dot{T}, T) = 0$. Here by making use of (24) we have

$$N_1 * \alpha T + T * \alpha N_1 = 0.$$

For a result of them,

N_1 is g -orthogonal to T .

$t = N_1 * \alpha T$ is a space-quaternion.

Here, T and N_1 have unit then t has unit length.

From $t = N_1 * \alpha T$ then, the vector N_1 can choosen as equal to $t * T$ along the curve. Namely this can be written as

$$N_1 = t * T. \tag{25}$$

If we derive equation (25) and and use Eqs. (19), (24) and (25), we obtain,

$$\dot{N}_1 = \dot{t} * T + t * \dot{T}$$

$$\dot{N}_1 = K T + k N_2 \tag{26}$$

Here N_2 is

$$N_2 = n_1 * T \tag{27}$$

The characterization of N_2 is given as follows:

N_2 is unit.

T, N_1 and N_2 are mutually g -orthogonal.

Now, in the derivation of $N_2 = n_1 * T$ by making use of (21), (23) and (24) we have the following result;

$$\dot{N}_2 = \dot{n}_1 * T + n_1 * \dot{T}$$

$$\dot{N}_2 = k N_1 + (r - K)N_3 \tag{28}$$

Here, N_3 is taken $N_3 = n_2 * T$. According to this condition; the characterization of N_3 is given as follows:

The norm of N_3 is $N(N_3) = 1$.

T, N_1, N_2 and N_3 are mutually g -orthogonal.

As a result of these, the derivation of N_3 , by making use of (2.0), (24) and (25) we obtain,

$$N_3 = \dot{n}_2 * T + n_2 * \dot{T} N_3 = -(r - K)N_2 \tag{29}$$

The equations of (24), (26), (28) and (29) are called The Serret-Frenet Formulae of \tilde{X} time-like pseudo-quaternionic Lorentzian curve at L_Q^3 . Thus, $(T, N_1, N_2, N_3, K, k, r - K)$ is called Serret-Frenet Apparatus of this Lorentzian curve.

The matrix form of this Serret-Frenet Apparatus for this Lorentzian curve is given by

$$\begin{bmatrix} \dot{T} \\ \dot{N}_1 \\ \dot{N}_2 \\ \dot{N}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & K & 0 & 0 \\ K & 0 & k & 0 \\ 0 & k & 0 & r - K \\ 0 & 0 & -(r - K) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{bmatrix} \quad (30)$$

[4].

3. CONCLUSIONS

Lorentzian curves have been studied by many mathematicians, but a different study has been done with the terminology of quaternions for a quaternionic Lorentzian curve. Thus the Serret-Frenet formulas of space quaternionic curves are re-derived.

REFERENCES

1. Bharathi K. and M. Nagaraj, "Geometry of Quaternionic and Pseudo-Quaternionic Multiplications", *Ind. J. P. App. Math.*, 16(7): 741-756, (1985).
2. Bharathi K. and Nagaraj M., "Quaternion Valued Function of a Real Variable Serret-Frenet Formulae", *Ind. J. P. App. Math.*, 18(6): 507-511, (1987).
3. Sivridag A. I., Gunes R. and Keles S., "The Serret-Frenet Formulae for Dual Quaternion Valued Functions of a Single Real Variable", *Mechanism and Machine Theory*, 29(5): 749-754, (1994).
4. M. Karadag, "Helixes and Characterisations on the Quaternionic Lorentz Manifolds", *Doctoral Dissertation*, University of Inonu, (1999).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



Seçici Katalitik İndirgeme (SCR) sistemi ve araçlara adaptasyonu

Selective Catalytic Reduction (SCR) System and adapting on the vehicles

Yazar(lar) (Author(s)): Nilgün ANAR¹, Pınar BAYRAM²

ORCID¹: 0000-0003-4560-3991

ORCID²: 0000-0003-1452-2769

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Anar N. ve Bayram P. “Seçici Katalitik İndirgeme (SCR) sistemi ve araçlara adaptasyonu”, *Politeknik Dergisi*, 21(4): 941-950, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.403973

Seçici Katalitik İndirgeme (SCR) Sistemi ve Araçlara Adaptasyonu

Araştırma Makalesi / Research Article

Nilgün ANAR*, Pınar BAYRAM

TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. İstanbul Cad. Bursa, Türkiye

(Geliş/Received : 06.09.2017 ; Kabul/Accepted : 01.03.2018)

ÖZ

Günümüzde artan dünya nüfusu ve bununla paralel olarak artış gösteren taşıt sayısının oluşturduğu egzoz gazlarının çevreye ve insan sağlığına olumsuz etkilerini en aza indirebilmek için her geçen gün daha sıkı denetimler yapılmakta ve sınırlandırmalar getirilmektedir. Bu kapsamda otomobil üreticilerinin yeni teknolojiler geliştirerek zararlı gaz salınımlarını azaltmaları gerekmektedir. Bu çalışmada zararlı egzoz gazı salınımlarının insan sağlığı ve çevre üzerindeki negatif etkilerinden bahsedilmiş, otomotiv üreticilerinin bu salınımların azaltılması için yapmakta olduğu çalışmalar ve uygulanan teknolojiler incelenmiştir. Dizel araçlarda açığa çıkan zararlı azot oksit miktarını sınırlandırmak için uygulanan en yeni ve gelişmiş teknoloji olan SCR (Selective Catalytic Reduction) olarak adlandırılan seçici katalitik indirgeme metodu analiz edilmiş, azot oksit miktarının minimize edilmesi için gerçekli olan şartlar ve sonucunda oluşan kimyasal reaksiyon ile ilgili bilgi verilmiştir. Ayrıca yöntemin diğer teknolojilere göre avantaj ve dezavantajları incelenirken, araçlara uygulanmasındaki kritiklikler ele alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Seçici katalitik indirgeme metodu, SCR sistemi, dizel, emisyon, azot oksit, üre, amonyum.

Selective Catalytic Reduction (SCR) System and Adapting On the Vehicles

ABSTRACT

More challenging controls are being carried out every day and limitations are brought to reduce the negative effects of the exhaust gases generated by the number of vehicles that is increasing in parallel with world population on the environment and human health. Because of this reason, automotive companies need to develop new technologies to reduce harmful gas emissions. In this research, negative effects of harmful exhaust gases on human health and environment, new technologies and studies that automotive manufacturers are performing to reduce these emissions have been discussed. Selective catalytic reduction (SCR) method which is the most advanced technology applied to limit the amount of harmful nitrogen oxides in diesel vehicles has been analyzed, required conditions for minimizing the amount of nitrogen oxide and the chemical reactions are explained. Also the advantages and disadvantages of the method compared to other technologies have been examined and criticalities in adaptation on the vehicles have been discussed.

Keywords: Selective Catalytic Reduction method, SCR system, diesel, emission, nitrogen oxide, urea, ammonia.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünya genelinde özellikle büyük şehirlerde otomobiller, oluşturduğu egzoz gazları sebebiyle doğayı en fazla kirleten etmenler içerisinde yer almaktadır. Otomobillerin özellikle insan sağlığına en fazla zarar verdiği ortam, yoğun trafikte araç motorlarının rölantide çalıştığı zamanlardadır. Bunun sebebi taşıtların, yakıt tiplerine göre egzoz borularından çıkan zararlı gaz bileşenlerinin farklılık göstermesidir. Dünya genelinde, içten yanmalı motorlarda yakıt-hava karışımının yanması sonucu açığa çıkan ve atmosfere salınan zararlı gaz miktarının sınırlandırılması için emisyon standartları ve emisyon değerlerinin kontrolleri her sene daha zorlayıcı hale gelmektedir. Bu kapsamda motor üreticileri, partikül madde (PM), karbon monoksit (CO),

karbondioksit (CO₂), hidrokarbon (HC) ve azot oksit (NO_x) emisyonlarını azaltmaya zorlanmaktadır.

NO_x, değişik miktarlarda azot ve oksijen içeren fazlaca reaktif bir gazdır. Hava yakıt karışımı içindeki NO_x, yanma odası sıcaklığı yaklaşık 1800 °C ye yükseldiğinde azot (N₂) ve oksijenin (O₂) birleşmesiyle oluşur. Eğer sıcaklık 1800 °C'nin üstüne yükselmez ise, N₂ ve O₂, NO gazını meydana getirmeden egzoz sisteminden dışarı atılır. Azot ve oksijen gazlarının değişik moleküllerinin birleşmesi ile NO, NO₂, N₂O, N₂O₃ vb. gibi çeşitli gazlar ortaya çıkar ki bunların hepsine birden “azot oksitler” denir ve NO_x olarak ifade edilir. Dizel motorların çalışma prensibi çok hava – az yakıttır. Bu çalışma prensibi ve havada bulunan azot miktarının yüksek olması sebebiyle; dizel motorların, benzinli motorlara göre NO_x oluşturma oranı daha fazladır. Benzinli motorlarda atmosfere atılan 1 ton egzoz gazının yaklaşık 18,42 kg'ı NO_x iken, dizel motorlarda bu miktar yaklaşık 123,71 kg'a ulaşmaktadır. [1]

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : nilgun_anar@hotmail.com

Dizel motorlu taşıtlarda açığa çıkan azot oksit miktarını sınırlandırmak için uygulanan en gelişmiş teknoloji, SCR (Selective Catalytic Reduction) olarak adlandırılan seçici katalitik indirgeme sistemidir. Bu teknoloji ile açığa çıkan azot oksit, sisteme dahil edilen kimyasal ile reaksiyona girerek havada doğal halde bulunan, soluduğumuz nitrojen, su buharı ve sınırlı miktarda karbondioksit döndürerek egzoz borusundan dışarı atılır. Bu yöntem ile %90'ın üzerinde azot oksit eliminasyonu mümkün olmaktadır.

İlkılıç ve diğ. [1] 'Dizel Motorlarında Azot Oksitlerin Oluşumu ve Kontrol Yöntemleri' isimli araştırma raporlarında dizel motorlardan kaynaklanan ve çevre ile canlıların sağlığı üzerinde olumsuz etkileri olan NOx emisyonlarının kontrol altına alınarak azaltılması için yanmadan önce, yanma sırasında ve yanmadan sonra alınabilecek önlemler ele almışlardır. Dizel motorlarında NOx emisyonlarının azaltılmasında kullanılan yöntemlerden sadece EGR uygulaması ile NOx emisyonlarında %75'lik bir azalma elde edilmektedir. NOx emisyonlarının azaltılmasında kullanılan mevcut yöntemler yakıt ekonomisi, yanmamış hidrokarbon ve partikül madde emisyonları gibi diğer parametreleri kötüleştirilmektedir. Bu nedenle NOx kontrol yöntemlerinin birkaçı beraber kullanılarak hem NOx emisyonları hem de diğer parametreler optimize edilmelidir.

Sher [2] çalışmasında içten yanmalı motorlardan kaynaklanan hava kirliliğinin insan sağlığı üzerindeki etkilerini incelemiş, emisyon kontrol yöntemleri ve bu yöntemlerin verimliliğini araştırmıştır. Bunların yanı sıra kullanılmakta olan yakıt tiplerinin emisyon değerleri üzerine etkileri üzerinde durmuş ve alternatif yakıt çözümlerini incelemiştir.

Uyumaz ve diğ. [3] çalışmalarında taşıtlardan kaynaklanan egzoz emisyonlarını tarif ederek, bu gazların azaltılma yöntemlerini incelemişlerdir. Taşıtların kaynaklı açığa çıkan egzoz emisyonlarını azaltmak için kullanılan en güncel ve teknolojik sistemler araştırılmıştır. Taşıtların kaynaklı egzoz emisyonlarının azaltılmasında en etkin yöntemler arasında katalitik konvertörler, seçici katalitik indirgeme ve partikül tutucu filtreler yer almaktadır. Bunun yanında alternatif yanma türleri ve yakıtlar ile yapılan çalışmalar taşıtların kaynaklı emisyonların azaltılmasında önemli bir yer tutmaktadır. Bununla birlikte ileride sıfır emisyon amacı için elektrikli taşıtlar, hidrojen kullanımı, farklı yanma modları gibi alternatiflerin uygulanabileceği belirtilmiştir.

Ayberk ve Çetin [4] hazırladıkları raporda azot oksitlerin tanımını yapmakta, etkilerinden bahsetmekte ve azot oksit emisyonuna neden olan kaynaklar ve uzaklaştırma yöntemlerini tanıtmaktadır. Bunun yanı sıra Kocaeli ilinde yapılan ölçümlere yer verilmiştir.

Yadav [5] katalitik konvertörleri incelediği çalışmasında her geçen gün sayısı artan taşıtların çevre kirliliğine olan etkilerini ele almış, 1991 yılından itibaren Hindistan'da uygulamaya geçen emisyon ile ilgili yasal düzenlemelerden bahsetmiştir. İki yollu ve üç yollu

katalitik konvertör tiplerini açıklamış ve konvertörlerle ilgili en sık yaşanan problemleri incelemiştir.

Johnson [6] 2014 yılını kapsayan çalışmasında taşıtların emisyon regülasyonları ve teknolojilerindeki gelişmelerden bahsetmiştir. NOx ve sera gazı ile ilgili regülasyon beklentilerini karşılamak için benzinli ve dizel motorlardaki yenilikler üzerinde durulmuş, NOx emisyon değerlerinin azaltılması için uygulanmakta olan SCR ve LNT adı verilen NOx absorbe edicilerin kullanıldığı sistem teknolojileri ile ilgili bilgi verilmiştir.

Schnitzler [7] hazırlamış olduğu araştırma raporunda partikül ve NOx indirgeme için kullanılmakta olan emisyon teknolojilerini ve bu teknolojilerin emisyon düşürme üzerindeki etkilerini incelemiştir. Araştırmada SCR'nin çoğunlukla ağır taşıtlarda tercih edilen teknik bir çözüm olmasından bahsedilirken hafif taşıtlarda LNT sisteminin alternatif bir seçenek olduğu belirtilmiştir. LNT teknolojisiyle ilgili olarak gözlenen en büyük sorunun uzun vadede istikrar sağlamaması olduğu belirtilmiştir. SCR teknolojisiyle ilgili en önemli handikaplar ise sistemin ihtiyaç duyduğu komponent yerleşimlerinin zorlayıcı olması ve sistemin çalışması için gerekli sıcaklık seviyesinin sağlanmasından kaynaklanacak zaman kaybıdır.

Jabłońska ve Chmielarz [8] raporlarında azot oksit oluşumunun başlıca kaynakları, bunların çevre ve insan yaşamı üzerindeki etkileri ile NOx'in giderilmesi için kullanılan farklı teknolojilerden bahsetmiştir. Bu kapsamda titanyum bazlı bazı katalitik konvertörler de dahil olmak üzere farklı tipteki konvertörler incelenmiştir. Tungsten ve molibden içeren katalizörler, NOx indirgeme sürecinde en iyi performansı sergilemesi nedeniyle piyasada yoğun olarak tercih edilmektedir. Titanyum içeren katalizörlerin dezavantajları nedeniyle farklı trend arayışı içine girilmekte ve hidrotalkit benzeri materyallerden elde edilen bakır içeren karışık metal oksitlerin kullanılmasının potansiyel bir çözüm olabileceği belirtilmektedir. Bununla birlikte rapor sonucunda gerçek çalışma koşullarında daha fazla uygulama yapılmasına ihtiyaç olduğu belirtilmiştir.

Tasic ve diğ. [9] hazırladıkları araştırma raporunda benzinli ve LPG'li taşıtların emisyonlarını incelemiş ve birbirlerine göre farklılıklarını ele almışlardır. Buna göre normal şehir trafiği ve yoğun şehir trafiğinde LPG'li taşıtlarda benzinli araçlara kıyasla CO, HC, NOx ve CO2 emisyonlarının daha düşük olduğu gözlenmiştir. Kıyaslama yapıldığında CO oranı benzinli araçlara göre normal şehir trafiğinde %30; yoğun trafikte %10 daha az iken HC oranı şehir trafiğinde %30; yoğun trafikte %51 daha azdır. Bunun yanı sıra NOx oranı şehir trafiğinde %41; yoğun trafikte %77 ve CO2 oranı şehir trafiğinde %10; yoğun trafikte %11 daha azdır. Tüm zararlı gaz salınımlarının yaklaşık %12'sinin kişisel taşıtlardan üretildiği düşünüldüğünde LPG'nin uygun bir alternatif yakıt olduğu ve geleceğin kişisel ulaşım çözümü olabileceği sonucuna varılmıştır.

Posada ve diğ. [10] hazırladıkları araştırma raporunda ağır hizmet tipi dizel motorlu araçlarda son ABD ve

Avrupa standartlarını karşılamak için kullanılan emisyon kontrol teknolojisinin üretim maliyetlerini incelemişlerdir. Bu maliyet tahminleri ile sadece son yıllarda imalat süreçlerindeki yenilik ve gelişmeler değil aynı zamanda belli emisyon kontrol teknolojilerinin araçlar üzerine uygulanması için de kullanılabilirlerdir. Araştırmada edinilen verilere göre US 1994 veya EURO II standartlarına kıyasla araç başına maliyet 7000\$ artmakla birlikte NOx emisyonlarında %95; partikül emisyonlarında ise %98'lik bir azalma sağlanmıştır. Özellikle ağır taşıtlarda yakıt tüketimi ve sera gazı salınımının azaltılması için bu sıkı standartlar uygulanmaya başlamıştır.

Balland ve diğ. [11] SCR sistemlerinde tüm sürüş koşullarında NOx dönüştürme performansından ödün verilmeksizin NH3 kaçağının önlenmesi için uygun bir üre enjeksiyon kontrol yazılımının gerekliliğinden bahsetmektedir. Tüm sistemin NOx dönüştürme veriminin en üst düzeye çıkartılabilmesi için SCROF içerisinde yüksek miktarda NH3 bulunması ve taban altı SCR ünitesine NH3 geçişine müsaade edilmesi gerektiğinden bahsedilmiştir. Buna göre aracın ani ivmelenmesi gibi durumları da içeren tüm sürüş koşullarında egzoz çıkış borusundan NH3 çıkışının engellenebilmesi için her iki katalizördeki NH3 seviyesinin hesaplanabildiği bir yazılım ihtiyacı ortaya çıkmaktadır.

Trautwein [12] dizel motorlu ticari araçlarda NOx emisyonunun azaltılması için AdBlue ticari isimli sulu üre çözeltilisinin kullanılması ile ilgili hazırladığı araştırma raporunda SCR/üre tekniğinin mekanizmasını açıklamakta, AdBlue sıvısının fiziksel, kimyasal ve çevresel özelliklerinin yanı sıra üretim yöntemlerinden bahsetmektedir. Bu tekniğin teknik ve lojistik gereksinimlerini araştırmak için yürütülen laboratuvar ve saha testlerinden bahsedilmekte ayrıca AdBlue servis istasyonlarında kazanılan ilk deneyimler anlatılmaktadır. Raporunda AdBlue tüketiminin 100 km'de 2 litreden az olması nedeniyle dağıtım ağının çok sık olmasının zorunlu olmadığından bahsedilmiştir.

Hsieh [13] dizel motorlarda uygulanan SCR sistemlerini konu aldığı çalışmada yeni, verimli ve geliştirilebilir bir üre dozajlama metodolojisinden bahsetmiş, yüksek verimli bir NOx indirgeme için SCR ünitesine dahil edilmesi gereken amonyak oranının tahmin yöntemlerine değinmiş, NOx indirgemenin yanı sıra egzoz borusundan amonyak kaçağının önlenmesi için SCR kontrol sistemlerinin modellenmesi üzerine çalışmıştır.

Czerwinski ve diğ. [14] çalışmalarında seçici katalitik indirgeme sistemi ve SCR kaplamalı dizel partikül filtresinin (SDPF) bir Iveco FIC motoru üzerinde uygulanması sonucu edinilen bulgulardan bahsetmişlerdir. Bu çalışma SDPF'nin gaz emisyonlarına ve nano-partiküllere olan etkilerinin araştırıldığı ilk çalışma olma özelliği taşımaktadır. Sınırlı gaz emisyon bileşenlerinin yanı sıra NH3, NO2 ve N2O miktarları FTIR (Fourier Dönüşümlü Infrared Spektrofotometre),

ile hesaplanmış ve nano-partikül emisyonlarının analizi SMPS (spektrometre) ve CPC (yoğunlaştırılmalı partikül sayacı) ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, NOx azalma hızına bağlı olarak SDPF'nin emisyon davranışı ve en üst NH3 değerinin, dikkatli bir şekilde yürütülen özdeş test prosedürlerinde bile dalgalanma gösterdiği tespit edilmiştir.

Balogh ve diğ. [15] makalelerinde bir dizel motor tarafından üretilen NOx emisyonunun azaltılması için motora monte edilen SCR ünitesi üzerinde yapılan bir deneyi konu almaktadır. Yapılan bu deney ile kritik emisyon noktaları ve bu noktalardaki SCR sistemi davranışı ile ilgili bilgi sağlanmış olup binek otomobillerin geliştirilmesi açısından faydalı bir kaynak oluşturulmuştur. Deney, motorun belli bir devir, hız ve sıcaklıkta çalışması esnasında bir α (NH3/NOx) değişkenine göre gerçekleştirilmiştir. Yapılan deney sonucuna göre NOx oranının %61,1 azaltılması sonrasında tekrar artışa geçtiği gözlenmiştir. Bu problemin, daha büyük bir katalizör ve yüksek sayıda kanal oluşturarak, reaksiyonun tüm yüzey boyunca gerçekleşeceği ve amonyakın geçmeyeceği bir karıştırma cihazının monte edilerek çözülebileceği belirtilmiştir.

Tulasiram ve Logachander [16] çalışmalarında normal çalışma koşullarında ve 200 bar enjeksiyon basıncında, enjeksiyon zamanlamalarını değiştirerek motorun performans ve emisyon değerleri üzerine etkilerini incelemişlerdir. Buna göre SCR sisteminin gecikmeli enjeksiyonda %36; ilerlemiş enjeksiyonda %8; normal enjeksiyon zamanlamasında ise %17 NOx indirgemesini sağladığı gözlenmiştir. Ön oksidasyon katalizörü HC ve CO emisyonlarını belli bir seviyeye kadar düşürürken CO2 oranını artırmaktadır.

Hesser ve diğ. [17] hazırladıkları çalışmada NOx dönüşümünü sağlayan SCR sistemini incelemişlerdir. Raporunda gelecekteki NOx yasal değerlerinin karşılanabilmesi için gerekli olan son işlemlerden bahsedilmiştir. SCR sisteminin günümüzde en verimli NOx azaltma teknolojisi olmasının yanı sıra araca adaptasyonunda yaşanan güçlükler ve üre donması gibi sorunlar da ele alınmıştır. Çalışmada aynı zamanda günümüzde ve gelecekteki sıkı emisyon düzenlemelerine uyum için kullanılmakta olan ve kullanılacak BOSCH firmasının SCR çözümleri incelenmiştir.

Nahavandi [18] hazırladığı raporda V2O5 / TiO2 katalizörü üzerindeki katalitik filtre ve petek yapı bir reaktör aracılığıyla NOx dönüşümünün tahmini için SCR kinetik yapısının verilerine dayanan sayısal bir modelleme ve simülasyon çalışmasından bahsetmiştir. NH3 ve SCR sistemi tanıtılarak egzoz gazı sıcaklığı, hız, NH3/NOx oranı gibi parametrelerin SCR prosesi üzerindeki etkileri incelenmiş ve buna göre optimum çalışma koşulları belirlenmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre SCR sisteminin performansının, tepkimeye giren kimyasal madde yoğunluğu ve çalışma sıcaklığına bağlı olduğu gözlenmiştir.

1.1. Taşıtlardan Kaynaklanan Zararlı Gaz Salınımlarının Çevre ve İnsan Sağlığına Etkileri (The Effects of Harmful Emissions from Vehicles on the Environment and Human Health)

Dizel ve benzinli motorların çalışması esnasında, yakıtın hava ile karışması sonucunda hidrokarbon, sülfür dioksit ve su açığa çıkmaktadır. Bu gazlar aynı zamanda akciğer ve kalp hastalıklarına yol açan azot oksit gazları, karbon dioksit ve karbon monoksit gazlarını da içermektedir. Hidrokarbonlar, azot oksitlerle güneş ışığı altında reaksiyona girerek zemin seviyesinde ozon oluşmasına sebep olurlar. Oluşan bu ozon, göz, burun ve boğazı tahriş eder ve akciğerlere zarar verir. Havada bulunan bu ince parçacıklar hemen her yerde devamlı olarak hareket halinde oldukları için ve istemsiz bir şekilde insanların bu parçacıklara maruz kalması sebebi ile dünya çapında insanları tehdit eden önemli bir çevresel risk faktörüdür. Aynı zamanda solunan bu maddeler miyokart enfarktüsü, inme ve kalp yetmezliği riskini arttırmaktadır. Karbon monoksit zehirli bir gazdır ve bulunulan havada konsantrasyonu artarsa kana geçmektedir. Kanda oksijenden daha kolay bir şekilde hemoglobine bağlanabilmesi sebebiyle dokulara oksijen taşınamayacak ve hücre ölümü meydana gelecektir. Özellikle kalp rahatsızlığı olan kişiler için bu durum tehlike arz etmektedir. Bunun yanı sıra hidrokarbonların kanserojen etkisinin olduğu bilinmektedir.

Dizel ve benzinli motorlar farklı emisyon değerlerine sahiptir. Motorlu araçlarda kullandığımız katalitik konvertörler yardımı ile emisyon değerleri mevcut teknolojilerle mümkün olan minimum seviyeye indirilmektedir. Benzinli otomobil emisyonları, karbon monoksit zararlı maddelerini karbon dioksit gibi daha az zararlı maddelere dönüştüren üç yollu katalitik konvertörlerin kullanılmasıyla önemli ölçüde azaltılmıştır. Katalitik konvertörlü benzinli araçlarda karbon monoksit, hidrokarbon ve azot oksit emisyonları düşük miktardadır. Dizel yakıtlar için ise iki yollu katalitik konvertör kullanılmaktadır. Dizel araçlara kıyasla karbon monoksit ve hidrokarbon salınımı benzinli araçlarda daha fazladır.

LPG (sıvılaştırılmış petrol gazı) ve CNG (sıkıştırılmış doğal gaz) ile çalışan araçlarda karbon monoksit salınımı benzinli araçlara kıyasla çok daha düşüktür. CNG araçlarda açığa çıkan karbon monoksit miktarı dizel araçlar ile hemen hemen aynıdır. Bununla birlikte CNG araçlarda meydana gelen hidrokarbon salınımı, doğal gazın ana bileşeni olan metan nedeniyle nispeten yüksektir. Metan, düşük seviyeli ozon oluşumuna ve küresel ısınmaya sebep olmaktadır. LPG ve CNG araçlarda azot oksit ve partikül emisyonu dizel araçlara kıyasla daha düşüktür.

1.2. Katalitik Konvertörler ve Özellikleri (Catalytic Converters and Specifications)

Katalitik konvertörler (katalitik dönüştürücüler) motorun çalışması esnasında ortaya çıkan zararlı egzoz gazlarının çevreye zararsız hale dönüştürülmesini sağlayan dönüştürücülerdir. Katalitik konvertöre aynı zamanda

‘oksidasyon katalizatörü’ de denmektedir. Otomotiv sektöründe emisyon değerlerinin sağlanması amacı ile katalitik konvertörlerin kullanılması zorunludur.

Katalitik konvertör, egzoz gazında bulunan ve zararlı olan yanmamış hidrokarbonları (HC), karbon monoksiti (CO), nitrojen oksitleri (NOx) kimyasal reaksiyona sokarak zararsız hale getirir.

İki tip katalitik konvertör vardır. Bunlar;

- Üç yollu katalitik konvertör (TWC: Three-Way Catalytic Converters)
- İki yollu katalitik Konvertör (Two-Way Catalytic Converters)

Üç yollu katalitik konvertörler, benzinli motorlarda kullanılırlar. Üç farklı egzoz gazı olan, karbon monoksit, hidrokarbonlar ve nitrojen oksitleri aynı anda zararsız hale çevirebilen katalitik konvertörlere, üç yollu katalitik konvertör denir. Aşağıda belirtilen yanma reaksiyonlarını gerçekleştirirler [19].

- Karbon monoksitin yakılarak karbon dioksite çevrilmesi: $2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$ (1)
- Azot oksitlerin oksijen ve azota indirgenmesi: $2NOx \rightarrow xO_2 + N_2$ (2)
- Yanmamış hidrokarbonların karbon dioksit ve suya dönüştürülmesi: $2CxHy + (2x + y/2)O_2 \rightarrow 2xCO_2 + yH_2O$ (3)

Dizel motorlarda kullanılan katalitik konvertöre, dizel oksidasyon katalizörü (diesel oxidation catalyst -DOC) adı verilir. Dizel oksidasyon katalizöründe, katalizör olarak; platinyum, paladyum ve alüminyum oksit kullanılır. Bu katalizörlerin üçü de oksidasyon işlevini yerine getirir; yani HC (hidrokarbon) ve CO (karbon monoksiti), oksijen ile yakarak, su (H₂O) ve karbondioksite (CO₂) dönüştürür. Bu tip katalitik konvertörlere “iki yollu katalitik konvertör denir, çünkü azot oksidi (NOx) indirgeyemezler ve sadece aşağıdaki iki yanma reaksiyonu gerçekleştirilir [19]:

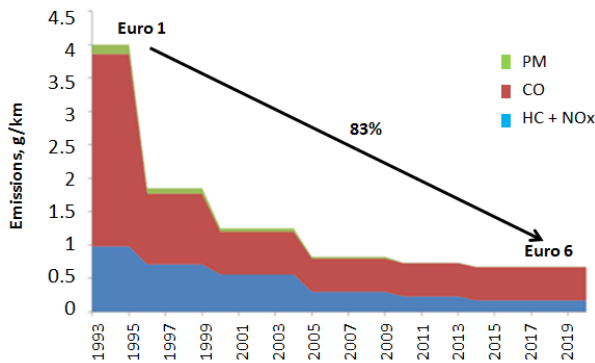
- Karbon monoksitin yakılarak karbon dioksite çevrilmesi: $2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$ (4)
- Yanmamış hidrokarbonların karbon dioksit ve suya dönüştürülmesi: $2CxHy + (2x + y/2)O_2 \rightarrow 2xCO_2 + yH_2O$ (5)

Dizel motorda, NOx (nitrojen oksit) emisyonunu azaltmak için, katalitik konvertör (dizel oksidasyon katalizörü) tek başına yeterli değildir. Dizel motorlar, çok hava- az yakıt ile çalıştığı için, egzoz gazlarında da yüksek oranda azot oksit bulundurulur. Dizel motorlarda NOx emisyonunu azaltmak için iki yöntem kullanılır, bunlar EGR sistemi (exhaust gas recirculation: egzoz gazı resirkülasyonu) ve SCR (Selective Catalytic Reduction: Seçici Katalitik İndirgeme) sistemleridir [46]. Seçici katalitik indirgeme sistemlerinde NOx dönüşümü, SCR filtresi (SCROF) içerisinde gerçekleştiğinden iki yollu katalitik konvertör kullanılmaktadır.

1.3. Emisyon Değerleri ve Yasal Zorunluklar (Emission Values and Valid Obligations)

Şehirlerde kullanılan araç sayısı arttıkça soluduğumuz havanın kalitesini artırmak için motorlu araçlarda müsaade edilen emisyon değerleri sınırlandırılmıştır. Amerika Birleşik Devletlerinde Çevresel Koruma Kurumu (Environmental Protection Agency, EPA) tespitine göre, zorunlu motorlu taşıt kirliliği kontrolünden önce 1960 yılında kilometre başına yaklaşık 6,6 gram hidrokarbon; 52,5 gram karbon monoksit ve 1 gr azot oksit üretildiği tahmin edilmektedir. Araçlardan salınan kirletici madde miktarının önemli ölçüde azaltılmasına rağmen nüfusun ve araç sayısının sürekli artması, emisyon yasal şartlarının daha zorlayıcı hale gelmesini ve otomotiv sektöründe emisyon kontrol teknolojilerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Emisyon kontrol standartları başlangıçta Japonya, Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa Birliği merkezlerinde kuruldu. Bunların her biri spesifik gerekliliklere göre uyarlanmış olsa da, bu bölgeler emisyon azaltılmasında benzer yaklaşımlara sahiptir. Euro ismi ile adlandırılan Avrupa regülasyonları (Euro 1 – Euro 6) ile Şekil 1’de de görülebileceği gibi son 20 yılda emisyonların %83 oranında azaltılması sağlanmıştır.

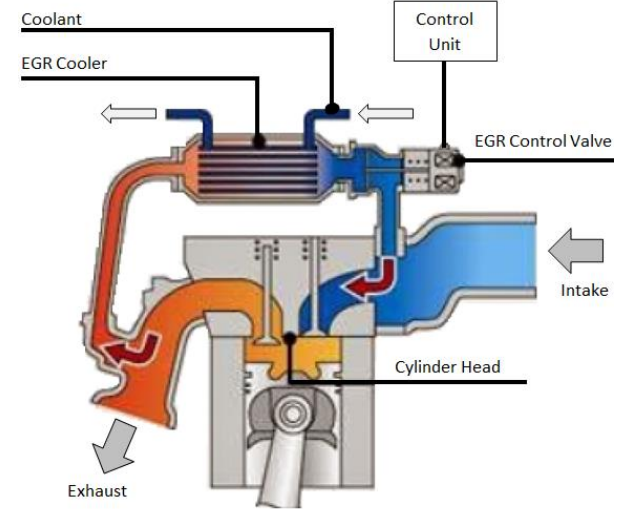


Şekil 1. Taşıtlardaki zararlı egzoz gazlarının yıllara göre azalma durumları (Decrease of harmful exhaust gases in vehicles within years) [20]

1.4. Dizel Araçlarda Emisyon Kontrolü (Emission Control for Diesel Vehicles)

Dizel yakıt, silindir içerisinde çok yüksek bir sıcaklıkta yanarsa oluşan kurum miktarı az olacaktır ancak açığa çıkan azot oksit miktarı fazla olacaktır. Daha düşük yanma sıcaklıklarında ise azot oksit emisyonu düşük ancak partikül (kurum) miktarı artacaktır. Açığa çıkan zararlı azot oksit miktarını sınırlandırmanın yollarından biri egzoz gazı geri çevrim (EGR – Exhaust Gas Recirculation) sistemidir. Bu sistemde egzoz gazının bir kısmı tekrar silindir içine gönderilir. Gönderilen bu atıl gazlar alınan temiz hava ile karışarak yanma verimini (sıcaklığını) düşürür ve böylelikle tepkime sonucu ortaya çıkan azot oksit miktarı azalmış olur. Dizel araçlarda

emisyon seviyelerinin düşürülmesinde karbon monoksit ve yanmamış hidrokarbon oksidasyonunu sağlamak için öncelikle dizel oksidasyon katalizörü (DOC – Diesel Oxidation Catalyst) kullanılır. Sonrasında kalan gaz ve partiküller (karbon, sülfat, kül, yağ) dizel partikül filtresinde (DPF – Diesel Particulate Filter) toplanarak hedef alınan basınç ve sıcaklık değerlerine ulaşıldığında filtrede biriken maddelerin yanması gerçekleşerek rejenerasyon sağlanır. Tipik bir EGR sisteminin çalışma prensibi Şekil 2’de gösterilmiştir.

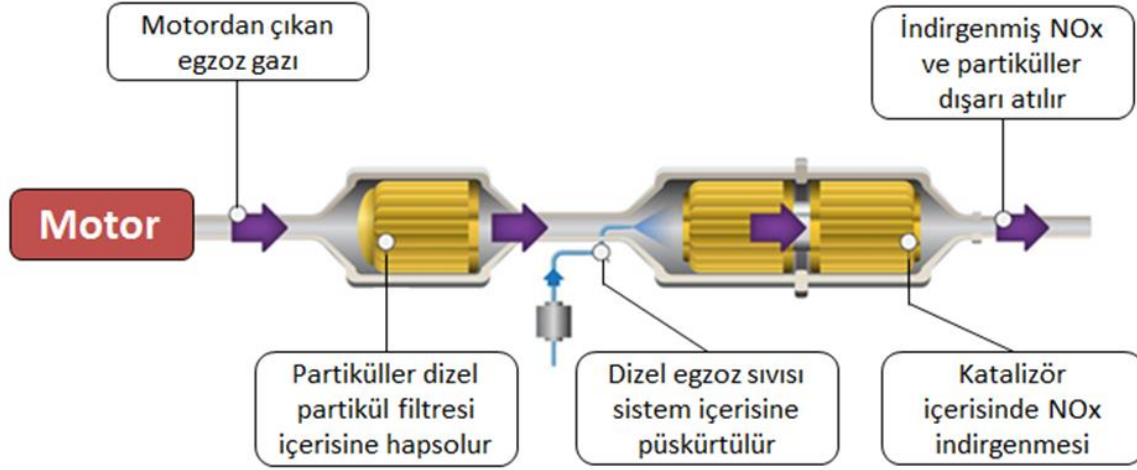


Şekil 2. EGR çalışma prensibi (Working principle of EGR) [21]

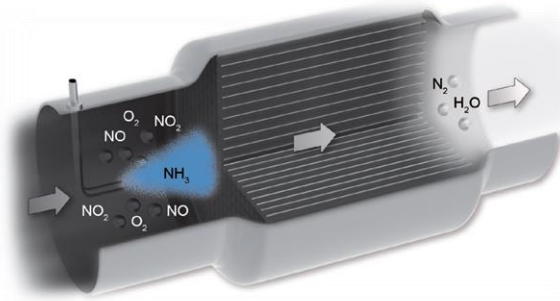
Azot oksit emisyonlarını azaltmanın ikinci yolu ise SCR katalitik konvertörü ile egzoz gazı arıtımını sağlamaktır. Bu yöntem ile açığa çıkan azot oksit miktarının yaklaşık %90’ı yok edilebilmektedir ve uygulamaya bağlı olarak daha yüksek oranda emisyon kontrolü bile mümkündür.

2. SEÇİCİ KATALİTİK İNDİRGEME SİSTEMİ (SELECTIVE CATALYTIC REDUCTION SYSTEM)

SCR (Seçici Katalitik İndirgeme - Selective Catalytic Reduction) yöntemi dizel motorlarda kullanılan gelişmiş bir emisyon kontrol teknolojisidir. Motorun optimize bir şekilde ateşlenmesiyle egzoz emisyonlarının artırılması sistemini birleştirerek nitrojen oksit (NOx) gibi kirletici emisyon düzeyinin azaltılmasını amaçlamaktadır. AdBlue ticari ismi ile anılan dizel egzoz sıvısı, nitrojen oksit ile kimyasal reaksiyona girerek havada doğal halde bulunan, soluduğumuz nitrojen, su buharı ve sınırlı miktarda karbondioksite dönüşerek Şekil 3 ve 4’de görülebileceği gibi egzoz borusundan dışarı atılır



Şekil 3. Seçici katalitik indirgeme sistemi çalışma prensibi (Working principle of selective catalytic reduction system) [22]



Şekil 4. Seçici katalitik indirgeme sistemi ile meydana gelen kimyasal reaksiyon (Chemical reaction in the selective catalytic reduction system) [23]

SCR sistemi uzun yıllardır dünya çapında ağır taşıtlar, güç santralleri, yolcu gemileri, kargo gemileri, feribotlar ve römorkörler de dahil olmak üzere bir çok alanda kullanılmaktadır. SCR sistemi nadir bakım gerektirmesi, araç ömrü boyunca kullanılabilmesi, aracın bakım ve yağ değiştirme aralıklarını etkilememesi, yüksek motor gücüne elverişli olması ve motorun yağlama veya soğutma sistemine ya da yakıt sistemine takviye edilmesine gerek olmaması gibi avantajlar sunmaktadır [11].

2.1. Dizel Egzoz Sıvısı – AdBlue (Diesel Exhaust Liquid - AdBlue)

AdBlue “VDA - Verband der Automobilindustrie” şirketinin tescilli markasıdır. AdBlue'nun aktif maddesi üre, doğalgazdan elde edilmektedir. Üre, ısıtıldığında amonyaka dönüşen bir azot bileşiğidir. Bu madde doğada da bulunan beyaz, kristal zerrecikli bir tozdur. AdBlue dayanıklı, renksiz, kokusuz, zehirsiz ve yanıcı olmayan bir sıvıdır. Zehirsiz ve dayanıklı olduğundan rahatça saklanıp nakledilebilir. DIN 70070 veya ISO 22241-1 kalite standartlarına göre üretilmektedir. %32,5 oranında üre içeren dizel egzoz sıvısı (geri kalan %67,5'lik kısmı iyonu giderilmiş sudur) SCR katalitik konvertörü tarafından egzoz gazı sistemine enjekte edilir. Üre miktarının %32,5 olmasının en önemli sebebi en düşük donma noktasının (-11°C) bu seviyede elde edilmesidir.

Ayrıca bu oranlarla üre ve su aynı oranda donarak çözülme esnasında sıvının yoğunlaşmasının ya da seyrelmesinin önüne geçilmiş olur. Sıvının donması ve çözülmesi bozulmaya yol açmaz. Dizel egzoz sıvısının donma – çözünmesi arasında %7'lik bir genişleme farkı vardır. Tank ve sistemler bu genişlemeye müsaade edecek şekilde tasarlanır. Mevcut normlara göre sıvının donmasını engelleyecek, kullanımı uygun bir katkı maddesi bulunmamaktadır. Bu nedenle ve sistemin çalışması için üre oranının hassas olması sebebiyle depo içerisine herhangi bir antifriz katkı maddesi eklenmemelidir. [24]

SCR sistemine enjekte edilecek dozaj, egzoz gazı akış miktarına göre motor kontrol ünitesi tarafından belirlenir. SCR katalitik konvertörün arkasında bulunan bir NOx sensörü tarafından bilgilendirilen motor yönetimi, dozajın hassas bir şekilde ayarlanmasını sağlar. Soğuk havalarda (araç çalıştırıldığında) tank ısıtılarak dizel egzoz sıvısının donması önlenir. Bağlantı ve hortumlar da sıcak tutularak ısı sabitlenir. Araç -11°C'nin altında park halinde kalırsa sıvı donar, fakat motor çalıştırıldığı anda ısınmaya başlar ve belli bir zaman sonra çözülür. Dizel egzoz sıvısı, ancak motor ve egzoz sistemi normal çalışma ısısına eriştiğinde tam filtreleme yapmaya başlar. Bu sebeple yapılan emisyon ölçümlerinde sistemin tam çalışmaya başlaması referans alınır.

Dizel egzoz sıvısı (AdBlue) SCR emisyon kontrol sisteminin ayrılmaz bir parçasıdır ve aracın sürekli çalışmasını sağlamak için tankta her zaman mevcut olmalıdır. Depodaki sıvı seviyesi bitmeye yakın olduğunda aracın bir sonraki seferinde kilitleyerek, sıvı takviyesi yapılmadan çalışması engellenebilir. Bir taşıtın dizel egzoz sıvı tüketimi, tüketilen dizel yakıtın yaklaşık %2'si olacaktır [24]. Taşıtlarda AdBlue depo dolmuş ağzları, yanlışlıkla yakıt konulmasının engelleyecek şekilde tasarlanır. Genellikle Şekil 5'de de görülebileceği gibi yakıt dolmuş haznesinde yer alan ayrı bir hattan sıvı dolumu gerçekleştirilir. Dolmuş ağzında yer alan kapak üzerinde AdBlue yazısı bulunduğu için, farklı bir madde ile dolmuş yapılmaya riski oldukça düşüktür.



Şekil 5. AdBlue sıvısı ve dolum lokasyonu (AdBlue liquid and filling location) [25]

Dizel egzoz sıvısı zehirli değildir ancak çalışırken alınması gereken önlemler arasında deri ve gözlerle temas etmesinden kaçınmak bulunmaktadır. Göz ile temasında göz bol su ile yıkanmalıdır. Ayrıca, eğer zemine dökülürse kayma tehlikesi arz eder. Yaklaşık 9.0 pH değeriyle kısmen alkalidir ve bu nedenle alüminyum, pirinç, yumuşak çelikle doğrudan temas ettirilmesi durumunda korozyona yol açacaktır. Yüksek yoğunluklu polietilen tanklarda depolanması önerilmektedir.

Dizel egzoz sıvısının raf ömrü ortam sıcaklığına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Güneş ışığı ve sığağa

maruz kalması durumunda zamanla bozulacaktır. -10°C ila $+30^{\circ}\text{C}$ arasında depolanması durumunda raf ömrü yaklaşık 1 yıldır. Maksimum sıcaklık 24°C 'yi aşmaz ise raf ömrü 2 yıla kadar uzayabilir.

2.2. Seçici Katalitik İndirgeme Sisteminin Araç Üzerinde Uygulanması (Applying Selective Catalytic Reduction System on the Vehicles)

Seçici katalitik indirgeme sistemi aşağıdaki otomobil üreticileri tarafından araçlarda uygulanmaya başlamıştır. Bu marka ve modeller Çizelge 1 de gösterilmektedir.

SCR sisteminin araçlara uygulanabilmesi için ilave edilmesi gereken komponentler dizel egzoz sıvı deposu, dolum borusu, sıvı iletim hattı, sıvı ısıtma sistemi (genellikle boruya entegre olarak temin edilir), enjektör, SCR katalizörü, NOx sensörü (girişte ve çıkışta olmak üzere 2 adet), SCR kontrol ünitesi, sıcaklık kontrol ünitesi, enjektör soğutma pompası ve borularıdır. İlave edilen bu komponentler sebebiyle araç üzerinde motor bölmesinde yer alan parçalarda, dış trim (ve/veya iç trim) parçalarında ve taban altı yerleşiminde değişiklikler yapılması da gerekebilmektedir.

Çizelge 1. Seçici katalitik indirgeme sisteminin uygulandığı taşıtların marka ve modelleri (Vehicle brands and models that selective catalytic reduction system is being used) [26]

MARKA	MODELLER
AUDI	Q3, A4 Avant, A5, A6 Avant, A7, A8 Limousine, Q5, Q7, A6 Saloon, A4 Saloon, A8 Saloon
BMW	X5, X6, 5 series Saloon, 5 series Gran Turismo, 5 series Touring, 7 series Saloon
CITROEN	Berlingo Multispace, C3, C3 Picasso, C4, C4 Cactus, C4 Picasso, C5, C5 Tourer, DS 3 Cabrio, DS 4, DS 4 Crossback, DS 5, Grand C4 Picasso, New DS3, New Berlingo, C Elysee, Jumpy
INFINITI	Q50
JAGUAR	XE, XF, XJ
LAND ROVER	Discovery Sport, Evoque, Range Rover Sport, Range Rover
MERCEDES	GLE SUV W166, ML W166, Sprinter, Viano, Vito W447, GLE coupe W166, G-class cabriolet W463, S-class Saloon W221, S-class Saloon W222, S-class W222, GL, GLC SUV, G-class Break long W463, E-class Coupe C207, C-class Saloon C205, C-class Saloon w204, CLS Coupe C218, CLS shooting break C218, E-class Saloon W212, E-class Cabriolet C207, R-class W251, E-class W213, GLC Class Coupe
PEUGEOT	208, 308, 2008, 3008, 5008, 508 SW, Partner, Travaveller, Partner Panel Van, 508 Saloon
RENAULT	Trafic
SKODA	Superb, Yeti
TOYOTA	Land Cruiser
VAUXHALL	Movano, Insignia, Zafira Tourer 2016, Vivaro, Zafira Tourer 2017
VOLKSWAGEN	Caddy, California, Caravelle, Crafter Van, Multivan, Passat SW, Sharan, Tiguan, Touareg, Transporter, Passat Saloon, New Passat Alltrack, New Touran

Araçlarda yer alan AdBlue depo hacimleri 8 litreden 24 litreye kadar olabilmektedir. En sık kullanılanları ise 12 – 17 litre olanlarıdır. [26] Depolar araç mimarisine göre farklı lokasyonlarda olabilmekle birlikte genellikle yakıt depolarının yakınına ya da motor boşluğuna konumlandırılır. Depoların araç üzerinde konumlandırılması yapılırken, olası kaza durumlarında deponun zarar görmesini engelleyecek bir bölgede olmasına dikkat edilmesi gereklidir. Kaza sonrası deponun zarar görüp içerisinde yer alan sıvının boşalması durumunda hafif hasarlı bir kaza olsa bile araç hareket etmeyecektir. Bu nedenle depolar korunaklı bölgelere konumlandırılmalı ve gerekli ise delinmesini engelleyecek ilave önlemler alınmalıdır. Dolum ağızları ise genellikle yakıt dolum haznesinde bulunmaktadır. Bununla birlikte üreticiler Şekil 6’da da görülebileceği gibi farklı dolum lokasyonlarını tercih edebilmektedir.

SCR sisteminde AdBlue dolum deposundan enjektöre ısıtmalı üre hattı vasıtasıyla dizel egzoz sıvısı pompalanır. SCR katalizörüne sıvının enjekte edilmesi ile egzoz gazı içerisinde var olan azot oksidin yaklaşık %90’ı (yüksek sıcaklıklarda) katalizör içerisinde azot ve suya dönüştürülür. İkinci katalizörde geriye kalan %5-8’lik azot oksit dönüşümü sağlanır. Sonrasında CUC (Clean Up Catalyst) olarak adlandırılan temizleme katalizöründe NH3 Slip olarak tanımlanan NH3 kaçağının oksidasyonu gerçekleştirilerek egzozdan NH3 çıkışı engellenmiş olur. NH3 kaçağı, amonyakın SCR katalizörünün içinden tepkimeye girmeden çıkmasıdır. Bunun sebebi fazla enjekte edilme, reaksiyon sıcaklığına ulaşamaması veya katalizörün aktif olmamasıdır. NH3 kaçağı alt bileşenlerin zarar görmesi ile sonuçlanabilecek amonyum sülfat oluşumuna yol açabilir [27].

3. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Sonuç olarak taşıtlardan kaynaklanan zararlı egzoz gazı emisyonlarının azaltılması için dünya genelinde her geçen sene daha zorlayıcı sınırlandırmalar getirilmektedir. Bu bağlamda Avrupa ve Amerika regülasyonlarının birbirine paralel sınırlandırmalar getirdiği gözlenmiştir. Buna göre son 20 yılda emisyonların %83 oranında azaltılması sağlanmıştır. Emisyon değerlerinin yakalanabilmesi için taşıtlarda iki yollu ve üç yollu katalitik konvertörlerin kullanılmasının yanı sıra dizel araçlarda açığa çıkan yüksek miktardaki azot oksit miktarının azaltılması için EGR ve SCR teknolojileri kullanılmaktadır. SCR sistemi ile egzoz gazı içerisinde var olan zararlı azot oksit miktarının %90’dan fazlası egzoz gazı içerisine NH3 enjekte edilerek nitrojen gazı ve suya dönüştürülür. Böylelikle dizel motorlu araçlarda sıkı emisyon kurallarına uyum sağlanmış olur. Yakıt ekonomisine doğrudan bir etkisi olmamakla birlikte egzoz sistemine artı olarak getirdiği NOx sönmüleme kapasitesi sayesinde silindir içi yanma sıcaklıklarının artmasına imkan vererek, yanma veriminin artmasına katkı sağlar. Bu avantajlarına rağmen sistemin çalışabilmesi için AdBlue deposu, enjektör, ilave borular, SCR katalizörü gibi ekstra komponentlerin gerekli olması sebebiyle aracın ağırlığını ve maliyetini negatif yönde etkilemektedir. Ayrıca -11°C’de AdBlue sıvısının donması sebebiyle özellikle soğuk havalarda sistemin tam performanslı çalışabilmesi için sıvının önceden ısıtılması zorunludur. Bu avantaj ve dezavantajlara bakılarak günümüzde dizel motorlu araçlarda emisyon kurallarını karşılamak için NOx indirgenmesini sağlayabilecek en gelişmiş teknolojinin SCR sistemi olduğu görülmektedir.

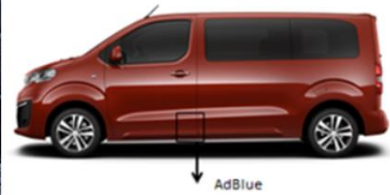
MERCEDES S CLASS W222



VOLKSWAGEN TIGUAN



PEUGEOT TRAVELLER



CITROEN C4



BMW X5



JAGUAR XE



Şekil 6. Farklı marka ve modellerde AdBlue dolum lokasyonları (AdBlue filling locations for different vehicle brands and models) [26]

KISALTMALAR (ABBREVIATIONS)

CNG	Sıkıştırılmış doğal gaz
CO	Karbon monoksit
CO ₂	Karbondioksit
CPC	Yoğunlaştırılmalı partikül sayacı
CUC	Temizleme katalizörü
DOC	Dizel oksidasyon katalizörü
DPF	Dizel partikül filtresi
EPA	Çevresel koruma kurumu
FTIR	Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrofotometre
EGR	Egzoz gazı resirkülasyonu
HC	Hidrokarbon
H ₂ O	Su
LNT	Azot oksit absorbanı
LPG	Sıvılaştırılmış petrol gazı
NH ₃	Amonyak
NO _x	Azot oksitler
PH	Hidrojen gücü
PM	Partikül madde
SCR	Seçici katalitik indirgeme
SCROF	Seçici katalitik indirgeme filtresi
SMPS	Spektrometre
TiO ₂	Titanyum dioksit
TWC	Üç yollu katalitik konvertör
V ₂ O ₅	Vanadyum pentoksit

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] İlkılıç C., Behçet R., Aydın S., Aydın H., "Dizel Motorlarında Azot Oksitlerin Oluşumu ve Kontrol Yöntemleri", *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, (2009).
- [2] Sher E., "Handbook of Air Pollution From Internal Combustion Engines: Pollutant Formation and Control", *Academic Press*, ISBN: 0-12-639855-0 (1998).
- [3] Uyumaz A., Boz F., Yılmaz E., Solmaz H., Polat S., "Taşıt Egzoz Emisyonlarını Azaltma Yöntemlerindeki Gelişmeler", *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Özel Sayı 1: 15-24, (2017).
- [4] Ayberk S., Çetin Ş., "Azot Oksit Emisyonları ve Çevresel Açından Değerlendirilmesi", *Kocaeli Üniversitesi – İzmil*, (2006).
- [5] Yadav S., "Air Pollution Control Device – Catalytic Converter", <https://www.slideshare.net/santoshhoist/catalytic-converter-23732014> (2013).
- [6] Johnson T. V., "Review of Vehicular Emissions Trends", *SAE International Journals*, DOI:10.4271/2015-01-0993 (2015)
- [7] Schnitzler J., "Particulate Matter and NO_x Exhaust Aftertreatment Systems", *FEV Motorentechnik GmbH*
- [8] Jabłońska M., Chmielarz L., "Nitrogen Oxides Removal By SCR Process – State Of The Art", *Zeszyty Naukowe Towarzystwa Doktorantów UJ Nauki Ścisłe*, Nr 7 (2/2013) (2013).
- [9] Tasic T., Pogorevc P., Brajlilj T., "Gasoline and LPG Exhaust Emissions Comparison. Advances in Production Engineering & Management", *APEM Journal*, 87-94 (2011).
- [10] Posada F., Chambliss S., Blumberg K., "Costs of Emission Reduction Technologies for Heavy Duty Diesel Vehicles", *International Council on Clean Transportation* (2016).
- [11] Balland J., Parmentier M., Schmitt J., "Control of a Combined SCR on Filter and Under-Floor SCR System for Low Emission Passenger Cars", *SAE International Journals* (2014).
- [12] Trautwein W. P., "AdBlue as a Reducing Agent for the Decrease of NO_x Emissions From Diesel Engines of Commercial Vehicles", *DGMK Research Report 616-2 Part 2: Laboratory and Field Testing of AdBlue AdBlue Logistics* (2003).
- [13] Nieuwstadt M. V., Upadhyay D., "Control of Urea SCR Systems for US Diesel Applications", *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles*, 66: 655-665, (2011).
- [14] Czerwinski J., Zimmerli Y., Mayer A., D'urbano G., Zurcher D., "Emission Reduction with Diesel Particle Filter with SCR Coating (SDPF)", *Emiss. Control Sci. Technol.* DOI 10.1007/s40825-015-0018-7 (2015).
- [15] Balogh R. M., Ionel I., Stepan D., Rabl H. P., Pfaffinger A., "NO_x Reduction Using Selective Catalytic Reduction (SCR) System – α Variation Test", *TERMOTEHNICA* (2011).
- [16] Tulasiram N. V., Logachander G., "Performance of a Urea SCR System Combined With Variable Injection Timings of a Diesel Engine to Reduce NO_x Emissions", *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, ISSN: 2321-9653 (2016).
- [17] Hesser M., Luders H., Henning R. B., "SCR Technology for NO_x Reduction: Series Experience and State of Development", *DEER Conference* (2005).
- [18] Nahavandi M., "Selective Catalytic Reduction (SCR) Of No By Ammonia Over V₂O₅/TiO₂ Catalyst In A Catalytic Filter Medium And Honeycomb Reactor: A Kinetic Modeling Study", *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 32, No. 04, pp. 875 - 893, dx.doi.org/10.1590/0104-6632.20150324s00003584 (2015).
- [19] "Katalitik Konvertör Nedir? Arızası Nasıl Anlaşılır?" <http://otomobilteknoloji.blogspot.it/2016/05/katalitik-konvertor-nedir-arizasi-nasil-anlasilir.html>
- [20] "Emission standards" <http://www.implats.co.za/implats/Emission-standards.asp>

- [21] “Diesel EGR - Diesel Exhaust Gas Recirculation Systems” <http://fuelschool.blogspot.it/2014/11/diesel-egr-diesel-exhaust-gas.html>
- [22] “What is Selective Catalytic Reduction?” <http://www.dieselforum.org/about-clean-diesel/what-is-scr>
- [23] Sinzenich H., Wehler K., Muller R., “Selective Catalytic Reduction: Exhaust aftertreatment for reducing nitrogen oxide emissions”, *MTU Friedrichshafen GmbH* (2014).
- [24] “Diesel Exhaust Fluid (DEF)”, <https://www.cumminsfiltration.com/sites/default/files/MB10033.pdf>
- [25] “AdBlue”, <http://ewapoint.shop/ad-blue>
- [26] “AdBlue For Diesel Cars” <http://infodiesel.co.uk/bookmarks/>
- [27] “Air Pollution Control Technology Fact Sheet”, *United States Environmental Protection Agency*, EPA-452/F-03-032
- [28] “AB Emisyon Yönetmelikleri”, <http://www.adblue.tr.com.tr/default.asp?pid=3&lng=1>
- [29] “AdBlue”, <http://www.total.com.tr/madeni-yaglar/ADBLUE.html>
- [30] “Motorlu Araçlar Teknolojisi Egzoz Emisyon Kontrolü”, *Milli Eğitim Bakanlığı Ankara* (2011).
- [31] “How Selective Catalytic Reduction (SCR) Works”, <http://www.discoverdef.com/def-overview/selective-catalytic-reduction/>
- [32] “Automotive Exhaust Chemicals: Disease Causing”, <http://www.nutrained.com/environment/carschemicals.htm>
- [33] “Motor Vehicle Emission Controls: Fuel Types”, <http://www.air-quality.org.uk/26.php>
- [34] “Cummins Tier 4 Technology Overview”, <https://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/workshops/dieselaerosols2012/NIOSHMVS2012Tier4TechnologyReview.pdf>
- [35] “Delphi Selective Catalytic Reduction Dosing System”, *Delphi Powertrain Systems*, www.delphi.com
- [36] “Dosing Components for SCR Systems”, *HILITE International*
- [37] “Emission Control Technologies for Diesel-Powered Vehicles”, *Manufacturers of Emission Controls Association*
- [38] Maritati M, “EURO VI Technologies & Strategies”, <http://ibb.iveco.com/Lists/Markets/Attachments/59/EURO%20VI.pdf>
- [39] Dorenkamp R., “LNT or Urea SCR Technology: Which is the right technology for TIER 2 BIN 5 passenger vehicles?”, *12th Diesel Engine-Efficiency and Emissions Research (DEER) Conference, Detroit, Michigan* (2006).
- [40] “Lower NOx Heavy Duty Diesel Engines”, *California Environmental Protection Agency Technology Assessment Sacramento, California* (2014).
- [41] Carpenter K. A., “NOx Emissions Solutions For Gas Turbines”, *Siemens Westinghouse Power Corporation*
- [42] Shah A. N., Ge Y. S., Jiang L., Liu Z. H., “Performance evaluation of a urea-water selective catalytic reduction (SCR) for controlling the exhaust emissions from a diesel engine”, *Turkish J. Eng. Env. Sci.* 33: 259 – 271. TUBITAK DOI:10.3906/muh-0907-63 (2009).
- [43] “Selective Catalytic Reduction and Exhaust Gas Recirculation Systems Optimization”, *Clean Diesel Technologies Inc.*
- [44] “Selective Catalytic Reduction System”, www.dieselforum.org
- [45] “Technology to Reduce Emissions in Large Engines”, https://www.deere.ca/en_CA/docs/pdfs/emissions/large_engine_technology_final.pdf
- [46] “Worldwide Emissions Standards Passenger Cars Light Duty” *Delphi Powertrain Systems*, www.delphi.com



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



Fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda kalınlık boyunca kompozisyonel değişimin balistik performans üzerindeki etkisinin incelenmesi

An investigation of the ballistic performance of functionally graded plates have different compositional gradation through the plate thickness

Yazar(lar) (Author(s)): Murat AYDIN¹, Emre ACAR²

ORCID¹: 0000-0003-3713-3029

ORCID²: 0000-0003-1114-6251

Bu makaleye řu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Aydın M. ve Acar E., “Fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda kalınlık boyunca kompozisyonel değişimin balistik performans üzerindeki etkisinin incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 21(4): 951-960, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.385490

Fonksiyonel Kademelenendirilmiş Plakalarda Kalınlık Boyunca Kompozisyonel Değişimin Balistik Performans Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Murat AYDIN^{1*}, Emre ACAR¹

¹ Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, Türkiye

(Geliş/Received : 08.09.2016 ; Kabul/Accepted : 24.10.2017)

ÖZ

Bu çalışmada, fonksiyonel kademelenendirilmiş plakalarda kalınlık boyunca bileşenlerin hacimsel değişim sürekliliğinin, balistik performans üzerindeki etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal analizler eksplisit dinamik analiz yapabilen LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

Seramik (SiC) ve metal (Al) bileşenlerden oluşan fonksiyonel kademelenendirilmiş plakalarında kademelenendirilmiş bölgedeki lokal malzeme özelliklerinin hesaplanmasında, mikro mekanik model olarak Mori-Tanaka şeması kullanılmıştır. Plakaların elasto plastik davranışlarının modellenmesi için de, iki farklı bileşene sahip yapılarda bileşenlerin, tek eksenli gerilme-şekil değiştirme değerlerini kullanarak kompozit malzemenin gerilme şekil değiştirme eğrisinin oluşturulması için geliştirilmiş olan TTO model kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fonksiyonel kademelenendirilmiş malzemeler, balistik performans, sonlu elemanlar yöntemi.

An Investigation of the Ballistic Performance of Functionally Graded Plates have Different Compositional Gradation Through the Plate Thickness

ABSTRACT

In this study, the ballistic performance of functionally graded plates (FGSPs) which have different layer numbers have been investigated numerically. Numerical analyses were performed using LS-DYNA finite element software which can perform an explicit dynamic analysis. The functionally graded sandwich plate is composed of a mixture of ceramic (SiC) and metal (Al) constituents, Mori-Tanaka scheme was used to determine the effective material properties at any point inside functionally graded plates. In order to define the elasto-plastic behavior of the functionally graded layers, the TTO (Tamura-Tomota-Ozawa) model was used.

Keywords: Functionally graded materials, ballistic performance, finite element method.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Fonksiyonel kademelenendirilmiş malzemeler (Functionally Graded Materials=FGMs) belirli bir pozisyonda malzeme kompozisyonunun sürekli olarak değiştiği yapılar olarak tanımlanırlar. Genellikle seramik-metal bileşiminden oluşan bu malzemeler kötü çalışma şartlarına sahip uygulamalar için son derece uygundur. Örneğin, ağır aşındırıcı parçaların taşınmasında aşınmaya karşı astar olarak, roket ısı koruyucularında, ısı değiştirici tüplerde, termoelektrik jeneratörlerde, ısı motoru parçalarında, füzyon reaktörlerinin koruyucu yüzeylerinde ve elektrik yalıtımında kullanılmaktadır [1].

Fonksiyonel kademelenendirilmiş malzemeler, seramik-metal bağlantıların ara yüzeylerinde termo-mekanik uyumsuzlukların azaltıldığı ideal yapılardır ve böylece

yüksek sıcaklık ortamlarında çalışan yapılarda oluşan artık gerilmeleri de azaltabilirler. Fonksiyonel kademelenendirilmiş malzemelerdeki ısı gerilmeleri kompozisyonel ve mikro-yapısal dağılımın kontrol edilmesiyle azaltılabilir. Yine de fonksiyonel kademelenendirilmiş malzemeler, kompozisyonundaki sürekli makroskopik değişimler nedeniyle artık gerilmelere sahiptirler ve bu artık gerilmeler fonksiyonel kademelenendirilmiş malzemenin mekanik özelliklerini de etkiler.

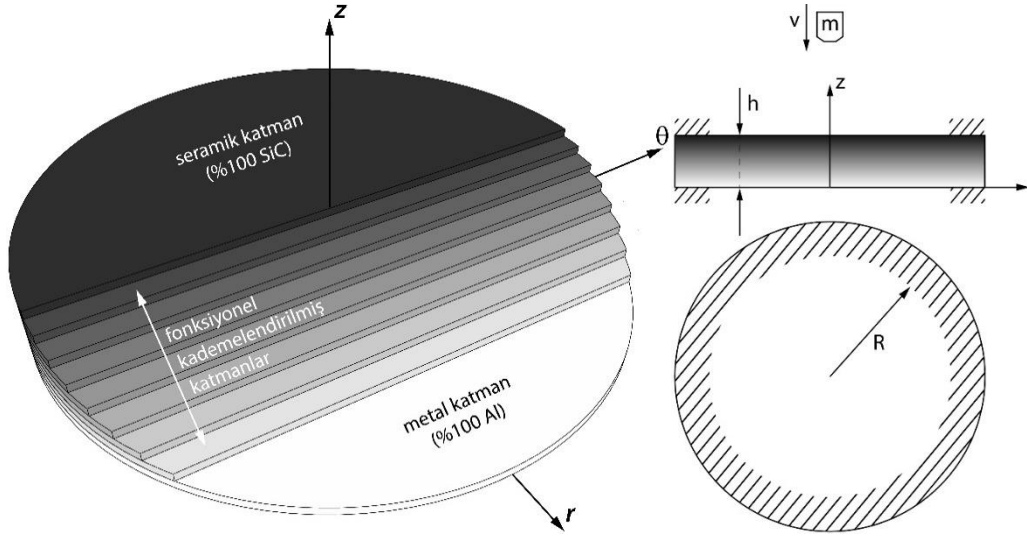
Fonksiyonel kademelenendirilmiş malzemeler zor çalışma şartlarına sahip darbeleri ortamlarda veya balistik amaçlı olarak da kullanılabilirler. Bu nedenle bu malzemelerin darbe dayanımlarının da belirlenmesi oldukça önemlidir.

1.1. Bünye İlişkileri ve Karışım Teorisi

Seramik (SiC) ve metal (Al) bileşenlerden oluşan fonksiyonel kademelenendirilmiş plakaların en alt yüzeyi metal, en üst yüzeyi ise seramik olup her iki yüzey

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : aydin@erciyes.edu.tr

arasında, bileşenlerin hacimsel oranları kademeli olarak değişmektedir (Şekil 1a). Söz konusu bu değişimin



Şekil 1. a) Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plaka, b) Sayısal analiz sınır şartları (a- A functionally graded circular plate and b- boundary condition)

sürekli olması katmanlar arası artık gerilmeyi ve termomekanik uyumsuzlukları azaltacaktır. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakayı oluşturan her bir katman kendi içerisinde homojen olup, her bir katmanın ihtiva ettiği seramik (c) ve metal (m) bileşenlerin hacimsel oranları arasındaki ilişki;

$$V_c + V_m = 1 \quad 1$$

Denklemler ile ifade edilir. Bileşenlerin hacimsel oranlarının, plaka kalınlığı (h) boyunca konumun fonksiyonu olarak değiştiği fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda, bu değişim, $V_c(z)$ ve $V_m(z)$ sırasıyla seramik ve metal bileşenin herhangi bir z mesafesindeki hacimsel oranları olmak üzere,

$$V_m(z) = \left(1 - \frac{z}{h}\right)^n \quad \text{ve} \quad V_c(z) = 1 - (V_m) \quad 2$$

eşitlikleri ile ifade edilir. Bu denklemlerde, h plaka kalınlığı ve n bileşenlerin hacimsel değişimini lineer veya lineer olmayan şekilde kontrol eden üstür. Çeşitli n değerleri için plaka kalınlığı boyunca bileşenlerin hacimsel oranlarındaki değişim **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'da gösterilmiştir. Bu çalışma kapsamında yapılan sayısal analizlerde, bileşenlerin plaka kalınlığı boyunca hacimsel oranlarındaki değişimin lineer olduğu ($n=1$) kabul edilmiştir.

Analizlerde fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların sayısal modellemesi için gerekli olan, kademelendirilmiş bölgedeki lokal malzeme özelliklerinin hesaplanmasında, mikro mekanik model olarak Mori-Tanaka şeması kullanılmıştır [2,3]. Bu modelde, fonksiyonel kademelendirilmiş malzemenin etkili hacim modülü K ve kayma modülü G şu şekilde ifade edilir;

$$\frac{K - K_m}{K_c - K_m} = \frac{V_c}{\left[1 + (1 - V_c) \frac{3(K_c - K_m)}{3K_m + 4G_m}\right]} \quad 3$$

$$\frac{G - G_m}{G_c - G_m} = \frac{V_c}{\left[1 + (1 - V_c) \frac{(G_c - G_m)}{G_m + f_1}\right]} \quad 4$$

$$f_1 = \frac{G_m(9K_m + 8G_m)}{6(K_m + 2G_m)} \quad 5$$

Elastisite modülü E ve Poisson oranı ν 'yu hesaplamak için;

$$E = \frac{9KG}{3K + G} \quad \text{ve} \quad \nu = \frac{3K - 2G}{2(3K + G)} \quad 6$$

eşitlikleri kullanılmıştır. Lineer karışım kuralına göre her bir katmanın yoğunluğu, ρ ise aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\rho = V_m \rho_m + V_c \rho_c \quad 7$$

1.2. Tamura-Tomota-Ozawa (TTO) Model

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin lineer-elastik davranışları klasik Hooke kanunu ile tariflenirken, elasto-plastik davranışlarını modellemek için Tamura ve diğerleri [4] tarafından ortaya atılan ve metal-seramik esaslı fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin, hacimsel oranlarını temel alan TTO model kullanılmıştır. TTO model iki fazlı kompozitlerde, iki bileşenin, ortalama tek eksenli gerilme ve şekil değiştirme değerleri kullanılarak elde edilen, tek eksenli gerilme (σ) ve şekil değiştirme (ϵ) değerleriyle ilişkilidir,

$$\sigma = V_c \sigma_c + V_m \sigma_m \text{ ve } \varepsilon = V_c \varepsilon_c + V_m \varepsilon_m \quad 8$$

Bu eşitlikte, σ_c ve σ_m sırasıyla seramik ve metal bileşenlerin ortalama gerilme ve ε_c ve ε_m sırasıyla seramik ve metal bileşenlerin şekil değiştirme değerlerini ifade etmektedir. TTO model, ilave bir parametre olan, gerilme-şekil değiştirme transfer oranı, q 'yu ise şu şekilde tanımlar:

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{|\varepsilon_1 - \varepsilon_2|}, \quad 0 < q < \infty \quad 9$$

q parametresinin değeri, bileşenlerin malzeme özelliklerine ve kompozit yapı içerisindeki mikro yapısal etkileşimlerine bağlıdır. Örneğin, $q=\infty$ iken bileşen elemanların yüklenme doğrultusundaki deformasyonları özdeşdir, hâlbuki $q=0$ iken bileşen elemanlar aynı gerilme seviyelerine sahiptirler. Genellikle, kompozit yapı içerisindeki bileşen elemanlar, karmaşık mikro yapıları (tane şekillerindeki fark, doğrultu, hacimsel oran vb.) nedeniyle, farklı gerilme ve şekil değiştirme değerlerine sahiptirler. q 'nun sıfırdan farklı, sonlu bir değeri, yaklaşık olarak bileşenlerin etkilerini yansıtabilir. Çalışma kapsamında yapılan sayısal analizlerde $q=4,8\text{GPa}$ olarak alınmıştır söz konusu değer Güneş ve arkadaşları [5] tarafından deneysel olarak hesaplanmıştır. Seramik-metal kompozitlerin plastik deformasyonu uygulamalarında TTO model, metal bileşen akmaya başlayınca, kompozitin aktığını varsayar ve kompozitin akma gerilmesi σ_Y şu şekilde tariflenir

$$\sigma_Y = \sigma_0 \left[V_m + \frac{q + E_m E_c}{q + E_c E_m} (1 - V_m) \right] \quad 10$$

Burada σ_0 , metalin akma gerilmesidir. Yukarıdaki denklem göstermektedir ki, kompozitin akma gerilmesi; metalin akma gerilmesi, metalin hacimsel oranı, bileşenlerin elastisite modülleri ve q parametresine bağlıdır. Kompozitin akma noktasından sonraki gerilme-şekil değiştirme (σ - ε) eğrisini veren parametrik denklem

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_Y} = \frac{V_1 E}{q + E_1} \frac{\sigma_2}{\sigma_Y} + \frac{(q + V_2 E_1) E}{(q + E_1) E_2} \frac{\sigma_0}{\sigma_Y} \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_0} \right)^{n_0} \quad 11$$

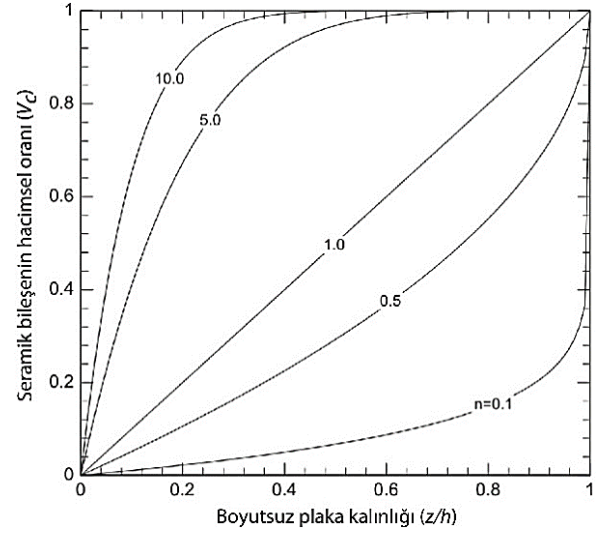
$$\frac{\sigma}{\sigma_Y} = \frac{V_2 q + E_1}{q + E_1} \frac{\sigma_2}{\sigma_Y} + \frac{(V_1 q E_1)}{(q + E_1) E_2} \frac{\sigma_0}{\sigma_Y} \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_0} \right)^{n_0} \quad 12$$

şeklinde tariflenir. Burada $\varepsilon_Y = \sigma_Y / E$ kompozitin akma şekil değiştirme değeri, n_0 ise metal bileşenin sertleşme katsayısıdır. Metal bileşen için sertleşme katsayısı, n_0 en küçük kareler metodu ile Denklem 13. kullanılarak hesaplanmıştır.

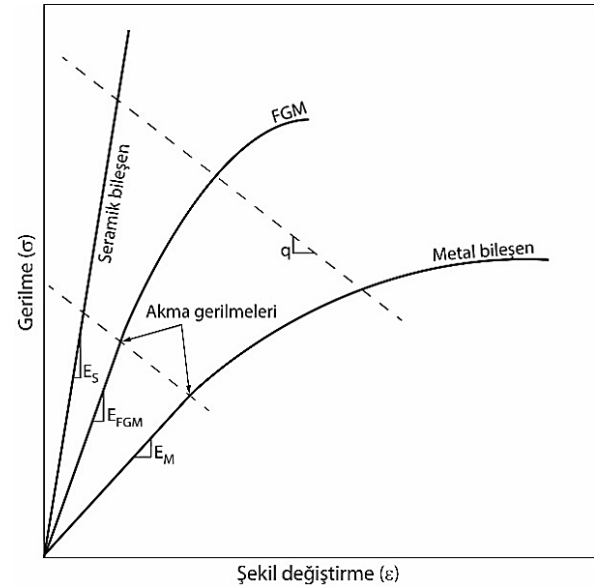
$$\varepsilon_m = \varepsilon_m \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_0} \right)^{n_0} \quad 13$$

Burada $\varepsilon_0 = \sigma_0 / E_m$ metal bileşenin akma şekil değiştirmesidir. **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** b'de TTO Model ile tariflenen kompozitin, gerilme-şekil değiştirme eğrisini şematik olarak gösterimi verilmiştir.

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin üretimi, genel olarak toz metalürjisi ile kademelendirilmiş yapının elde edilmesi ve daha sonra sinterlenmesi esasına dayanır [6-8]. Bu malzeme konseptinde, kademelendirilmiş yapı oluşturulurken katmanları oluşturan bileşenlerin hacimsel oranları belirli doğrultularda sürekli olarak değişmesi ile mekanik özellikler de değişecektir.



(a)



(b)

Şekil 2. a) Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakanın kalınlığı boyunca farklı kompozisyonel gradyanlarda seramik bileşenin hacimsel oranı (V_c)

b) TTO Modelin şematik gerilme-şekil değiştirme eğrisi. (a- Through the thickness distribution of the volume fraction of the ceramic phase in the functionally graded circular plate, b- Schematic of the stress-strain curve of the TTO model)

Yüksek sıcaklık ortamlarında çalışan fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerde, katmanlar arası

mekanik özelliklerin ani değişimi sebebiyle ısı gerilmelerin olduğu ve katman ara yüzeylerinde termomekanik uyumsuzluklar meydana geldiği rapor edilmiştir [9-12]. Bahse konu bu olumsuzluk, plaka kalınlığı boyunca mümkün olduğunca çok katman kullanılarak giderilebilir, bu sayede yapıyı oluşturan katmanların incilmesi ile bir yüzeyden diğer bir yüzeye, mekanik özellik değişimi kademeli değil sürekli olacaktır. Toz istifleme, toz püskürtme döküm, santrifüj, lazer kaplama ve difüzyon gibi çeşitli yöntemler kullanılarak üretilen fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler için, oluşturulabilecek minimum katman kalınlığı üretim yöntemi ile direkt olarak ilişkilidir. Örneğin toz istifleme sıcak presleme yöntemi kullanılarak üretilen fonksiyonel kademelendirilmiş bir malzemenin katman kalınlığı büyük ($>1\text{mm}$) ve orta ($100-1000\mu\text{m}$) ölçekte olabilirken santrifüj yöntemi ile çok ince film ($<10\mu\text{m}$) katmanlar ile sürekli bir değişim elde edilebilir [8]

Havacılık, uzay, otomotiv ve enerji gibi birçok özellikli alanlarda kullanılan fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerden yapılmış plakaların farklı yüklemeye ve sınır şartlarında lineer olmayan mekanik davranışlarının tespiti ve bu bilgiler ışığında gerilmeleri minimize edecek ve kullanım ömrünü uzatacak optimum malzeme kompozisyona sahip yapıların belirlenmesi son derece önemlidir. Literatürde termal yükler altında fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin üretim optimizasyonunun yapıldığı birçok çalışma mevcut olup balistik darbe yükleri altındaki davranışlarının incelendiği çalışmalar oldukça sınırlı sayıdadır.

Bu çalışma ile fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakalarda, plaka kalınlığı boyunca bileşenlerin hacimsel oranlarının değişim sürekliliğinin balistik performans üzerindeki etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların mikro yapısı esas alınarak oluşturulan numerik modelin sayısal analizleri bir sonlu elemanlar yazılımı olan LS-DYNA programı ile yapılmıştır.

2. PROBLEM TARİFİ (PROBLEM DESCRIPTION)

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen sayısal analizlerde, açık dinamik analiz yapabilen LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımı kullanılmış olup 15mm kalınlığa sahip fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar Şekil 1b'de gösterilen ve dış çapı 90mm ve iç çapı 70mm olan bölgeleden ankastre olarak mesnetlenerek merkezi

çarpma yüküne maruz bırakılmışlardır. Analizler, plaka kalınlığı boyunca 4 farklı katman sayısına sahip (5,10, 15 ve 20) fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar ve 500m/s ile 750m/s mermi hızları için tekrarlanmıştır. Analizlerde modellemesi yapılan 4 farklı fonksiyonel kademelendirilmiş plaka tipi için her bir plakayı oluşturan katmanların ihtiva ettiği seramik ve metal oranları Şekil 3a'da verilmiş olup plaka kalınlığı boyunca bileşenlerin hacimsel değişim oranları da Şekil 3b ile verilen grafikte görülmektedir.

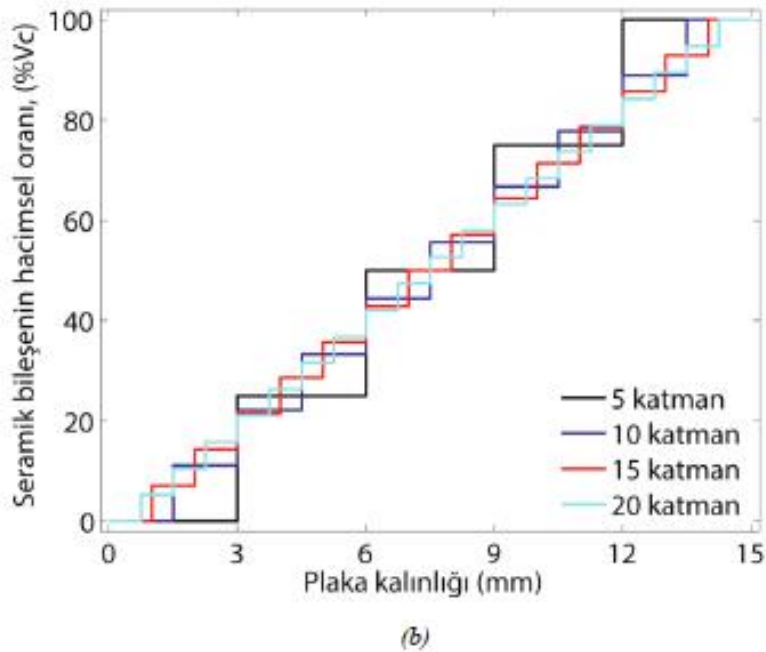
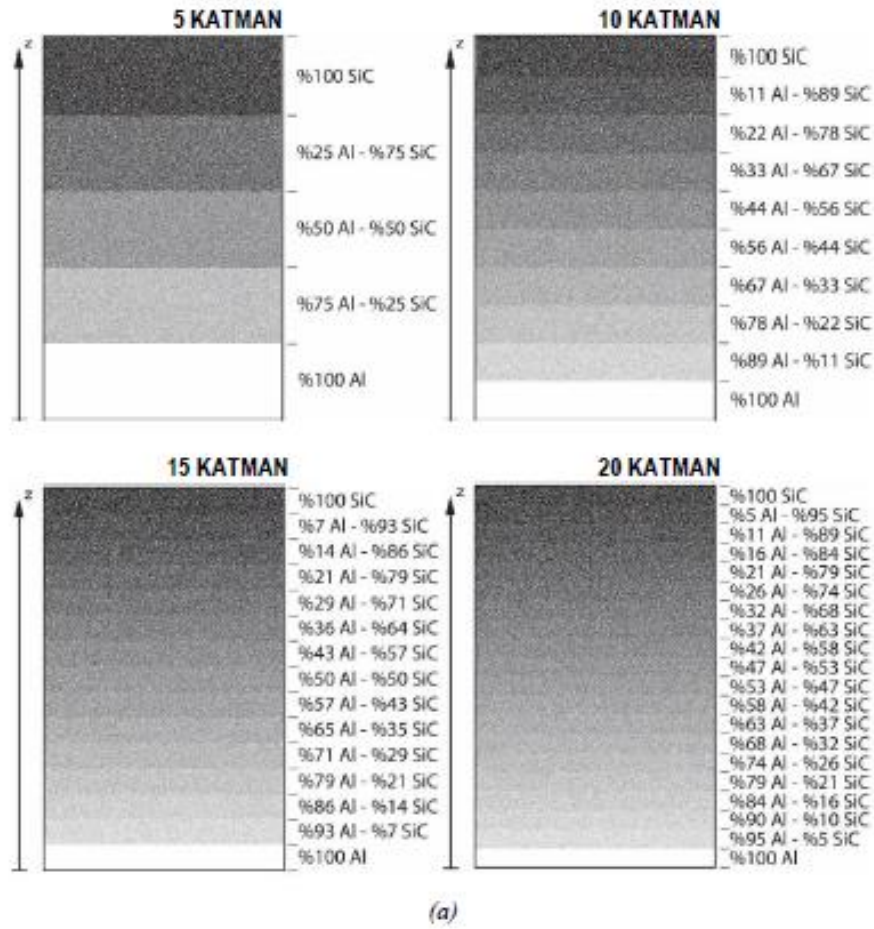
Balistik darbe analizlerinde 2,85g kütleyle sahip vurucu, STANAG 2920 [13] ve MIL-DTL-46593B (MR) [14] standartları ile tanımlanmış ve geometrisi Şekil 4'te verilmiş olan ISI 4340H çeliğinden üretilmiş, 0,3 kalibre parçacık benzetimli mermi (Fragment Simulating Projectiles, FSP) dikkate alınarak modellenmiştir. Bu standartlar ile tanımlanmış parçacık benzetimli mermiler isabet ettikleri hedef üzerinde patlamalı silah mermilerinin oluşturacakları deformasyonuna benzer etki oluşturmaları sebebiyle gerçek test şartları simule edilmiş olacaktır. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar kompozisyonu kalınlık boyunca değişen seramik (Silisyum Karbür-SiC) ve metal bileşenlerden (Alüminyum-Al) oluşmaktadır. Seramik ve metal katmanlar arasında kalan fonksiyonel kademelendirilmiş bölgenin mekanik özelliklerinin hesaplanmasında 1.Bölümde tanımlanan, Mori-Tanaka şeması ve TTO model kullanılmıştır.

Sayısal analizlerde, vurucu için plastik kinematik (Plastic Kinematic) ve fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar için parçalı lineer plastisite (Piecewise Linear Plasticity) malzeme modelleri kullanılmış olup fonksiyonel kademelendirilmiş plaka ve parçacık benzetimli mermi mekanik özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. Sonlu elemanlar modeli Şekil 5'te gösterilen fonksiyonel kademelendirilmiş plaka ve 0,3 kalibre parçacık benzetimli mermi için 8 düğüm noktalı, her bir düğümde 9 serbestlik dereceli bulunan SOLID 164 eleman tipi tercih edilmiştir. Model için ağ bağımsızlığı yapılarak, yaklaşık olarak 1570000 eleman kullanılmıştır.

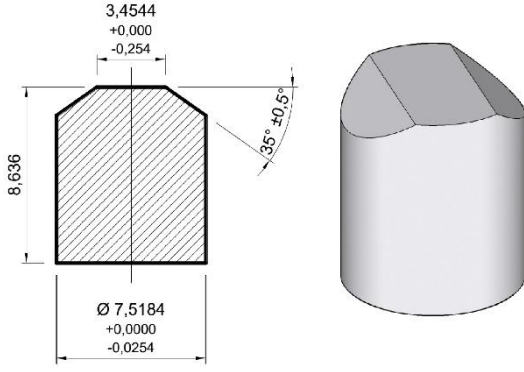
Çarpma analizlerinde temas modelinin oluşturulması oldukça kritik bir adımdır. Sayısal analizlerde mermi ile fonksiyonel kademelendirilmiş plaka arasında, düğüm noktalarının temas ettiği yüzeye, temasla birlikte penetre olduğu durumlarda kullanılan CONTACT_ERODING_NODE_TO_SURFACE temas algoritması kullanılmıştır.

Çizelge 1. Fonksiyonel kademelendirilmiş plaka bileşenleri ve mermi mekanik özellikleri (Mechanical properties of constituents of functionally graded circular plate and projectile.)

Malzeme	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m^3)	Akma Gerilmesi (MPa)	Tanjant Modülü (MPa)
Al 6061	67	0,33	2702	95	-
SiC	302	0,17	3100	-	-
Çelik (AISI 4340)	200	0,29	7850	970	470



Şekil 3. a) Farklı katman sayılarına sahip fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların her bir katmanının ihtiva ettiği seramik ve metal hacimsel oranları b) Plaka kalınlığı boyunca seramik bileşenin hacimsel oranının değişimi (a- volumetric ratios of ceramic and metal for all layers of each functionally graded plates, b- volume fraction of the ceramic phase in each layers of the functionally graded circular plates)



Şekil 4. 0,3 kalibre parçacık benzetimli mermi (0.3 caliber fragment simulating projectile)

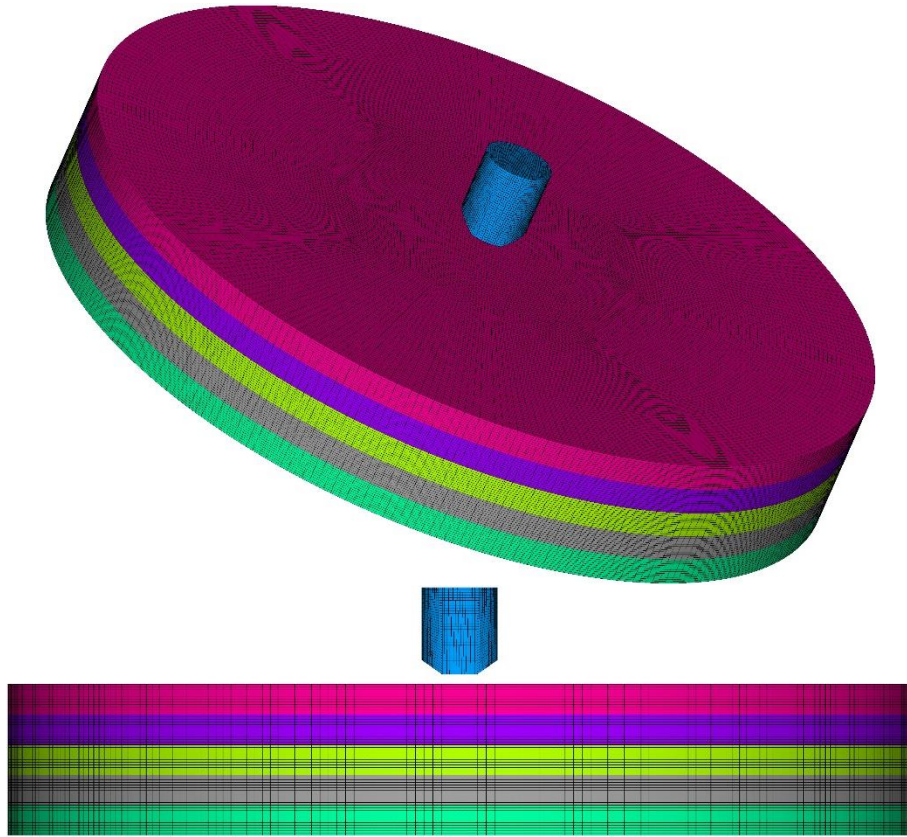
Bu temas tipi genellikle iki yüzey arasında meydana gelen genel temaslarda ve yüzeylerden biri ya da her ikinde de hasar oluşması durumlarında, temasın yüzey altındaki elemanlar üzerinde de etkili olmasına izin verildiği katı elemanlara penetrasyon problemlerinde ve diğer yüzey hasarına uğrayan problemlerde kullanılır. Ayrıca mermi ve plakaya ait elemanlarda oluşacak bozulmaları engellemek için 5. tip HOURGLASS tanımlanmıştır.

Fonksiyonel kademelendirilmiş silindirik plakalar, kalınlıkları boyunca 5,10,15 ve 20 katman olarak modellenmiş olup mermi ile fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar arasında sürtünmenin

olmadığı, fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların sönümleme etkisinin ihmal edildiği, çarpma boyunca yerçekimi ivmesinin olmadığı, katman ara yüzey bağlarının mükemmel olduğu, her bir katmanın kendi içerisinde homojen olduğu kabulleri yapılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir.

3. NUMERİK SONUÇLAR (NUMERICAL RESULTS)

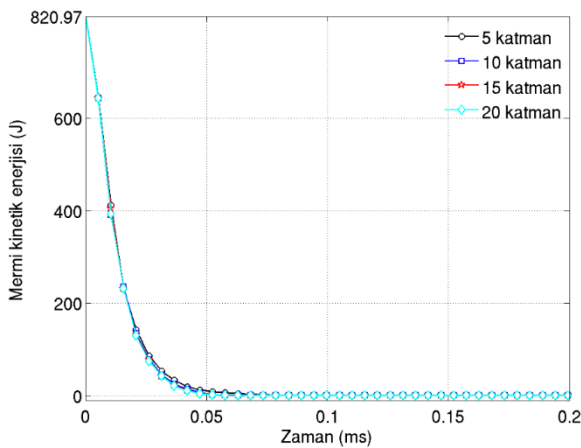
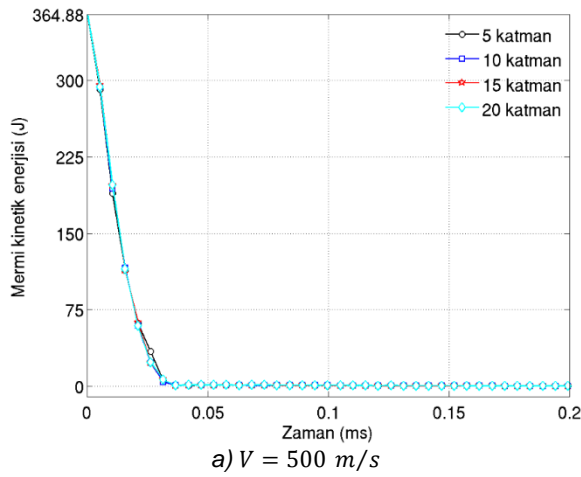
Sayısal analizlerde 2,85g kütleli 0,3 kalibre parçacık benzetimli mermi sabit 500m/s ve 750m/s 'lik hızlarda Şekil 3a'da gösterilen kalınlığı boyunca 4 farklı katman sayısına sahip fonksiyonel kademelendirilmiş plakalara çarptırılmıştır. Analizlerde fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların en üst katmanı (çarpma yüzeyi) %100 SiC olup plaka alt yüzeyi de %100 alüminyumdur, ara katmanlar ise, kompozisyonu bileşenlerin hacimsel oranlarındaki değişime bağlı olarak bir kuvvet kanununa göre tanımlanmıştır. Seramik malzemeler, balistik sistemlerde kullanılacak bir malzemeden beklenen yüksek sertlik, termal direnç ve basma dayanımına sahip olsa da kırılabilir bir yapıya sahip olmalarından dolayı tek başına bu amaç için kullanılmazlar.



Şekil 5. Fonksiyonel kademelendirilmiş plaka ve 0,3 kalibre parçacık benzetimli mermi sonlu elemanlar modeli (Finite element model of the functionally graded circular plate and projectile)

Zırh sistemlerinde genellikle ön yüz malzemesi olarak kullanılan seramikler, merminin delici ucunu deforme ederken arka yüzeyde kullanılan sünek (metal, polimer vs.) malzemeler enerjii absorbe ederek merminin durdurulmasını sağlamakta, mermi ve parçacıkları tutarak tam nüfuziyeti engellemektedir [15-16].

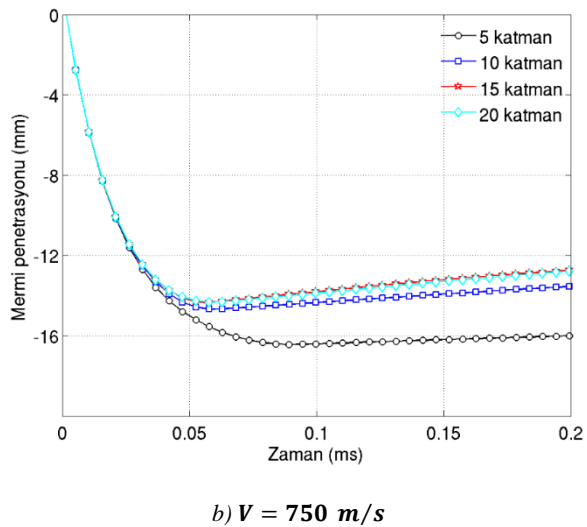
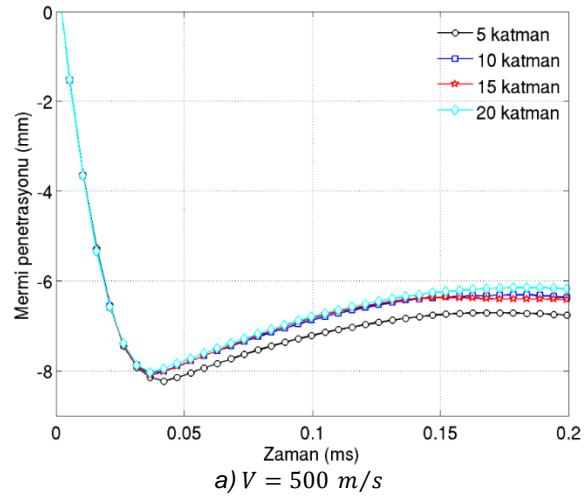
Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.'da iki farklı hız için 0,3 kalibre parçacık benzetimli merminin sahip olduğu kinetik enerjinin zamana göre değişim grafikleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde her iki hız değeri için, fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların sahip olduğu katman sayısının, mermi kinetik enerjisi değişimi üzerinde neredeyse etkisiz olduğu görülmektedir. Mermi hızının artması ile penetrasyon süreleri artmış ve mermilerin sahip oldukları kinetik enerjinin (sırasıyla 364,88J ve 820,97J) tamamı plaka deformasyonu için harcanmıştır ancak plakalarda delinme (perforasyon) olmamıştır.



Şekil 6. 0.3 kalibre parçacık benzetimli mermi kinetik enerjisinin zamana göre değişimi (Kinetic energy histories of 0.3 caliber fragment simulating projectile)

Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.'de iki farklı hız için 0,3 kalibre parçacık benzetimli merminin, plakalar

içerisine nüfuziyetinin zamana göre değişim grafikleri verilmiştir. Her iki grafikte de mermi nüfuziyeti 5 katmana sahip plaka için diğer plakalara kıyasla önemli olmayan mertebede biraz daha fazla olmuştur. 15 mm kalınlığa sahip fonksiyonel kademelendirilmiş plakalara, 500m/s hızda çarptırılan 0,3 kalibre parçacık benzetimli mermi, 5 katmana sahip plaka içerisine toplamda 8,23mm, 10 katmana sahip plaka içerisine toplamda 8,11mm, 15 katmana sahip plaka içerisine toplamda 8,06mm ve 20 katmana sahip plaka içerisine toplamda 8,04mm nüfuz edebilmiştir.



Şekil 7. 0.3 kalibre parçacık benzetimli mermi penetrasyonunun zamana göre değişimi (Penetration histories of 0.3 caliber fragment simulating projectile)

Merminin 5 katmana sahip fonksiyonel kademelendirilmiş plaka nüfuziyeti ile 20 katmana sahip plaka nüfuziyeti arasında 0,17mm seviyesinde önemsiz sayılabilecek bir fark olmuştur. 750m/s mermi hızı için de benzer sonuçlar gözlemlenmiş olup, plakalara 750m/s hızda çarptırılan 0,3 kalibre parçacık benzetimli mermi, 5 katmana sahip plaka içerisine toplamda 16,4mm, 10 katmana sahip plaka içerisine toplamda 14,7mm, 15 katmana sahip plaka içerisine toplamda 14,4mm ve 20 katmana sahip

plaka içerisine toplamda 14,3mm nüfuz edebilmiştir. Bu hız değeri için merminin, 5 katmana sahip fonksiyonel kademelendirilmiş plaka içerisine toplam nüfuziyeti ile 20 katmana plaka içerisine olan nüfuziyeti kıyaslanacak olursa aradaki fark toplamda 2,1mm olmuştur. Yukarıda bahsi geçen nüfuziyet değerleri merminin, plaka üst yüzeyine olan mutlak mesafesidir. Öyle ki 750m/s hızla sahip mermi, kalınlığı 15 mm olan 5 katmanlı plaka içerisine 16,4mm nüfuz etmesine karşın tam delinme gerçekleşmemiştir, çünkü plaka arka yüzeyinde çarpma etkisi ile 2,49mm şişme meydana geldiğinden dolayı, plaka arka yüzeyinin, çarpma öncesi plaka ön yüzeyi arasındaki toplam mesafesi 17,49mm olmuştur.

Grafiklerde, plaka kalınlığı boyunca değişen katman sayısının balistik performans üzerindeki etkisinin mermi hızı ile ilişkisi incelenecek olursa; her iki mermi hızında 10, 15 ve 20 katmana sahip fonksiyonel kademelendirilmiş plakalardaki mermi nüfuziyetinin neredeyse aynı olduğu görülmektedir. 5 katmana sahip plakalardaki mermi nüfuziyeti diğer plakalara kıyasla çok az miktarda daha fazla olmakla birlikte mermi hızının artması ile söz konusu bu farkın da belirgin olmayan bir oranda arttığı görülmektedir.

Şekil 8 ve Şekil 9'da sırasıyla 500m/s ve 750m/s hızlarında, 0,3 kalibre parçacık benzetimli mermi tesiri altında, 4 farklı katman sayısına sahip fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda çarpması sonrasında oluşan deformasyon kesit görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde 500m/s hızla sahip merminin (Şekil 8), plakalar içerisinde yaklaşık olarak 8mm ilerleyebildiği görülmekte olup çarpma etkisi ile plaka arka yüzeylerindeki şişme miktarları da yaklaşık olarak 0,45mm'dir. Ayrıca grafikler açık bir şekilde göstermiştir ki 0,1, 0,5 ve 1ms zaman değerleri için plaka ve mermilerde oluşan deformasyon hızları neredeyse birbirlerinin aynıdır. 750m/s hızına sahip mermi (Şekil 9) ise plakalar içerisinde yaklaşık olarak 14,5mm ilerleyebilmiş ve plaka içerisinde kalmıştır. 10, 15 ve 20 katmana sahip plakaların arka yüzeylerinde meydana gelen şişme miktarları yaklaşık olarak 1,75mm seviyelerinde iken 5 katmana sahip plaka arka yüzeyinde oluşan şişme miktarı yaklaşık olarak 2,49 mm olmuştur. Bu mermi hızı için, plaka kalınlığı boyunca artan katman sayısının mermi penetrasyon derinliği ve plaka arka yüzeylerinde oluşan şişme miktarları üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı ve aynı zamanda 0,3 kalibre parçacık benzetimli mermi deformasyonlarının da çok benzer olduğu görülmüştür.

Aydın ve arkadaşları [17] tarafından rapor edilmiş olan deneysel çalışma, bu makalede elde edilen sayısal analiz sonuçlarının doğrulanmasını mümkün kılmaktadır. Aydın ve arkadaşları söz konusu çalışmalarında, kalınlık boyunca farklı sayıda katmana (5, 10, 15 ve 20 katman) sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların balistik performanslarını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında toz istifleme-sıcak presleme yöntemini kullanarak ürettikleri Al/SiC fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalara, tek kademeli gaz silah sistemi ile 0,3 kalibre parçacık benzetimli mermi

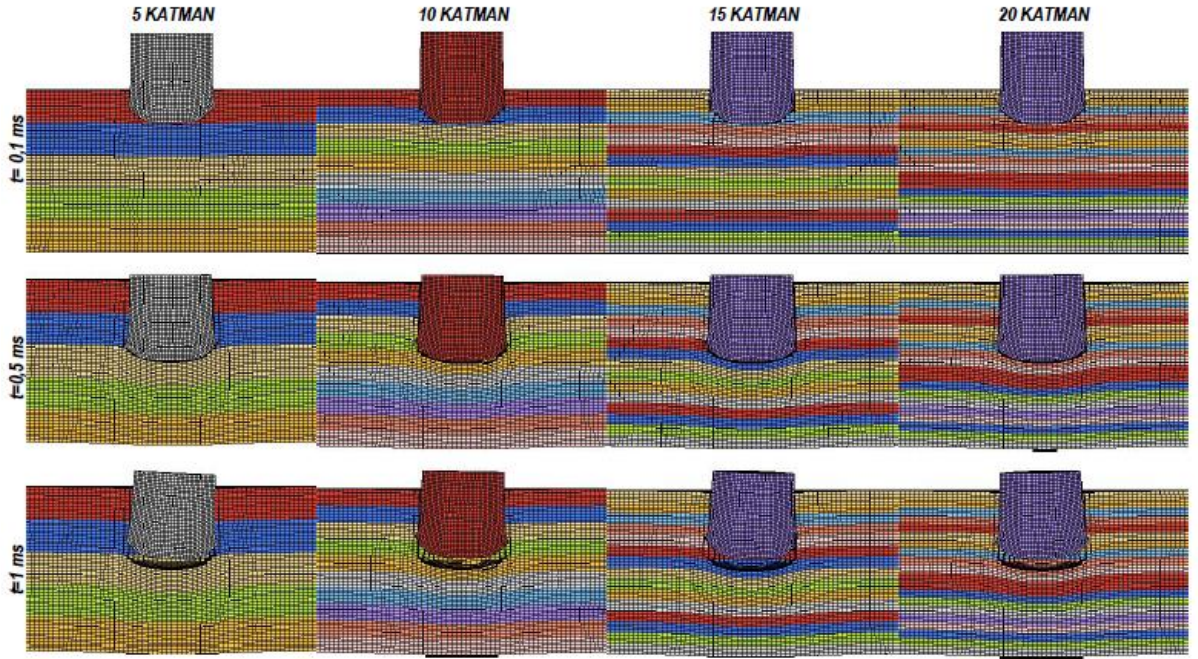
kullanarak yaklaşık 710±5 m/s hızda atış gerçekleştirmişlerdir. Balistik test sonrasında plakaların hasar ve deformasyon mekanizmalarını inceleyen Aydın ve arkadaşları plaka kalınlığı boyunca artan katman sayısının balistik performans üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını ortaya koymuşlardır. Bu çalışmada da aynı şekilde plaka kalınlığı boyunca 5, 10, 15 ve 20 katmana sahip fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların yine 0,3 kalibre parçacık benzetimli mermi isabeti altında sonlu elemanlar modeli oluşturularak sayısal analizleri yapılmış ve benzer sonuçlara ulaşılmıştır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

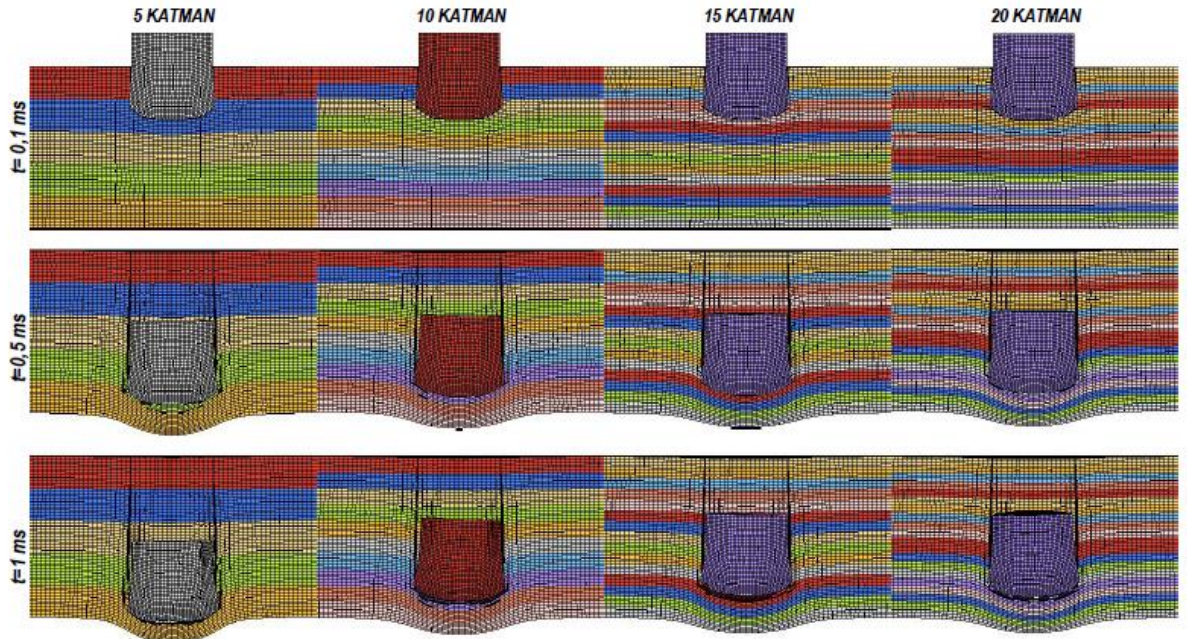
Bu çalışmada fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda kalınlık boyunca bileşenlerin hacimsel değişim sürekliliğinin, balistik performans üzerindeki etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, kalınlığı boyunca farklı katman sayılarına (5,10, 15 ve 20 katman) sahip Al/SiC fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların balistik çarpma yükü altındaki davranışları, LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Lineer olmayan davranışa neden olan geometri, malzeme ve temas sonrasındaki etkileşimin karakterleri dikkate alınarak gerçekleştirilen analizlerde, 0,3 kalibre parçacık benzetimli mermi, seramik zengin yüzey, çarpma yüzeyi olacak şekilde konumlandırılan 4 farklı plaka üzerine çarpıtılmıştır. Analizler 500 ve 750m/s olmak üzere iki farklı mermi hızı için raporlanmış olup 300 ile 850 m/s aralığında değişken mermi hızlarında da benzer sonuçlar elde edilmiştir.

90mm çap ve 15mm kalınlığa sahip plakalarda, seramik (SiC) ve metal (Al) katmanlar arasında kalan, fonksiyonel kademelendirilmiş bölgenin mekanik özellikleri, plaka kalınlığı boyunca sürekli olarak bileşenlerin hacimsel oranlarındaki değişime bağlı olarak bir kuvvet kanununa göre değiştiği varsayılmıştır. Analizlerde iki farklı bileşene sahip yapılarda bileşenlerin, tek eksenli gerilme-şekil değiştirme değerlerini kullanarak nihai malzemenin gerilme şekil değiştirme eğrisinin oluşturulması için geliştirilmiş olan TTO model kullanılarak elasto-plastik davranışlar modellenmiştir.

Analiz sonuçları göstermiştir ki, kademelendirilmiş bölge boyunca katman sayısının artması mermi penetrasyon derinliği üzerinde önemli bir rol oynamamıştır. Katman sayısının artması ile mermi penetrasyonu ve plaka arka yüzeylerinde oluşan şişme miktarları ihmal edilebilir bir oranda azalmıştır. Sonuç olarak bu çalışma, fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler için belirli bir pozisyonda değişen malzeme kompozisyonunun kademeli ya da sürekli olarak değişmesinin, her ne kadar termal yüklemeler açısından önemli olsa da, balistik performans açısından önemli olmadığını açıkça ortaya koymuştur, bu sonuç fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların daha fazla katman sayısı ile üretilmesinin plaka dayanımına ilave bir katkı sağlamayacağı şeklinde yorumlanabilir.



Şekil 8. 0,3 kalibre parçacık benzetimli mermi ($V=500\text{m/s}$) çarpması sonrasında, farklı katman sayısına sahip fonksiyonel kademelenendirilmiş dairesel plakalarda oluşan deformasyon kesit görüntüleri (Deformations on the cross-section of the impact region of functionally graded plates have different layer number caused by 0.3 caliber fragment simulating projectile ($V=500\text{m/s}$))



Şekil 9. 0,3 kalibre parçacık benzetimli mermi ($V=750\text{m/s}$) çarpması sonrasında, farklı katman sayısına sahip fonksiyonel kademelenendirilmiş dairesel plakalarda oluşan deformasyon kesit görüntüleri (Deformations on the cross-section of the impact region of functionally graded plates have different layer number caused by 0.3 caliber fragment simulating projectile ($V=750\text{m/s}$))

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] R. M. Mahamood, E. T. Akinlabi, "Functionally Graded Material", Springer, Switzerland, (2017).
- [2] Mori, T. and Tanaka, K., 1973. "Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions", **Acta Metallurgica**, 21(5): 571–574, (1973).
- [3] Benveniste, Y., "A new approach to the application of Mori-Tanaka's theory in composite materials", **Mechanics of Materials**, 6(2): 147 – 157, (1987).
- [4] Tamura, I., Tomota, Y., and Ozawa, H., "Strength and ductility of Fe-Ni-C alloys composed of austenite and martensite with various strength", in **Proceedings of the Third Conference on Strength of Metals and Alloys**, 1: 611–615, (1973).
- [5] Gunes R, Aydin M, Apalak MK, et al. "Experimental and numerical investigations of low velocity impact on functionally graded circular plates", **Composites Part B: Engineering**, 59: 21-32, (2014).
- [6] Kieback, B., Neubrand, A., and Riedel, H., "Processing techniques for functionally graded materials", **Materials Science and Engineering: A**, 362(1–2): 81–106, (2003).
- [7] Zhou, M., Xi, J., and Yan, J., "Modeling and processing of functionally graded materials for rapid prototyping", **Journal of Materials Processing Technology**, 146(3), 396 – 402, (2004).
- [8] El-Desouky, A., Kassegne, S.K., Moon, K.S., McKittrick, J., and Morsi, K., "Rapid processing; characterization of micro-scale functionally graded porous materials", **Journal of Materials Processing Technology**, 213(8): 1251–1257, (2013).
- [9] Shabana, Y.M. ve Noda, N. "Thermo-elasto-plastic Stresses in Functionally Graded Materials Subjected to Thermal Loading Taking Residual Stresses of the Fabrication Process into Consideration", **Composites Part B: Engineering**, 32: 111-121, (2001).
- [10] Shaw, L.L., "Thermal Residual Stresses in Plates and Coatings Composed of Multi-Layered and Functionally Graded Materials", **Composites Part B: Engineering**, 29: 199-210, (1998).
- [11] Nemat-Alla, M., "Reduction of Thermal Stresses by Developing Two-dimensional Functionally Graded Materials", **Int. Jour. of Solids and Structures**, 40: 7339-7356, (2003).
- [12] Caroline, S. L., Sung-Hoon. A., Lutgard, C. D., Gareth, T., "Effect of functionally graded material (FGM) layers on the residual stress of polytypoidally joined Si₃N₄-Al₂O₃", **Materials Science and Engineering A**, 434: 160-165, (2006).
- [13] **NATO STANAG 2920**, "Ballistic test method for personal armour materials and combat clothing", (2003).
- [14] **MIL-DTL-46593 B (MR) w/AMENDMENT 1**, Projectile, calibers .22, .30, .50, and 20 mm fragment-simulating, (2008).
- [15] Gonçalves, D., de Melo, F., Klein, A., and Al-Qureshi, H., "Analysis and investigation of ballistic impact on ceramic/metal composite armour", **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 44(2–3): 307–316, (2004).
- [16] Liu, D., Raju, B.B., and Dang, X., "Impact perforation resistance of laminated and assembled composite plates", **International Journal of Impact Engineering**, 24(6–7): 733–746, (2000).
- [17] M. Aydin., M. K. Apalak., Z. G. Apalak., "Effect of Number of Layers on the Ballistics Performance of Functionally Graded Sandwich Plates", **14th International Symposium on Functionally Graded Materials**, Bayreuth-Germany, 215-218, (2016).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



SRF based output voltage control of 3-Level 3-Phase 4-Leg AT-NPC inverter

3-Seviyeli 3-Fazlı 4-Kollu AT-NPC eviricinin SRF tabanlı çıkış gerilimi denetimi

Yazar(lar) (Author(s)): Emre AVCI¹, Mehmet UÇAR²

ORCID¹: 0000-0003-2086-1417

ORCID²: 0000-0002-7008-9886

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(To cite to this article): Avcı E. ve Uçar M., “SRF based output voltage control of 3-level 3-phase 4-leg AT-NPC inverter”, *Politeknik Dergisi*, 21(4): 961-966, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.386964

SRF Based Output Voltage Control of 3-Level 3-Phase 4-Leg AT-NPC Inverter

Araştırma Makalesi / Research Article

Emre AVCI, Mehmet UÇAR*

Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Düzce University, Turkey

(Received : 21.09.2017 ; Accepted : 18.01.2018)

ABSTRACT

This paper proposes a synchronous reference frame (SRF) based high performance output voltage controller for the 3-level 3-phase 4-leg (3P4L) advanced T-type neutral point clamped (AT-NPC) inverter operated in stand-alone mode. 3-phase inverters for stand-alone operation are required to provide 3-phase balanced nominal voltage under different load types such as unbalanced linear and non-linear loads. 3P4L inverters working with these types of load allow controlling zero sequence voltage by additional fourth leg. The main contribution of this work is the control of the 3-level 3P4L AT-NPC inverter with an LC-type filter modeled based on the output voltage and capacitor current feedback in the synchronous coordinate system. According to obtained capacitor current decoupled model, double loop PI controller is adopted to control the output voltage of the inverter. An inner capacitor current feedback loop is employed to provide fast dynamic response and active damping of the capacitor current. Finally, transient and steady state operation performance of the controller have been tested with PSIM simulation studies considering different load types. Simulation results validate that the proposed SRF based double loop PI controller ensure high dynamic response and high quality output voltage with less than 3% total harmonic distortion (THD) value for the 3-level 3P4L AT-NPC inverter.

Keywords: 3-level, 4-leg, AT-NPC inverter, carrier-based PWM, voltage control.

3-Seviyeli 3-Fazlı 4-Kollu AT-NPC Eviricinin SRF Tabanlı Çıkış Gerilimi Denetimi

ÖZ

Bu çalışma bağımsız modda çalışan 3-seviyeli 3-fazlı 4-kollu (3P4L) gelişmiş T-tipi nötr noktası bağlantılı (AT-NPC) evirici için senkron referans yapı (SRF) tabanlı yüksek performanslı çıkış gerilimi denetleyicisi önermektedir. Bağımsız işletim için 3-fazlı eviriciler, dengesiz doğrusal ve doğrusal olmayan yükler gibi farklı yük türleri altında 3-fazlı dengeli nominal gerilim sağlamak zorundadır. Bu tür yüklerle çalışan 3P4L eviriciler, ilave dördüncü kol tarafından sıfır sıralı gerilimi kontrol etmeye izin verirler. Bu çalışmanın ana katkısı, senkron koordinat sisteminde çıkış gerilimi ve kondansatör akım geri beslemesine dayalı olarak modellenmiş LC tipi filtreye sahip 3-seviyeli 3P4L AT-NPC eviricinin kontrol edilmesidir. Elde edilen kondansatör akımı ayrıştırılmış modele göre, eviricinin çıkış gerilimini kontrol etmek için çift çevrimli PI denetleyicisi adapte edilmiştir. Hızlı dinamik cevap ve kapasitör akımının aktif sönümlenmesi için kapasitör akım geri beslemeli bir iç döngü kullanılmıştır. Son olarak, denetleyicinin geçici ve kararlı durum çalışma performansı, farklı yük türleri dikkate alınarak PSIM benzetim çalışmaları ile test edilmiştir. Benzetim sonuçları, önerilen SRF tabanlı çift döngülü PI denetleyicinin, 3-seviyeli 3P4L AT-NPC evirici için %3'den daha düşük toplam harmonik bozulma (THD) değerine sahip yüksek dinamik cevap ve yüksek kaliteli çıkış gerilimi sağladığını doğrulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: 3-seviye, 4-kol, AT-NPC evirici, taşıyıcı tabanlı PWM, gerilim kontrolü.

1. INTRODUCTION

Inverters have been widely used in many power electronics applications, such as uninterruptible power supply (UPS), renewable energy systems and electrical vehicle, which need converting DC power to AC power. In several 3-phase inverter applications, 3-phase 4-wire (3P4W) inverters are employed to supply 1-phase, unbalanced and non-linear loads [1], [2]. In 3-phase inverter applications, these load types result in zero sequence voltage and current. To handle zero sequence current, conventional split DC-link capacitors can be used at the DC side of 3P4W inverter. In this case, neutral current flows throughout the DC-link capacitor, which

requires huge capacitance to handle the neutral current [3]. Another way to obtain neutral point for the zero sequence current in 3P4W inverter is that a delta/star or delta/zigzag connected transformer is used at the load side. However, this is not chosen in many applications because of transformer's dimensions, losses and cost [2]. Therefore 3-phase 4-leg (3P4L) inverter, generated with an additional fourth leg (or neutral leg), is employed in 3-phase applications to provide neutral connection and to control zero sequence voltage.

Other challenging tasks for today's inverter applications are high efficiency, low complexity and low cost. Even though the complexity and cost concerns are partially satisfied with 2-level topology, low efficiency and high filter requirements are disadvantages for this topology.

*Corresponding Author
e-mail: mehmetucar@duzce.edu.tr

For these disadvantages, 3-level topologies are a good solution. Among the 3-level topologies, neutral-point clamped (NPC) inverter is well-known topology and widely preferred in industrial applications [4], [5]. The classical 3-level NPC topology is widely used for medium voltage applications. Because it is necessary to place switching devices in series in the topology, higher conduction losses occur due to the increase in these devices in the conduction path. Another type of the NPC topology is T-NPC, which is more convenient for low-voltage applications and more efficient than the NPC inverter [6], [7]. Compared to the 3-level NPC topology, the T-NPC employs an active bidirectional switch to the dc-link voltage midpoint and gets along with two diodes less per bridge leg. The T-NPC topology combines the positive aspects of the 2-level converter such as low conduction losses, small part count and a simple operation principle with the advantages of the 3-level converter such as low switching losses and high output voltage quality [4]. In T-NPC topology, a bidirectional switch at the midpoint leg is formed by using two conventional insulated gate bipolar transistors (IGBTs) with two antiparallel diodes. Power dissipation in these switches is high since there are two semiconductors in the current path as an IGBT and a diode at the midpoint leg. On the other hand, a bidirectional switch can be designed with only two RB-IGBTs, which do not require diodes [8]. The disadvantage of the T-NPC topology can be removed using an AT-NPC topology due to the employment of the highly efficient RB-IGBT at the midpoint leg. The advanced type of T-NPC (AT-NPC) was proposed in literature with high efficiency and reliability [9]. Because of these advantages, 3-level 3P4L AT-NPC inverter structure, whose detailed analysis and principles are excluded from the scope of this study, is employed with the LC-type filter as in Figure 1. As can be shown in the figure, the additional fourth leg is employed to provide neutral point for 1-phase loads and to control zero sequence voltage under unbalanced or non-linear load conditions.

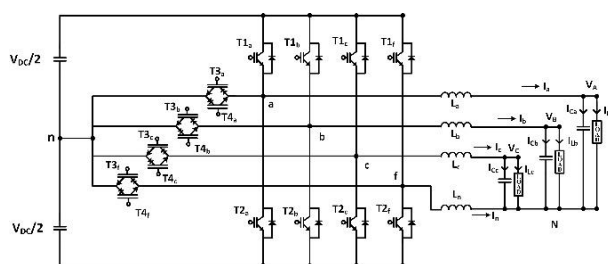


Figure 1. 3-level 3P4L inverter structure

To control the 3-level 3P4L AT-NPC inverter system with low total harmonic distortion (THD) under 1-phase/3-phase, linear/non-linear and balanced/unbalanced load types, double-loop proportional-integral (PI) controller is designed in this study. Although, PI controller has the advantages such as widely used and easy to implement, it does not enable to track sinusoidal reference signal and has not enough

controller band width to satisfy high dynamic response in inverter applications. For these reasons, double-loop PI controller based on coordinate transformation in synchronous reference frame (SRF) [10] is used to eliminate steady-state error [11], [12]. In multi-loop based voltage control, either output filter inductor or output filter capacitor current is sampled for inner current loop variable to obtain fast transient response in literature. In reference [13], different feedback and feedforward multi-loop voltage control of 2-level 3-phase 3-leg inverter for the capacitor and the inductor currents feedback are analyzed and it indicates that capacitor current based control is the superior performance. Moreover, reference [14] proves that capacitor current based model is more independent of load variation than inductor current based. Therefore, in this paper, capacitor current based control is adopted as in reference [15] to control 3-level 3P4L AT-NPC inverter with high controller bandwidth and low THD under aforementioned load types.

2. MODELING AND OUTPUT VOLTAGE CONTROL OF THE INVERTER

A proper model of the inverter system should be obtained to achieve high performance output voltage control. The switching-model can represent detailed dynamics and characteristics of the inverter. However, the average-model of the inverter system is more ideal than the switching-model for controller design employed in this study, because the switching-model contains the non-linear structure of the power switches. For the proposed system given in the Figure 1, output voltages (v_{jf}), pole voltages (v_{jn}) and offset voltage (v_{fn}) can be written as:

$$v_{jn} = \frac{E}{2} d_j \tag{1}$$

$$v_{jf} = v_{jn} - v_{fn} = \frac{E}{2} (d_j - d_f) = \frac{E}{2} d_{jf} \tag{2}$$

where $j \in \{ a, b, c \}$ and d_j is duty ratio of each leg that range from 0 to 1. According to Eqs. (1) and (2), matrix form of output voltage can be expressed as:

$$\begin{bmatrix} v_{af} \\ v_{bf} \\ v_{cf} \end{bmatrix} = \frac{E}{2} \begin{bmatrix} d_{af} \\ d_{bf} \\ d_{cf} \end{bmatrix} \tag{3}$$

From the Figure 1, Eqs. (4)-(6) can be easily written using the Kirchhoff voltage and current laws.

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = L_n \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{AN} \\ v_{BN} \\ v_{CN} \end{bmatrix} + \frac{E}{2} \begin{bmatrix} d_{af} \\ d_{bf} \\ d_{cf} \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{AN} \\ v_{BN} \\ v_{CN} \end{bmatrix} = \frac{1}{C} \begin{bmatrix} I_{Ca} \\ I_{Cb} \\ I_{Cc} \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$I_a + I_b + I_c = -I_n \tag{6}$$

where v_{AN}, v_{BN}, v_{CN} are capacitor voltages, I_a, I_b, I_c are filter inductor currents, I_n is neutral filter current and filter inductors L_a, L_b, L_c have same value L .

The obtained time-varying $a-b-c$ coordinate model is transformed to $d-q-0$ coordinate (SRF) by using T_T matrix and Eq. (8).

$$T_T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$T_T \frac{dx_{a,b,c}}{dt} = T_T \frac{dT_T^{-1}}{dt} X_{d,q,0} + \frac{dX_{d,q,0}}{dt} \quad (8)$$

Using Eqs. (4)-(6) with Eqs. (7), (8), SRF based model of the inverter is obtained as:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} = \frac{\varepsilon}{2} G \begin{bmatrix} d_d \\ d_q \\ d_0 \end{bmatrix} - G \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} I_q \\ -I_d \\ I_0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = \omega \begin{bmatrix} v_q \\ -v_d \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{C} \begin{bmatrix} I_{Ca} \\ I_{Cb} \\ I_{Cc} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$G = \begin{bmatrix} 1/L & 0 & 0 \\ 0 & 1/L & 0 \\ 0 & 0 & 1/(L + L_n) \end{bmatrix} \quad (11)$$

In the above model, it can be concluded that d -channel and q -channel have capacitor current cross coupling terms with ωCV_q , $-\omega CV_d$ and have inductor voltage cross coupling terms with $-\omega LI_q$, ωLI_d . The state-space model including the cross coupling terms can be obtained as Eq. (12);

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_d \\ \dot{V}_d \\ \dot{I}_q \\ \dot{V}_q \end{bmatrix}^T = A * \begin{bmatrix} I_d \\ V_d \\ I_q \\ V_q \end{bmatrix}^T + B * \begin{bmatrix} D_d \\ D_q \end{bmatrix}^T \\ \begin{bmatrix} \dot{V}_d \\ \dot{V}_q \end{bmatrix}^T = C * \begin{bmatrix} I_d \\ V_d \\ I_q \\ V_q \end{bmatrix}^T \quad (12)$$

In Eq. (12), the model has 4×4 state matrix (A) and output matrix (B) and has 4×2 input matrix (C), moreover; it has four transfer functions v_d/d_d , v_q/d_q , v_d/d_q , v_q/d_d , the last two of which are coupling transfer functions. If the channels can be coupled completely, the coupling transfer functions would be zero. To simplify the controller design, the decoupling of inductance voltage terms is omitted, because the effect of it is little. Additionally, capacitor current decoupling terms can be added to capacitor current references for the decoupling. Hence the capacitor current based state-space model can be simplified as in Eq. (13);

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_c \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/RC & -1/L \\ 1/C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_c \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{dc}/2L \\ 0 \end{bmatrix} D_{dq0} \\ V_{dq0} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_c \\ V_c \end{bmatrix} \quad (13)$$

,where R represents output load impedance, D_{dq0} represents duty ratio of each channels. The inverter produces the output voltage based on reference signals (v_d^* , v_q^* , v_0^*). The reference signals for the reactive and zero components of the output voltage (v_d^* , v_q^*) are set to zero, thus the reactive and zero components of the output

voltage are regulated to zero. Therefore, only the active component (v_d^*) contributes to the actual output voltage. According to this simplified model, PI controller is employed in outer closed-loop voltage control for each channel in the control structure. Although zero steady-state error is achieved with integrator of the outer voltage loop, control bandwidth is so low that cause slow transient response under unbalanced voltage and load disturbance. To improve performance of the controller, inner closed-loop current feedback is employed with proportional gain. The outputs of the proportional controller are transformed to $a-b-c$ coordinate and used as each phase's line to neutral reference voltages (v_{af}^* , v_{bf}^* , v_{cf}^*) as can be seen in Figure 2.

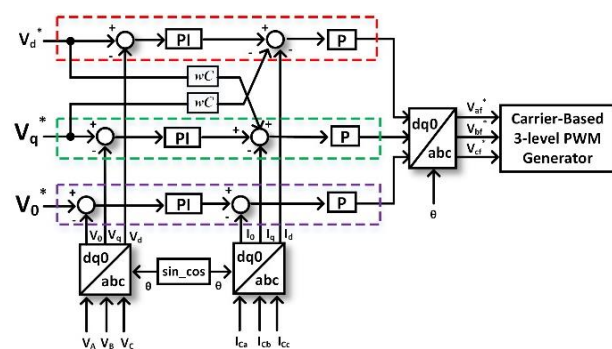


Figure 2. SRF based proposed control block diagram

In Figure 3, double loop voltage control strategy is given. In there, $G_{VC}(s)$ is outer loop voltage controller transfer function, $G_{CC}(s)$ is inner loop current controller transfer function and $G_p(s) = H_i(s) * H_v(s)$ is simplified plant transfer function, where C is capacitance of the filter, L is inductance of the filter and R is equivalent resistance of the filter inductance.

$$G_{VC}(s) = K_{p1} + \frac{K_I}{s} \quad (14)$$

$$G_{CC}(s) = K_{p2} \quad (15)$$

$$G_p(s) = H_i(s) * H_v(s) = \left(\frac{1}{sC}\right) \left(\frac{\frac{1}{LC} sC}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}}\right) \quad (16)$$

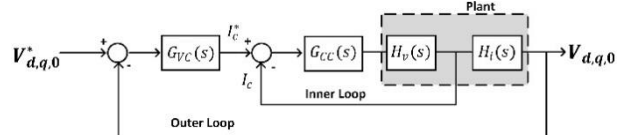


Figure 3. Double loop voltage control strategy

The controller parameters are designed according to requirements of stability and high dynamic response. In voltage loop, the gain K_{p1} and K_I are obtained as 0.8 and 30, respectively. In current loop, the gain K_{p2} is obtained as 60. Using these parameters, the frequency response of the open loop voltage control system with the controllers is given in Figure 4. It shows that the gain and phase margin are sufficient to fulfill the requirement of high dynamic response and stability.

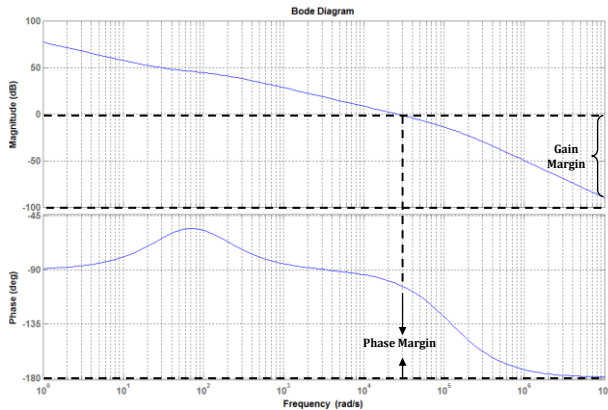


Figure 4. Frequency response of open loop voltage control system with controllers

After obtaining the voltage reference signals at the output of the controller, the carrier-based 3-level pulse-width modulation (PWM) method is used to generate switching signals is depicted in the Figure 5. Since the 3P4L topology has not current path between n point and f point as shown in the Figure 1, which is different from 3P4W with split DC-link capacitors topology, there is extra degree of freedom in the selection of v_{fn} [16]. Thus, selection of the offset voltage gives some advantages, which are higher DC-link voltage utilization, optimization of switching losses and reduced DC-link capacitor. The offset voltage selection can be achieved by controlling of gate signal of the fourth leg [1], [5]. To utilize the advantages that are mentioned above, offset voltage can be calculated as in Eq. (17).

$$v_{fn} = \begin{cases} -\frac{v_{min}^*}{2}, & v_{max}^* > 0 \\ -\frac{v_{max}^*}{2}, & v_{min}^* > 0 \\ -\frac{v_{min}^* + v_{max}^*}{2}, & elsewhere \end{cases} \quad (17)$$

The calculated offset voltage is added to phase reference voltages to obtain modulation signal of each leg as can

be seen in Figure 5. And then, modulation signals are compared with triangular carrier wave that yields 3-level PWM signals for each leg.

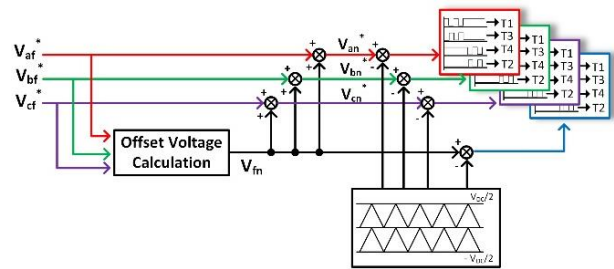


Figure 5. 3-level carrier-based PWM technique

3. SIMULATION RESULTS

The performance of the control algorithm designed for 3-level 3P4L AT-NPC inverter system is extensively evaluated for the different load types in PSIM software simulations. The results of the simulations are presented for three different load types, which are unbalanced load, 1-phase or 2-phase load and non-linear load. PSIM simulation block diagram of the 3-level 3P4L AT-NPC inverter system is shown in Figure 6. The inverter system is created with Fuji Electronic 4MBI300VG-120R-50 RB-IGBT module and with LC-type filter as can be seen in this figure. The inductor value in the LC filter is designed with the consideration of limiting the current ripple to 20% of the rated amplitude. The required minimum inductance is calculated as in (18), [17]. For the design of the LC filter capacitance value, the cut-off frequency of the LC filter is selected typically about 1/10~1/5 of the switching frequency f_{sw} to attenuate the switching ripple. The parameters of the system are summarized in Table 1.

$$L_j = \frac{v_{DC} - v_{jN} d_j}{2\Delta I_j f_{sw}} \quad (18)$$

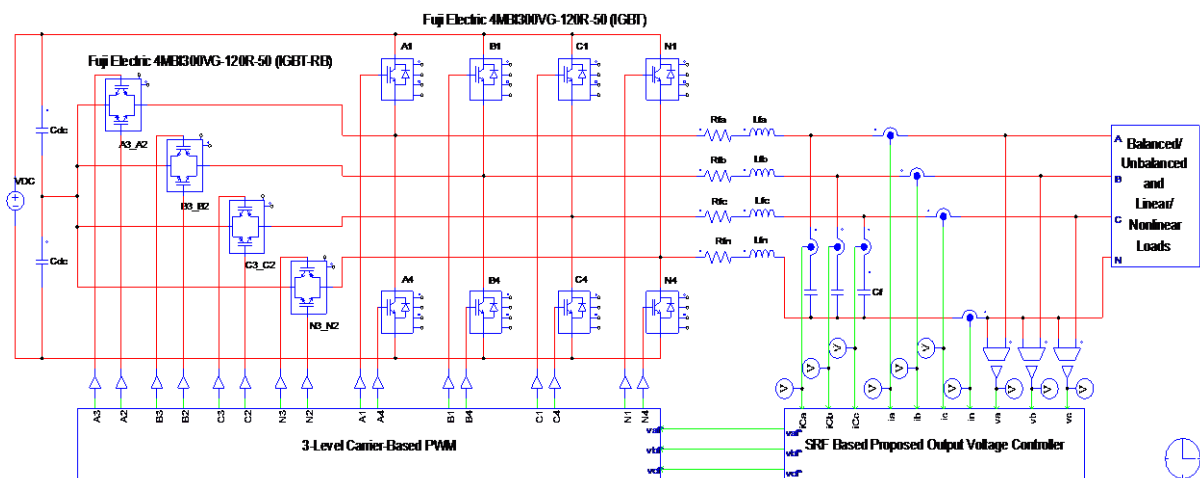


Figure 6. PSIM simulation block diagram of the 3-level 3P4L AT-NPC inverter system

Table 1. System parameters

Parameter	Value & Unit
Rated Power S	35 kVA
Output Voltage V_{fn}	220 V_{rms}
Output Frequency f	50 Hz
DC-Link Voltage V_{dc}	700 V
DC-Link Capacitor C_{dc}	2200 μ F
Filter Capacitance C_f	30 μ F
Filter Inductance L_f	2 mH
Simulation Step Time T_s	20 μ s
Switching Frequency f_s	5 kHz

In the first case, the control algorithm is tested under linear unbalanced load type. The load connected to the inverter output is 10 Ω , 5 Ω and 12 Ω for each phase leg. Figure 7 shows performance of the system under unbalanced linear load. As can be seen in the Figure 7a, the output voltages of each phase are balanced and its THD values are 1.58%, 1.56% and 1.55%, respectively. The neutral current caused by unbalanced load flows throughout fourth leg.

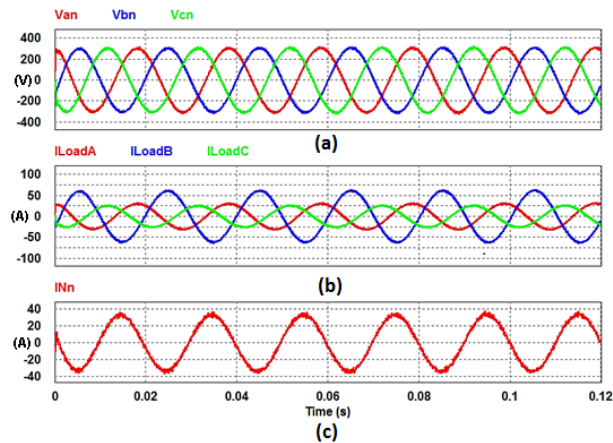


Figure 7. Simulation result of the 3-level 3P4L AT-NPC inverter system with unbalanced 10 Ω , 5 Ω and 12 Ω loads (a) output voltages (b) inverter currents (c) neutral current

In the second case, 1-phase or 2-phase loads are connected at the output of the inverter. In this case, the system start with unbalanced 2-phase loads and then one of the loads is disconnected at 0.06 s. The result about this case is shown in Figure 8. It shows that, the designed controller has fast dynamic response and it provides the 3-level 3P4L AT-NPC inverter system working with 1-phase or 2-phase loads. Moreover, the output voltage is balanced and its THD values are 1.80%, 1.74% and 1.76%, respectively.

In the final test case, 1-phase rectifier with RC load is connected to each phase leg of the inverter output. The load currents have 80.1% THD value. As can be seen in Figure 9, the controller provides the 3-level 3P4L AT-NPC inverter system to work balanced output voltage under non-linear load type. For this case, THD values of the inverter output voltages are 2.58%, 2.55% and 2.58%, respectively.

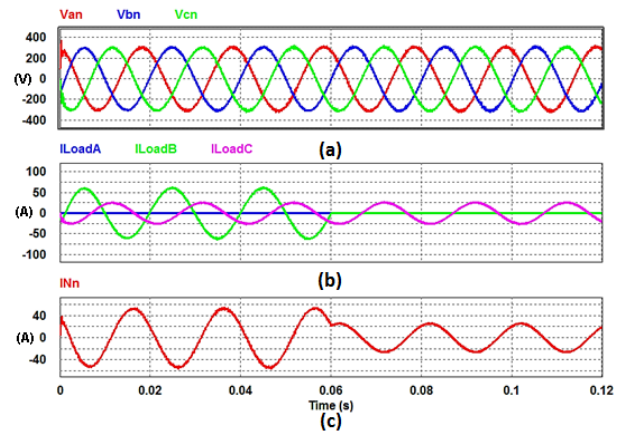


Figure 8. Simulation result of the 3-level 3P4L AT-NPC inverter system with 1-phase or unbalanced 2-phase loads (a) output voltages (b) inverter currents (c) neutral current

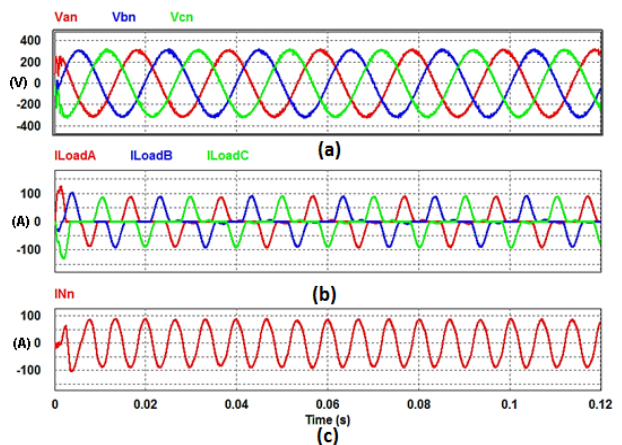


Figure 9. Simulation result of the 3-level 3P4L AT-NPC inverter system with non-linear loads (a) output voltage (b) inverter currents (c) neutral current

All these results show that SRF based control technique used in this study fulfills the requirement of high dynamic response and large stability margin in the 3-level 3P4L AT-NPC inverter system. Additionally, the system achieves to work with or without 2-phases. In all test conditions, the system supply high quality output voltage with less than 3% THD for the different loads.

4. CONCLUSION

In this paper, SRF based high performance output voltage controller is proposed for stand-alone operation of high efficient 3-level 3P4L AT-NPC inverter. For the controller design, capacitor current decoupled model of the inverter with LC-type filter is described. The controller is designed with an outer voltage loop to ensure zero steady state error and with an inner current loop to increase dynamic response of the system. The steady state and dynamic performance of the controller has been evaluated with PSIM simulation studies. The results show that the 3-level 3P4L AT-NPC inverter

system assures high quality balanced nominal output voltage for balanced/unbalanced, linear/non-linear and 1-phase/3-phase load types with less than 3% THD value and provides fast dynamic performance.

ACKNOWLEDGMENT

This study is supported by The Scientific and Technological Research Council of Turkey (Grant No. 215E357)

REFERENCES

- [1] Kim J.H., and Sul S.K., "A carrier-based PWM method for three-phase four-leg voltage source converters", *IEEE Transaction on Power Electronics*, 19: 66–75, (2004).
- [2] Hava A.M. and Demirkutlu E., "Output voltage control of a four-leg inverter based three-phase UPS", *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*, Aalborg, Denmark, 1–10, (2007).
- [3] Zhang R., Boroyevich D., Prasad V.H., Mao H., Lee F. C. and Dubovsky S., "A three-phase inverter with a neutral leg with space vector modulation", *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Atlanta, Georgia, 857–863, (1997).
- [4] Schweizer M. and Kolar J.W., "Design and implementation of a highly efficient three-level T-type converter for low-voltage applications", *IEEE Transaction on Power Electronics*, 28: 899–907, (2013).
- [5] Kortenbruck J., Premgamone T., Leksawat S., Ortjohann E., Holtschulte D., Schmelter A., and Morton D., "Multilevel and 4-leg topology for smart grid inverter", *Energy Conference (Energycon)*, Leuven, Belgium, 1-6, (2016).
- [6] Aghdam G.H., "Optimised active harmonic elimination technique for three-level T-type inverters", *IET Power Electronics*, 6: 425–433, (2013).
- [7] Schweizer M. and Kolar J.W., "High efficiency drive system with 3-level T-type inverter", *14th European Conference on Power Electronics and Applications*, Birmingham, UK, 1-10, (2011).
- [8] Zhang L., Sun K., Huang L. and Igarashi S., "Comparison of RB-IGBT and Normal IGBT in T-Type Three-Level Inverter", *15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, Lille, France, 1-7, (2013).
- [9] Avci E. and Ucar M., "Analysis and design of grid-connected 3-phase 3-level AT-NPC inverter for low-voltage applications", *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 25: 2464–2478, (2017).
- [10] Kesler M. and Ozdemir E., "Synchronous-reference-frame-based control method for UPQC under unbalanced and distorted load conditions", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58: 3967–3975, (2011).
- [11] Sato Y., Ishizuka T., Nezu K. and Kataoka T., "A new control strategy for voltage-type PWM rectifiers to realize zero steady-state control error in input current", *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 34: 480–486, (1998).
- [12] Zhang N., Tang H. and Yao C., "A systematic method for designing a PR controller and active damping of the LCL filter for single-phase grid-connected pv inverters", *Energies*, 7: 3934–3954, (2014).
- [13] Loh, P.C., Newman M. J., Zmood D.N. and Holmes D. G., "A comparative analysis of multiloop voltage regulation strategies for single and three-phase UPS systems", *IEEE Transaction on Power Electronics*, 18: 1176–1185, (2003).
- [14] Byen B. J., Choe J.M. and Choe G.H., "High-performance voltage controller design based on capacitor current control model for stand-alone inverters", *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 10: 709–718, (2015).
- [15] Yi H.Z. and Jin S., "Study on control strategy for three-phase four-leg inverter power supply", *IEEE Industrial Electronics Society Conference (IECON)*, Busan, South Korea, 805–809, (2004).
- [16] Demirkutlu E. and Hava A.M., "A scalar resonant-filter-bank-based output-voltage control method and a scalar minimum-switching-loss discontinuous PWM method for the four-leg-inverter-based three-phase four-wire power supply", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 45: 982–991, (2009).
- [17] Erickson R.W. and Maksimovic D., "Fundamentals of Power Electronics", Second Edition, *Kluwer Academic Publishers*, New York, (2001).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



On a study of the totally umbilical semi-invariant submanifolds of Golden Riemannian manifolds

Altın Riemann manifoldlarının tamamen umbilik yarı-invariant altmanifoldları üzerine bir çalışma

Yazar(lar) (Author(s)): Feyza Esra ERDOĞAN¹, Cumali YILDIRIM²

ORCID¹: 0000-0003-0568-7510

ORCID²: 0000-0002-5131-3731

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Erdoğan F. E. ve Yıldırım C., "Altın Riemann manifoldlarının tamamen umbilik yarı-invariant altmanifoldları üzerine bir çalışma", *Politeknik Dergisi*, 21(4): 967-970, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.389629

Altın Riemann Manifoldlarının Tamamen Umbilik Yarı-Invariant Altmanifoldları Üzerine Bir Çalışma

Araştırma Makalesi / Research Article

Feyza Esra ERDOĞAN^{1*}, Cumali YILDIRIM²

¹Eğitim Fakültesi, Matematik Ve Fen Bilimleri Eğitimi Bölümü, Adıyaman Üniversitesi, Türkiye

²Fen Edebiyat Fakültesi, Matematik Bölümü, İnönü Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 02.10.2016 ; Kabul/Accepted : 26.08.2017)

ÖZ

Altın oran, sürekli yeni fikirler üretilen büyüleyici bir konudur. Altın yapı ile donatılmış bir Riemann manifoldu altın Riemann manifoldu olarak isimlendirilecektir. Tam olarak söyleyebiliriz ki, m-boyutlu (\bar{M}, \bar{g}) Riemann manifoldu üzerindeki (1,1) tipinde bir \bar{P} tensör alanı, Id, \bar{M} üzerinde birim dönüşüm olduğu yerde, eğer $\bar{P}^2 = \bar{P} + Id$, denklemini sağlarsa bir Golden yapıdır. Ayrıca, Riemannian metrik $\bar{g}(\bar{P}X, Y) = \bar{g}(X, \bar{P}Y)$, denklemini sağladığında \bar{P} -uyumludur denir ve $(\bar{M}, \bar{g}, \bar{P})$ de Golden Riemannian manifold olarak isimlendirilir. Bu makalenin asıl amacı, Golden yapılarıyla donatılmış Riemannian manifoldlarının geometrisini incelemektir. Bu amaçla, biz Golden Riemannian manifoldlarının tamamen umbilik yarı-invariant altmanifoldlarını çalıştık. Ayrıca yapraklanmaların geometrisini inceledik ve distribüsyonların integrallenebilirlik şartlarını elde ettik.

Anahtar Kelimeler: Yarı-invariant altmanifoldlar, Altın Riemann manifoldlar, tamamen umbilik altmanifoldlar.

On a Study of the Totally Umbilical Semi-Invariant Submanifolds of Golden Riemannian Manifolds

ABSTRACT

The Golden Ratio is fascinating topic that continually generated news ideas. A Riemannian manifold endowed with a Golden Structure will be called a Golden Riemannian manifold. Precisely, we can say that an (1,1)-tensor field \bar{P} on a m-dimensional Riemann manifold (\bar{M}, \bar{g}) is a Golden structure if it satisfies the equation $\bar{P}^2 = \bar{P} + Id$, where Id is identity map on \bar{M} . Furthermore, $\bar{g}(\bar{P}X, Y) = \bar{g}(X, \bar{P}Y)$, the Riemannian metric is called \bar{P} -compatible and $(\bar{M}, \bar{g}, \bar{P})$ is named a Golden Riemannian manifold. The main purpose of the present paper is to study the geometry of Riemannian manifolds endowed with Golden structures. For this purpose, we study totally umbilical semi-invariant submanifold of the Golden Riemannian manifolds. Also, we obtain integrability conditions of the distributions and investigate the geometry of foliations.

Keywords: Semi-invariant submanifolds, Golden Riemannian manifolds, totally umbilical submanifolds

1. INTRODUCTION

The Golden proportion, also called the Golden ratio, Divine ratio, Golden section or Golden mean, has been well known since the time of Euclid. Many objects alive in the natural world that possess pentagonal symmetry, such as inflorescence of many flowers and phyllotaxis objects have a numerical description given by the Fibonacci numbers which are themselves based on the Golden proportion. The Golden proportion has also been found in the structure of musical compositions, in the ratios of harmonious sound frequencies and in dimensions of the human body. From ancient times it has played an important role in architecture and visual arts. The Golden proportion and the Golden rectangle (which is spanned by two sides in the Golden proportion) have been found in the harmonious proportions of temples, churches, statues, paintings, pictures and fractals.

Golden Riemannian manifolds were introduced by Crasmereanu and Hretcanu [3] by using Golden ratio. The authors also studied invariant submanifolds of a Golden Riemannian manifold and obtained interesting results in [4], [6]. The integrability of such Golden structures was also investigated by Gezer, Cengiz and Salimov in [5]. Moreover, the harmonicity of maps between Golden Riemannian manifolds was studied in [7].

Submanifolds of Riemannian manifolds endowed with some structure (complex, contact, product etc.) have rich geometric properties. In this way, CR-submanifolds have been studied by many authors see: [2], [3], [7] and they found many interesting results.

The structure of this article is following: In Preliminaries, we give some fundamental concepts and definitions needed for this paper. In Section3, we investigate totally umbilical semi-invariant submanifold of the Golden Riemannian manifolds, furthermore, we find integrability conditions of the distributions and analyze the geometry of foliations.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : ferdogan@adiyaman.edu.tr

2. PRELIMINARIES

Let (\bar{M}, \bar{g}) be a Riemannian manifold. Then \bar{M} is called Golden Riemannian manifold if there exists an $(1,1)$ tensor field \bar{P} on \bar{M} such that

$$\bar{P}^2 = \bar{P} + Id, \tag{1}$$

where Id is identity map on \bar{M} . Also,

$$\bar{g}(\bar{P} X, Y) = \bar{g}(X, \bar{P} Y). \tag{2}$$

The Riemannian metric (2) is called \bar{P} -compatible and $(\bar{M}, \bar{g}, \bar{P})$ is named a Golden Riemannian manifold [3]. It is known [3] that a Golden structure φ is integrable if the Nijenhuis tensor N_φ vanishes. In [5], the authors show that a Golden structure is integrable if and only if $\bar{\nabla}_\varphi = 0$, where $\bar{\nabla}$ is Levi-Civita connection of \bar{g} .

Let M be a Golden Riemannian manifold isometrically immersed in \bar{M} and denote by the same symbol g the Riemannian metric induced on M . Let TM be the Lie algebra of vector fields in M and TM^\perp the set of all vector fields normal to M . Then the Gauss and Weingarten formulas are given by

$$\bar{\nabla}_X Y = \nabla_X Y + h(X, Y), \forall X, Y \in \Gamma(TM) \tag{3}$$

for all $X \in \Gamma(TM), N \in \Gamma(TM^\perp)$

$$\bar{\nabla}_X N = -A_N X + \nabla_X^\perp Y, \tag{4}$$

where $\{\nabla_X Y, A_N X\}$ and $\{h(X, Y), \nabla_X^\perp Y\}$ belong to $\Gamma(TM)$ and $\Gamma(TM^\perp)$, respectively. ∇ and ∇^\perp are linear connections on M and (TM^\perp) , respectively. The second fundamental form h is a symmetric $\mathcal{F}(M)$ -bilinear form on $\Gamma(TM)$ with values in $\Gamma(TM^\perp)$ and the shape operator A_N is linear endomorphism of $\Gamma(TM)$. Also we have, for $N \in \Gamma(TM^\perp)$

$$g(h(X, Y), N) = g(A_N X, Y). \tag{5}$$

Let M be a submanifold of Riemannian manifold (\bar{M}, \bar{P}) if there is a smooth vector field $\mathcal{H} \in \Gamma(TM^\perp)$ on M , called the curvature vector field of M , such that, for all $X, Y \in \Gamma(TM)$,

$$h(X, Y) = \mathcal{H}g(X, Y). \tag{6}$$

Hence, M is totally umbilical submanifold.

Definition 2.1 Let (\bar{M}, \bar{P}) be a Golden Riemannian manifold and M a real submanifold of \bar{M} . Then M is called a semi-invariant submanifold of \bar{M} , if it is endowed with the pair of orthogonal distributions (D, D^\perp) satisfying the following conditions:

$$(a) TM = D \oplus D^\perp \tag{7}$$

(b) The distribution D is invariant

$$\bar{P}D_x = D_x, \tag{8}$$

for each $x \in M$.

(c) The distribution D^\perp is anti-invariant,

$$\bar{P}D^\perp \subset T_x M^\perp, \tag{9}$$

for each $x \in M$.

The distributions D and D^\perp are called the horizontal distribution and vertical distribution on M , respectively. A semi-invariant submanifold M is said to be invariant and anti-invariant submanifold if we have $D_x^\perp = 0$ and $D_x = 0$, respectively, for each $x \in M$. We say that, M is proper semi-invariant submanifold if it is a semi-invariant submanifold, which is neither an invariant nor an anti-invariant submanifold. The projection morphisms of TM to D and D^\perp are denoted by T and R respectively. Then, we have

$$X = TX + RX, \tag{10}$$

$$\bar{P}N = BN + CN, \tag{11}$$

for $X \in \Gamma(TM)$ and $N \in \Gamma(TM^\perp)$, where BN and CN denote the tangential and normal components of $\bar{P}N$, respectively. Applying \bar{P} to (10), we obtain

$$\bar{P}X = \bar{P}TX + \bar{P}RX \tag{12}$$

If we put $\bar{P}TX = SX$ and $\bar{P}RX = LX$, we rewrite (12)

$$\bar{P}X = SX + LX, \tag{13}$$

where $SX \in \Gamma(TD)$ and $LX \in \Gamma(TM^\perp)$. We obtain complementary distribution to $\bar{P}D^\perp$ in $\Gamma(TM^\perp)$ by μ , then, we have

$$TM^\perp = \bar{P}(D^\perp) \oplus \mu. \tag{14}$$

PROPOSITION 2.1 Let M be a semi-invariant submanifold of the Golden Riemannian manifold (\bar{M}, \bar{P}) . Then, the distribution μ is invariant with respect to \bar{P} , [9].

COROLLARY 2.1 Let M be a semi-invariant submanifold of the Golden Riemannian manifold (\bar{M}, \bar{P}) . Then the projection S given by (13) is a Golden structure on M [9].

However, there is no guarantee for the projection L .

THEOREM 2.1 Let M be a semi-invariant submanifold of Golden Riemannian manifold (\bar{M}, \bar{P}) . Then, D distribution is integrable if and only if

$$h(X, PY) = h(Y, PX)$$

for all $X, Y \in \Gamma(D)$ [9].

LEMMA 2.1 Let M be a semi-invariant submanifold of Golden Riemannian manifold (\bar{M}, \bar{P}) . Then, we have

$$A_{PX}Y = -A_{PY}X \tag{15}$$

for all $X, Y \in \bar{P}(D^\perp)$ [9].

THEOREM 2.2 Let M be a semi-invariant submanifold of Golden Riemannian manifold (\bar{M}, \bar{P}) . Then, D^\perp distribution is integrable if and only if

$$PA_{PX}Y = A_{PX}Y \tag{16}$$

has no components in D for all $X, Y \in \Gamma(D^\perp)$, [9].

THEOREM 2.3 Let M be a semi-invariant submanifold of Golden Riemannian manifold (\bar{M}, \bar{P}) . Then, D distribution defines a totally geodesic foliation if and only if

$$PA_{PZ}X - A_{PZ}X \tag{17}$$

has no components in D^\perp for all $X \in \Gamma(D)$ and $Z \in \Gamma(D^\perp)$ [9].

3. TOTALLY UMBILICAL SEMI-INVARIANT SUBMANIFOLDS (TOTAL UMBİLİK YARI-İNVARİYANT ALT MANİFOLDLAR)

In this section, totally umbilical semi-invariant submanifolds of Golden Riemannian manifolds are studied.

Totally umbilical M implies the following result which shows that the submanifold is foliated by D .

THEOREM 3.1 Let M be a totally umbilical submanifold of a Golden Riemannian manifold \bar{M} . Then, the distribution D is always integrable.

PROOF: Let M be a totally umbilical submanifold of a Golden Riemannian manifold \bar{M} . Then, for all $X, Y \in \Gamma(D)$, from (1), (2) and (6), we have

$$h(PX, Y) = g(PX, Y)\mathcal{H}$$

$$h(PX, Y) = h(PX, PY) - h(X, Y). \tag{18}$$

In a similiar way, we obtain

$$h(X, PY) = h(PX, PY) - h(X, Y). \tag{19}$$

Thus, from (18) and (19), the proof is completed.

LEMMA 3.1 Let M be a totally umbilical submanifold of a Golden Riemannian manifold (\bar{M}, \bar{P}) . Then, we have

$$g(Y, Z)g(\mathcal{H}, PX) + g(X, Z)g(\mathcal{H}, PY) = 0$$

for all $X, Y, Z \in \Gamma(D^\perp)$.

PROOF: From Lemma 2.1 , we get

$$g(A_{PX}Y, Z) = -g(A_{PY}X, Z),$$

$$g(Y, Z)g(\mathcal{H}, PX) + g(X, Z)g(\mathcal{H}, PY) = 0$$

THEOREM 3.2 Let M be a totally umbilical submanifold of a Golden Riemannian manifold (\bar{M}, \bar{P}) . Then, D^\perp is integrable.

PROOF: From Theorem 2.2, it is known that [9], D^\perp distribution integrable if and only if,

$$PA_{PX}Y = A_{PX}Y$$

has no components in D . Then for all $X, Y \in \Gamma(D^\perp)$ and $Z \in \Gamma(D)$, we have

$$g(PA_{PX}Y - A_{PX}Y, Z) = \begin{Bmatrix} g(PA_{PX}Y, Z) \\ -g(A_{PX}Y, Z) \end{Bmatrix}$$

$$g(PA_{PX}Y - A_{PX}Y, Z) = \begin{Bmatrix} g(h(Y, PZ), PX) \\ -g(h(Y, Z), PX) \end{Bmatrix}$$

$$= \begin{Bmatrix} g(Y, PZ)g(\mathcal{H}, PX) \\ -g(Y, Z)g(\mathcal{H}, PX) \end{Bmatrix}$$

$$g(PA_{PX}Y - A_{PX}Y, Z) = 0,$$

which completes proof.

THEOREM 3.3 Let M be a totally umbilical submanifold of a Golden Riemannian manifold (\bar{M}, \bar{P}) . Then D is integrable for all $X, Y \in \Gamma(D)$.

PROOF: From $(\bar{\nabla}_X P)Y = 0$, we have

$$\begin{Bmatrix} \nabla_X PY + h(X, PY) \\ -P\nabla_X Y - Ph(X, Y) \end{Bmatrix} = 0$$

$$\begin{Bmatrix} \nabla_X PY + h(X, PY) \\ -S\nabla_X Y - L\nabla_X Y \\ -Bh(X, Y) - Ch(X, Y) \end{Bmatrix} = 0$$

$$\begin{Bmatrix} \nabla_X PY + g(X, PY)\mathcal{H} \\ -S\nabla_X Y - L\nabla_X Y \\ -B\mathcal{H}g(X, Y) - C\mathcal{H}g(X, Y) \end{Bmatrix} = 0,$$

taking the normal parts of the equation, we get

$$g(X, PY)\mathcal{H} - L\nabla_X Y - C\mathcal{H}g(X, Y) = 0.$$

Interchanging X and Y above equation, we can be obtained

$$g(Y, PX)\mathcal{H} - L\nabla_Y X - C\mathcal{H}g(Y, X) = 0.$$

Thus, we find

$$\{g(Y, PX) - g(X, PY)\}\mathcal{H} + L[X, Y] = 0,$$

which implies that

$$L[X, Y] = 0,$$

then $[X, Y] \in \Gamma(D)$, which completes the proof.

THEOREM 3.4 Let M be a totally umbilical submanifold of a Golden Riemannian manifold (\bar{M}, \bar{P}) and D^\perp be integrable. Then $\mathcal{H} \in \Gamma(\mu)$ for all $X, Y, Z \in \Gamma(D^\perp)$.

PROOF: From (5), (6) and (16), we have

$$g(h(X, Y), PZ) = g(g(X, Y), PZ)$$

$$g(PA_{PZ}X, Y) = g(X, Y)g(\mathcal{H}, PZ).$$

Thus, we obtain

$$g(A_{PZ}X, PY) = g(X, Y)g(\mathcal{H}, PZ),$$

$$0 = g(X, Y)g(\mathcal{H}, PZ).$$

By virtue of $g(X, Y) \neq 0$,

$$0 = g(\mathcal{H}, PZ).$$

Hence, we get

$$g(\mathcal{H}, PZ) = g(P\mathcal{H}, PZ) - g(\mathcal{H}, Z),$$

$$g(\mathcal{H}, PZ) = g(P\mathcal{H}, PZ) = 0,$$

namely, we obtain $\mathcal{H} \in \Gamma(\mu)$.

Thus, the proof is completed.

4. CONCLUSION

In the last few years, the Golden proportion has played an increasing role in modern physical research and it has a unique significant role in atomic physics. The Golden proportion is found to govern the transition from Newtons physics to relativistic mechanics and the Golden rectangle has been used to derive the dilation of time intervals and the Lorentz contraction of lengths in special relativity. The Golden proportion has also interesting properties in topology of fourmanifolds, in conformal field theory, in mathematical probability theory and in Cantorian spacetime as well as in the El Naschie's field theory.

The classification of the submanifolds is an important part of the application, while the geometry of the submanifolds is examined. By examining the geometry of the submanifolds, a lot of information about the main manifold can be obtained.

In this paper, we study totally umbilical semi-invariant submanifold of the Golden Riemannian manifolds. Also, we obtain integrability conditions of the distributions and investigate the geometry of foliations.

We hope that the current work contributes to motivate this research in both mathematics and physics.

REFERENCES

- [1] Bejancu, A., "Geometry of CR-submanifolds", *D. Reidel*, (1986).
- [2] Chen, B.-Y. "Riemannian submanifolds, in Handbook of Differential Geometry", *North Holland* (eds. F. Dillen and L. Verstraelen) I, 187418, (2000).
- [3] Crasmareanu, M. and Hretcanu, C. E. "Golden differansiyel geometry". *Chaos, Solitons & Fractals* 38, (5): 1229-1238, (2008).
- [4] Crasmareanu, M. and Hretcanu, C. E. "Applications of the Golden Ratio on Riemannian Manifolds". *Turkish J. Math.* 33, (2): 179-191, (2009).
- [5] Gezer, A., Cengiz, N. and Salimov, A., "On integrability of Golden Riemannian structures". *Turkish J. Math.* 37: 693-703, (2013).
- [6] Hretcanu, C. E and Crasmareanu, M. "On some invariant submanifolds in a Riemannian manifold with golden structure". *An.Stiins. Univ. Al. I. Cuza Iasi. Mat.* (N.S.)53, (1): 199-211, (2007).
- [7] Sahin, B. and Akyol, M. A., "Golden maps between Golden Riemannian manifolds and constancy of certain maps", *Math. Commun.* 19: 333-342, (2014).
- [8] Yano, K. And Kon, M., "Structures on manifolds", *World Scientific, Singapuore, Series in pure mathematics*, 3 (1984).
- [9] Erdoğan, F. E. And Yıldırım C. "Semi-invariant submanifolds of Golden Riemannian manifolds" *AIP Conference Proceedings*, 1833, 020044, doi:10.1063/1.4981692, (2017).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



Türkiye’deki kent içi raylı ulaşım sistemlerinin performanslarının Veri Zarflama Analizi ile karşılaştırılması

A comparison of performances of urban rail systems in Turkey by Data Envelope Analysis

Yazar(lar) (Author(s)): Mahsa MASOUMI¹, Ebru V.ÖCALIR-AKÜNAL²

ORCID¹: 0000-0001-6402-1108

ORCID²: 0000-0001-8381-1308

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(To cite to this article): Masoumi M. ve Öcalır-Akünel E.V., “Türkiye’deki kent içi raylı ulaşım sistemlerinin performanslarının Veri Zarflama Analizi ile karşılaştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 21(4): 971-975, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.391798

Türkiye'deki Kent İçi Raylı Ulaşım Sistemlerinin Performanslarının Veri Zarflama Analizi ile Karşılaştırılması

Araştırma Makalesi / Research Article

Mahsa MASOUMI^{1*}, Ebru V. ÖCALIR-AKÜNAL²

¹Şehir ve Bölge Planlama Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

²Mimarlık Fakültesi, Şehir ve Bölge Planlama Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 02.10.2016 ; Kabul/Accepted : 26.08.2017)

ÖZ

Toplu taşıma türleri arasında kent içi raylı sistemler, daha rahat, güvenilir, temiz enerji kullanımı ve sonucunda daha az hava kirliliği, yüksek taşıma kapasitesi ve hızlı erişim sağlamaları sebebiyle gitgide daha fazla tercih edilmektedir. Bütün bu olumlu özelliklerine karşılık kent içi raylı sistemler oldukça yüksek maliyetli yatırımlar gerektirmekte ve bu yüzden de planlamanın ve uygulamanın en iyi şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, Türkiye'de işletmede olan kent içi raylı ulaşım sistemlerinin performansları Veri Zarflama Analizi ile karşılaştırılarak bir değerlendirme yapılmıştır. Uygulamada kullanılan veri seti Ulaşım Dairesi Başkanlıklarından ve ilgili literatürden toplanmıştır. Uygulama sonucunda her bir kentin raylı ulaşım sisteminin etkinlik değeri ve etkin olmayan kentler için tavsiye edilen iyileştirme önerileri sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Veri Zarflama Analizi, kent içi raylı ulaşım sistemleri.

A Comparison of Performances of Urban Rail Systems in Turkey By Data Envelope Analysis

ABSTRACT

Urban rail systems among the public transport types are increasingly preferred due to the use of more convenient, reliable, clean energy and resulting in less air pollution, higher carrying capacity and faster accessibility. In contrast to all these positive features, the urban rail systems require highly costly investments and therefore the planning and implementation must be carried out in the best possible way. In this study, an evaluation was made by comparing the performances of urban rail transportation systems operated in Turkey with Data Envelopment Analysis. The data is collected from the Transportation Department Presidency and related literature for this study. As a result of the implementation, the recommendation for the efficiency value of each city's rail transportation system and the recommended improvement for the ineffective cities are presented.

Keywords: Data Envelopment Analysis, urban rail transportation systems.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kültürel, sosyal veya daha önemlisi teknolojik gelişmelerden dolayı, sanayi devriminden sonra hızlı bir şekilde yoğun nüfus artışı ile birlikte kentler de hızlı bir şekilde büyümeye başlamıştır. Özellikle bu dönemde gelişmekte olan ülkelerde çarpık ve plansız kentleşmenin sonucunda şehirlerdeki ulaşım en büyük sorunlardan biri olarak ortaya çıkmıştır. Ulaşımın asıl amacı, insanların daha kısa sürede, daha ekonomik, çevreye duyarlı, rahat ve güvenilir bir şekilde taşınmasını sağlamaktır.

Şehirlerdeki hızlı nüfus artışı ile birlikte özel araç sahipliği de hızla çoğalmaktadır. Bu nedenle kent içi ulaşımı önemli bir sorun olarak ortaya çıkmıştır. Neredeyse dünyanın çoğu kentlerinde ulaşım büyük sorunlara yol açmaktadır. Bu sorunların en önemlilerinden biri ulaşımında kullanılan araçların hava kirliliğine yol açmasıdır. Diğer ciddi sorunlar ise; zaman,

enerji kaybı ve insan sağlığını da çok ciddi şekilde tehdit eden hava kirliliğidir. Bu ciddi tehditlere karşı en iyi çözüm toplu taşıma sistemlerini tercih etmektir [1].

Kent içi toplu taşıma sistemleri arasında raylı sistemler, yatırım maliyetlerinin yüksek olmasına rağmen, işletme maliyetlerinin düşük olması, temiz enerji kullanımı ve sonucunda daha az hava kirliliği ile hızlı erişim sağlaması ve daha az zaman kaybı ve daha az trafik sıkışıklığı yarattığı için diğer sistemlere göre daha fazla tercih edilmektedir [1].

Toplu taşıma yatırımları kentlerde uzun süreli ve kalıcı bir etkiye sahiptir, özellikle de raylı sistemlerin yatırım maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı daha fazla etkiye sahiptir. Bu yüzden kent içi raylı sistemlerin daha verimli çalışabilmesi için planlama ve etüt çalışmalarının çok önemli olduğu görülmektedir. Fakat dünya örneklerine bakıldığında bazılarının yolcu kapasitesinin düşük olduğu ve bu yüzden trafik sıkışıklığına bir çözüm olmadığı görülmektedir.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : ma_soumi@yahoo.com

Swami tarafından yılında yapılan çalışmada (2015), Multimodal bağlamda Veri Zarflama Analizi Yöntemini kullanarak Delhi'deki Metro istasyonlarında karşılaştırmalı bir değerlendirme yapılmıştır. Çalışma alanı sarı ve kırmızı metro hatlarını içermektedir. Kullanılan veriler banliyöde yaşayan insanlardan (demografik, seyahat zamanı ve kalite algılama parametreleri) anket yardımı ile toplanmıştır. Sarı ve kırmızı hatlar, yedi koridora bölünmüş özel istasyonlarda verimlilik analizi yapılmıştır. Sonuçlar ortaya çıkararak, etkinlik skorları ve etkin olmayanların zaafalarını iyileştirmek için stratejiler önerilmiştir. Koridorlar arasında, sarı hattaki Jahangirpuri'den Kashmere kapısına kadar olan ve kırmızı hattaki Inderlok'tan Kashmere kapısına kadar en iyi performansı gösterdiği, özel istasyonlar arasında ise sarı hatta G.T.B. Nagar, Rajiv Chowk, Malviya Nagar ve Ghitorini, kırmızı hatta ise Pulbangash ve karşılama istasyonunun daha iyi performans gösterdiği değerlendirilmiştir [2].

Türkiye'deki raylı sistem yatırımları ve performansları üzerine yapılan çalışmaların oldukça sınırlı olduğu görülmektedir. Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı'nda (2014) yapılan bir tez çalışmasında, Türkiye'deki raylı ulaşım sistemleri dünyadaki metropol kentlerinin raylı sistemleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma yapısal açıdan, yatırım maliyeti, gelir-gider, kullanım ve çeken ve çekilen araçlar açısından yapılmıştır. Bir kapasite hesabı yapılarak tasarlanan sistemlerin verimli çalışmadığı, işletme maliyetlerinin taşınan yolcu sayıları göz önüne alındığında yüksek kaldığı tespit edilmiştir. Aynı güzergâh üzerinde paralel toplu taşıma türlerinin varlığı, yolcuların raylı sistemleri kullanmak yerine şahsi araçlarına yönelmesi, istasyonlara yolcu taşıyan ring servisler bulunmaması verimliliği etkileyen en önemli faktörlerdir [1].

Bu çalışmada, literatüre bir katkı olarak Türkiye'deki raylı sistem yatırımı bulunan kentlerin birbirleriyle karşılaştırması yapılmaktadır.

2. YÖNTEM (METHODOLOGY)

Araştırma kapsamında veri setine ulaşılan kentlerdeki raylı sistem performansları ve etkinlik düzeyleri Veri Zarflama Analizi yöntemi kullanılarak analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Etkin olmayan kentlere örnek olacak şekilde etkin kent değerleri üzerinden etkinlik artırıcı değerler belirlenmiştir.

Veri Zarflama Analizi (VZA) doğrusal programmanın özel bir uygulama şekli olup, aynı amaçlara sahip işletmelerin göreceli olarak verimliliği ölçmede kullanılan bir yöntemdir. Bu parametrik olmayan, doğrusal programlama tabanlı yöntemde benzer girdilerin kullanılmasıyla aynı çeşitte çıktı ya da çıktılar üretilmekte ve sorumlu karar noktalarının görece etkinlikleri ölçülmektedir [3, 4].

Veri Zarflama Analizi (VZA) daha önce de belirtildiği üzere belirli ve seçilmiş Karar Verme Birimlerinin (KVB) görece etkinlik ölçümü için kullanılan bir yöntemdir.

Çalışmada VZA analizi için aşağıdaki aşamalar takip edilmiştir:

- Karar Verme Birimlerinin seçimi: Veri Zarflama Analizinin sağlıklı ve kullanılabilir olması açısından Karar Verme Birimlerinin aynı kararlara sahip olması gerekmektedir. Bu uygulamanın ilk aşaması homojen karar verme birimlerinin seçimidir. Diğer bir anlamda birbirlerine benzer girdiler kullanarak benzer çıktılar üreten KVB'nin, karşılaştırılmalı görece etkinliklerini ölçmek üzere seçilmesidir. Bu aşamada dikkat edilmesi gereken diğer bir konu ise birimlerin sayısıdır. Bu konuda bir çok varsayım bulunmaktadır. Yapılan uygulamanın güvenilir olması açısından eğer kullanılan girdi sayısı "I" ve çıktı sayısı "O" ise bu durumda karar verme biriminin (DMU) sayısı en az "I+O+1" olmalıdır [4]. Çalışmada kullanılan Karar Verme Birimleri, veri setine ulaşılan kentlerdir: Ankara, Antalya, Adana, İstanbul, İzmir, Bursa, Kayseri, Konya, Samsun, Eskişehir ve Gaziantep.
- Modelde kullanılacak olan Değişkenlerin (Girdiler ve Çıktılar) belirlenmesi: Karar Verme Birimlerinin seçiminden sonra ikinci aşama modelde kullanılacak Girdi ve Çıktıların belirlenmesidir. Uygulamanın sonunda önemli sonuçların elde edilebilmesi ve etkili yorumların yapılabilmesi için değişkenlerin seçimine son derece önem ve dikkat vermek gerekmektedir. Bir yandan da Girdi ve Çıktıların sayısı da çok fazla olmamalıdır çünkü fazla sayıda olursa gözlem kümesinin homojenliğinin bozulmasına ve sonuçta VZA'yi modelinin ayrıştırma yeteneğinin düşmesine neden olmaktadır [5]. Çalışmada kullanılan Girdiler; hat uzunluğu (km), istasyon sayısı, sefer sıklığı (dakika), ticari hız (km/saat) ve şehir nüfusedir. Çıktı ise senelik taşınan yolcu sayısıdır (Çizelge 1).
- Veri kümesinin güvenilirliği ve elde edilebilirliği: VZA'yi uygulama çalışmalarında üçüncü aşama ise seçilen girdi ve çıktılara ait veri kümesinin elde edilmesidir. Eğer her hangi birim için güvenli veriler elde edilemez ise hem birime ait etkinlik değeri ve hem diğer birimlerin etkinlik değerleri görece etkinlik ölçümünden dolayı, tüm etkinlik değerlerini çekişmeli hale getireceğinden dolayı uygulamadan çıkartılması gerekecektir [6]. Veri kümesi, bilgilerine ulaşılabilen kenter kapsamaktadır. Çalışmada kullanılan bilgiler, ilgili Büyükşehir Belediyeleri'nin web sayfaları ve Ulaşım Daire Başkanlıkları'ndan resmi yazı ile elde edilen güvenilir rakamlardır.
- Kullanılacak VZA'yi modelinin belirlenmesi ve görece etkinliğin ölçülmesi: Karar Verme Birimleri ve değişkenlerin seçiminden sonra çalışmaya en uygun VZA'yi modeli seçilir ve etkinlik ölçümü KVB'leri için yapılır. Bu yöntemde kullanılan modeller iki farklı şekilde yapılabilmektedirler: girdiye yönelik, çıktıya yönelik. Girdi yönlü model, en etkin şekilde minimum

Çizelge 1. Girdi ve çıktı değerleri (2016 yılı) (Inputs and Outputs)(by the year 2016)

Kentler	Girdiler				Çıktı	
	Hat uzunluğu (km)	İstasyon sayısı	Sefer sıklığı (dakika)	Ticari hız km/saat	Şehir nüfusu	Senelik taşınan yolcu sayısı
Ankara	64,2	55	5	40	5.270.000	109.256.000
Antalya	15,7	26	7	27	2.328.555	13.620.000
Adana	13,5	13	10	40	1.737.000	9.410.000
İstanbul	147	142	5	32	14.800.000	717.628.374
İzmir	156	57	7	40	2.848.000	230.000.000
Bursa	48	61	7	27	2.340.000	75.443.501
Kayseri	33,7	55	10	30	1.062.000	36.323.522
Konya	56	40	5	27	1.221.000	30.809.550
Samsun	31	21	8	30	605.319	18.200.000
Eskişehir	45	61	13	25	844.842	47.760.000
Gaziantep	26,5	29	7	22	1.974.244	18.000.000

girdiyi kullanarak maksimum çıktıyı elde edilebilmek için kullanılan bir modeldir. Çıktı yönlü model ise belirli girdileri kullanarak maksimum çıktıyı elde etmeye çalışır [7]. Veri Zarflama Analizi tablolar halinde hazırlanan veri kümesini kullanarak KVB leri'nin etkinlik ölçümünü tespit etmektedir. Bu yöntem doğrusal programlama tabanlı olduğundan dolayı, modeli çözmek için bazı paket programları, bilgisayar yazılımları ve VZA'ne bazı özel yazılımlar kullanılmaktadır. GAMS, LINDO, QSB, EMS, IDEAS, DEAP, ETAKS vs. Bu çalışmada Veri Zarflama Analizi yöntemini kullanarak yapılan girdi yönlü CCR modeli CRS varsayımı altında ele alınmıştır. Yapılan analiz sonucunda CCR modeline göre ortaya çıkan sonuçlar değerlendirilmiştir. Yazılım olarak EMS'den yararlanılmıştır.

- Etkinlik değerlerinin belirlenmesi: Charnes, Cooper ve Rhodes'un etkinlik açıklamalarında herhangi bir birimin 100% etkin olabilmesi için ancak aşağıdaki durumlarda gerçekleşebilir: Her bir karar birimi için 0 ile 1 (veya yüzde) arasında elde edilir. Etkinlik sınırı etkin olan KVB yani etkinlik değerleri 1 olanları tarafından belirlenir. Etkin olmayan Karar Verme Birimlerinin etkinlik değeri ise 0 ile 1 arasında olur [8].
- Referans grupları: VZA, görel olarak verimli birimlere uygulanan yönetsel veya organizasyonel yöntemleri uygulayarak verimli olmayan karar verme birimlerinin aynı seviyede etkinliğe ulaşabileceği varsayımına dayanır [9]. Veri Zarflama Analizi etkin olan bir grup karar birimini referans olarak belirtir ve

gözle kümesinden daha küçük bir grupla karşılaştırmanın yapılmasını sağlar. Veri setini oluşturan kentlerin etkinlik değeri ve referans kümeleri Çizelge 2'de verilmektedir.

- Etkin olmayan birimler için stratejilerin belirlenmesi: Veri Zarflama Analizi ile yapılan karşılaştırma, karar verme birimlerinin benzerliklerinden hareket etmeye başlar, bunun büyük faydası ise etkin olmayan birimlerin etkin hale getirebilmek üzere bazı önemli stratejiler (etkin olmayan birimlerin referans grubunda olan etkin birimlere ait ağırlıklı katsayısıdır) sağlar. Analizin sonunda elde edilen sonuçlar, etkin birimlerin elde edilebilen giriş ve çıkış içerdiğini varsaymaktadır. Aynı anda etkin olmayanlar için de bu girdi ve çıktılara ulaşmasının varsayar. Fakat bu her zaman doğru olamaz ve sonunda iyileştirme çabaları sonuçsuz kalabilir [10]. Bu çalışmada da etkin olmayan birimler belirlenmiş ve Bulgular bölümünde özetlenmiştir.
- Sonuçların değerlendirilmesi: Veri Zarflama Analizi uygulamasında yapılan son aşama ise, girdiler ve çıktıların hepsi yapılan uygulamada değerlendirildikten sonra elde edilen sonuçları karar birimlerine göre değerlendirilir ve sonunda yorumlanır [9]. Uygulamada belirlenen hedeflere ulaşılması zor olsa da bu bilgilerin daha sonra kullanılabilir olması ve iyileştirmelere açık olması faydalı bir gelişmedir. Çalışmayla ilgili sonuçlar, Tartışma ve Öneriler bölümünde özetlenmiştir.

Çizelge 2. Girdi yönlü CCR etkinlik değerleri ve referans kümeleri (CCR Efficiency scores and reference sets)

Kentler	Girdi yönlü CCR etkinlik değerleri ve referans kümeleri	
	Etkinlik değeri	Referans kümeleri
Ankara	%42,48	4 (0,1452) 10 (0,1053)
Antalya	%17,77	4 (0,0190)
Adana	%14,32	4 (0,0131)
İstanbul	%100,00	
İzmir	%89,72	4 (0,1221)
Bursa	%64,60	4 (0,0841) 10 (0,3155)
Kayseri	%64,12	4 (0,0183) 10 (0,4862)
Konya	%49,97	4 (0,0309) 10 (0,1803)
Samsun	%54,30	4 (0,0032) 10 (0,3329)
Eskişehir	%100,00	
Gaziantep	%18,69	4 (0,0240) 10 (0,0156)

Çizelge 3. Analizden elde edilen değişken artıkları (Variable residues obtained from the analysis)

Şehirler	1.girdideki fazlalık	2.girdideki fazlalık	3.girdideki fazlalık	4.girdideki fazlalık	5.girdideki fazlalık	Çıktıdaki azlık
Ankara	2,0232	0	0,0286	9,7100	0,0015	0,0531
Antalya	0	1,9252	1,1490	4,1907	132899,7	0,0001
Adana	0,0061	0	1,3667	5,3096	54724,08	0,0167
İzmir	0	23,0405	5,6701	31,982	748623,3	0,5546
Bursa	6,9683	19,2577	0	6,8629	0,0009	0,0444
Kayseri	0,9351	20,033	0	6,4968	0	0,0007
Konya	16,7651	10,9078	0	7,9947	0,0009	0,1083
Samsun	4,0439	2,2921	0	7,8645	0,0006	0,0125
Gaziantep	0	1,6005	0,9852	2,9524	0	0,0006

Kentler	Girdiler				Çıktı	
	Hat uzunluğu (km)	İstasyon sayısı	Sefer sıklığı (dakika)	Ticari hız km/saat	Şehir nüfusu	Senelik taşınan yolcu sayısı
Ankara	64,2	55	5	40	5.270.000	109.256.000
Antalya	15,7	26	7	27	2.328.555	13.620.000
Adana	13,5	13	10	40	1.737.000	9.410.000
İstanbul	147	142	5	32	14.800.000	717.628.374
İzmir	156	57	7	40	2.848.000	230.000.000
Bursa	48	61	7	27	2.340.000	75.443.501
Kayseri	33,7	55	10	30	1.062.000	36.323.522
Konya	56	40	5	27	1.221.000	30.809.550
Samsun	31	21	8	30	605.319	18.200.000
Eskişehir	45	61	13	25	844.842	47.760.000
Gaziantep	26,5	29	7	22	1.974.244	18.000.000

3. BULGULAR (FINDINGS)

Türkiye'deki kentiçi raylı sistemlerin performanslarının VZA ile karşılaştırıldığı çalışma sonucu aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır:

- Bulgular, Veri Zarflama Analizini kent içi raylı sistemlerin performanslarını karşılaştırarak görece etkinliklerini ölçmek ve etkin olmayanlar için performanslarını yükseltmek amacıyla, nasıl kullanılabilirliğini göstermektedir.
- Karar Verme Birimleri (kentler) arasında İstanbul ve Eskişehir'in kent içi raylı sistemlerinin etkinlik skoru % 100 (veya 1) olduğu için etkin oldukları değerlendirilmektedir. Etkinlik değerleri %100 değerinin altında olan ve performanslarının etkin olmadığı değerlendirilen kentler ise Ankara, Antalya, Adana, İzmir, Bursa, Kayseri, Konya, Samsun ve Gaziantep'dir.
- Etkin olmayan birimlerin (kentlerin) etkinliklerini artırabilmeleri için, etkin olan kentler arasından hangisinin referans alınabileceğini belirlemek mümkündür. Örnek olarak; Ankara kenti'nin % 42,48 etkinlik değeri ile etkin durumda olmadığı görülmektedir. Bu şehrin etkinliğini artırabilmek veya etkin olabilmesi için etkin olan İstanbul kentini % 14 ve Eskişehir kentini % 10 oranında referans alması gerektiği görülmektedir.

4. TARTIŞMA VE ÖNERİLER (DISCUSSION AND SUGGESTIONS)

Veri Zarflama Analizi'nden elde edilen diğer bir çıktı da değişkenlerin artık değerleridir. Bu değerler aslında etkin olmayan kentlerin girdilerini ve çıktılarını ne degerde azaltması ve artırması gerektiğini göstermektedir. Azaltma girdilerdeki fazlalık ve artırma ise çıktılardaki

azlık değerlerine göre yapılmaktadır. VZA'yi sonuçlarından elde edilen ve etkin olmadığı değerlendirilen 9 kente ait değişken artık değerler Çizelge 3'de verilmiştir.

Bu birimlerin etkin hale gelebilmeleri için, girdilerdeki fazlalığı azaltmak ve çıktıdaki azlığı artırılması gerekmektedir. İncelenen kentlerde raylı sistemlerin verimliliğini artırmak için, iyileştirme tablosunda (Tablo 3) elde edilen değişken artıklarına göre:

- Sefer sıklıklarını Ankara'da 0,0286 dakika, Antalya'da 1,1490 dakika, Adana'da 1,3667 dakika, İzmir'de 5,6701 dakika ve Gaziantep'te 0,9852 dakika azaltmak,
- Ticari hızı Ankara'da 9,7100 km/saat, Antalya'da 4,1907 km/saat azaltmak, Adana'da 5,3096 km/saat, İzmir'de 31,9820 km/saat, Bursa'da 6,8629 km/saat, Kayseri'de 6,4968 km/saat, Konya'da 7,9947 km/saat, Samsun'da 7,8645 km/saat ve Gaziantep'te 2,9524 km/saat azaltmak,
- Senelik taşınan yolcu miktarını Antalya'da 132.900 kişi, Adana'da 5.724 kişi ve İzmir'de 748.623 kişi artırmak gerekmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Baştürk, G., "Kent içi raylı toplu taşıma sistemleri incelemesi ve dünya örnekleri ile karşılaştırılması", *Ulaştırma ve Haberleşme Uzmanlığı Tezi*, Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, Ankara, (2014).
- [2] Swami, M. ve Parida, M. "Comparative appraisal of metro stations in Delhi using Data Envelopment Analysis in a Multimodal context, *Journal of Public Transportation*, 18(3): 29-51, (2015).

- [3] Semra, T., “İşletme performansını belirlemede Veri Zarflama Analizi”, *Yönetim ve Ekonomi*, 10(2): 221-229, (2003).
- [4] Başkaya, Z., Avcı, B., Veri Zarflama Analizi, *Dora Yayınları*, 1.Baskı, (2011).
- [5] Erdoğan, M. ve Yıldız, M., “Sağlık işletmelerinde finansal oranlar aracılığıyla performans ölçümü: hastanelerde bir uygulama”, *KAÜ İBBF Dergisi*, 6(9): 129-148, (2015).
- [6] Kandemir, M. “Ankara’daki Hastanelerin Etkinliğinin İki Aşamalı Veri Zarflama Analizi ile İncelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2016).
- [7] Sarı, Z., “Veri Zarflama Analizi ve Bir Uygulama”, *Yüksek Lisans Tezi*, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, (2015).
- [8] Yavuz, İ. “Sağlık Sektöründe Etkinlik Ölçümü (Veri Zarflama Analizine Dayalı Bir Uygulama)”, *MPM Yayınları*, Yayın No: 654, Ankara, (2001).
- [9] Aydemir, Z.C. “Bölgesel rekabet edebilirlik kapsamında illerin kaynak kullanım görece verimlilikleri: Veri Zarflama Analizi uygulaması”, *Uzmanlık Tezi*, DPT, (2002).
- [10] Selcan, Ç., İnsani gelişmenin Veri Zarflama Analizi ile ölçülmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Ankara, (2012).
- [11] Charnes, A., Cooper, W. W., ve Rhodes, E., “Measuring the Efficiency of Decision Making Units”, *European Journal*.



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



Schottky yapılar üzerine inceleme ve analiz çalışması

Review and analysis study on schottky structures

Yazar (Author): Serhat Orkun TAN

ORCID: 0000-0001-6184-5099

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Tan S. O., “Schottky yapılar üzerine inceleme ve analiz çalışması”, *Politeknik Dergisi*, 21(4): 977-989, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.426648

Schottky Yapılar Üzerine İnceleme ve Analiz Çalışması

Derleme Makalesi / Review Article

Serhat Orkun TAN

TOBB Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Elektronik Otomasyon Bölümü, Karabük Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 16.03.2018 ; Kabul/Accepted : 02.05.2018)

ÖZ

Yüksek sıcaklık ve vakum altında metal ve yarı iletkenlerin sıkı kontak edilmesi durumunda oluşan metal-yarı iletken kontaklar üzerinde hala çok sayıda teorik ve deneysel çalışma yapıyor olmasına rağmen metal ve yarı iletken arasındaki bariyerin oluşumu ve iletimi mekanizmaları henüz tam olarak aydınlatılmamıştır. Bu yapılar hakkında yapılan ilk detaylı çalışmalar W. Schottky tarafından yapıldığından, bu metal-yarı iletken kontaklar genellikle Schottky diyotlar/yapılar olarak bilinir. Geçmişten günümüze farklı fiziksel, kimyasal ve elektriksel özelliklere sahip çeşitli malzemeler kullanılarak arayüzey tabakalar olmaksızın veya yalıtkan, polimer ve ferroelektrik gibi arayüzey tabakalar içeren Schottky yapıların performansı artırılmaya çalışılmıştır. Çok yüksek frekanslarda ve düşük ileri ön gerilimde çalışabilmesi ve çok hızlı anahtarlama kabiliyeti gibi diğer diyotlarda bulunmayan özellikleri, elektronik teknolojideki yaygın kullanımı ve gelişime açık teknolojiye sahip olması bilim insanlarını Schottky yapıları üzerinde çalışmaya teşvik etmektedir. Bu çalışmada, metal yarıiletken ve arayüzey tabakasına sahip metal yarıiletken Schottky yapıların bu alanda yapılan bilimsel çalışmalar da göz önüne alınarak incelenmesi, zaman içindeki gelişiminin gözlenmesi ile birlikte dünya ve Türkiye’de bu alanda yapılan akademik çalışmaların istatistiksel analizi yapılmıştır. Sonuçta, Türkiye'nin bilimsel çalışmalar bakımından dünyanın neresinde olduğunu açığa çıkartmak amaçlanmıştır. Aynı zamanda farklı MY yapılar üzerine yapılmış bilimsel çalışmaların Türkiye ve dünyada ne oranda karşılık gördüğü de ortaya konulmuştur. Web of Science veri tabanında Science Citation Index (SCI) tarafından taranan ve hem Türkiye’de hem de tüm dünyada yapılan akademik çalışmaların analizi veri madenciliği ile otomatik veri toplama yöntemleri ve Structured Query Language (SQL) sunucu yönetim stüdyosu programı kullanılarak yapılmıştır. İstatistiksel analiz sonuçları her alanda Schottky yapılar üzerine Türkiye ve dünyada yapılan akademik çalışmaların nerede ise her sene artış gösterdiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Schottky yapı, MY schottky yapılar, arayüzey tabakalı schottky yapılar, veri madenciliği, istatistiksel analiz.

Review and Analysis Study on Schottky Structures

ABSTRACT

Although quite a few number of theoretical and experimental studies are still carried out on metal-semiconductor contacts which forms in case of a tight contact of metal and semiconductor under high temperature and vacuum, the formation and transmission mechanisms of the barrier between metal and semiconductor have not yet been fully elucidated. Since the initial detailed studies about these structures were made by W. Schottky, these metal-semiconductor contacts are generally known as Schottky diodes/structures. It has been tried to improve the performance of the Schottky structures without or with interfacial layers such as insulator or polymer and ferroelectric by using various materials with different physical, chemical and electrical properties from past to present. The significant features not found in other diodes, such as its ability to operate at very high frequencies and low forward bias, and very fast switching capability, the widespread use in electronic technology, and the fact that its technology is open for development encourage scientists to study on Schottky structures. Together with the investigation of the metal-semiconductor and the metal-semiconductor with interfacial layer Schottky structures by considering the scientific studies on Schottky structures, the observation of its progress over time, the statistical analysis of academic studies in this area over the world and Turkey have been made in this study. Ultimately, it is aimed to reveal the situation of Turkey over the world in terms of scientific studies. At the same time, to what extent the scientific studies on distinct MS structures get reciprocity in the world and in Turkey is set forth. The analysis of the academic studies which are scanned by Science Citation Index (SCI) in Web of Science database and made in Turkey as well as all over the world were performed with data mining by utilizing automated data collection methods and SQL Server Management Studio program. The statistical analysis results indicate that the academic studies made for every type of Schottky structures over the world and Turkey increase for almost every year

Keywords: Schottky structures, MS schottky structures, interfacial layered schottky structures, data mining, statistical analysis

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Düşük ileri gerilimlerde çalışan ve çok hızlı anahtarlama kabiliyetine sahip olan Schottky yapılar elektronik

teknolojisinde önemli bir yer edinmiştir. Yüksek frekanslarda çalışarak iletkenlik ile yalıtkanlık durumları arasındaki geçişlere hızlı cevap verebilmesi gibi önemli avantajları sayesinde metal ile yarıiletkenin sıkı kontak edilmesiyle oluşturulan Schottky yapıların üretimi ve kullanımı yarıiletken endüstrisinde hızla yaygınlaşmıştır.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : serhatorkuntan@karabuk.edu.tr

Bu yaygın kullanımının gereği olarak metal-yarıiletken (MY) ve arayüzey tabakalı metal-yalıtkan-yarıiletken (MYY) yapılarla ilgili teorik ve deneysel birçok araştırma yapılmaktadır [1-10]. Metal ile yarıiletkenin arasında arayüzey tabaka olarak polimer kullanıldığında metal-polimer-yarıiletken (MPY), ferroelektrik kullanıldığında metal-ferroelektrik-yarıiletken veya metal-ferroelektrik/yalıtkan-yarıiletken (MFY/MFY) yapılar ve oksit tabaka kullanıldığında metal-oksit-yarıiletken (MOY) yapılar elde edilmektedir. Metal ile yarıiletken arasına farklı yöntemlerle büyütülen yalıtkan, polimer, ferro-elektrik gibi ince bir tabaka hem metali yarıiletkenden izole eder hem de onlar arasındaki yük geçişlerini düzenler. MY yapılar yarıiletken tabanlı devre elemanlarının temelini oluşturmasının yanında bu alandaki elektronik cihazların daha iyi anlaşılmasına imkân sağlamaktadır. Bu yapılar bir metal ile bir yarıiletkenin aralarında başka bir madde olmaksızın kontak durumuna getirilmesiyle meydana gelir [11,12].

MY ve arayüzey tabakalı MY veya MPY ve MFY/MFY gibi yarıiletken aygıtlar doğru ön gerilim altında akımı iletirken ters ön gerilim altında ise yarıiletken malzemeye bağlı olarak az miktarda sızıntı akımı geçirirler. Doğru ve ters ön gerilimler altındaki akımların oranı doğrultma oranını ($RR=I_F/I_R$) vermektedir. Diyot performansı bu oranın ne kadar yüksek olmasına bağlıdır. İdeal bir Schottky diyotta yeterince ileri/doğru ve ters gerilimlerdeki akım oranları $\geq 10^{10}$ civarındadır [1]. Arayüzey tabakalı ve tabakasız MY yapılar hazırlanırken, metal ile yarıiletken arasında bir potansiyel engel yüksekliğinin oluşması için yarıiletkenin iş fonksiyonuna uygun iş fonksiyonlu metaller seçilmelidir. Genellikle yüksek saflıkta altın (Au), gümüş (Ag) ve alüminyum (Al) gibi metallere oluşan bu tip kontaklara Schottky veya doğrultucu ön kontaklar denilir. P-tipi bir yarıiletken de doğrultucu kontak oluşması için metalin iş fonksiyonu (ϕ_m) yarıiletkenin iş fonksiyonundan (ϕ_s) küçük olması ($\phi_s > \phi_m$) gerekir. Arka omik kontak oluşturmak için p-tipi yarıiletkende $\phi_m > \phi_s$ durumu geçerlidir ve bu kontakın düşük dirençli olması için mutlaka kaplandıktan sonra uygun sıcaklıkta tavlama yapılması gereklidir. N-tipi yarıiletkende doğrultucu kontak oluşumu için $\phi_m > \phi_s$, omik kontak oluşumu için ise $\phi_s > \phi_m$ olması gerekmektedir [1]. Yarıiletken aygıtların yapımında, genelde hammaddesi doğada çok bulunan, daha ekonomik ve yüksek sıcaklıklarda daha kararlı olduğu içi silisyum (Si) kullanılmaktadır.

MY diyotlar ile yapılan ilk doğrultma işlemi 1874'te Braun tarafından kurşun sülfür ve demir sülfür yarıiletkenleri üzerinde metal nokta kontaklar kullanılması ile gerçekleştirilmiştir [2]. İlk MY yapı olan bu kontakların geliştirilmiş hali olan Schottky engel diyotlarında metal ile yarıiletken arasında vakum olup eklem bölgesindeki kontak potansiyeli ve akım dağılımı homojendir. MY yapılar ile yapılan pratik uygulamalardan çok sonra 1914 yılında Schottky tarafından bulunan metal- vakum sistemlerde imaj kuvvet etkisiyle engel alçalması olayı bu yapıların teorik

olarak açıklanmasını sağlamıştır. Metal ile yarıiletken arasında oluşan engelin hesaplanması aynı yıllarda Schottky ve Mott tarafından birbirinden bağımsız olarak ispatlanmıştır [1-4]. Schottky ve Mott'un bu buluşu yaklaşık elli yıl kadar sonra 1964 yılında Sze ve arkadaşları tarafından doğrulanmıştır [13]. Schottky, Störmer ve Waibel 1931 yılında yaptıkları bir araştırma ile akım etkisi ile kontakın bütününe meydana gelen gerilim düşümünü bir engel yüksekliğinin varlığı ile açıklayarak MY kontakların daha iyi anlaşılmasına imkân sağlamışlardır [13].

MY Schottky yapıların elektrik alan altındaki akım-iletim mekanizmalarını belirlemek son derece önemlidir. Schottky yapıların performansını etkileyen MY arasındaki arayüzey tabaka, polarite yönü, sıcaklık, yarıiletken çeşidi, seri direnç ve arayüzey durumları gibi unsurlar göz önüne alındığında hangi akım-iletim mekanizmasının kullanılacağını belirlemek zorlaşmaktadır. MY ve arayüzey tabakalı MY yapıdaki kontaklarda başlıca akım-iletim mekanizmaları, termiyonik emisyon (TE) teorisi, difüzyon teorisi, termiyonik emisyon-difüzyon (TED) teorisi, kuantum mekaniksel tünelleme (termiyonik alan emisyonu (TAE), alan emisyonu (AE) ve çok katlı tünelleme), uzay yük bölgesinde rekombinasyon olarak sıralanabilir. TE teorisi potansiyel engelin tepesini yeteri kadar termal enerji kazanarak aşan elektronların iletimi şeklinde ifade edilebilir. Difüzyon teorisi yoğunluk farkı bulunan bölgeler arasında, yüklerin yoğunluğunun çok olduğu bölgeden az olduğu bölgeye geçmesi mantığı ile oluşturulmuştur. Bu modelde doyma akım yoğunluğu voltaja bağlı olarak daha çabuk değişir fakat sıcaklığa bağlılığı TE teorisindeki doyma akım yoğunluğuna göre daha küçüktür. TED teorisi metal-yarıiletken arayüzeyi yakınında tanımlanan termiyonik rekombinasyon hızının sınır şartlarından faydalanılarak elde edilmiştir. TAE veya AE mekanizması yüksek katkılanmış yarıiletkenler ve düşük sıcaklıklar için uygun bir modeldir. Uzay yük bölgesinde birleşme yüksek katkılı yarıiletkenler ile çoğu omik kontaklar için uygun bir modeldir ve doğal bölgede enjeksiyon mekanizmasını ifade eder [1,2]. Richardson tarafından TE olayının metal vakum sistemleri için bulunmasından sonra MY yapılarda uygulanabilirliği 1942 yılında Bethe tarafından açıklanmıştır [14]. 1966 yılında ise Crowell ve Sze, Schottky'nin termiyonik emisyon ve Bethe'nin difüzyon teorilerini derleyerek TED teorisi adı altında tek bir teoriyi oluşturmuşlardır [15].

MY arayüzeyinin karakteri ile bağlantılı olarak oluşturulan kontakların davranışı Schottky veya doğrultucu kontak ve omik kontak olmak üzere iki şekilde gerçekleşmektedir. Oluşturulan kontaklarda elektronların hareketi kontak durumlarını da belirler. Hem MY hem de MIY tipi Schottky yapılarda, bir yöndeki elektron hareketi düşük potansiyel engeli neticesinde (doğru öngerilim) oldukça kolay olurken diğer yönde potansiyel engelin artması neticesinde (ters öngerilim) oldukça zorlaşıyorsa "doğrultucu kontak" durumu, her iki yönde de elektronlar serbest hareket

edebiliyor ise “omik kontak” durumu meydana gelmektedir. Ancak p-n eklem üretiminde birçok farklı yöntemin geliştirildiği 1950’li yıllarda MY kontaklar akım iletiminde omik kontak olarak değerlendirilmiştir. 1960’lar ise Schottky yapıların gelişimi üzerine yapılan araştırma çalışmalarının bir hayli arttığı yıllardır. Bu yıllarda Schottky engel diyotların uygulama alanı genişlemiştir. Bu gelişimin en önemli örneğini 1964 yılında silisyum transistörle Schottky engelini birleştiren ve Schottky engel kapılı MY alan etkili transistörü bulan Baird vermiştir [16]. Schottky yapıların arayüzey hallerinin göz önüne alındığı ilk teorik çalışmada 1965 yılında Heine metal tipine bağlı iki olası arayüzey durumunun varlığına işaret etmiştir. Bu durumlardan ilkinin yarıiletken kaynaklı gerçek durum ikincisi ise metalden kaynaklı zahiri durum olarak adlandırmıştır [17]. Bu durumu takiben 1969 yılında Crowell ve Roberts Au/n-Si Schottky yapılarında arayüzey halleri enerji dağılımları eğrilerini kapasitans-voltaj (C-V) karakteristiğinden elde etmişler ancak bu eğrilerin akım-voltaj (I-V) karakteristik eğrisi ile uyumunu dikkate almamışlardır [18]. 1970’ler daha önceki çalışmaların ışığında Schottky engel diyotların elektronik teknolojisinde kullanımına yönelik endüstriyel üretimlerin gerçekleştirildiği yıllardır. Aynı zamanda bu yıllarda MY arayüzeyinin daha iyi anlaşılması adına çalışmalar hız kazanmıştır. Schottky ve Mott engel oluşumunun mekanizmasını izah etmişler ve engel yüksekliğinin ve şeklinin hesaplanması adına yeni modeller önermişlerdir. 1971 yılında yaptıkları çalışmalarda Card ve Rhoderick düz beslem I-V verilerini kullanarak idealite faktörü (n) değerine bağlı arayüzey hallerinin metal veya yarıiletken ile dengede olduğunu ortaya koymuşlardır [19]. Yine aynı yıl Levine çalışmasında Schottky engel yüksekliği ve arayüzey halleri enerji dağılımlarının kontrolünün uygulanan gerilim ile sağlanabileceğini öne sürerek I-V karakteristiğinden Au/n-GaAs yapıların arayüzey durumları enerji dağılımlarının eğrilerini elde etmiştir [20]. 1977 yılında ise Borrego ve arkadaşları, I-V ve C-V verilerini birlikte değerlendirerek metal ile dengede olan arayüzey halleri enerji dağılımlarını belirlemek için arayüzey tabakası etkisinin göz ardı edildiği bir metot geliştirmişlerdir [21]. Cowley ve Sze’nin arayüzey tabakası teorisi 1980 yılında Wu tarafından geliştirilerek potansiyel engelin pozitif yüzeyde yük artışı ile azaldığı ve arayüzey tabakası üzerindeki potansiyelin idealite faktöründe artışa neden olduğunu bulmuşlardır [22]. MY yapıların karakteristiğini 1983 yılında sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçen Chandra ve Prasad, bu yapıları sıcaklığın belirlenmesi amacıyla kullanmışlardır [23]. Arayüzey halleri yoğunluğu belirlenmesi amacıyla Gomila ve Rubi, 1997 yılında yarıiletken eklemdeki taşıyıcıların yer değişimlerini inceleyerek bir bağıntı ortaya çıkarmışlardır. Bu bağıntı ile idealite faktörü için doğru beslemede tüm beslem boyunca geçerli olacak bir analitik ifade bulmuşlardır [24]. 50 MeV Ni iyon ışınmasının Au/n-GaN Schottky diyotuna etkisi akım voltaj karakterizasyonu ile Baranwall ve arkadaşları

tarafından 2009 yılında incelenmiştir. İyon ışınlaması ile Schottky parametrelerinin değişimi, ışınlama akışkanlığını 5×10^9 ila 5×10^{11} iyon cm^{-2} arasında değiştirerek tartışılmıştır. Sonuç olarak metal-yarıiletken arayüzünde hızlı ağır iyon (SHI) ışınlamasının enerji kaybı mekanizmalarına dayandığı şeklinde yorumlanmıştır. [25]. 2014 yılında Hamdaoui ve arkadaşları Metal /n-InAlAs Schottky diyotların I-V karakteristiklerini 90-300 K sıcaklık aralığında belirlemiş ve doyma akımı, idealite faktörü ve seri direnç değerlerini hesaplamışlardır. Sonuçta sıcaklık artışı ile birlikte Schottky engel yüksekliğinde artış ve idealite faktöründe azalma tespit edilmiştir. [26]. 2017 yılında Vali ve arkadaşları, elektron demeti ışınlamasının (EBI) Al /n-Si Schottky yapıya etkisini oda sıcaklığında I-V karakterizasyonu ile incelenmişlerdir. MY arayüzünün davranışı, Schottky engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç gibi MY temas parametrelerindeki varyasyonlar vasıtasıyla analiz edilmiş ve bu parametrelerin 7.5 meV sabit bir enerjiye sahip EBI dozuna bağlı olduğu bulunmuştur. Dikkat çekici bir şekilde, engel yüksekliğinin ayarlanması EBI dozunun bir fonksiyonu olarak gözlemlenmiştir. MY arayüzünde Schottky temas davranışına katkıda bulunan kalınlık değişimi tartışılmıştır. Bu çalışma, elektron demeti ile ışınlanmış n-Si tabakalar üzerindeki metal birikimi ile Schottky temas parametrelerini ayarlamak için yeni bir tekniği açıklamaktadır [27].

Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MYY) yapılar, doğal yöntemler kullanılarak ya da yapay oksidasyon yöntemi ile metal ve yarıiletken tabakalar arasında yalıtkan bir tabaka oluşturulması suretiyle elde edilmektedir. Bu yalıtkan tabakanın kalınlığı yaklaşık 100-200 Å altında ise MYY, üstünde ise metal oksit yarıiletken (MOY) yapılar veya kapasitörler olarak adlandırılmaktadır. MOY yapılar MYY yapılarından farklı olarak arayüzey tabakanın kalınlığından dolayı genellikle kapasitör özelliği göstermektedir. Başka bir ifadeyle, yükleri iletmekten ziyade depolarlar ve çok miktarda yük depolaması çok miktarda enerji depoladığı anlamına gelmektedir. Genellikle silisyum-dioksit (SiO_2), kalay-dioksit (SnO_2) gibi bileşikler metal ile yarıiletken arasında yalıtkan görevini üstlenerek metal ve yarıiletkeni birbirinden izole ederken, yük geçişlerinin de düzenlenmesini sağlamaktadır [28-33]. Hudait ve Krupanidhi, 2000 yılında yaptıkları çalışmada galyum arsenik (GaAs) tabanlı MYY Schottky yapıların I-V ve C-V özelliklerini MY diyotlar ile karşılaştırmıştır. MYY yapıların I-V karakteristiğinde 1.17 idealite faktörü ve 0.97 eV engel yüksekliği ideal olmayan davranış gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca doyma akımındaki azalmanın, ince bir oksit tabakasından ve artan engel yüksekliği ve Richardson sabitindeki azalmanın kombinasyonundan kaynaklandığı belirtilmiştir [34]. Kılıçoğlu ve Asubay 2005 yılında oksit ara yüzeye sahip MOY tipi Schottky engel diyotun tüm elektriksel parametrelerinin referans diyottan yüksek olduğunu rapor etmişlerdir [35]. 2009 yılında Tataroğlu ve Altındal yaptıkları çalışma ile Au / SiO_2 /n-Si (MYY) Schottky

yapıların 300-400 K sıcaklık aralığında ileri ve ters beslem I-V karakteristiklerini ölçmüşlerdir. İdealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç gibi elektriksel parametrelerin sıcaklık bağımlılığını düz beslem I-V ölçümlerinden çıkarmışlardır. Ayrıca, yarıiletken yüzeyinde arayüzey durumları enerjisi ile iletkenlik bandının bir fonksiyonu olarak arayüz durumları yoğunluğunu I-V ölçümlerinden elde etmişlerdir. Deneysel sonuçlar ile bu parametrelerin sıcaklığın kuvvetli bir fonksiyonu olduğunu ortaya koymuşlardır [36]. 2012 yılında Chen ve arkadaşları La_2O_3 izolatör kullanarak MYY tabanlı Schottky-diyot hidrojen sensörü imal etmişlerdir. Akım voltaj özellikleri, engel yüksekliği gibi elektriksel özellikler ve hidrojen algılama performansı 25 °C ile 300 °C arasında farklı konsantrasyonlarda H_2 'ye karşı incelenmiş ve sonuç olarak 260 °C çalışma sıcaklığında cihazın hassasiyetinin 10.000 ppm hidrojen gazına göre maksimum 4,6 değerine ulaşabileceğini ve tepki süresi 20 saniyeye ulaştığını göstermişlerdir [37]. 2015 yılında Tuan ve arkadaşları Pt/SiO₂/n-tipi indiyum galyum nitrid (InGaN) MOY diyotlar üzerine yaptıkları çalışmada MOY diyotların elektriksel özelliklerini I-V ve C-V ölçümleri kullanılarak belirlemişlerdir. Sonuç olarak azot ortamında 15 dakika boyunca 400 °C' de tavlama sonucunda, Schottky engel yüksekliğinin 0.67 eV'ye (I-V) ve 0.82 eV'ye (C-V) yükseldiğini göstermişler ve kaçak akımında önemli ölçüde düştüğünü ortaya koymuşlardır [38]. 2016 yılında Tan ve arkadaşları ürettikleri Au/ZnO/n-GaAs MYY tipi Schottky yapısının oda sıcaklığında farklı ışık yoğunlukları altında akım-voltaj özelliklerini incelemişlerdir. Ters ve doğru beslem akımlarındaki davranışlar incelendiğinde imal edilen diyotun fotodiyot özelliği sergilediğini belirtmişlerdir. Aydınlatmadan sonra idealite faktöründeki artışı MY arayüzündeki homojensizliğe atfetmişler ve arayüzey durumlarının enerji dağılımının artan aydınlatma seviyesi ile arttığı ve seri dirence bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir [39].

MPY ve MFY/MFY yapıların elektriksel özellikleri metal yarıiletken arasındaki arayüzey özelliklere, yalıtkan/polimer arayüzey tabaka oluşumuna, Schottky engel yüksekliğindeki homojensizliğe ve seri dirence de bağlı olduğundan MYY yapılar ile benzerlik göstermektedir [4]. Yarı iletken yüzeyi ve metal yarıiletken arası yalıtkan/organik/ferroelektrik tabakanın kalitesi yük geçişlerinin düzenlenmesini sağladığı gibi Schottky engel diyotun performansını da önemli ölçüde etkilemektedir. Arayüzey tabakası olarak genellikle yüksek dielektrik sabitli, yüzeyi pasifize edebilecek, kontrollü akım iletim mekanizmasına sahip ve sızıntı akımını en aza indirecek malzemelerin seçimine dikkat edilmelidir [40-43]. Bu özelliklere sahip yalıtkan malzemelere SiO₂, TiO₂, SnO₂ ve Si₃N₄, organik malzemelere ise poli-indol, poli-anilin ve poli-vinil alkol (PVA) örnek verilebilir. Schottky yapıların elektriksel özelliklerinin modifikasyonu amacıyla son yıllarda yapılan birçok çalışmada arayüzey malzemesi olarak organik yarıiletkenler tercih edilmiştir [44-48]. Organik

yarıiletkenlerin tercih edilmesindeki en önemli sebepler farklı kaplama teknikleriyle tek seferde oldukça fazla üretim yapılabilmesi, ucuz maliyeti, esnek ve bükülebilir yapısı, zarar eşliğinin yüksek olması ve yüksek nonlineerlik olarak sıralanabilir. Bu önemli özellikleri ile organik yarıiletkenler Schottky yapıların yansırı organik alan etkili transistörler (OLED), organik ışık yayan diyotlar (OLED), güneş pilleri gibi elektronik ve optoelektronik alanlarındaki uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. [47,48]. Yakuphanoglu ve arkadaşları 2008 yılında Schottky yapılarında organik arayüzey tabakası kullanıldığında diyotun elektriksel parametrelerinin ve diyotun arayüzey özelliklerinin değiştiğini göstermişlerdir [49]. Vural ve arkadaşları (2010), yaptıkları çalışmada Al/Rhodamine/n-GaAs MPY yapı kullanılmış ve 80-350 K sıcaklık aralığında I-V karakteristiği incelenmiştir. Sıcaklık artışları ile birlikte idealite faktöründe azalma, engel yüksekliğinde artma olduğu gözlemlenmiştir [50]. Tecimer ve arkadaşları (2013), çinko (Zn) katkılı PVA organik arayüzey kullanılmış ve ileri ve ters öngerilimlemede 80-350 K sıcaklık aralığında 30K aralıklarında I-V karakteristiği incelemişlerdir. Sıcaklık artışları ile birlikte idealite faktörü 12.85'ten 2.8 'e düştüğü, engel yüksekliğinin de 0.145'ten 0.606'ya çıktığı gözlemlenmiştir [41]. Çiçek ve arkadaşları 2016 yılında yaptıkları çalışmada geniş aydınlatma şiddeti aralığında oda sıcaklığında Au/n-GaAs MY Schottky, Au/ PVA/n-GaAs ve Au/Gr-doped PVA/n-GaAs MPY Schottky yapıların I-V karakteristiklerini incelemişler ve grafen katkılı PVA arayüzeyinin Schottky yapının kalitesini önemli ölçüde geliştirdiğini gözlemlenmişlerdir [48]. Alan etkili transistörlerin (FET) çeşitli ferroelektrik malzemelerin Si üzerinde büyütülmesi ile direkt veya bir dielektrik tabakanın eklenmesiyle dolaylı olarak elde etmek adına 1950'li yılların sonlarına doğru MFY ve MFYY yapılar sıklıkla araştırılmıştır [51-53]. Dikkat çekici fiziksel özellikleri sayesinde ferroelektrik malzemeler üzerine yapılan araştırmalar son on yılda yoğunluk kazanmıştır. Ferroelektrik ince filmler ile geliştirilen ve FeRAM (ferroelectric random-access memories) kararlı hafıza ortamı güç kaynağına ihtiyaç kalmadan bilgi saklayabilir [54]. Tipik bir ferroelektrik malzeme olan bizmut titanat ($\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$), piezoelektrik, optik hafızalar, FeRAM'lar ve elektro-optik cihazlarda tercih edilmektedir [55,56]. MOY yapıların çeşidi olan MFY yapıların oluşturmalarındaki uyumsuzluklar sebebiyle yüzey problemlerine çözüm olarak iç difüzyonu önleyen, yük geçişlerini düzenleyen ve elektrik alanda azalmayı engelleyen SiO₂, Si₃N₄, SnO₂ vb. ince yalıtkan tabakalar doğal ya da yapay bir oksidasyon yöntemi ile BTO/Si arayüzeylerine eklenerek MFYY yapılar oluşturulmuştur. MFYY yapıda bulunan ferroelektrik tabakanın MOY kapasitöre hafıza özelliği kazandırdığı bilinmektedir [57,58]. Okuyama ve arkadaşları 2001 yılında yaptığı çalışma ile bir MFYY yapısının yalıtkan ve ferroelektrik tabakalar içerisindeki akımları dikkate alarak elektriksel özelliklerini araştırmak için basit bir model türetmişlerdir. Modele

dayalı simülasyonlar ile MFYY' deki ferroelektrik tabaka için Schottky bariyer yüksekliğinin hafifçe artmasıyla hafıza tutma özelliklerinin çok daha iyi olabileceğini gösterdi [59]. 2008 yılındaki bir başka çalışmada ise MFYY yapılarının arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}) ve seri direncin (R_s) etkileri Altındal ve arkadaşları tarafından sıcaklığın bir fonksiyonu olarak araştırılmıştır. 80- 400 K sıcaklık aralığında ileri ve geri doğru öngerilim C-V ve kondüktans-voltaj (G/ω -V) özellikleri ölçülmüştür. Deneysel ölçümler ve analizler hem kapasitans hem de iletkenliklerin özellikle yüksek sıcaklıklarda sıcaklık ve voltaja oldukça bağlı olduğunu göstermektedir. Sıcaklığa bağlı C-V ve G/ω -V özellikleri, R_s ve N_{ss} ' in MFYY yapılarının elektriksel özelliklerini güçlü bir şekilde etkileyen önemli parametreler olduğunu teyit etmektedir [60]. Au/Bi₄Ti₃O₁₂/SiO₂/ n-Si (MFYY) yapısının arayüz durumlarının dağılım profilleri ve durulma zamanı 2011 yılında Bülbül ve arkadaşlarının yaptığı çalışma ile C-V ve G/ω -V özelliklerinden elde edilmiştir. Yapının iyi rektifiye edici özelliklere sahip olduğu ise I-V karakteristiğinden elde edilen deneysel değerler ile ortaya konulmuştur. Arayüz durumlarının yoğunluğu ve dinlenme zamanı, valans bandının tabanından Si' nin orta boşluğuna kadar artan enerji ile artmaktadır [61]. 2017 yılında Çetinkaya ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada elektriksel parametrelerin dağılımını belirlemek için aynı p-Si yapı üzerinde toplam 58 diyot Al/Bi₄Ti₃O₁₂/p-Si (MFY) yapısı şeklinde hazırlandı. Literatürle uyumlu olarak, C-V verileri, I-V verilerine göre daha yüksek (bariyer yüksekliği) BH değerlerini ortaya koymuştur. 58 diyot verilerinin istatistiksel analizi sırasıyla 0.716 eV ve 0.818 eV olarak BH' nin ortalama değerlerini vermiştir. Bahsedilen bulgularla birlikte, R_s ' nin makul ortalama değeri Al/Bi₄Ti₃O₁₂/p-Si' nin umut verici bir diyot yapısı olduğunu düşündürmektedir [62].

Bu önemli özellikleri ile elektronik teknolojisinde gelişime açık bir alan olduğundan gerek Türkiye'de gerek diğer ülkelerde Schottky yapılar üzerine yapılan akademik çalışmalar her yıl artış göstermektedir. Özellikle son yıllarda hem MY yapılar hem de arayüzey tabakalı MYY, MOY, MPY VE MFY/MFYY yapılar üzerine birçok akademik çalışma literatüre eklenmiştir [63-70]. Bu çalışmanın önemli bir diğer amacı da Schottky yapıları incelerken aynı zamanda Schottky yapılar üzerine yapılmış akademik çalışmalardan elde edilen verilerin istatistiksel dağılımını göstermek suretiyle araştırmaların artma oranını, yayın yıllarını ve son yıllarda daha fazla odaklanan alanları bulmak için Türkiye'de ve dünyada bu alandaki akademik çalışmaları analiz etmektir. Bu analiz ile birlikte Türkiye'nin bilimsel çalışmalar bakımından dünyanın neresinde olduğunu ve farklı yapılar üzerine yapılmış bilimsel çalışmaların Türkiye ve dünyada ne oranda karşılık gördüğünü saptamak mümkün olacaktır. Web of Science veri tabanından veri elde etmek için Otomatik Veri Toplama Yöntemleri kullanılmış ve SQL sunucu yönetim stüdyosu programı ile istatistiksel analizler yapılmıştır. Schottky yapıların farklı yapıları üzerine yapılan

akademik çalışmaların her yıl artış göstermesi Türkiye'de araştırmacıların bu alana gösterdiği ilgiyi de ortaya koymaktadır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Web of Science veri tabanındaki verilere bağlı olarak, bilginin otomatik olarak alınması, herhangi bir yeni veri yerleştirildiğinde periyodik olarak panoyu okumak için veri toplama programını kullanan bir veri alma yöntemi ile yapılmıştır. Program aracılığıyla, her yeni veri aramasında, önceden belirlenmiş kriterlere uyulup uyulmadığı kontrol edilmektedir. Buna ek olarak, program ölçütleri karşılıyorsa, verilere dayalı bir web tabanlı arama gerçekleştirilerek veri alımı başlatılmaktadır. Kriterler karşılanmazsa, program veri alımını gerçekleştirilemez [71]. Web of Science veri tabanından veri çıkarımı ve SQL sunucu yönetim stüdyosu ile istatistiksel analiz, Otomatik Veri Toplama Yönteminin çalışma mantığı aracılığıyla yapılmıştır. Akıllı şebeke üzerinde yapılan araştırmaların istatistiksel dağılımları ve verilerin analiz değerleri Excel Power Pivot'a aktarılarak analiz sonuçları görüntülenmiştir. Web of Science'dan yapılan veri toplama işleminin şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir [71].



Şekil 1. Web of Science'dan yapılan veri toplama işleminin şematik gösterimi (Schematic representation of data collection from Web of Science) [71].

Çalışmada odaklanılan anahtar kelimeler, bu alandaki herhangi bir yayını atlamamak adına Web of Science veri tabanına MY ve arayüzey tabakalı MYY ve MPY yapılarına ek olarak MOY yapılar için olası tüm sözcük dizilerinin kombinasyonu şeklinde girilmiştir.

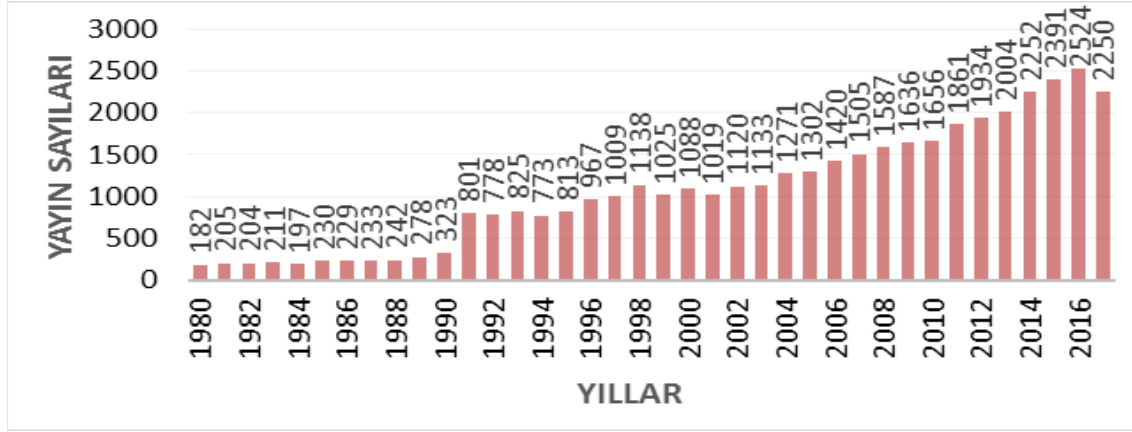
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Birçok elektronik devreler ve cihazlar Schottky kontak veya omik kontak olarak MY arayüzeyini kullanmaktadırlar. Geçmişte mikro dalga diodyu ve radyo ve radar dedektörü olarak geliştirilen MY yapılar şimdilerde metal-yarıiletken alan etkili transistörler (MESFET) gibi aktif devre elemanlarının yansıra güneş pilleri, varaktörler ve anahtarlama devreleri gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Farklı

malzemeler ve yapılar oluşturularak gelişime açık olması ve uygulama sahasının her geçen zaman genişlemesi araştırmacıları Schottky yapılar üzerine çalışmaya yönlendirmektedir. Dünya üzerinde MY Schottky yapılar üzerine yapılan akademik çalışmaların sayısı her geçen yıl artış göstermektedir. Şekil 2’de dünya üzerinde geçmişten günümüze MY Schottky yapılar üzerine yapılan ve Web Of Science veri tabanında yer alan akademik çalışma sayılarının yıllara göre dağılımı verilmiştir.

alan akademik çalışma sayılarının yıllara göre dağılımı verilmiştir.

Özellikle son 10 yılda Türkiye’de MY Schottky yapılar üzerine yapılan akademik çalışmaların artış gösterdiği Şekil 3’te açıkça görülmektedir. 2014 ve 2015 yıllarında en üst seviyeye ulaşan Türkiye’de yapılmış yayın sayılarının dünya geneline oranla geride kaldığı gözlemlenmiştir. Ancak son 10 yıla bakıldığında, dünyada bu alandaki Web of Science veri tabanında yer alan her yüz yayından beşinin Türkiye’den çıktığı

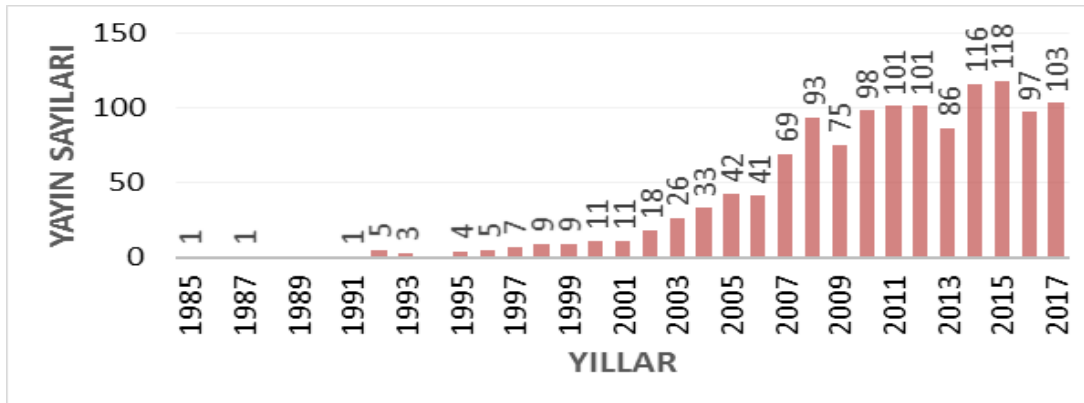


Şekil 2. Dünyada MY Schottky yapılar üzerine yapılan ve Web Of Science veri tabanında yer alan akademik çalışma sayılarının yıllara göre dağılımları (Distribution of the number of Web of Science database indexed academic studies on MS Schottky structures in the world by years).

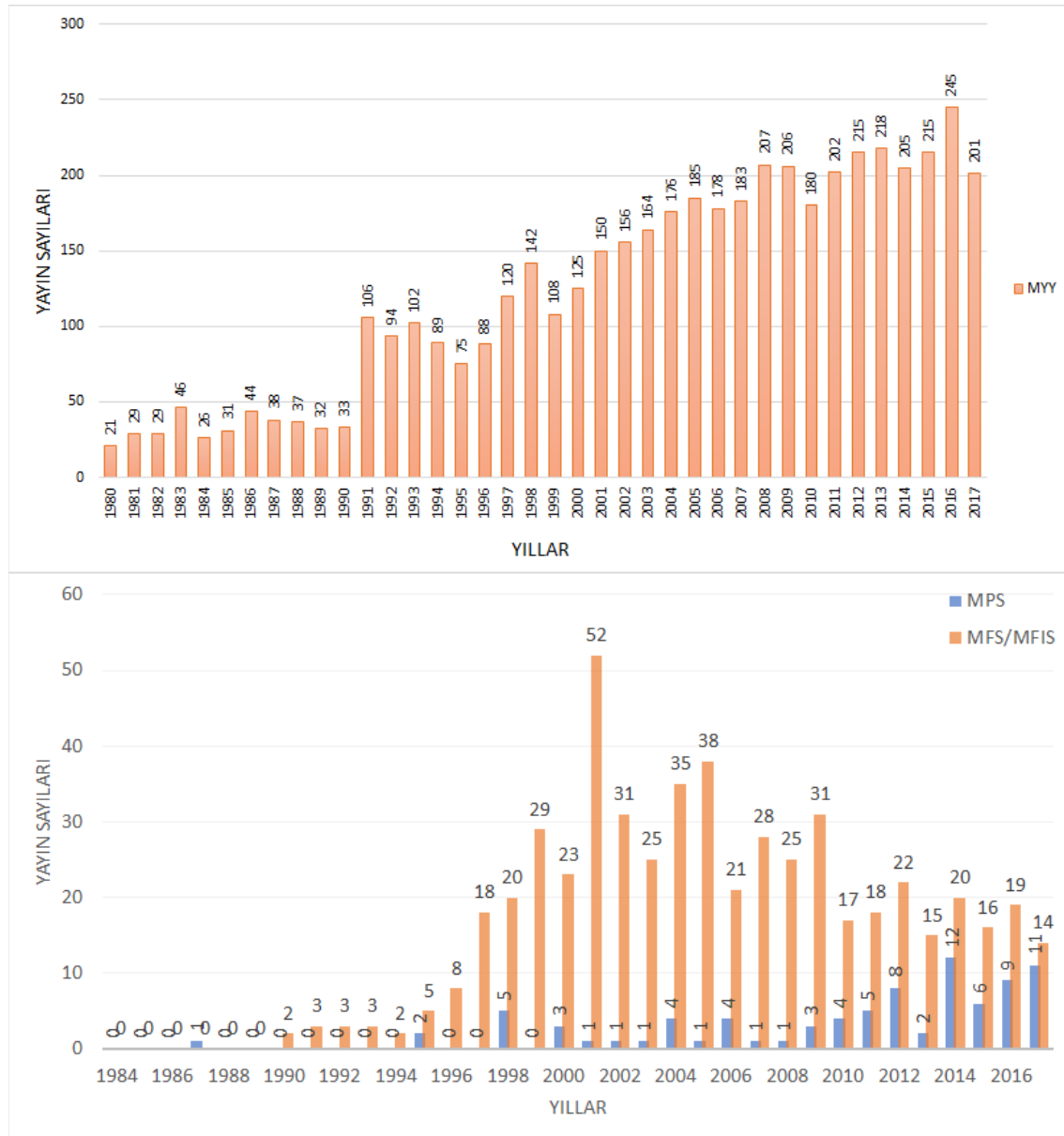
Şekil 2’de açıkça görüldüğü üzere 2018 yılına ait yayınlarda dikkate alınırca MY Schottky yapılar üzerine kırk bini aşkın yayının Web of Science veri tabanında tarandığı gözlemlenmektedir. Ayrıca dünya üzerinde 2000’li yıllar ile birlikte bu alanda yapılan çalışmalara ilginin arttığı ve yapılan yayınların hemen hemen her yıl artış gösterdiği görülmektedir. Türkiye, Schottky yapılar ile ilgili bilimsel araştırmaların ve akademik çalışmaların yoğun olarak yapıldığı bir ülke olarak dikkat çekmektedir. Şekil 3’te Türkiye’de MY Schottky yapılar üzerine yapılan ve Web Of Science veri tabanında yer

belirlenmiştir.

Metal yarıiletken arasına yalıtkan tabaka eklendiğinde MYY yapılar oluşmakta olup organik polimerlerin ve ferroelektrik malzemelerin arayüzey tabakası olarak kullanıldığı zaman MPY ve MFY/MFY yapılar olarak isimlendirildiği bilinmektedir. Dünya çapında, MYY, MPY ve MFY/MFY Schottky yapılar üzerine yapılan ve Web Of Science veri tabanında yer alan akademik çalışmaların yıllara göre dağılımı Şekil 4.a ve Şekil 4. b’de gösterilmektedir



Şekil 3. Türkiye’de MY Schottky yapılar üzerine yapılan ve Web Of Science veri tabanında yer alan akademik çalışma sayılarının yıllara göre dağılımları (Distribution of the number of Web of Science database indexed academic studies on MS Schottky structures in Turkey by years)

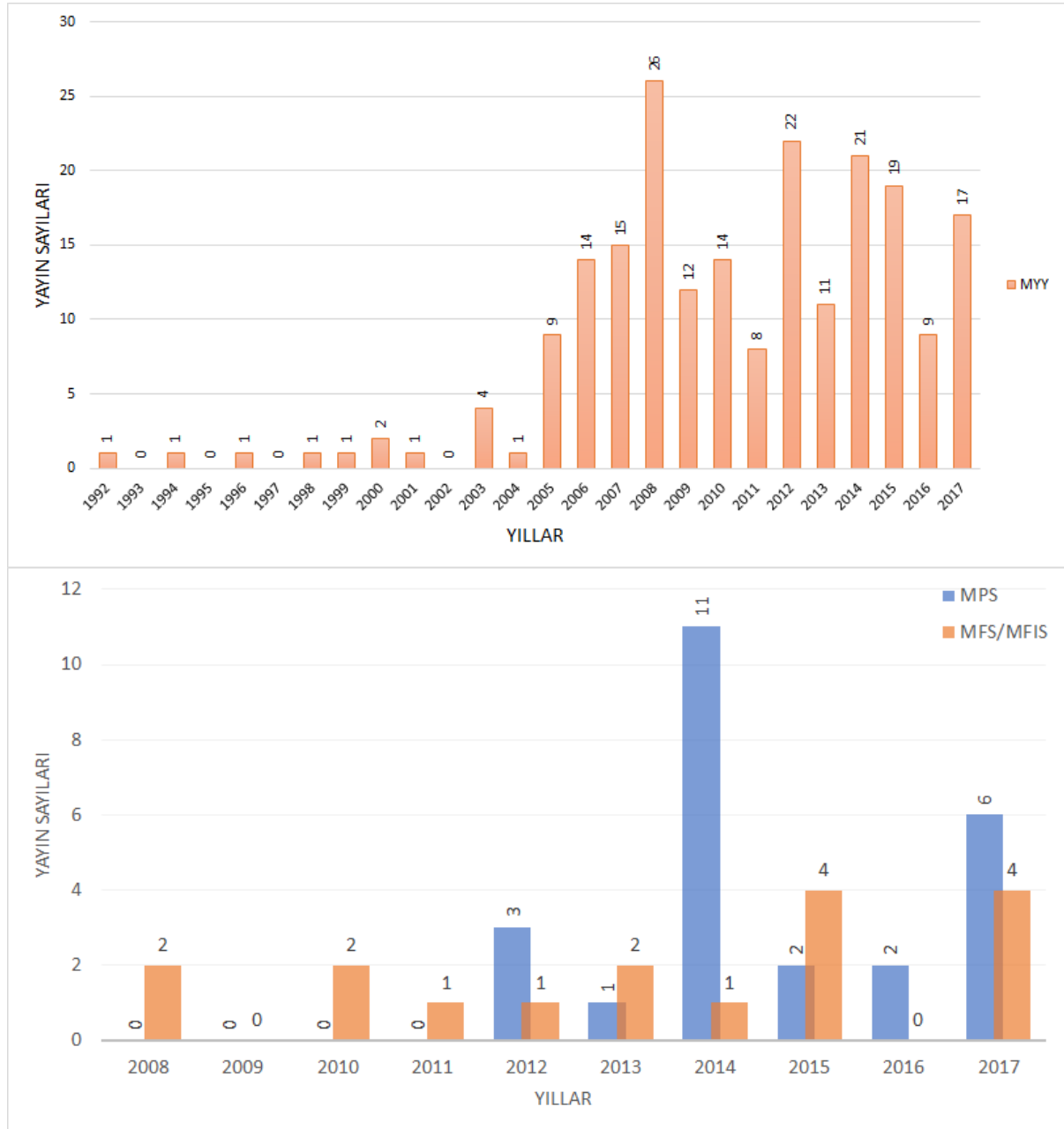


Şekil 4. Dünyada a) MYY b) MPY ve MFY/MFY Schottky yapılar üzerine yapılan ve Web Of Science veri tabanında yer alan akademik çalışma sayılarının yıllara göre dağılımları (Distribution of the number of Web of Science database indexed academic studies in the world on a) MIS b) MPS and MFS/MFIS Schottky structures by years).

Şekil 4'te görüldüğü üzere MY yapılarda olduğu gibi MYY yapılar üzerine yapılan akademik çalışmaların sayısı 2000'li yıllar ile birlikte artış göstermiş ve özellikle 2000 yılı ve sonrasında her yıl belirli sayıda çalışmalara devam edilmiştir. Ancak MY yapılar üzerine yapılan çalışmalara oranla MYY üzerine yapılan akademik çalışmaların sayısı bir hayli az olduğu görülmektedir. Bu durum arayüzey tabakasından kaynaklanan ve Schottky yapının kalitesini olumsuz etkileyen faktörlerden dolayı araştırmacıların MYY yapı üzerine çalışmayı daha az tercih etmesi olarak açıklanabilir. Öte yandan dünyada özellikle MPY yapılar üzerine yapılan akademik çalışma sayısı her ne kadar son yıllarda artsa bile bir hayli az olduğu görülmektedir. Bu durum MY yapılarda arayüzey

tabakası organik polimer kullanımının yeni bir alan olmasına atfedilmek ile birlikte gelecek yıllarda bu alanda yapılacak çalışmaların artacağı düşünülmektedir. Dünya üzerinde MFY/MFY yapılar üzerine yapılan akademik çalışma sayısı ise 2000 yılı ile birlikte artış göstermesine rağmen son yıllarda yapılan yayın sayılarının azalmasıyla bu alana olan ilginin azaldığı düşünülmektedir.

Arayüzey tabakasına sahip Schottky yapılar üzerine yapılan ve Web of Science veri tabanında taranan Türkiye'deki akademik çalışmaların yıllara göre dağılımı MYY, MPY ve MFY/MFY yapılar için Şekil 5. a ve Şekil 5. b'de gösterilmektedir



Şekil 5. Türkiye’de a) MYY b) MPY ve MFY/ MFYY Schottky yapılar üzerine yapılan ve Web Of Science veri tabanında yer alan akademik çalışma sayılarının yıllara göre dağılımları (Distribution of the number of Web of Science database indexed academic studies in Turkey on a) MIS b) MPS and MFS/MFIS Schottky structures by years).

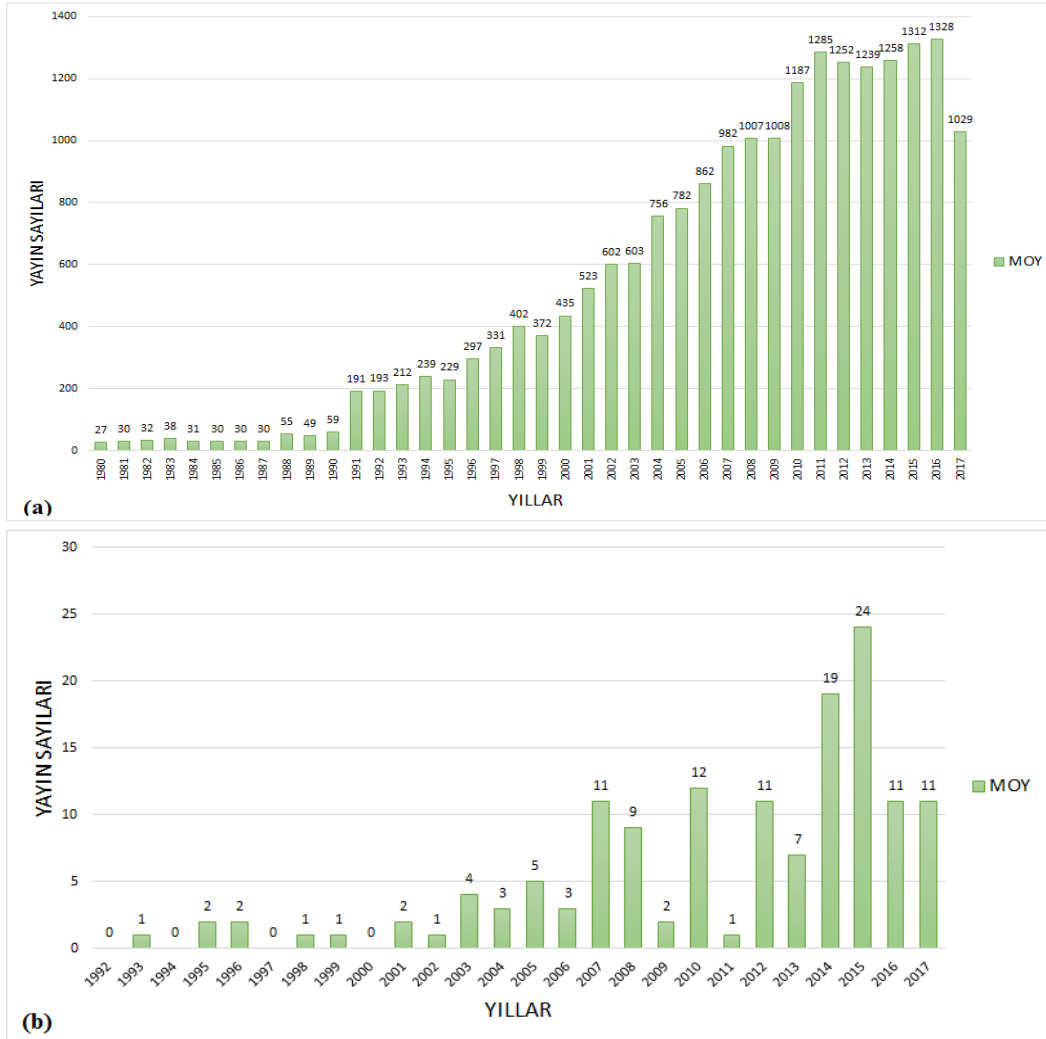
Şekil 5’te görüldüğü üzere Türkiye’de arayüzey tabakasına sahip MYY, MPY ve MFY/MFYF yapılar üzerine bir hayli az sayıda akademik çalışma yapıldığı görülmektedir. Bu durumun dünya çapında arayüzey tabakalı Schottky yapılar gösterilen ilgi ile doğru orantılı olduğu açıktır. MYY yapılar üzerine Web of Science’da dünya çapındaki 4701 akademik yayına karşı Türkiye’de 210 akademik çalışma yer almaktadır. Sonuçta MY yapılar olduğu gibi MYY yapılar üzerine yapılan akademik çalışmaların yaklaşık olarak %4’ü Türkiye’den çıkmaktadır. MPY ve MFY/MFYF yapılar için ise Türkiye’de yapılan yayınların dünya genelinde göre dikkat çekici bir sayıda olduğu görülmektedir.

Dünya üzerinde bu zamana kadar MPY yapılar üzerine Web of Science’da taranan 85 yayın tespit edilmiş olup bunların 25 tanesi Türkiye’den çıkmıştır. MFY/MFYF yapılar üzerine ise dünya genelinde Web of Science veri tabanında 2017 yılına kadar 543 yayın tespit edilmiş olup bu yayınların 17 tanesi Türkiye’den yayınlanmıştır. Son beş yılda MPY yapılar üzerine yapılan yayınların önemli bir kısmı Türkiye’den çıkmış olduğu gözlemlenmiştir. Ancak MFY/MFYF yapılar üzerine yapılan yayınlar göz önüne alındığında Türkiye bu alanda yapılan akademik çalışmaların dünya genelinde yapılan çalışma sayılarını bir hayli gerisinde kaldığı görülmektedir.

Daha önce bahsedildiği üzere metal ile yarıiletken arasına doğal veya termal oksidasyon gibi yöntemleri ile yalıtkan arayüzey tabakası eklenmesi sonucunda MYY ve MOY yapıları meydana gelmektedir. Metal ve yarıiletken tabakaları izole eden yalıtkan tabakanın kalınlığı yaklaşık olarak 100 Å altında ise MYY yapı, üstünde ise MOY yapı oluşmaktadır. Bu şekilde üretilen MOY yapılar üzerine dünya genelinde ve Türkiye’de yapılan çalışmalarında istatistiksel analizi sırasıyla Şekil 6.a ve Şekil 6.b ‘de verilmiştir

Science veri tabanı baz alındığında akademisyenlerin MYY yapılar kıyasla MOY yapılar üzerine daha fazla çalışma yaptığı ancak Türkiye’de dünya geneline kıyasla MOY yapılar üzerine araştırmacıların daha az çalışması olduğu ve MYY yapılar MOY yapılardan daha fazla ilgi gösterdikleri görülmektedir.

Dünya ve Türkiye’de yapılan toplam yayınları ve belirtilen sayısal değerleri ve oranları daha açık bir şekilde görmek ve karşılaştırmasını yapmak adına Web



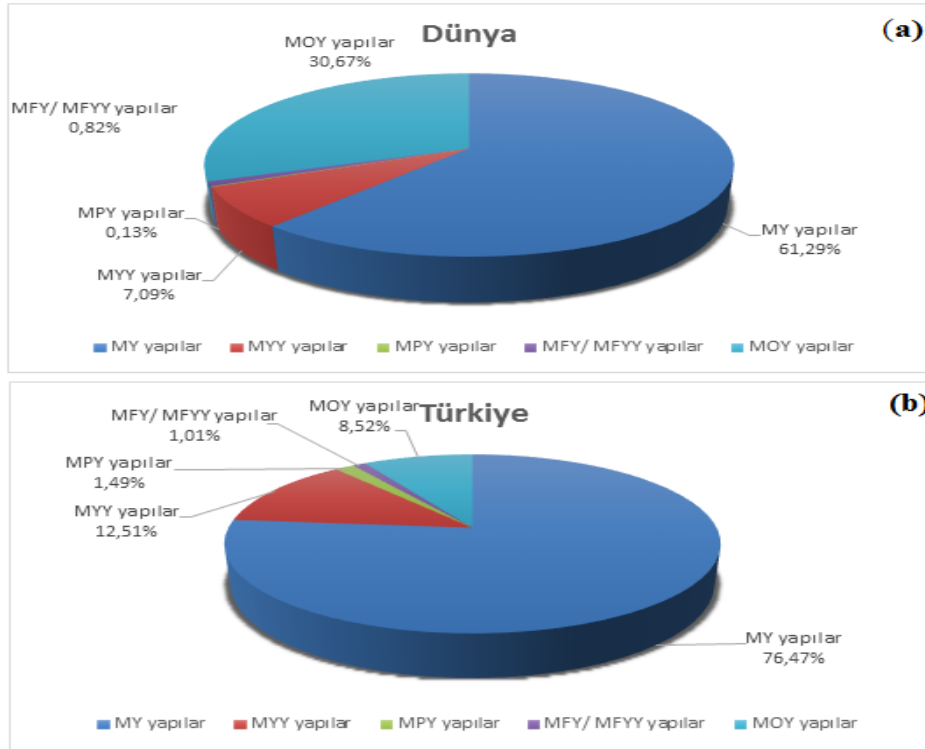
Şekil 6. MOY Schottky yapılar üzerine yapılan ve Web Of Science veri tabanında yer alan a) Dünyada b) Türkiye’de yapılmış akademik çalışma sayılarının yıllara göre dağılımları (Distribution of academic studies by years on MOS Schottky structures and indexed in Web of Science database a) in the world b) in Turkey).

Şekil 6.a’da görüldüğü üzere dünya genelinde MOY yapılar üzerine yapılan akademik çalışma sayıları MYY yapılar üzerine yapılan çalışma sayılarından bir hayli fazladır. Ancak Türkiye’de MOY yapılar üzerine yapılan akademik çalışma sayıları MYY yapılar üzerine yapılan akademik çalışma sayılarını gerisinde kalmıştır. Dünya genelinde MOY üzerine yapılan 20327 adet akademik çalışmanın Web of Science veri tabanında tarandığı ve bunların ancak 143 tanesinin Türkiye’ye ait olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak dünya genelinde Web of

Science veri tabanına kayıtlı yayınların MY ve arayüzey tabakalı MY yapılar için toplam yayın sayıları Çizelge 1’de verilmiştir. Şekil 7.a ve Şekil 7.b’de dünyada ve Türkiye’de 1975 ile 2017 yılları arasında Web Of Science veri tabanında yer alan MY ve arayüzey tabakalı MY yapılar üzerine yapılmış toplam akademik çalışma sayılarının yüzdeler olarak gösterimi verilmiştir

Çizelge 1. Dünya ve Türkiye’den Web of Science veri tabanına kayıtlı yayınların MY ve arayüzey tabakalı MY yapılar için 1975 ile 2017 yılları arasındaki toplam yayın sayıları (The total number of academic studies indexed in Web of Science database between 1975 and 2017 on MS and interface layer MS structures in the world and in Turkey).

	MY yapılar	MYY yapılar	MPY yapılar	MFY/MFYF yapılar	MOY yapılar
Dünya	40616	4701	85	543	20327
Türkiye	1284	210	25	17	143



Şekil 7. 1975 ile 2017 yılları arasında MY ve arayüzey tabakalı MY yapılar üzerine Web Of Science veri tabanında yer alan a) Dünyada b) Türkiye’de yapılmış toplam akademik çalışma sayılarının yüzdeleri olarak gösterimi (Percentage distribution of total number of academic studies indexed in Web of Science database between 1975 and 2017 on MS and interface layered MS structures a) in the world b) in Turkey).

Şekil. 7’de açıkça görülmektedir ki arayüzey tabakasız MY yapılar üzerine hem dünyada hem Türkiye’de önemli ölçüde akademik çalışma yapılmıştır. Türkiye’de MOY yapılar üzerine yapılan akademik çalışmalar dünya geneline oranla daha azdır. Hatta MYY yapılar üzerine yapılan akademik çalışmaların da gerisinde kaldığı görülmektedir. Öte yandan MPY ve MFY/MFYF yapılar üzerine yapılan akademik çalışmaların yüzdeleri oranlarının dünya geneline oranla daha yüksek olduğu görülmektedir.

6. SONUÇ (CONCLUSION)

Metal yarıiletken ve arayüzey tabakasına sahip metal yarıiletken Schottky yapıların geniş bir literatür araştırmasının, tarihsel gelişiminin ve farklı tiplerde elde edilen bu yapıların genel özelliklerinin incelendiği bu çalışmada aynı zamanda dünya ve Türkiye üzerinde bu alanda yapılan akademik çalışmaların istatistiksel analizi

yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre 2000’li yıllar ile birlikte MY Schottky yapılar üzerine yapılan çalışmalara ilginin arttığı ve yapılan yayınların hemen hemen her yıl artış gösterdiği görülmektedir. Türkiye’de de son on yılda MY Schottky yapılar üzerine yapılan akademik çalışmaların artış gösterdiği ve dünya genelinde bu alanda yayınlanmış ve Web of Science veri tabanında yer alan yayınların yaklaşık %5’inin Türkiye’den çıktığı gözlemlenmiştir. Öte yandan dünya genelinde ve Türkiye’de MY yapılar üzerine yapılan çalışmalara oranla MYY, MPY ve MFY/MFYF üzerine yapılan akademik çalışmaların sayısının bir hayli az olduğu görülmektedir. Bu durum, Web of Science’da taranan yayınlar özelinde Schottky yapının kalitesini olumsuz etkileyen arayüzey tabakasından kaynaklı faktörler ve organik polimer kullanımının yeni bir alan olması gibi nedenler ile araştırmacıların bu yapılar üzerine daha az çalışması olarak açıklanabilir. MYY yapılar üzerine

yapılan Web of Science’da taranan akademik çalışmaların yaklaşık olarak %4’ü Türkiye’den çıkmaktadır. Web of Science veri tabanında yer alan MPY yapılar üzerine dünyada yapılmış 85 yayından 25 tanesi Türkiye’den çıkmıştır. Özellikle son yıllarda MPY üzerine yapılan akademik çalışmaların önemli sayıdaki kısmı Türkiye’den çıkmış olup dünya genelinde yapılan yayınların %29.4’ünün Türkiye’den yapıldığı belirlenmiştir. Ayrıca, dünya genelinde Web of Science veri tabanında taranan MFY/MFYF yapılar üzerine yapılan çalışmaların MPY yapılar üzerine yapılan çalışmalardan daha fazla olduğu belirlenmiştir. Ancak Türkiye’de bu alanda fazla yayın yapılmadığı hatta MPY yapılar üzerine yapılan akademik çalışmaların gerisinde kaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum Web of Science veri tabanı baz alındığında Türkiye’de yapılan yayınlarda polimer arayüzey tabakasının ferroelektrik arayüze göre daha fazla tercih edildiği şeklinde yorumlanmıştır. Yine Web of Science veri tabanı göz önüne alındığında MOY yapılar üzerine MYY yapılarla kıyasla oldukça fazla yayın yapıldığı ancak Türkiye’de bu durumun aksine MOY yapılar üzerine araştırmacıların daha az çalışması olduğu tespit edilmiştir.

SİMGELER VE KISALTMALAR (SYMBOLS AND ABBREVIATIONS)

Semboller (Symbols)

Ag: Gümüş (Silver)

Al: Alüminyum (Aluminium)

Au: Altın (Gold)

$Bi_4Ti_3O_{12}/BTO$: Bizmut Titanat (Bismuth Titanate)

GaAs: Galyum arsenik (Gallium Arsenide)

InGaN: İndiyum Galyum Nitrür (Indium Gallium Nitride)

Φ_s : Yarıiletkenin İş Fonksiyonu (Semiconductor’s Work Function)

Φ_m : Metalin İş Fonksiyonu (Metal’s Work Function)

n: İdealite Faktörü (Ideality Factor)

N_{ss} : Arayüzey Durum Yoğunluğu (Interface State Density)

R_s : Seri Direnç (Serial Resistance)

Si: Silisyum (Silicon)

SiO_2 : Silisyum-Dioksit (Silicon-Dioxide)

SnO_2 : Kalay-Dioksit (Tin-Dioxide)

Zn: Çinko (Zinc)

Kısaltmalar (Abbreviations)

AE: Alan Emisyonu (Field Emission)

BH: Engel yüksekliği (Barrier height)

C-V: Kapasitans-Voltaj (Capacitance-Voltage)

EBI: Elektron Demeti Işınlaması (Electron Beam Irradiation)

FeRAM: Ferroelektrik rastgele-erişimli hafıza (Ferroelectric random-access memory)

G/ ω -V: Kondüktans-Voltaj (Conductance-Voltage)

I-V: Akım-Voltaj (Current-Voltage)

MY: Metal-Yarıiletken (Metal-Semiconductor)

MYY: Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (Metal-Insulator-Semiconductor)

MPY: Metal-Polimer-Yarıiletken (Metal-Polymer-Semiconductor)

MFY/MFYF: Metal-Ferroelektrik/Yalıtkan-Yarıiletken(Metal-Ferroelectric/Insulator-Semiconductor)

MESFET: Metal-Yarıiletken Alan Etkili Transistör (Metal-Semiconductor Field Effect Transistor)

MOY: Metal Oksit Yarıiletken (Metal-Oxide-Semiconductor)

OLED: Organik Işık Yayan Diyotlar (Organic Light Emitting Diodes)

PVA: Polivinil Alkol (Polyvinyl Alcohol)

RR: Doğrultma Oranı (Rectifying Ratio)

TAE: Termiyonik Alan Emisyonu (Thermionic Field Emission)

TE: Termiyonik Emisyon (Thermionic Emission)

TED: Termiyonik Emisyon-Difüzyon (Thermionic Emission-Diffusion)

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Sze S. M., Kwok K. Ng., “Physics of Semiconductor Devices” 3rd ed., *John Wiley & Sons*, 9780470068328, New Jersey, (2007).
- [2] Rhoderick E. H. and Williams R. H., “Metal Semiconductor Contacts”, 2nd ed., *Oxford Press*, 0198593368, USA, (1988).
- [3] Northrop D. C. and Rhoderick E. H., “The Physics of Schottky barriers, in Impedance Devices”, *Solid State Electronics*, 4: 37-73, (1978).
- [4] Sharma B. L., “Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications”, *Plenum Press*, 9781468446555, New York, (1984).
- [5] Soylu M. and Yakuphanoglu F., “Photovoltaic and interface state density properties of the Au/n-GaAs Schottky barrier solar cell”, *Thin Solid Films*, 519: 1950-1954, (2011).
- [6] Farag A. A. M., Yahia I. S. And Fadel M., “Electrical and photovoltaic characteristics of Au/n-CdS Schottky diode”, *Int. J. Hydrogen Energ.*, 34: 4906-4913, (2009).
- [7] Sharma A. T., Shahnawaz, Kumar S., Katharria Y. S and Kanjilal D., “Barrier modification of Au/n-GaAs Schottky diode by swift heavy ion irradiation”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 263: 424, (2007).
- [8] Demirezen S., Özavcı E. and Altındal Ş., “The effect of frequency and temperature on capacitance/conductance-voltage (C/G-V) characteristics of Au/n-GaAs Schottky barrier diodes (SBDs)”, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 23: 1-6, (2014).
- [9] Gökçen M., Altuntaş H., Altındal Ş. and S. Özçelik, “Frequency and voltage dependence of negative

- capacitance in Au/SiO₂/n-GaAs structures”, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 15: 41–46, (2012).
- [10] Bhajantri R. F., Ravindrachary V., Harisha A., Ranganathalah C. and Kumaraswamy G. N., “Effect of barium chloride doping on PVA microstructure positron annihilation study”, *Appl. Phys. A*, 87: 797-805, (2007).
- [11] Afandiyeva I. M., Dökme İ., Altındal Ş., Bülbül M. M. and Tataroğlu A., “Frequency and voltage effects on the dielectric properties and electrical conductivity of Al–TiW–Pd₂Si/n-Si structures”, *Microelectronic Engineering*, 85: 247-252, (2008).
- [12] Bilkan Ç., Zeyrek S., San S. E. and Altındal Ş., “A compare of electrical characteristics in Al/p-Si (MS) and Al/C₂OH₁₂/p-Si (MPS) type diodes using current–voltage (I–V) and capacitance–voltage (C–V) measurements”, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 32: 137-144, (2015).
- [13] Sze S. M., Crowell C.R. and Khang D., “Photoelectric Determination of The Image Force Dielectric Constant For Hot Electrons in Schottky Barriers”, *J. Appl. Phys.*, 35: 2534-2536, (1964).
- [14] Bethe H. A., “Theory of The Boundry Layer of Crystal Rectifiers”, 43, *Radiation Laboratory, Massachusetts Institute of Technology*, 12, Cambridge, (1942).
- [15] Crowell C. R. and S.M. Sze, “Current transport in metalsemiconductorbarriers”, *Solid-State Electronics*, 9: 1035-1048, (1966).
- [16] Rideout V. L., “A Review of The Theory, Technology and Applications of Metal-Semiconductor Rectifiers”, *Thin Solid Films*, 48: 261-266, (1978),
- [17] Heine V., “Theory of Surface States”, *Phys. Rev.*, 6A, 138: 1689-1696, (1965).
- [18] Crowell C. R. and Roberts G. I., “Surface State and Interface Effects on The Capacitance-Voltage Relationship in Schottky Barriers”, *J. Appl. Phys.*, 40: 3726-3730, (1969).
- [19] Card H. C., Rhoderick E. H., “Studies of Tunnel MOS Diodes I. Interface Effects in Silicon Schottky Diodes”, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 4: 1589-1601, (1971).
- [20] Levine J., “Schottky Barrier Anomalies and Interface States”, *J. Appl. Phys.*, 42: 3991-3999, (1971).
- [21] Borrego J. M., Gutmann R.J. and Ashok S., “Interface State Density in Au/n-GaAs Schottky Diodes”, *Solid State Elect.*, 20: 125-132, (1977).
- [22] Wu C.Y., “Interfacial Layer Theory of The Schottky Barrier Diodes”, *J. Appl. Phys.*, 51: 3786-3789, (1980).
- [23] Chandra M. M., Prasad M., *J. of Solid State Phys. A*, 77: 1, (1983).
- [24] Gomila G., Rubi M., “Relation for The Nonequilibrium Population of The Interface States: Effects on The Bias Dependence of The Ideality Factor”, *J. Appl. Phys.*, 81: 2674-2681, (1997).
- [25] Baranwal V., Kumar S., Pandey A. C. and Kanjilal D., “Effect of ion irradiation on current–voltage characteristics of Au/n-GaN Schottky diodes”, *Journal of Alloys and Compounds*, 480: 962-965, (2009).
- [26] Hamdaoui N., Ajjel R., Salem B. and Gendry M., “Distribution of barrier heights in metal/n-InAlAs Schottky diodes from current–voltage–temperature measurements”, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 26: 431-437, (2014).
- [27] Vali I. P., Shetty P. K., Mahesha M. G., Petwal V. C., Dwivedi J. and Choudhary R. J., “Tuning of Schottky barrier height of Al/n-Si by electron beam irradiation”, *Applied Surface Science*, 407: 171-176, (2017).
- [28] Sing A., Reinhard K. C. and Anderson W. A., “Temperature dependence of the electrical characteristics of Yb/p-InP tunnel metal-insulator-semiconductor junctions”, *J. Appl. Phys.*, 68: 3475-3479, (1990).
- [29] Chattopadhyay P. and Daw A. N., “On the current transport mechanism in a metalinsulator-semiconductor diode”, *Solid State Electron.*, 29: 555-560, (1986).
- [30] Yu A. Y. C., Snow E. H., “Surface Effects on Metal-Silicon Contacts”, *J. Appl. Phys.*, 39: 3008, (1968).
- [31] Depas M., R., Van Meirhaegh L., Laflere W. H. and Cardon F., “Electrical characteristics of Al/SiO₂/n-Si tunnel diodes with an oxide layer grown by rapid thermal oxidation”, *Solid State Electron.*, 37: 433-441, (1994).
- [32] Altındal Ş., Karadeniz S., Tuğluoğlu N. and Tataroğlu A., “The role of interface states and series resistance on the I-V and C-V characteristics in Al/SnO₂ p-Si Schottky diodes”, *Solid State Electron.*, 47(10): 1847-1854, (2003).
- [33] Goetzberger A., Klausmann E. and Schulz M. J., “Interface states on semiconductor/insulator surfaces”, *CRC Critical Reviews in Solid State Sciences*, 6: 226-233, (1976).
- [34] Hudait M. K. and Krupanidhi S.B., “Effects of thin oxide in metal-semiconductor and metal-insulator-semiconductor epi-GaAs Schottky diodes”, *Solid-State Electron.*, 44: 1089-1097, (2000).
- [35] Kılıçoğlu T. and Asubay S., “The effect of native oxide layer on some electronic parameters of Au/n-Si/Au–Sb Schottky barrier diodes”, *Physica B*, 368: 58–63, (2005).
- [36] Tataroğlu A. and Altındal Ş., “The analysis of the series resistance and interface states of MIS Schottky diodes at high temperatures using I–V characteristics”, *Journal of Alloys and Compounds*, 484: 405–409, (2009).
- [37] Chen G., Yu J. and Lai P.T., “A study on MIS Schottky diode based hydrogen sensor using La₂O₃ as gate insulator”, *Microelectronics Reliability*, 52: 1660-1664, (2012).
- [38] Tuan T. T. A. and Kuo D.-H., *Materials Science in Semiconductor Processing*, 30: 314-320, (2015).
- [39] Tan S. O., Tecimer H. U., Çiçek O., Tecimer H., Orak İ. and Altındal Ş., “Electrical characterizations of Au/ZnO/n-GaAs Schottky diodes under distinct illumination intensities”, *J. Mater. Sci. Electron*, 27: 8340-8347, (2016).
- [40] Ichenko V. V., Marin V. V., Lin S. D., Panarn K. Y., Buyanin A. A. and Tretyak O. V., “Room temperature negative differential capacitance in self-assembled quantum dots”, *J. Phys. D Appl. Phys.*, 41: 235107, (2008).
- [41] Tecimer H., Türüt A., Uslu H. Altındal Ş. and Uslu İ., “Temperature dependent current-transport mechanism in Au/(Zn-doped) PVA/n-GaAs Schottky barrier diodes (SBDs)”, *Sensors and Actuators A*, 199: 194-201, (2013).
- [42] Werner J. and Guttler H., “Barrier inhomogeneities at Schottky contacts”, *Journal of Applied Physics*, 69: 1522-1533, (1991).
- [43] Sakr G. B. and Yahia I. S., “Effect of illumination and frequency on the capacitance spectroscopy and the

- relaxation process of p-ZnTe/n-CdMnTe/GaAs magnetic diode for photocapacitance applications”, *J. Alloys Compd.*, 503: 213-219, (2010).
- [44] Yakuphanoglu F. and Okur S., “Analysis of electronic parameters and interface states of boron dispersed triethenolemine/p-Si structure by AFM, I-V, C-V-f and G/w-V-f techniques”, *Microelectronic Engineering*, 87: 30-34, (2010).
- [45] Aydoğan Ş., İncekara Ü. and Türüt A., “Determination of contact parameters of Au/Carmine/n-Si Schottky device”, *Thin Solid Films*, 518: 7156-7160, (2010).
- [46] Gupta R. K. and Singh R. A., “Fabrication and characteristics of Schottky diode based on composite organics semiconductor”, *Composites and Science and Technology*, 65: 677-681, (2005).
- [47] Yahia I. S., Farag A. A., F. Yakuphanoglu and Farooq W. A., “Temperature dependence of electronic parameters of organic Schottky diode based on fluorescein sodium salt”, *Synthetic Metals*, 161: 881-887, (2011).
- [48] Çiçek O., Uslu Tecimer H., Tan S. O., Tecimer H., Altındal Ş and İ. Uslu, “Evaluation of electrical and photovoltaic behaviours as comparative of Au/n-GaAs (MS) diodes with and without pure and graphene (Gr)-doped polyvinyl alcohol (PVA) interfacial layer under dark and illuminated conditions”, *Composites Part B*, 98: 260-268, (2016).
- [49] Yakuphanoglu F., Kandaz M. and Senkal B.F., “Current-voltage and capacitance-voltage characteristics of Al/p-type silicon/organic semiconductor based on phthalocyanine rectifier contact”. *Thin Solid Films*, 516: 8793-8796, (2008).
- [50] Vural Ö., Şafak Y., Altındal Ş. and A. Türüt, “Current and voltage characteristics of Al/Rhodamine-101/n-GaAs structures in the wide temperature range”, *Current Applied Physics*, 10: 761, (2010).
- [51] Fujimori Y., Nakamura T. and Kamisawa A., “Properties of ferroelectric memory FET using $\text{Sr}_2(\text{Ta}, \text{Nb})_2\text{O}_7$ thin film”, *J. Appl. Phys.*, 38: 2285-2288, (1999).
- [52] Tokomitsu E., Fujii G. and Ishivara H., “Nonvolatile ferroelectric-gate field-effect transistors using $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9/\text{Pt}/\text{SrTa}_2\text{O}_6/\text{SiON}/\text{Si}$ structures”, *Applied Physics Letter*, 75(4): 575-577, (1999).
- [53] Fujisaki Y., Iseki K. and Ishiwara H., “Long retention performance of a MFIS device achieved by introducing high-k $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$ buffer layer”, *Material Research Society Symposium Proceedings*, 786: 297 (2004).
- [54] Wu D., Li A. and Ming N., “Characteristics of metal-ferroelectric-insulatorsemiconductor structure using La-modified $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ as the ferroelectric layer”, *Microelectronic Engineering*, 66: 773-778, (2003).
- [55] Yang Ch. H., Wang Zh., Xu H. Y., Sun X. Q. and J. R. Han, “Samarium doped $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ thin films grown on $\text{SiO}_2/\text{p-Si}$ (111) by spin coating metalorganic solution decomposition method”, *Materials Chemistry and Physics*, 88: 67- 70, (2004).
- [56] Joshi P. C. and Krupanidh S. B., “Structural and electrical studies on rapid thermally processed ferroelectric $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ thin films by metalloorganic solution deposition”, *Journal of Applied Physics*, 72(12): 5817-5819, (1992).
- [57] Lea K.C., Kim W.S., Park H., Jeon H. and Pae Y.H., “Thermal-stress stability of yttrium oxide as a buffer layer of metal-ferroelectric-insulatorsemiconductor field effect transistor”, *Thin Solid Films*, 473: 335- 339, (2005).
- [58] Hill W. A. C. and Coleman C. C., “A single-frequency approximation for interface-state density determination”, *Solid State Electronics*, 23: 987-993, (1980).
- [59] Okuyama M., Takahashi M., Sugiyama H., Nakaiso T., Kodama K. and Noda M., “An Analysis of Effects of Device Structures on Retention Characteristics in MFIS Structures, Applications of Ferroelectrics, IEEE, ISAF 2000, 12th IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics, Kyoto, 337-340, (2000).
- [60] Altındal Ş., Parlaktürk F., Tataroğlu A., Parlak M., Sarmasov S.N. and Agasiev A.A., “The temperature profile and bias dependent series resistance of Au/ $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{SiO}_2/\text{n-Si}$ (MFIS) structures”, *Vacuum*, 82: 1246-1250, (2008).
- [61] Bülbül M. M., Altındal Ş., Parlaktürk F. and Tataroğlu A., “The density of interface states and their relaxation times in Au/ $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{SiO}_2/\text{n-Si}$ (MFIS) structures”, *Surf. Interface Anal.*, 43: 1561-1565, (2011).
- [62] Çetinkaya H. G., Yıldırım M., Durmuş P. and Altındal Ş., “Correlation between barrier height and ideality factor in identically prepared diodes of Al/ $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{p-Si}$ (MFS) structure with barrier inhomogeneity”, *Journal of Alloys and Compounds*, 721: 750-756, (2017).
- [63] Yu J., Wang H., Dong X., Zhou W., Wang Y., Zheng Y. and J. Zhao, “Fabrication and characteristics of Au/PZT/BIT/p-Si ferroelectric memory diode”, *Solid-State Electron.*, 45: 411-415, (2001).
- [64] Dakhel A. A., “Nanocrystalline Pr-doped ZnO insulator for metal-insulator-Si Schottky diodes”, *Journal of Crystal Growth*, 311: 4183-4187, (2009).
- [65] Tataroğlu A. and Altındal Ş., “Gamma-ray irradiation effects on the interface states of MIS structures”, *Sensors and Actuators A: Physical*, 151: 168-172, (2009).
- [66] Chen G., Yu J. and Lai P.T., “A study on MIS Schottky diode based hydrogen sensor using La_2O_3 as gate insulator”, *Microelectronics Reliability*, 52: 1660-1664, (2012).
- [67] Ueda K., Soumiya T. and Asano H., “Ferromagnetic Schottky junctions using diamond semiconductors”, *Diamond and Related Materials*, 25: 159-162, (2012).
- [68] Filip L. D., Pintilie L., Stancu V. and Pintilie I., “Simulation of the capacitance-voltage characteristic in the case of epitaxial ferroelectric films with Schottky contacts”, *Thin Solid Films*, 592: 200-206, (2015).
- [69] Chen J., Lv J. and Wang Q., “Electronic properties of Al/ $\text{MoO}_3/\text{p-InP}$ enhanced Schottky barrier contacts,” *Thin Solid Films*, 616: 145-150 (2016).
- [70] Bartolomeo A. D., “Graphene Schottky diodes: An experimental review of the rectifying graphene/semiconductor heterojunction”, *Physics Reports*, 606: 1-58, (2016).
- [71] Tan S.O., Türker İ. and Toku T., “The scientific studies on smart grid in selected European countries”, *MATEC Web of Conferences* 112, 10012, (2017), DOI: 10.1051/mateconf/201711210012.



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



Optimization of process parameters of ground source heat pumps for space heating applications with taguchi method

Yazar(lar) (Author(s)): Mustafa Bahadır ÖZDEMİR

ORCID: 0000-0001-7801-9367

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Özdemir M. B. “Optimization of process parameters of ground source heat pumps for space heating applications with taguchi method”, *Politeknik Dergisi*, 21(4): 991-998, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.473411

Optimization of Process Parameters of Ground Source Heat Pumps for Space Heating Applications with Taguchi Method

Araştırma Makalesi / Research Article

Mustafa Bahadır ÖZDEMİR*

Energy Systems Engineering Department, Technology Faculty, Gazi University, Ankara, Turkey

(Geliş/Received : 02.10.2016 ; Kabul/Accepted : 26.08.2017)

ABSTRACT

In this paper, optimization of the influence of the process parameters of ground source heat pump (GSHP) with the double U tube heat exchanger for space heating applications was performed. The coefficient of performance (COP_{sys}) in GSHP system was investigated during experimental measurements with various process parameters; space air inlet/outlet temperatures ($T_{i,sa}$ and $T_{o,sa}$) and soil inlet/outlet temperatures ($T_{i,wa}$ and $T_{o,wa}$). Taguchi method performed for obtained the optimum process conditions on the COP_{sys} in GSHP system. Taguchi experimental design considered as L16 orthogonal array. The most influence of process parameter on the COP_{sys} in GSHP system was evaluated by using analysis of variance (ANOVA) and signal/noise (S/N) ratio. The optimum process parameter was determined as A4B1C1D1 for COP_{sys} in GSHP with ANOVA analysis. The optimum levels were computed as $T_{i,sa}$ at Level 1 (32 °C), the $T_{o,sa}$ at Level 2 (17°C), the $T_{i,wa}$ at Level 2 (6°C) and and the $T_{o,wa}$ at Level 1 (9°C). The most significant parameter on the COP_{sys} for space heating applications of GSHP system were found as $T_{i,sa}$ and $T_{o,sa}$ with 48.4 %..

Keywords: Taguchi method, ANOVA, ground source heat pump, COP_{sys} , heating applications absorbent, refrigeration.

1. INTRODUCTION

Ground source heat pump (GSHP) systems of the space heating and cooling applications were one of the promising technologies as regards evaluations ground energy [1-3]. GSHP system was drawn energy stored under the ground during winter months for space heating applications. The absorbed ground temperature was higher than the ambient temperature. Therefore, coefficient of performance (COP_{SYS}) of GSHP obtained higher than the system performance [4-5]. Also, ground heat exchangers (GHX) provided connection between the heat pump and the ground and affected of the efficiency of GSHP. GSHP systems was the most important for space heating systems in winter months, as the systems reduced significant electric consumption in the place. GSHP system with these advantages can be evaluated parametrically and the efficiency can be increased. In previous studies, the optimal utilization of the space cooling and heating of the GSHP systems were evaluated with some optimization techniques. The various process parameters of vertical ground coupled heat pump (VGCHP) system were performed by Esen and Turgut [6]. The process parameters in VGCHP for varying depth of boreholes and temperatures of condenser and evaporator were optimized by using Taguchi method. The author computed COP with helping ANOVA and S/N ratio. Ramniwas et al. [7] investigated effect of the process operation of a ground coupled heat pumps (GCHP) system with Taguchi method for space heating applications. The author was determined the most important parameter of the value COP of a GCHP system

as the condenser outlet temperature. The optimization of ground heat exchanger parameters of GSHP for space heating applications with Taguchi method was evaluated by Sivasakthivelet. al., [4]. The GSHP systems to utilize ground energy for space heating and cooling applications was set up and performed by Pandey et. al., [8]. Also, the author performed by using Taguchi method to determine optimum length of GHX for heating and cooling applications. Sivasakthivel et al. [9] presented the optimum process parameters of a GSHP system for both heating and cooling operations. The author obtained the best COP for the case of heating and cooling situations during experimental measurements. The influence of the parameters a solar assisted GCHP system was performed with Taguchi method for heating application by Verma and Murugesan [10]. Also, the optimum solar collector area and ground heat exchanger length for COP in GSHP systems was determined. Özdemir and Özkaya designed vertical ground source heat pump system with the single tube heat exchanger for Ankara conditions. They reported that R407c and water+antifreezewere used as working fluids for heat pump system and single

U-tube heat exchanger, respectively. According to the experimental results, they found out the performance of the system as 3.12 for the heating season [10]. Hu et al., conducted energy and exergy analyzes under different control strategies to improve the performance of a ground source heat pump system for a building in Wuhan, China. According to their analysis, the use of flow control and variable flow pump has shown to improve the performance of the system [11]. Xia et al., experimentally investigated a vertical and horizontal type ground source heat pump and made an optimization for control. Experimental results suggest that the energy

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : mbozdemir@gazi.edu.tr

consumption of the system increases with the use of a variable speed pump and the energy consumption decreases by about 8% during the heating and cooling season [12]. Verma and Murugesan in the performance of solar assisted ground source heat pump a different mass flow rates were determined for the Indian winter conditions. 0.23, 0.28, and 0.33 kg / s mass flow rate throughout the day in experiments have determined that the COP value reaches the maximum value at low flow rates [13]. Sivasakthivel et al. investigated the soil heat exchanger in a ground source heat pump system as single and double U-tube. The thermal performance analysis of single and double U-tube heat exchangers has been discussed in this paper by focusing on its effectiveness, ground temperatures, heat extraction-injection rate and its effects on surrounding ground formations. The calculations according to the experimental results show that the average efficiency of the single U-tube heat exchanger in the heating and cooling modes is 0.34 and 0.40 respectively, 0.46 and 0.57 for the double U-tube, respectively [14].

In this work, optimization of the process parameters was performed in GSHP systems with the double U tube heat exchanger for space heating applications using Taguchi experimental design method. The obtained results were analyzed using a signal-to-noise (S/N) ratio and ANOVA method to determine the percentage contribution of each parameter on COP_{sys} in GSHP systems. The main objective of the present study was to optimize the process parameters in the GSHP systems using Taguchi experimental design method.

2. MATERIALS AND METHOD

2.1 System Descriptions

The main objective of this work is to heat a space by means of the GSHP systems. A schematic view of the GSHP system is shown in Figs. 1 and 2.



Figure 2. General view of the experimental setup used for space heating applications in GSHP

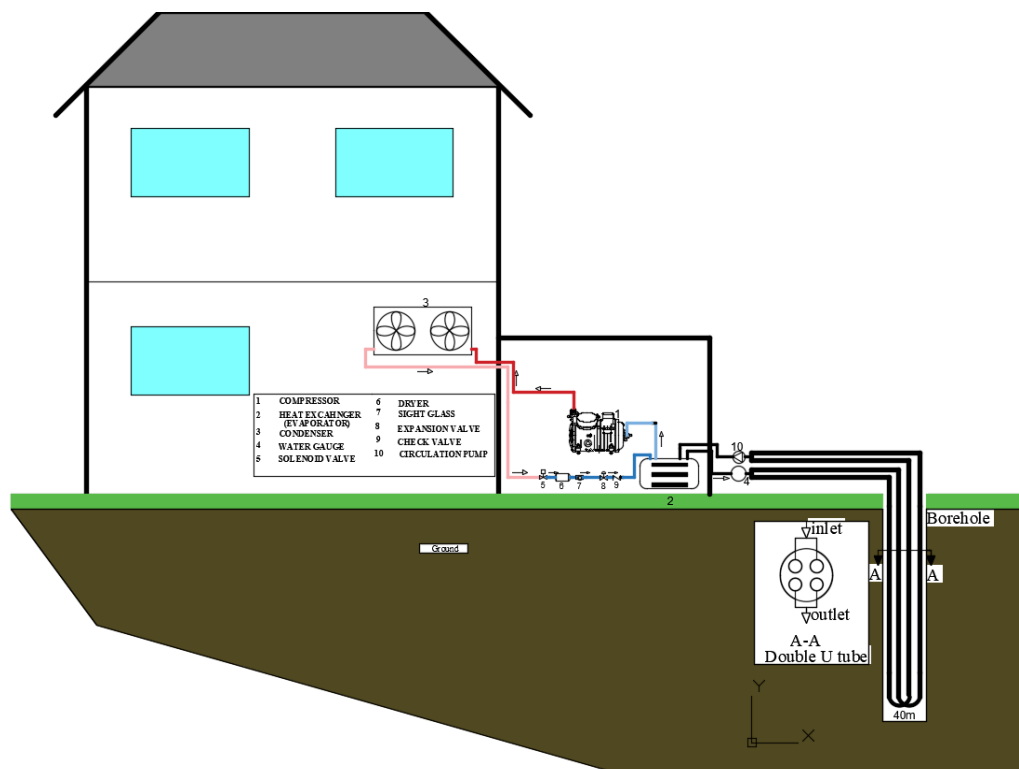


Figure 1. Schematic diagram of GSHP for space heating applications

The working fluid was water-antifreeze mixture. In the heating cycle, the water-antifreeze mixture circulated in the soil transfers heat from the soil to the evaporator, after the refrigerant vaporizes in the evaporator. It is compressed by the compressor into the condenser and the refrigerant circulated through the condenser enters the expansion valve after condensing due to heat transfer. After the pressure of the refrigerant is reduced at the expansion valve, the cycle is completed when the

$$COP_{sys} = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{W}_c + \dot{W}_{ef} + \dot{W}_{cp}} \quad (1)$$

The \dot{Q}_c of the GSHP system is calculated by the following equation:

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_a c_{p,a} (T_{i,sa} - T_{o,sa}) \quad (2)$$

Table 1. Main components and characteristics in GSHP

Place: Ankara, Turkey (Latitude 39.56 °K; Longitude 32.14 °D)	
Annual average weather information:	
Average outside temperature	287.5K
Average soil temperature (1 m)	288.6K
Cooling ambient information:	
Volume	21 m ³
Comfort temperature	293 K
Heat pump information:	
Capacity	1.85 kW
Compressor type / power	Hermetic/ 1 HP, 0.736 kW
Evaporator type	HS 10; Kontherm
Condenser type	AC30-30EQ Plate heat exchanger
Condenser fan	1046 m ³ /h
Refrigerant	R407c
Soil heat exchanger information:	
Heat exchanger type	Vertical
Double U-tube material	Polythene, SDR-11
Borehole length	40 m
Double U-tube diameter	32 mm
Borehole diameter	180 mm
Circulation pump information:	
Type	Rio-C25-70
Powers	40,62, 83 W

refrigerant returns to the evaporator. The air that contacts with the condenser and is blown into the room with the help of a fan, heats the room. The main components of the system and characteristic information are given in Table 1. The air flow rate was determined via a TESTO 435 air speed meter.

2.2 Thermodynamic Analysis

The COP_{sys} of the GSHP system for heating applications is calculated by the following equation [11-12]:

where \dot{Q}_c is an amount of heat transferred from the condenser to the space depending on the air flow rate passing through the fan on the condenser and the inlet and outlet temperatures of the air to the condenser. The amount of heat transferred to the soil by the mixture of water and antifreeze circulated in the soil heat exchanger is calculated by Eq. 3 [11-12].

$$\dot{Q}_{SHE} = \dot{m}_{wa} c_{p,wa} (T_{o,wa} - T_{i,wa}) \quad (3)$$

Table 2. Uncertainty of measurement devices in GSHP

Uncertainty types (W)	Uncertainty of measurement and calculation
Mass flow (\dot{m}_a)	$\pm 2 \times 10^{-5}$ kg s ⁻¹
Space air outlet temperatures ($T_{o,sa}$)	± 0.1 °C
Space air inlet temperatures ($T_{i,sa}$)	± 0.1 °C
Specific heat ($c_{p,a}$)	± 0.01 kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹
Total energy consumption (W_T)	± 0.01 kW
The performance of system (COP _{sys})	± 2.146 % kW

2.3. Uncertainty Analysis

In experimental studies, the accuracy of measurement data is as important as experimental results. The measurement devices used in the experiments have measurement sensitivities. During measurement, the uncertainties due to the measurement sensitivities of the devices must be calculated. In this study, sensitivity and uncertainty of measurement devices uncertainties were given Table 2. The uncertainty was performed using the following equation [13-14]:

$$W = [(x_1)^2 + (x_2)^2 + + (x_n)^2]^{1/2} \quad (4)$$

3. EXPERIMENTAL DESIGN AND OPTIMIZATION

In this paper, the effects of the air inlet/outlet temperatures and soil inlet/outlet temperatures of COP_{sys} in GSHP systems were performed. The full factorial experimental test was designed for the four factors and levels with as L16 orthogonal array as shown in Table 3 and Table 4. The control factors and their corresponding levels were given as shown in Table 3.

Table 3. Assignment of the levels to the factors in GSHP

Symbol	Process Parameter	Levels			
		1	2	3	4
A	T _{i,sa}	26	28	30	32
B	T _{o,sa}	17	19	21	23
C	T _{o,wa}	9	9.5	10	10.5
D	T _{i,wa}	6	6.5	7	7.5

Table 4. Experimental design using L16 orthogonal array in GSHP

Experiment no.	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	1	4	4	4
5	2	1	2	3
6	2	2	1	4
7	2	3	4	1
8	2	4	3	2
9	3	1	3	4
10	3	2	4	3
11	3	3	1	2
12	3	4	2	1
13	4	1	4	2
14	4	2	3	1
15	4	3	2	4
16	4	4	1	3

The factor and levels for COP_{sys} for heating applications in GSHP systems were considered as T_{i,sa}, T_{o,sa}, T_{i,wa} and T_{o,wa}. The main of the optimization was decreased test time and cost. Therefore, Taguchi design proposed and performed to investigate the full parameter with a small number of experimental tests in order to decrease the experimental tests. The Taguchi method provided a simple, efficient and systematic approach to specifying the optimum process in GSHP systems. The experimental design can determined the effect of the control factor in GSHP systems. The design can be provided of determining the optimal process conditions of highest COP_{sys} in GSHP systems for heating system [15-21]. The test results were evaluated with a signal-to-noise (S/N) ratio to evaluate of quality characteristics with desired values. The quality characteristics in S/N ratio were debated with three categories, i.e. the lower the better, the higher the better, and the nominal the better. This study aimed to optimize the best COP_{sys} in GSHP systems. Therefore, a higher- the-better has been performed to measure the S/N ratio. The-higher-the-better quality formula used for calculating S/N ratio was given below [16, 17-20]:

$$\eta = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (5)$$

where η is the S/N ratio for the higher-the-better case (unit: dB), and yi represents the COP in GSHP systems obtained from the experimental results and n the number of repetitions in a trial [16, 17-21]. The S/N ratios were presented in Table 5.

Also, ANOVA analysis was performed to determine of the effect the design process on quality characteristic [16, 18-21]. The ANOVA analysis can be determined the most significant factors in GSHP system. The COP_{sys} values for space heating applications were evaluated by ANOVA analysis. The percent contribution ratios (PCR) were compute by ANOVA analysis. The PCR for COP values for space heating applications can be indicated the degree of influence of the process parameter in GSHP system. The PCR formula was given below [16-20]:

$$PCR = \left(\frac{SS_A - (V_e) \cdot (v_A)}{SS_T} \right) \times 100 \quad (6)$$

where SS_A is the sum of squares for parameter A, V_e is the variance of error, v_A is the degrees of freedom of parameter A, and SS_T is the total sum of squares [16-22].

Table 5. Experimental results and S/N ratio, (η), for COP_{sys} of space heating system in GSHP

Experiment no.	A (°C)	B (°C)	C (°C)	D (°C)	COP _{sys}	
					Measured	S/N (dB)
1	26	17	9	6	2,95306	9,4054
2	26	19	9,5	6,5	2,34127	7,3890
3	26	21	10	7	1,72948	4,7583
4	26	23	10,5	7,5	1,31769	2,3962
5	28	17	9,5	7	3,56485	11,0408
6	28	19	9	7,5	2,95306	9,4054
7	28	21	10,5	6	2,34127	7,3890
8	28	23	10	6,5	1,72948	4,7583
9	30	17	10	7,5	4,17664	12,4165
10	30	19	10,5	7	3,56485	11,0408
11	30	21	9	6,5	2,95306	9,4054
12	30	23	9,5	6	2,34127	7,3890
13	32	17	10,5	6,5	4,58844	13,2333
14	32	19	10	6	4,17664	12,4165
15	32	21	9,5	7,5	3,56485	11,0408
16	32	23	9	7	2,95306	9,4054

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1. Experimental Results

In this study, the characteristics properties of GSHP located in Ankara, Turkey were investigated. The tests for space heating applications in GSHP were conducted between January and February of 2016 winter season. To determine of the COP_{sys} in GSHP, the $T_{i,sa}$, $T_{o,sa}$, $T_{i,wa}$ and $T_{o,wa}$ values were continuously obtained during experimental periods of the ambient conditions. The obtained temperature values of GSHP were presented in Fig. 3.

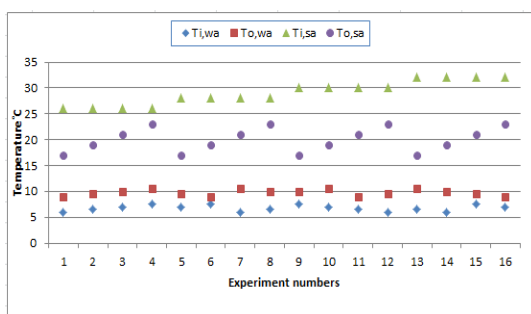


Figure 3. The temperature variations corresponding experimental measurements in GSHP

The most important parameter in GSHP system was found as average of $T_{i,wa}$ and $T_{o,wa}$ temperatures. The average of $T_{i,wa}$ and $T_{o,wa}$ temperatures were measured as 6.75 °C and 9.75 °C respectively. On the other hand,

the average of $T_{i,sa}$ and $T_{o,sa}$ was obtained as 29 °C and 20 °C for space heating applications in GSHP. The best COP_{sys} value in GSHP system was obtained that the $T_{i,sa}$ and $T_{o,sa}$ temperatures were 17 °C and 32 °C. The COP_{sys}, soil temperature $T_{s,40m}$, and ambient air temperature T_e change obtained from experimental tests were given as shown in Fig. 4.

At a depth of 40 meters ($T_{s,40m}$), the temperature is measured at between 11 °C and 12 °C the experimental tests were determined as 2.95, 1.45 and 11.37 °C, respectively. As investigated in Fig 4., the COP_{sys} value in GSHP system was obtained as between 4.58 and 1.36 values.. The average COP_{sys} value, environmental temperature and temperature of the soil of the GSHP system during

4.2. Optimization Results

The results of COP_{sys} for space heating applications in GSHP system of each test were presented in Table 6. The test results were converted into S/N ratio using Eq. (5). The S/N ratio was given in Tables 5 for all responses. The main effect for mean and S/N ratio was illustrated in Figs. 5. The effect of process parameters on COP_{sys} for space heating applications in GSHP system was presented as shown in Table 6 and Fig. 5. It can be seen that the optimum values corresponds to process parameters were given as peak point as shown in Fig. 5.

The optimum process parameters and levels on the COP_{sys} for space heating applications of GSHP system was found to be A₄B₁C₁D₁ as shown in Table 6. The optimum process parameters on the COP_{sys} for space heating applications of GSHP system were computed as the T_{i,sa} at Level 1 (32 °C), the T_{o,sa} at Level 2 (17°C), the T_{i,wa} at Level 2 (6°C) and and the T_{o,wa} at Level 1 (9°C). The improvement in S/Nratio from the initial process parameters to the level of optimal process parameters was 6.6199 dB.

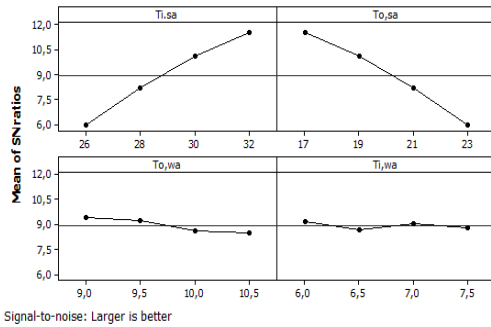


Figure 5. Mean S/N ratio graph for COP_{sys} for space heating applications in GSHP

Table 6. Results of confirmation tests for COP_{sys} in GSHP

	Initial process parameters	Optimal process parameters	
		Prediction	Experimental
Level	A ₂ B ₃ C ₂ D ₄	A ₄ B ₁ C ₁ D ₁	A ₄ B ₁ C ₁ D ₁
COP _{sys}	2.14127	4.68844	4.58843
S/N ratio (dB)	6.6134	14.8115	13.2333
Improvement of S/N ratio	6.6199 dB (100%)		
Prediction error (dB)	1.5782		
Improvement of S/N ratio for COP =	6.6199 dB (50.75%).		

The degree of importance of each process parameter was determined using Eq. (6) for T_{i,sa}, T_{o,sa}, T_{i,wa} and T_{o,wa} corresponding each response. The PCR on the COP_{sys} for space heating applications of GSHP system was given in Tables 8. It can be observed from Table 8 that T_{i,sa} and T_{o,sa} have the greatest influence on the COP_{sys} for space heating applications of GSHP system followed by T_{o,wa}. The contributions process parameters, PCR, on the COP_{sys} for space heating of GSHP system were computed as Level A (48.40 %), Level B (48.40 %), Levels C (1.31 %) and D (<0.01 %). In addition, the residual error

Table 7. Results of ANOVA for COP_{sys} in GSHP

Source	DoF	SS	MS	F-test	P-coefficient	PCR (%)
A	3	69.133	23.0443	129.51	0.001	48.40
B	3	69.133	23.0443	129.51	0.001	48.40
C	3	2.388	0.7959	4.47	0.125	1.31
D	3	0.534	0.1779	1.00	0.500	0.00
Residual error	3	0.534	0.1779			1.88
Total	15	141.721				100

DoF: Degrees of freedom; SS: Sequential sum of squares; MS: Mean sum of squares

derived from ANOVA results for COP_{sys} for space heating of GSHP system was calculated as 1.88 % as presented in Table 7.

5. CONCLUSIONS

This paper presented the optimization of process parameters : in GSHP systems with the double U tube heat exchanger for space heating applications with by using the Taguchi method and ANOVA analysis. The main results drawn from this work were as follows

- The COP_{sys} values for space heating applications of GSHP system were as between 4.58 and 1.31 during experimental measurements.
- T_{i,sa} and T_{o,sa} has the greatest influence with 48.4 % on the COP_{sys} for space heating applications of GSHP system followed by T_{o,wa}.
- Quality characteristics depend on parameters and levels combination with by using the S/N ratio was investigated and derived experimental results. The optimum process parameters for COP_{sys} in GSHP systems were determined to be A₄B₁C₁D₁.

- T_{i,sa} at Level 1 (32 °C), the T_{o,sa} at Level 2 (17°C), the T_{i,wa} at Level 2 (6°C) and the T_{o,wa} at Level 1 (9 °C) with ANOVA techniques for COP_{sys} in GSHP systems were determined the best process parameters conditions.
- The improvement in S/Nratio of COP_{sys} in GSHP from the initial process parameters to the level of optimal process parameters was 6.6199 dB.
- Taguchi experimental design method was applied to reduce maximum cost and time. This

method was an efficient and effective method for optimization of COP_{sys} in ground source heat pumps.

SUBSCRIPTS

GSHP - ground source heat pump

SHE - soil heat exchanger

REFERENCES

- [1] Ochsner K., Geothermal heat pumps: a guide for planning and installing., 1st ed. London, *Earthscan Publications Ltd.*, (2007).
- [2] Sarbu I., Sebarchievici C., Ground Source Heat Pumps, Fundamentals, Experiments and applications, 1st Edition, eBook ISBN: 9780128042410, *Academic Press*, October (2015).
- [3] Omer AM. Ground-source heat pumps systems and applications, *Renewable Sustainable Energy Review*, 12: 344-371, (2008).
- [4] Sivasakthivel T, Murugesan K, Sahoo PK., Potential reduction in CO2 emission and saving in electricity by ground source heat pump system for space heating applications-A study on northern part of India, *Procedia Engineering*, 38: 970-979, (2012).
- [5] Kim E, Lee J, Jeong Y, Hwang Y, Lee S, Park N., Performance evaluation under the actual operating condition of a vertical ground source heat pump system in a school building, *Energy Build.*, 50: 1-6, (2012).
- [6] Esen H., Turgut E., Optimization of operating parameters of a ground coupled heat pump system by Taguchi method, *Energy and Building*, 107: 329-334, (2015).
- [7] Ramniwas K., Murugesan K., Sahoo P.K., Optimization of operating parameters of ground source heat pump using Taguchi method, in: *23rd IIRConference*, Prague, Czech Republic, August 21-26, (2011).
- [8] Pandey N., Murugesan K., Thomas H.R., Optimization of ground heat exchangers for space heating and cooling applications using Taguchi method and utility concept, *Applied Energy* 190: 421-438, (2017).
- [9] Sivasakthivel T, Murugesan K, Thomas HR., Optimization of operating parameters of ground source heat pump system for space heating and cooling by Taguchi method and utility concept, *Applied Energy*, 116: 76-85, (2014).
- [10] V. Verma, K. Murugesan, Optimization of solar assisted ground source heat pump system for space heating application by Taguchi method and utilityconcept, *Energy and Building*, 82: 296-309, (2014).
- [11] Özdemir M. Br, Özkaya Musa Galip, Energy and Exergy Analyses of the Vertical Type Ground-Sourced Heat Pump for Ankara Conditions, *Gazi University Journal of Polytechnic*, 18(4): 269-280, (2015).
- [12] Pingfang Hu, Qiushi Hu, Yaolin Lin, Wei Yang, Lu Xing, Energy and exergy analysis of a ground source heat pump system for a public building in Wuhan, China under different control strategies, *Energy and Buildings*, 152: 301-312, (2017).
- [13] Lei Xia , Zhenjun Ma, Craig McLauchlan , Shugang Wang, Experimental investigation and control optimization of a ground source heat pump system, *Applied Thermal Engineering*, 127: 70-80, (2017).
- [14] VikasVerma, K. Murugesan, Experimental study of solar assisted ground source heat pump system during space heating operation from morning to evening, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 32(1):, 391-398, (2018),.
- [15] T. Sivasakthivel, Mikael Philippe , K. Murugesan , VikasVerma, Pingfang Hu, Experimental thermal performance analysis of ground heat exchangers for space heating and cooling applications, *Renewable Energy*, 113: 1168-1181, (2017).
- [16] Bejan A., Advanced engineering thermodynamics. USA: John Wiley and Sons Inc.; (1988).
- [17] Çengel A.Y., and Boles M. A., Thermodynamics: An Engineering Approach, New Media Version, *6th Edition*, Mc Graw Hill, Inc., (2008).
- [18] Holman JP. Experimental methods for engineers. 6th ed. Singapore: McGraw-Hill; (1994).
- [19] S.J. Kline, F.A. McClintock, Describing uncertainties in single sample experiments, *Mech. Eng.* 75: 3-8, (1953).
- [20] Taguchi G., ElSayed E. A., and Hsiang T. C., Quality Engineering in Production Systems, McGraw-Hill, New York, NY, USA, (1989).
- [21] Ross P.J., Taguchi Techniques for Quality Engineering, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, USA, (1996).
- [22] Çakıroğlu R., Acir A., Optimization of cutting parameters on drill bit temperature in drilling by Taguchi method, *Measurement*, 46(9): 3525-3531, (2013).
- [23] Yang W.H., and Tarng Y.S., Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method, *Journal of Materials Processing Technology* 84: 122-129, (1998).
- [24] Acir A., Canlı M.E., Ata I., Çakıroğlu R., Parametric optimization of energy and exergy analyses of a novel solar air heater with grey relational analysis, *Applied Thermal Engineering*, 122: 330-338, (2017).
- [25] Çakıroğlu, R., Acir A., Taguchi optimization method of tool chip interface temperature depending on the cutting parameters in drilling operations, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi* 10(2): 73-86 (2013).
- [26] Baysal E., Bilginsoy A.K., Acir A., Parametric optimization on exergy analysis of a thermal power plant using Taguchi Method, *Energy Education Science and Technology Part A-Energy Science and Research*, 29(2): 1313-1326, (2012).
- [27] Zhang J. Z. et. al., Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method, *Journal of Materials Processing Technology*, 184: 233-239, (2007).

NOMENCLATURE

COP_{SYS}	- performance of whole system, [-]	\dot{Q}_{SHE}	-heat transferred from the condenser to the soil, [kW]
$T_{i,sa}$	- space air inlet temperatures, [°C]	\dot{m}_{wa}	-flow rate of mixture of water and antifreeze, [kg s ⁻¹]
$T_{o,sa}$	- space air outlet temperatures, [°C]	$c_{p,a}$	-specific heat of the air, [kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹]
$T_{i,wa}$	- soil inlet temperatures, [°C]	S/N	-signal-to-noise, [-]
$T_{o,wa}$	- soil outlet temperatures, [°C]	η	- S/N ratio, [-]
\dot{Q}_c	- heat transferred from the condenser to the space, [kW]	$c_{p,wa}$	-specific heat of mixture of water and antifreeze, [kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹]
\dot{W}_c	- power of compressor, [kW]	PCR	- percent contribution ratio, [-]
\dot{W}_{ef}	- power of fan, [kW]	SS _A	- sum of squares, [-]
\dot{W}_{cp}	- power of circulation pump, [kW]	SS _T	- total sum of squares, [-]
\dot{W}_T	- total energy consumption, [kW]	V_e	- variance of error, [-]
\dot{m}_a	-air flow rate, [kg s ⁻¹]	ν_A	is the degrees of freedom, [-]



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



fCDN:A novel-energy efficient content delivery architecture over next generation systems

Yazar(lar)(Author(s)): Kasim OZTOPRAK

ORCID: 0000-0003-2483-8070

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(To cite to this article): Oztoprak K, “fCDN:A novel-energy efficient content delivery architecture over next generation”, *Politeknik Dergisi*, 21(4): 999-1006, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.470675

fCDN: A Novel-Energy Efficient Content Delivery Architecture over Next Generation Systems

Araştırma Makalesi / Research Article

Kasim OZTOPRAK*

Engineering Faculty, Computer Engineering Department, KTO Karatay University, Turkey

(Geliş/Received : 15.10.2017 ; Kabul/Accepted : 23.02.2018)

ABSTRACT

Content Delivery in mobile networks are gaining popularity with an increasing demand by new mobile subscriptions. Reduction of the outgoing traffic is becoming an important issue, which is proposed to be reduced by a futuristic Content Delivery System (fCDN) for Mobile Operators. The proposed system utilizes the idea Device-to-Device Communication (D2D), with a dynamic resource allocation support of SDN-NFV based systems and the locating of a content. The approach is to use the content of a node as close as possible to a mobile user, which may reduce the cost of communication, and power consumption while increasing the Quality of Experience. While the energy consumption can be reduced by proposed model upto 8 fold according to the current state of the art, enabling the users to use 5G based systems, it reduces the energy consumption by a factor of 50 fold in the proposed solution. The simulation results demonstrate that the use of proposed method outperforms the current state of the art systems in power consumption.

Keywords: Energy consumption, mobile networks, content delivery networks, 5G.

1. INTRODUCTION

By the tremendous demand increase of multimedia services, mobile networks has an overloaded usage for years. By far, these demands could not be met with the current architecture and the capacity of the mobile networks [1]. Newly designed architectures are designed to cope with this demand, which utilizes all-in-one design for the components and separates control and data planes.

Mobile content distribution network (mobile-CDN) studies are limited when compared to CDN studies [2]. A mobile-CDN is proposed by Yousaf et al. with the assumption that future mobile networks will have multiple gateways to the Web and 70% of the internet traffic would be short videos in 2016 and using the TCP protocol as the service layer.

In [3], it is indicated that the increasing demand for higher bandwidth cannot be satisfied using typical content delivery systems. The existing problems are proposed to be solved mostly in similar with [4]. For instance, Oztoprak et al. proposed a P2P-based communication for a scalable multimedia delivery systems. [4] was adapted in mobile communication networks by using device-to-device (D2D) instead of P2P. All available frequency spectrum were used by researchers in D2D [5,6], whereas none of these studies contains an orchestrator framework to control/coordinate the user device communication for content delivery.

In existing literature, the proposals either do not provide feasible solutions or come up with incomplete solutions for mobile devices and content management issues. Furthermore, they do not offer a way of guaranteeing the validity of the resources obtained from mobile devices.

They are far from addressing the source of motivation in order to share the content they already have.

In previous study [7], a content delivery system for mobile operators (mCSDN) was proposed. The system employed D2D to achieve the maximum capacity of the physical environment, while bringing a novel solution to manage the communication infrastructure as well as mobile devices utilizing software-defined networks (SDN). It utilizes the mobile video delivery orchestrator effectively: (i) to maximize the throughput; (ii) to maximize the overlay network capacity; and (iii) to provide higher quality streams effectively. In the study, a video streaming system is designed to use multiple description coding (MDC) in video delivery. In this setting, the delivery of the video is guaranteed, by sending a single description through the content cache located in the cellular node (eNB) of the mobile network or CDN server either within the operator or CDN providers. In order to increase the quality of experience with higher throughput of the content delivery network, additional streams are collected through the D2D overlay network. Guaranteed high availability, higher quality of experience, and less energy consumption has been demonstrated in a limited scope.

In this study, a novel Future Content Delivery Network (fCDN) is proposed. The power consumption analysis given in [7] is also analyzed and elaborated. In contrast to most studies in the literature, the power usage is calculated quantitatively rather than measuring the battery usage for an interval. The method of video coding assumed is Scalable Video Coding (SVC) (rather than MDC) in accordance with the massive usage of HTTP based streaming. In addition to the improvements, a new method is proposed in which the CPU resources of the mobile devices are used for trans-coding of the video into different bitrates, which also means to have data center

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : kasim.oztoprak@karatay.edu.tr

node in the mobile devices specifically processing the video as part of the CDN.

In the following Section II, related works about mobile content delivery systems, D2D systems, software defined networks, and power consumption are briefly surveyed. In Section III, the proposed fCDN is explained. The experimentation and the results are listed in Section IV and concluded in Section V.

2. RELATED WORK

Packet data network gateway (P-GW) is the bottleneck within the mobile networks, since it is a bridge between Internet and the mobile network. According to [2], high speed mobile device radio access is provided by radio base stations (eNB). The main problem of this system is the P-GW use as a central Internet access point. In order to solve the bottleneck issue, some studies proposed to distribute the Internet access. This may provide a shorter path for the users to access the outer network. Another critical issue in mobile networks is the unavoidable traversal of the P-GW to access the resources by using the Internet Protocol (IP). mSCP was proposed by Yousaf et al. [2], which concentrates more on TCP/HTTP traffic. Mainly, two new ideas were proposed: (1) in order to solve the trust issue, CDN data content is to be controlled by the same authority. (2) The infrastructure can be designed to include CDN as an integrated part. CDN infrastructure is proposed to have its edge nodes dispersed across every eNB together in coordination with the central CDN servers. A similar proposal was made by Wang et al. [1] as "cooperative cell caching", where the popular content is cached in base stations.

QoE-based transport optimized Mobile CDN platform was proposed by Amram et al. [8], which pushes the popular content to peering/and or sibling caches proactively. Additionally, in order to reduce the mobile network load, an exchange mechanism between caches is proposed as a peer-to-peer model together with a network aware redirection of user requests dynamically to the appropriate cache in order. Similarly, [9,10,11] proposed systems for the mobile users to share the existing content with others in the network. Additionally, [11] emphasized on the energy consumption in D2D communication for increasing the mobile device lifetimes.

D2D communication studies mostly concentrate on the device contributions in a CDN to improve throughput, to increase the energy and spectral efficiency, delays and fairness. [5,6] surveys the D2D studies under two main categories: (1) mobile operator inband sharing, (2) outband sharing. Whereas the D2D and the cellular communications in inband channel are on the same cellular channels, outband usage is to utilize all channels such as Wi-Fi, Bluetooth etc.

According to [13,14], content distribution and multimedia transmission in cellular networks is commonly performed by D2D communication. [13] proposes a scheme to keep track of locations for the users.

Hence, a nearby node can be identified and data can be transferred from them directly. The weakness of the method is the higher power consumption and control overhead while tracking the location of the nodes. Similarly, [14] proposes a method to reuse the content located in the mobile devices by utilizing D2D communication. It was assumed to use extreme capacity formed by mobile infrastructure and user devices without any consideration related to energy consumption. Although, several studies [15] try to solve sustainability problem of stream by utilizing multiple peer or device, the current state of the art does not solve the reputation management problem. In other words, there is no mechanism guaranteeing the quality and correctness of the data obtained from the other devices/peers.

Caching is a proven method to reduce the mobile data traffic by two thirds [1]. [1] proposes a content caching and delivery method for 5G networks. It is mentioned that the Internet will be using a content-centric networking (CCN). By using the CCN architecture, every network node stores data, data is transported as chunks and with a receiver oriented transfer.

The literature surveyed so far indicates that mobile network nodes and devices can be used to cache the data and forward in order to minimize the energy consumption and maximize the throughput. Mainly the missing part for most studies is an orchestrator to control and coordinate the CDN. It is further commented that SDN is a new concentration to solve the problem by separating the data and control planes.

As highlighted in [3], centralized data plane functionality may create a scalability problem in LTE. It is further suggested to be using SDN to overcome the scalability issue. However, SDN adaptation might be a challenging issue because of the radio resources management, resource scarcity addressing, and the user mobility. In addition, it is highlighted that the SDN is being used to solve network configuration management problems. A method is proposed to improve the efficiency of the content management by using the SDN based solutions in a Wireless Mesh Network (WMN) in [16]. SDN is used to provide a content caching identifier, performing the location decision in the cache, as well as cache distribution. The authors pointed out that the proposal was very effective when the users are locally converged. Similar solutions are attracting both operators and network vendors around the world by the motivation of having the ability to automate resource allocation anywhere in the system dynamically in addition to flexibility and agility. The idea behind the SDN philosophy can be summarized as; i) using white label hardware to get rid of vendor lock-in as much as possible, ii) allocating necessary resources through Network Function Virtualization (NFV) whenever requested, and iii) having a centralized automation/orchestration mechanism to control and coordinate all assets and configuration of the network. In contrast to having many studies on this area, there is still a need for a framework to control, orchestrate and automate all mobile devices

as a part of the network infrastructure and as a content delivery platform, especially in the coming era of 5G.

3. FUTURE CONTENT DELIVERY NETWORKS - fCDN

3.1. Motivation Behind the Study

The energy consumed for mobile communication is one of the main interest area of the researchers among decades. The main concern in those studies are to optimize the total power consumed per bits transmitted. [17] starts from the basics of wireless communication and derives the total energy consumed for different type of communication. Similarly, [18,19] worked on power optimization in mesh of wireless sensor networks. It is clear that the total energy consumed is the sum of i) the energy consumed during the transmission, ii) energy dissipation during the reception, and iii) the energy spent for the amplification in the sender side in order to compensate the propagation distance. [18] calculates the total energy in order to transmit k-bit message below;

$$\begin{aligned} E_{Tx}(k, d) &= E_{Tx} - elec(k) + E_{Tx} - amp(k, d) \\ E_{Tx}(k, d) &= E_{elec} * k + \varepsilon_{amp} * k * d^2 \end{aligned} \quad (1)$$

and to receive the above message, the total energy spent becomes;

$$\begin{aligned} E_{Rx}(k) &= E_{Rx} - elec(k) \\ E_{Rx}(k) &= E_{elec} * k \end{aligned} \quad (2)$$

It is obvious from Equations (1) and (2) that, the energy consumed to transfer a bit is directly related with the distance between communicating parties. Although, [17] indicates that the order of the distance is in between 2.7 and 3.5, [18,19] use it as 2. In this study, it will be used as 2 as depicted from Equations (1) and (2).

In addition to the above, Fodor et al. [12] proposed to use the D2D communication in a cellular network. The results of the experiments conducted shows that knowing the location of a mobile device can reduce the energy consumption of mobile devices by 25 fold when communicating with the ones geographically very close. The results are very similar to the studies in [18,19].

In most of the content delivery networks, DASH (Dynamic Adaptive Streaming over HTTP) is becoming the de-facto standard method for streaming media files over HTTP [20]. DASH is based on adaptive streaming in order to improve the Quality of Experience (QoE) of the users by adjusting the bit-rate of the streams. Each stream is divided into small Group of Pictures (GoP) (of 2-10 seconds each). Those group of segments were coded in different resolution and bit-rate by using Scalable Video Coding (SVC). According to the experience obtained from the network the most appropriate chunk is delivered to the viewer. Studies using the resources from

a device is becoming more popular in video streaming while the rate of the streaming remains same. On the other hand, the rapid evolution in edge computing because of the increasing capacity of mobile devices enables us to utilize video trans-coding in order to serve to the receiver the video content in different speeds. This approach brings trans-coding operation from the cloud to the edge.

The features of the proposed method are defined in the following subsection.

3.2. Features of the Proposed Solution

The proposed fCDN is composed of the following components: (i) a CDN server farm located in the data-center or the core of the mobile operator as the main source of the content seed. This is valid only when the operator also acts as a content provider. Otherwise, the origin CDN server stays outside of the operator; (ii) content caching application located in the cellular base station in order to perform network assisted caching in order to keep to content as close as possible to the mobile users; (iii) the mobile devices (users) with the capability of D2D communication preferably with multiple radio network interfaces (i.e. Multiple LTE Channels, Bluetooth and Wi-Fi); and iv) the management software of the proposed energy aware content delivery platform is designed to optimize the usage of the capacity of the system, energy consumption as well as tracking the locations of the mobile devices (users) across the system. The system promotes the use of the resources of the nearby nodes in order to get better QoE as well as the least energy consumption. The reliance to the content shared among 5G system have a critical role in the effectiveness of such systems, otherwise, the gain in energy consumption and faster access is lost with improperly advertised content.

3.3. Proposed Method

The proposed model starts with building a discovery mechanism for the content replicated throughout the mobile devices which is identical to the served content by the CDN servers. The overlay management software responsible from the content discovery operation performs indexing all the content and registering available CPU cycles into its resource pool either in the CDN server or in the mobile devices connected to the system.

The system is assumed to allow users to access and share video contents encoded by using SVC [20] with four different streaming capacity as follows: 100 Kbps, 200 Kbps, 400 Kbps and 800 Kbps. All video contents are assumed to exist in a CDN server either in the data-centers of the Mobile operator or through a CDN providers outside of the operator.

In order to reduce the latency and optimize the uplink capacity, caching application is onboarded to the virtual eNB node in the mobile base stations with the functionality of caching the most frequently used content in its cell area. Although the idea of caching content for a cellular area in base stations is offered by several

studies [5,6] previously, the massive usage of this approach will be used after having the caches installed in eNBs in a virtual network function. The aim of this approach is bringing the intelligence of the systems as close to the edge as possible which is consistent with the telecommunication trends for 5G era. The proposed caching application is located in the cellular base station, which is the closest point to the users in the mobile network.

The proposed method aims to minimize the power consumption as well as guaranteeing the service quality above some levels. In addition to the lower power consumption, the propagation delay is less in a communication with closer nodes.

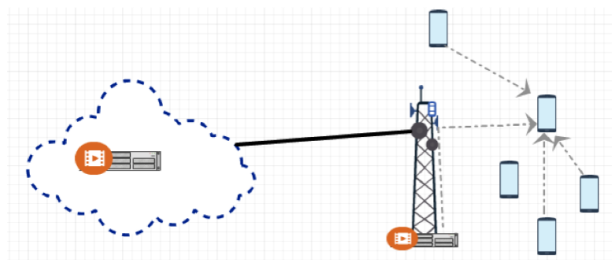


Figure 1. A Mobile system with CDN server, content cache in eNB as well as mobile devices

The proposed system depicted in (Figure 1) has two main resource pool. Although a content cache and a CDN server is located in the system, the main motivation is to utilize the content located in the neighbor devices. The system benefits from the devices three folds. Those are faster access to data, lower power consumption for the access, and more scalable streaming capacity with many devices in the system. The proposed method is summarized in Algorithm (1):

1. **Input:** S (set of nodes), T (set of content), N (set of nodes returned with searched content), $Interest$ ($S \rightarrow T$).
2. A node X queries for a content $t \in T$.
3. **Output:** System returns all $n \in N$, $n_i \leftarrow$ (the total number of devices having the searched content and CPU resources)
4. **while** (N satisfies selected quality) **do**
 - a. Select node $n_i \leftarrow$ closest to X with the searched GoP d_i in specified rate which will minimize the use of power p_i and increases the throughput
 - b. If a node has higher rate for a GoP (which is unavailable in others) and having CPU resources available, utilize transcoding
5. A node X connects to Content Cache or CDN for a content $t_i \in T$ if there is a missing GoP in D2D
6. **end while**
7. Play out the content

Algorithm 1. fCDN with caching and SLA guarantee

In the proposed algorithm (1), when a user queries the fCDN system for a content, the discovery system returns with the location of the devices having the content and other resources to share. In order to guarantee continuous streaming, the content cache (or from the CDN server in the worst case) located in the eNB nodes will be used as emergency resource.

The remaining GoPs are taken from the devices (through the stream collection part of the discovery system) based on the availability of the content and the distance between the user and the candidate device. By selecting devices that are as close as possible to the user, power consumption is reduced and throughput is increased.

If the client could only locate a GoP with higher bandwidth, it can pay the cost for transcoding the available rate into required one and then downloads into its buffer if the time permits for it.

When there is an inability to locate a GoP through D2D system, the content cache is searched for the GoP. If it's not found there either, the content is pulled from the CDN. In this case, the content in the cache servers located at the eNBs are updated accordingly.

3.4. Locating the Content

Locating the searched content is one of the critical problem to be addressed in this study. Although centralized content indexing is the fastest solution to the problem, it has scalability problems which forces us to use distributed content index in each eNB. This can easily be performed by using NFV based systems with the ability of installing series of Virtual Network Functions (VNF) at least; i) eNB; ii) index server; and iii) content cache. SDN/NFV based infrastructure on the mobile edge enable us to easily deploy cache and content servers and allocate enough resources to the system dynamically.

8. **Input:** S (set of nodes), T (set of content), N (set of nodes returned with searched content), $Interest$ ($S \rightarrow T$).
9. **Output:** System keeps track of all returns $s \in S$, $s_i \leftarrow$ (all devices and content associated to them, as well as CPU resources)
10. **while** (forever) **do**
 - a. A node S arriving to the system registers its content $t \in T$.
 - b. A node S already within the system updates its status and location within every y seconds
11. **end while**

Algorithm 2. fCDN registration

In the proposed model, all participating device within the base station area registers themselves and their content to the index server located as a VNF in the same physical system of the base station. The index server acts as a gateway for the subscribers of the system not only keeping the records of the content hold by the devices within that base station area but also acts as a proxy

initiating searches to foreign systems (CDN, etc.) for the content could not be located within the area of that base station.

In addition to keeping track of the content shared by the devices, it is necessary to keep the location of the devices holding resources within the system in order to optimize the use of energy. All devices joining to the system should register to the index server, and update the status and location through *heartbeat* messages as depicted in Algorithm (2).

3.5. Outbound Communication Alternatives

It is indicated that D2D can occur either through inband or outband channels. Although using inband allows the system to control and manage the subscribers through licensed cellular system, total communication capacity is limited to the capacity of the cellular system. On the other hand, subscribers have the flexibility to use unlicensed spectrum through cellular communication mediums as well as Wifi.

In addition to the link capacity Miettinen et al. [21] demonstrated energy usage characteristics of different systems including wifi and 3G systems. The simulation results indicate that, energy consumption of 3G for transferring data from short distance is twice more than transferring and processing same document through wifi. It becomes three times more for when performing the comparison between transferring from far node in 3G and Wifi system.

This fact leads us to use Wifi whenever available allowing us to reduce the energy consumption more than 50%.

4. EXPERIMENTAL STUDIES

In the simulation study, the maximum radius of the cell station is assumed to be 500 meters. There are a total of 100 users in the macro cell, of which 60 are uniformly distributed into 6 different clusters within 50 meters of the cluster centers, whereas the remainings are randomly positioned within the range of the macro cell. The distance between clusters are assumed to be 150 meters while individual nodes without belonging to a cluster is assumed to be 300 meters away from the clusters on average. In the case of devices outside of the clusters are assumed to be 200 meters away from each other on average while the average distance of those subscribers to the base station is assumed to be 400 meters. The total power to transmit and receive a bit is assumed to be as 100 nj and propagation of a bit for 1 meter is assumed to be as 50 nj as proposed by [18], while transcoding a video part into half rate is assumed to be 48 nano joule as calculated from the proposal by [22]. The parameters for the simulation are given in Table (1).

4.1. Simulating Constant Speed Video Delivery

In the first part of the experiments, a video with the length of 200 seconds is assumed to be distributed among the devices with several probabilities. The video is split into 100 consecutive Group of Pictures (GoP) which form a

whole video. During the experiments, the availability rate (percentage) for a GoP in a mobile node is assumed to be $x\%$ out of 100 nodes. For example; if the availability rate

Table 1. Environmental parameters for the Simulation

Parameters	Value
Cellular Station radius	500 meters
Cluster Radius	50 meters
Number of Users	100
Average Number of Users in Clusters	10
ETx+ERx	50 nj/bit
Eamp	100 pj/bit/m ²
Etranscode	28 nj/bit

for a GoP is 1% in the system, it means that the related GoP is only available in only one mobile node throughout the whole system. The system is assumed to have multiple different quality levels which can be trans-coded into lower quality by processing. In the experiments, the client requesting the video to play out is assumed to be in one of the clusters. Although there is a cost for locating a suitable GoP for a client, for this study, that cost is assumed to be negligible.

The client is allowed to fetch all GoPs during the experiment. The main concern of the candidate selection was on the distance to the source device, as well as the power consumption directly related to the distance. The energy consumption during a transaction is based on total energy consumed within the system without calculating consumption for transmitter and receiver nodes separately. The simulations are performed with varying probability of existence for a GoP from 1% to 4% respectively.

Tables (2) and (3) summarizes the results of the simulation. In Table (2), the numbers 9, 45, 68 means that finding the content searched within the cluster is 9%, within another cluster is 45% and within other devices is 68%. As it can see from Table (2), when the existence

Table 2. Locating GoPs from the same cluster, within clusters and total D2D systems for single data rate for varying existence probabilities

Avail	100Kbps	200Kbps	400Kbps	800Kbps
1%	9,45,68	10,45,68	9,45,68	13,45,68
2%	19,74,88	19,74,88	17,73,87	15,73,87
3%	27,93,100	29,89,98	29,93,100	27,93,100
4%	37,99,100	43,100,100	37,99,100	33,95,100

probability increases, locating any GoP within the same cluster increases from 9% to 37% for 100 Kbps speed as obvious. When the existence probability goes beyond 2%, the need for connecting to content cache and/or CDN server becomes useless since all the necessary content can be obtained through the system.

In parallel to the above, it is clear from Table (3) that whenever the client locates the resource from the D2D

Table 3. Energy consumption for a video request with single data rate for varying existence probabilities within D2D system

Avail	100Kbps	200Kbps	400Kbps	800Kbps
CDN/Cache	160J	320J	640J	1280J
1%	82.22J	164.05J	328.90J	651.40J
2%	49.80J	99.60J	200.00J	403.20J
3%	31.88J	61.35J	125.90J	255.00J
4%	23.73J	45.85J	94.90J	189.00J

system, the energy consumption decreases dramatically. The energy consumption saving becomes more than three fold in any speed when the probability increases from 1% to 4% respectively. It is almost 8 times less when compared with traditional CDN-cache server usage for video access in lower quality and similar benefits for higher quality.

4.2. Simulating Varying Speed Video Delivery

In the this part of the experiments, same video from the first experiment is assumed to be distributed among the devices with different quality levels which are 100Kbps, 200Kbps, 400Kbps and 800Kbps with the probabilities of 0.4, 0.3, 0.2 and 0.1 respectively. Similarly, the client requesting the video to play out is assumed to be in one of the clusters. The client is allowed to fetch all GoPs during the experiment. The simulations are performed with varying probability of existence for a GoP from 1% to 4% respectively for different clients with all video speeds consecutively.

Tables (4) and (5) summarizes the results of the second part of the simulation. Similar to the first experiments

Table 4. Locating GoPs from the same cluster, within clusters and total D2D systems with variable data rate GoPs for varying client rates

Avail	100Kbps	200Kbps	400Kbps	800Kbps
1%	9,44,61	6,29,44	2,18,26	1,6,10
2%	18,71,86	10,51,72	6,31,46	1,10,19
3%	29,86,96	18,65,83	9,42,59	3,16,26
4%	37,96,100	23,80,93	11,51,71	4,20,33

Table 5. Energy consumption for a video request with variable data rate GoPs for varying client rates

Avail	100Kbps	200Kbps	400Kbps	800Kbps
CDN/Cache	160J	320J	640J	1280J
1%	99.37J	233.70J	531.87J	1203.36J
2%	66.34J	169.04J	442.49J	1129.08J
3%	49.06J	134.42J	382.13J	1052.48J
4%	42.76J	103.37J	323.93J	990.48J

when the existence probability increases, locating any GoP within the same cluster increases for all speeds and existence probabilities as depicted in Table (4). Secondly, since the distribution differs for all speeds (0.4,0.3,0.2,and 0.1 respectively), the impact on the existence probability can obviously seen from the Table (4).

In parallel to the above it is clear from Table (5) that energy consumption dramatically increases even if we have same total success rate for the same video. This is because either from utilizing transcoding to convert the speed into suitable rate which requires additional energy, or having worse quality video in the system which would not be possible to use. The latter will lead the client to connect either to a node far from him or connect directly to the content cache or CDN server. This lead us dramatic increase in energy consumption for higher quality. While the increase is in between 60%-90% for 100 Kbps client rate, it goes up to 90%-400% for 800 Kbps streaming quality. As explained before the energy saving goes up to 4 times. In Tables (5) and (6) the first line gives the total energy consumption of the system to fetch and playout the video either from the centralized cache server located in the base station or from the CDN server.

4.3. Simulating Varying Speed Video Delivery in the Existence of Wifi

In addition to less power consumption and cheaper cost for streaming through D2D system, there is another benefit of performing streaming through the contribution of the D2D system. Since D2D communication can use out-of-band capacity other than licensed capacity of mobile network, it also overcomes the potential congestion in the mobile network because of the high bandwidth demand of the applications. In addition to overcome congestion problems incurring in the network, it also reduces use of energy as proposed in \cite{hotcloud} where the energy transmission and reception cost halves for close distance compared with cellular ones while it goes down 3 to 3.5 fold for the distant communication. In the experiments, the propagation cost change is left untouched while the transmission cost is halved. As depicted in Table (6) the results of the simulations indicate that the energy saving is around 1% less when heavily accessing outside of the cluster. The saving becomes more than 50% when using resources heavily from the same cluster.

In this experiment, an SDN-NFV based Wifi access device is installed around the center of clusters. It reduces the radius of the distance to half of previous one, as well as eliminating the transcoding effort since the cache installed in those devices can keep copies of the content in multiple quality forms. When the system is heavily populated with those hotspots even it saves energy more than 50% when compared with Wifi based solution. as depicted in in Table (6).

Although there are some improvements in the SDN-NFV based system proposal, the improvement in the performance seen in Table (6) does not fit into expectations from the customers of telecommunication

systems in the future. First of all, the experiment did not consider the increase in the cache hit rate although it should be. Secondly, although a SDN based cache server

Table 6. Energy consumption for a video request with variable data rate GoPs for varying client rates in the use of Wifi

Avail	100Kbps	200Kbps	400Kbps	800Kbps
CDN/Cache	160J	320J	640J	1280J
1% Cellular	85.63J	218.31J	522.20J	1210.08J
1% Cellular Wifi	85.43J	218.01J	521.91J	1209.94J
1% Cellular Wifi+SDN	85.01J	217.51J	521.55J	1209.88J
1% 5G	2.49J	5.04J	9.97J	25.40J
10% Cellular	11.77J	35.92J	134.08J	649.04J
10% Cellular Wifi	10.36J	33.93J	131.82J	647.10J
10% Cellular Wifi+SDN	9.18J	32.44J	130.21J	646.30J
10% 5G	2.34J	5.70J	12.43J	24.18J
50% Cellular	4.64J	10.84J	33.87J	158.76
50% Cellular 5 Wifi	2.38J	6.49J	26.56J	151.80J
10% Cellular Wifi+SDN	1.33J	4.32J	22.92J	148.90J
50% 5G	1.31J	2.84J	7.64J	19.11J

and Wifi access point to the clusters are placed, the internet link of them has not been considered for the third experiments. This conflicts with the idea of Wifi offloading, and 5G plans. Table (6) has lines identified with 5G, and you can see the amazing change when we utilize both cache hit rate increase and internet access through 5G. These numbers indicate that the future of telecommunication sector can be defined as “*the closer to the subscriber, the better*”.

The results depicted in Table (6) gives some hints about achieving the promises of 5G. Although the energy saving is achieved by providing shorter distance for the devices, it also utilizes the use of Wifi to access to the internet which consumes half of what cellular communication is consuming. One of the main findings from the table is the results of 5G network which seems loosely coupled with the availability rate since the cost of transferring data from Wifi hotspot is very cheap compared with transferring it through cellular infrastructure from cache servers or CDN. Distributed Internet access also overlaps with one of the main desires of [2]. Besides, while the proposals in [2,3] propose to use base stations as caching point for a system, the proposed method goes one step further to organize the resources actively to the field next to consumers.

While the motivation behind sharing content with other nodes is not covered in this study, the nodes allowing the others to use their resources should be promoted. This mechanism shall also cover the use of CPU resources in

addition to the usage of network resources. The use of CPU resources forms and edge computing system through mobile nodes.

5. CONCLUSIONS

In this study a futuristic content delivery system for mobile operators (fCDN) is proposed to control and coordinate the video streaming by utilizing both CDN assisted cache and D2D network. The proposed solution was inspired from the idea of using D2D communication, and with the framework of mobile device management and locating the content as well as benefiting from the improvements in the telecommunication world especially in SDN/NFV technologies and the effectively using them. The enabling technology of this architectural proposal is the migration of conventional systems into SDN-NFV based systems.

The main motivation of the proposed system is “using the content from the node as close as possible to the mobile user”. This will enable the users to achieve minimal energy usage, while maximizing the throughput as well as minimizing the cost.

The results obtained from the study clarified two things; i) D2D contribution is necessary for scalability, and ii) architecting the mobile networks ready for 5G will allow users to access data with cheaper cost.

In the future, the studies should head towards the availability of consecutive GoPs in a mobile node or throughout the system in order to simulate the trace of a previous ployout of a video as well as the monetization effect of the methods proposed and the balance between QoE and cost.

REFERENCES

- [1] Wang, X., Chen, Taleb, T., Ksentini, A., and Leung, V. C. M, “Cache in the air: Exploiting content caching and delivery techniques for 5G systems”, *IEEE Communications Magazine*, 52(2) : 131–139, (2014).
- [2] Yousaf, F.Z., Liebsch, M., Maeder, A., and Schmid, S., “Mobile CDN enhancements for QoE-improved content delivery in mobile operator networks”, *IEEE Network*, 27(2): 14–21, (2013).
- [3] Bradai, A., Singh, K., Ahmed, T. and Rasheed, T., “Cellular Software Defined Networking: A Framework”, *IEEE Communications Magazine*, (6): 36–43, (2015).
- [4] Oztoprak, K., and Akar, G. B., “Hybrid fault tolerant peer to peer video streaming architecture”, *IEICE Communications Magazine*, 91(11): 3627–3638, (2008).
- [5] Asadi, A., Wang, Q., and Mancuso, V., “A survey on device-to-device communication in cellular networks”, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 16(4): 1801–1819, (2014).
- [6] Liu, J., Kato, N., Ma, J. and Kadowaki, N., “Device-to-Device Communication in LTE-Advanced Networks: A Survey,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, (c) 1–1, (2014).
- [7] Oztoprak, K., “mCSDN: A software defined network based content delivery system with D2D contribution”,

- in: Proceedings - IEEE 12th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD)*, 2053-2057, (2016).
- [8] Amram, N., Fu, B., Kunzmann, G., Melia, T., Munaretto, D., Randriamasy, S., Sayadi, B., Widmer, J., and Zorzi, M., “QoE-based transport optimization for video delivery over next generation cellular networks”, *in: Proceedings - IEEE Symposium on Computers and Communications*, 19–24, (2011).
- [9] Almashor, M., Khalil, I., Tari, Z., Zomaya, A. Y. and Sahni, S., “Enhancing Availability in Content Delivery Networks for Mobile Platforms”, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 26(8): 2247–2257, (2015).
- [10] Tong, S.-R., Du, S.-T., Chen, L.-W. Chen, S., and Yeh, E., “A Peer-to-Peer Streaming CDN for Supporting OTT Video Broadcast Service in Mobile Networks”, *International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW)*, 260–261, (2015).
- [11] Sung, J. Lee, D., Bang, Y., Lee, J., and Rhee, J.-K.K., “Energy-aware algorithms for network-assisted device-to-device content delivery networks”, *Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, 469–471, (2015).
- [12] Fodor, G., Dahlman, E., Mildh, G., Parkvall, S. Reider, N., Miklos, G., and Turanyi, Z., “Design aspects of network assisted device-to-device communications”, *IEEE Communications Magazine*, 50(3): 170–177,(2012).
- [13] Bao, X., Lee, U., Rimal, I. and Choudhury, R.R., “Data Spotting: offloading cellular traffic via managed device-to-device data transfer at data spots”, *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 14(3) :37, (2010).
- [14] Ji, M., Caire, G. and Molisch, A., “Wireless device-to-device caching networks: Basic principles and system performance”, <http://arxiv.org/abs/1305.5216>.
- [15] Yazici, M. A., Oztoprak, K., Akar, N., and Akar, G. B., “Markov zinciri tabanlı Güvenilirlik modellemesi”, *in: Proceedings-IEEE 16th Signal Processing, Communication and Applications Conference*, Aydin, pp. 1-6. doi: 10.1109/SIU.2008.4632689, (2008).
- [16] Kim, W.S., Chung, S.H., and Moon, J.W., “Improved content management for information-centric networking in SDN-based wireless mesh network”, *Computer Networks*, 92: 316–329, (2015).
- [17] Rappaport, T.S., “Wireless Communications: Principles and Practice”, *IEEE Press, Prentice Hall PTR*, ISBN: 0-7803-1167-1, (1996).
- [18] Heinzelman, W.R., Chandrakasan, A., Balakrishnan, H., “Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks”, *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Maui, HI, USA*, (2):10. doi: 10.1109/HICSS.2000.926982, (2000).
- [19] Alsultan, M., Oztoprak, K., Hassanpour, R., “Power Aware Routing Protocols in Wireless Sensor Network”, *IEICE TRANSACTIONS on Communications*, Vol.E99-B No.7: 1481-1491 . DOI: 10.1587/transcom.2015EBP3453, (2016).
- [20] ISO/IEC, ISO/IEC. Information technology Dynamic adaptive streaming over HTTP (DASH), in: online from <https://www.iso.org/standard/65274.html>, 2053-2057, (2016).
- [21] Miettinen, A.P., Nurminen, J.K., “Energy efficiency of mobile clients in cloud computing”, *2nd USENIX Workshop on Hot Topics in Cloud Computing (HotCloud '10)*, Boston, MA, June, (2010).
- [22] Ou, Z., Pang, B., Deng, Y., Nurminen, J.K., Yla-Jaaski, A., and Hui, P., Energy and Cost-Efficiency Analysis of ARM-Based Clusters, *12th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing (ccgrid 2012)*, Ottawa, ON, pp. 115-123. doi: 10.1109/CCGrid.2012.84, (2012).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



PLC destekli SCADA ile enerji yönetimi için örnek laboratuvar çalışması

Sample laboratory work for energy management with SCADA supported by PLC

Yazar(lar) (Author(s)): Furkan ÜSTÜNŞOY¹, H. Hüseyin SAYAN²

ORCID¹: 0000-0003-3087-895X

ORCID²: 0000-0002-0692-172X

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Üstünsoy F. ve Sayan H.H., "PLC destekli SCADA ile enerji yönetimi için örnek laboratuvar çalışması", *Politeknik Dergisi*, 21(4): 1007-1014, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.385922

PLC Destekli SCADA ile Enerji Yönetimi İçin Örnek Laboratuvar Çalışması

Araştırma Makalesi / Research Article

Furkan ÜSTÜNŞOY^{1*}, H. Hüseyin SAYAN²

¹Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Müh. Bölümü, Ankara Gazi Üniversitesi, Türkiye

²Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Müh. Bölümü, Ankara Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 11.10.2017 ; Kabul/Accepted : 07.12.2017)

ÖZ

Bu çalışmada tek merkezden SCADA ve PLC sistemi ile izleme-raporlama, enerji yönetimi ve enerji tasarrufu sağlanması amaçlanmaktadır. Günümüzde teknolojinin gelişmesine bağlı olarak elektrikli aletlerin kullanımının çok hızlı biçimde artması hem şebeke parametrelerini ciddi biçimde bozmakta hem de enerji tüketimini hızla artırmaktadır. Bu değişim enerji kalitesi ve enerji verimliliğinin önemini gittikçe artırmaktadır. Bundan dolayı enerji yazılımları da gün geçtikçe daha elzem hale gelmektedir. Özellikle sanayi bölgelerinde, sağlık merkezlerinde, büyük alışveriş merkezlerinde yaygın olarak kullanılmakta olan enerji yazılımları genel itibarıyla şebekedeki parametreleri takip etmek ve arşivlemek için kullanılmaktadır. Bu bağlamda, bir tesisin sadece elektrik enerji parametrelerini izleme ve raporlama değil aynı zamanda enerji yönetimi sağlamak, arıza tespiti, maliyet ve tüm sistemlerin verimli çalışması için önemlidir. Aynı zamanda tesislerdeki enerji tüketimini azaltmak için SCADA yazılımında rapor sayfaları oluşturarak tasarruf stratejileri oluşturmak maliyet ve şebeke kararlılığı açısından katkı sağlayabilir.

Anahtar Kelimeler: Enerji izleme, otomasyon, PLC, SCADA.

Sample Laboratory Work for Energy Management with SCADA Supported by PLC

ABSTRACT

In this study, it is aimed to provide monitoring and reporting, energy management and energy saving with SCADA system supported by PLC from a single center. Today, due to the development of technology, the rapid increase in the use of electrical appliances seriously disturbs the network parameters and increases the energy consumption rapidly. This change is increasing the importance of energy quality and energy efficiency. Therefore, energy software is becoming more and more essential. Energy softwares, which are widely used in industrial areas, health centers and large shopping malls, are generally used to track and archive the parameters in the network. In this context, it is important for a plant not only to monitor and report electrical energy parameters but also to provide energy management, fault detection, cost and efficient operation of all systems. At the same time, creating savings strategies by creating report pages in SCADA software to reduce energy consumption in the facility can contribute to cost and network stability.

Keywords: Energy monitoring, automation, PLC, SCADA.

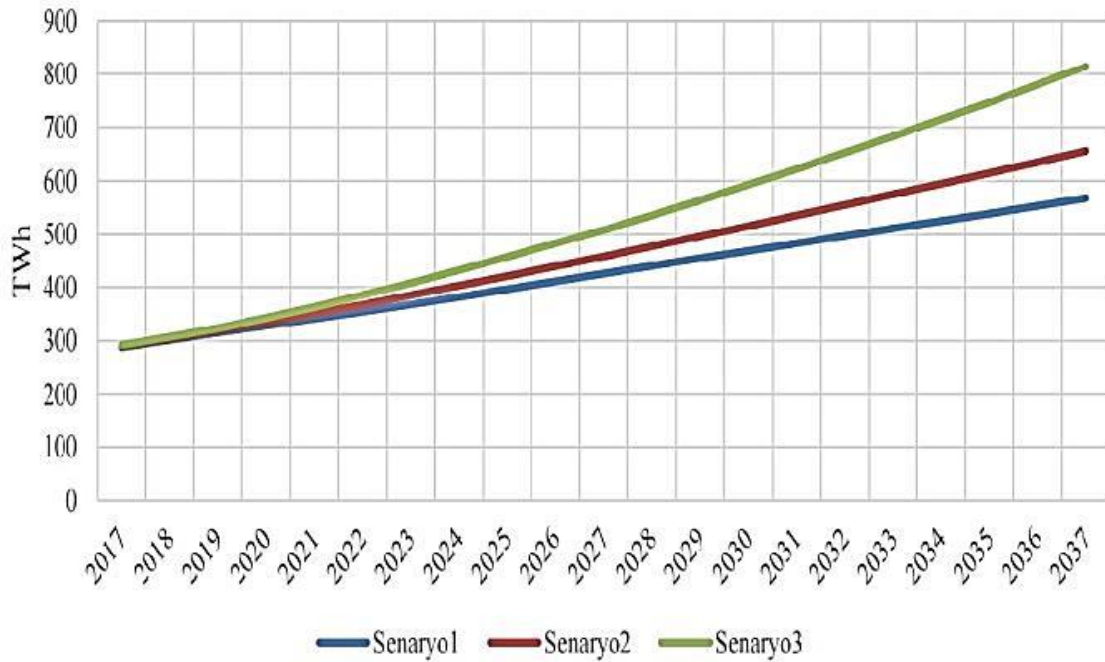
1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kesintisiz, kaliteli ve ucuz enerjinin temini, aynı zamanda enerjinin optimum şekilde kullanılarak tasarruf sağlanması gelişim ve kalkınmanın temellerini oluşturur. Verimi arttırmanın en etkin yolu tüketilen enerjiyi kontrol etmektir. Yaygın enerji kaynaklarının kısıtlı olmasına karşın tüketimin hızla artması verimli enerji tüketiminin önemini ortaya koymaktadır. Şekil 1, Türkiye'nin 2017-2037 yılları arasındaki talep projeksiyonu talebin her geçen gün hızla arttığını ve artacağını göstermektedir. Enerjinin kalitesi, enerji tasarrufunun yanında, üretimde verimi arttırmak ve arıza sıklığını azaltma yönünden de çok kritiktir. Burada şebekedeki reaktif güç varlığı, gerilim düşmesi/yükselmesi, transients (1 saykıldan daha kısa süre içinde ortaya çıkan çok hızlı değişimler), harmonik

bozulmalar, gürültü ve EMI gibi birçok enerji kalitesi problemi de karşımıza çıkmakta ve hem üreticiyi hem de tüketiciyi maddi/manevi zararlara uğratmaktadır. Tüm bu riskleri minimize etmek ve enerji verimliliği için enerjinin üretiminden tüketildiği son noktaya kadar izlenmesi ve en uygun senaryoya göre kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu da üretim, iletim ve dağıtım noktalarına kapsamlı enerji otomasyon sistemleri kurmakla mümkün olacaktır.

Güç kalitesi problemleri analizi ve bu analizlerin SCADA ile izlenmesi ve arşivlenmesi işletmenin enerji dağıtım sistemini izlemek amacıyla kurulmuş olan enerji otomasyonları ile gerçekleştirilmiştir. Örneğin, enerji izleme sistemi için işletme içi kritik noktadaki analizör ile ölçülen enerji parametrelerinin takibi, arşivlenmesi ve grafik ortama aktarılması [2], büyük ölçekli bir endüstriyel tesiste elektrik altyapısını güvenilir hale getirmek için örnek bir uygulama olarak tesis edilmiş decoupling ve yük atma sistemlerinin yapıları [3],

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : ustunsoy.furkan@gmail.com



Şekil 1. Türkiye'nin Elektrik Talep Projeksiyonu [1] (Turkey's Electricity Demand Projections)

SCADA (Denetleyici Kontrol ve Veri Toplama) sistemlerinin temel kavramlarını ve SCADA'nın güç sistemi alanında nasıl önemli bir rol oynadığı incelenmiştir [4]. Bir başka çalışmada, güç kalitesi problemlerinin belirlenebileceği, anlık akım ve gerilim değerlerinin ölçümünü yapan, harmonik analizlerini ve reaktif güç hesaplamalarını gerçekleştirebilen, gerektiğinde uzun dönemli raporlandırıcı, düşük maliyetli bir izleme sistemi tasarlanmıştır [5]. PLC kullanarak pik saatler boyunca endüstride yük kontrolünü sağlamak ve SCADA kullanarak bilgisayar üzerinden motorların tüm yük parametrelerini izlemek hedeflenmiştir [6], bir başka makalede de SCADA sistemlerinin genel yapısı iletişim protokolleri ele alınmış, enerji iletim ve dağıtım altyapılarında kullanılan SCADA sistemlerinin güvenli çalışması için alınması gereken önlemler vurgulanarak, Türkiye'deki durum irdelenmiştir [7]. Diğer bir çalışmada enerji izleme sistemi ile endüstrideki enerji kullanımını denetleyerek güç kesilmesi problemi üzerine basit ve etkili bir çözüm sunulmuş olup [8], bir diğerinde dağıtım şirketinde uygulaması yapılacak olan SCADA/DMS sistemi genel bir şekilde ele alınmıştır [9]. Transformator güvenliğini sağlamak amacıyla yapılan çalışmada ise transformator merkezinde meydana gelen olayların kontrol merkezine ve ilgili kişilere aktarılması için GSM temelli bir uzaktan kontrol sistemi geliştirilmiştir [10]. İzlenebilir enerji dağıtım sisteminin bilgi güvenliği için yapılan çalışmada kurulu enerji dağıtım sistemine ait elektriksel parametreleri görüntüleyen ve saklayan enerjisi izleme sisteminin güvenlik riskleri incelenmiştir [11]. Sayaçların uzaktan okunmasını sağlamak ve kullanıcılar için anlık fatura bilgisi sağlayabilmek için yapılan çalışmada GSM ile sayaç okuma sisteminin gelişimi sunulmuştur [12].

Literatür incelendiğinde çalışmaların çoğu elektrik enerji parametrelerini izleme ve arşivleme amaçlarına yönelmiştir. Bu çalışmada ise tüm bunlarla beraber kompanzasyon ve jeneratör gibi tüm sistemi denetleyerek ve kontrol ederek arızaları minimize etmek amaçlanmıştır. Bunu yaparken kompanzasyon sistemi kontrolünün PLC ile sağlanması hedeflenmiştir. Ayrıca enerji kesintisi yaşandığında öncelik durumuna göre bir yük alma algoritması devreye girerek yüke öncelik sırasına göre enerji verilmesi sağlanmıştır. SCADA sistemi ile ise tüm parametrelerin izlenmesi, cihazların ve sistemlerin durumunun takip edilebilmesi ayrıca SCADA ara yüzünde anlık enerji bedeli hesaplayarak tüketim maliyetinin anlık hesaplanması sağlanmıştır. Mevcut sisteme Modbus, Profibus, Ethernet TCP/IP gibi haberleşme protokollerinden birini desteklemesi durumunda UPS (Uninterruptible Power Supply) cihazı da PLC üzerinden izleme yazılımına entegre edilebilir.

2. SİSTEM MİMARİSİ VE UYGULAMA MATERYALLERİ (SYSTEM ARCHITECTURE AND APPLICATION MATERIALS)

Bu çalışma endüstriyel otomasyon laboratuvarında küçük güçlerde gerçekleştirilmiştir. Ancak tüm yazılım ve algoritmalar endüstriyel bir tesisin enerji izleme ve kontrolünü sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Sistem topolojisi ele alındığında, enerji dağıtım çıkışlarında konumlandırılmış şebeke analizörleriyle elde edilen veriler, PLC'ye aktarılarak hem kontrol hem de PLC'ye bağlı bilgisayarda parametrelerin takibi, arşivlenmesi ve grafik ortama aktarılması sağlanmıştır. PLC ile şebeke analizörü arasındaki bağlantı, ek modül kullanılmadan MODBUS RTU protokolü ile sağlanmıştır. Ek modül

kullanılarak MODBUS TCP/IP, Profibus, ProfiNET, Canbus gibi farklı protokollerle de haberleşme sağlanabilir.

Bilgisayar ile PLC arasındaki bağlantı Ethernet arayüzüyle sağlanmıştır. Şekil 2' de enerji tüketimdeki pik saatler için yük kontrolü, reaktif güç kontrolü, jeneratör transferi ve tüm bunların SCADA ile hem izlenmesi hem de kontrolünü sağlayacak topoloji görülmektedir.

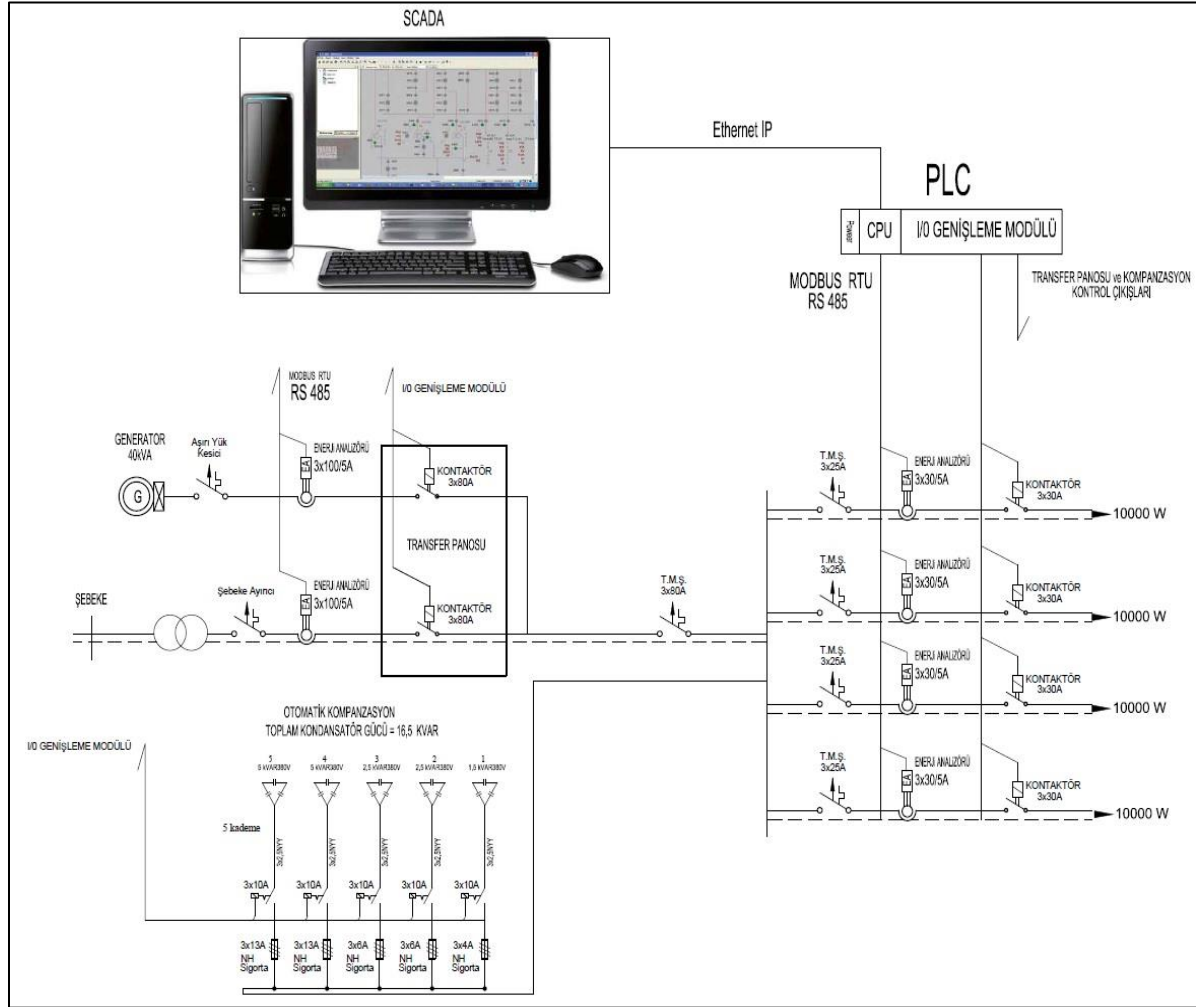
Sistem kontrolü Schneider marka M 241 serisi PLC ile sağlanmıştır. Enerji analizöründeki tüm veriler Somachine yazılımında oluşturulan Modbus konfigürasyonu ile anlık PLC'ye aktarılmış ve bu sayede gereksiz komut kullanımı engellenmiştir. Dolayısıyla sistemin daha hızlı cevap vermesi sağlanmıştır. Enerji analizörlerinden gelen veriler floating point formatında olduğundan desimal formata dönüşüm için alt program oluşturulmuş ve tüm veriler için kullanılmıştır. SCADA programı ise Schneider PLC ile uyumlu Vijeo Citect

yazılımıdır. Bu programla tüm görsel arayüzler, raporlar, alarmlar ve trendler oluşturulmuştur.

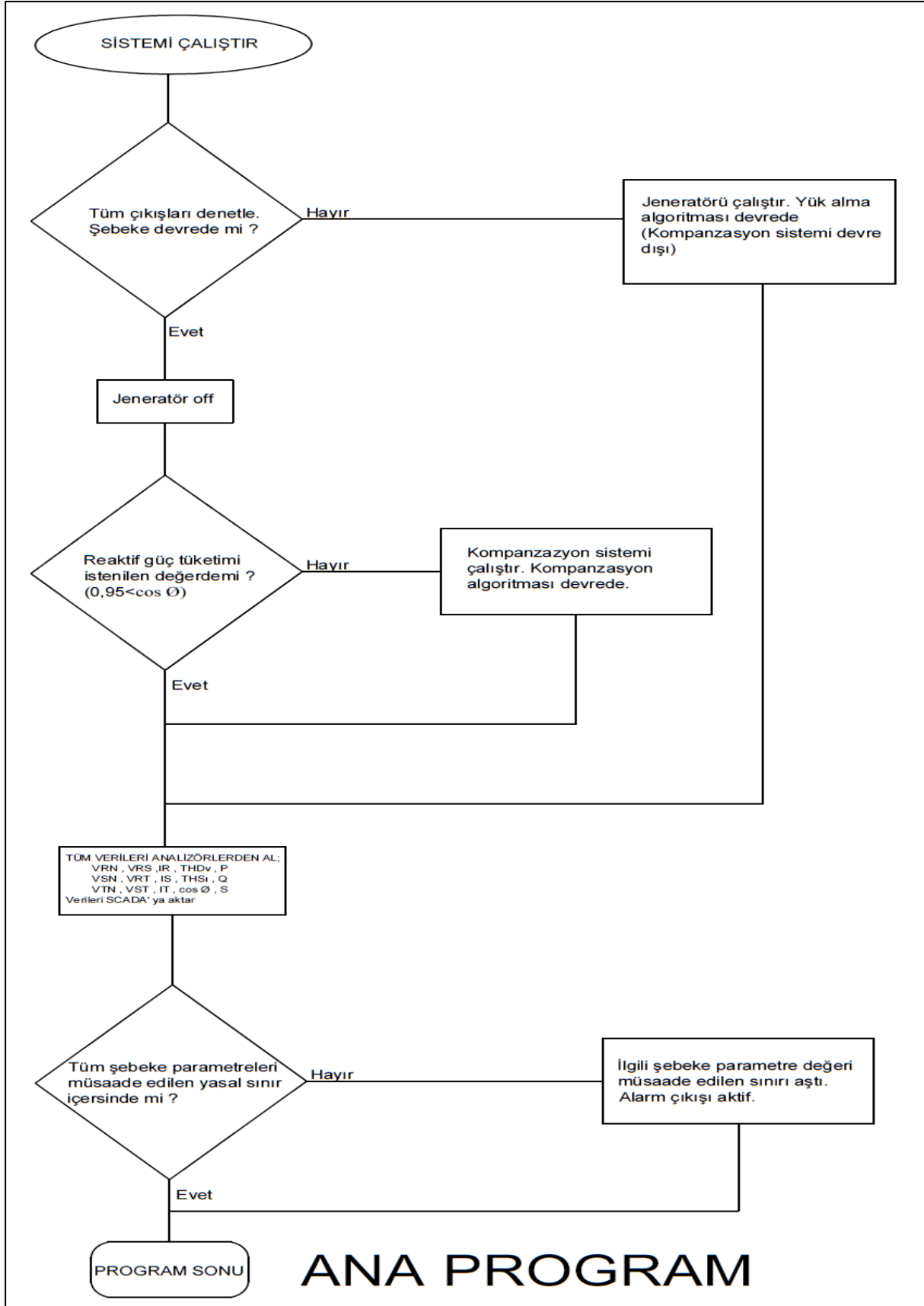
3. SİSTEM ALGORİTMALARI (SYSTEM ALGORITHMS)

Otomasyon sistemi, jeneratör transferini ve kompanzasyon sistemini kontrol edecek şekilde tasarlanmıştır. Transfer, şebeke enerjisi kesildiğinde jeneratörün paralel bağlanma şartları yerine geldiğinde sisteme bağlanması şeklinde sağlanıyor. Daha sonra ise yükler öncelik sırasıyla belirli bir öncelik algoritmasına göre en hızlı şekilde devreye alınabiliyor. Yüklerin devreye girmesi enerji kesildiği andaki son tüketim değerleri ve jeneratörün kapasitesi için eşik değer baz alınarak sağlanmaktadır.

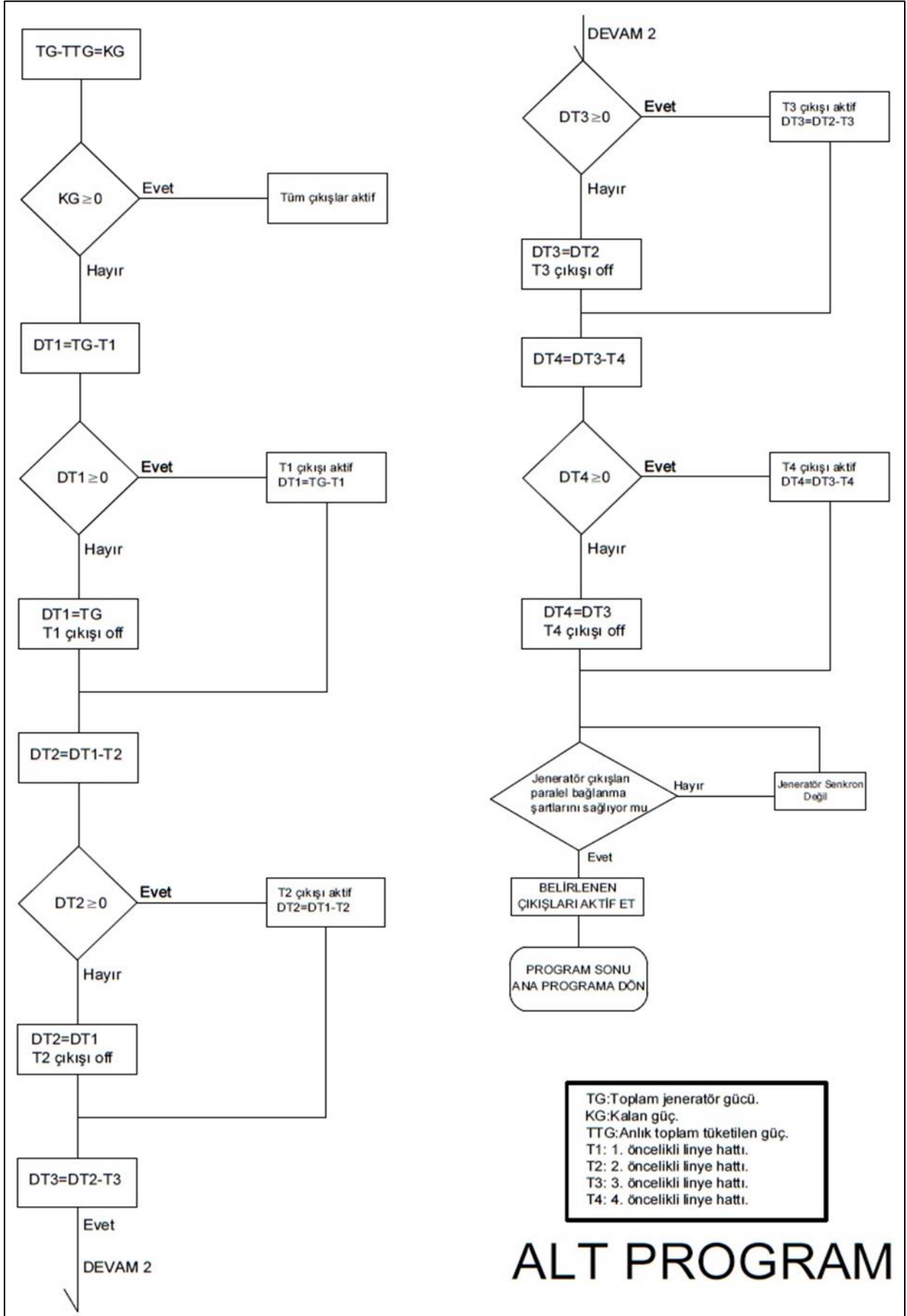
Ana ve alt program algoritmaları Şekil 3 ve Şekil 4' te verilmiştir. Ayrıca eğer reaktif güç tüketimi tespit edilirse kompanzasyon sistemi algoritması devreye girmektedir.



Şekil 2. Sistem Mimarisi (System Architecture)



Şekil 3. Ana Program Algoritması (Main Program Algorithm)

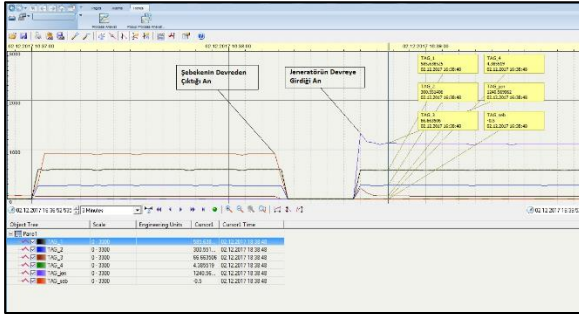


Şekil 4. Alt Program Algoritması (Subprogram Algorithm)

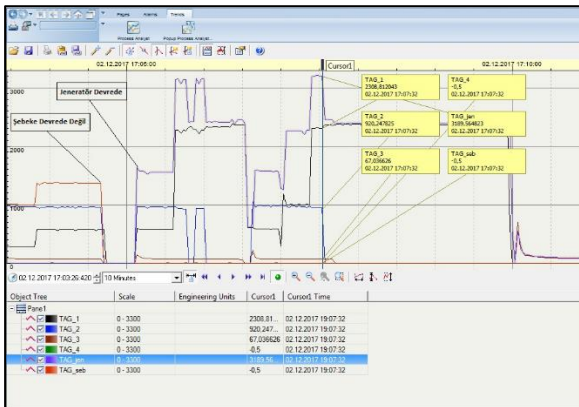
Enerji analizöründen PLC'ye aktarılan veriler izleme bilgisayarına aktarılmaktadır. Burada ölçüm hassasiyeti analizörün özelliğine bağlı olup IEC 61557-12 standardındadır. Analizörden alınan veriler gerçek zamanlı olarak SCADA arayüz ekranına anlık olarak yansıtılmakta ayrıca, 2 saniyelik zaman aralıklarıyla veri tabanına kaydedilmektedir. SCADA arayüz tasarımı için Vijeo Citect yazılımı kullanılmıştır. Grafik ekran tasarlanmadan önce I/O server, trend server, alarm server ve rapor server izleme bilgisayarına kurulmuştur. Tüm serverlar aynı bilgisayarda çalışacak şekilde tanımlanmış ve kullanılan Schneider marka TM241CE40T/U model PLC için ilgili sürücü kurulumu sağlanmıştır. PLC ve izleme bilgisayarı arasındaki haberleşme Ethernet TCP/IP protokolüyle sağlanmıştır. Sonraki süreçte ilgili variable tags, trend tags ve alarmlar tanımlanarak tüm grafik ekranların tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Şebekede enerji kesintisi yaşandığında tesiste aşırı motor yükü olması veya istenmeyen arızalar oluşması neticesinde aşırı yüklenmesi durumunda jeneratörün görevi reddetmemesi için yük alma algoritması devreye girmekte ve öncelik sırasına göre çıkışlara enerji verilmektedir.

Şekil 9' da tüm çıkışların jeneratörün ve şebekenin devreye girme-çıkma anları, Şekil 10' da jeneratör devreye girdikten sonra yük atma durumu görülmektedir.



Şekil 9. Jeneratörün Devreye Girme Durumu (Engaging the generators status)

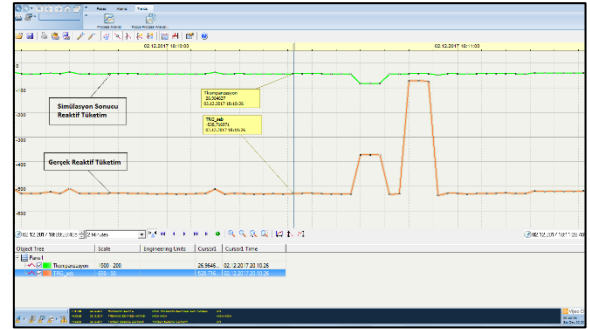


Şekil 10. Yük Atma Durumu (Loading Status)

Şekil 9' da şebekenin devreden çıkmasıyla otomatik olarak jeneratör çalıştır çıkışı aktif hale gelmiştir. Paralel bağlanma şartlarının yerine gelmesi için beklenen süre sonunda jeneratör devreye alınmıştır. Şekil 10' da ise

jeneratörün devreye girmesinden kısa süre sonra yük-1' in aktif güç tüketiminin yaklaşık iki katına çıktığı ve algoritma gereği hızlı bir şekilde yük-2 ve yük-3 için yük atma işleminin gerçekleştiği gözlenmiştir. Bu grafikler incelenirken trend sayfaları için örnekleme süresinin 2 saniye seçildiği göz önünde bulundurulmalıdır.

Uygulama yapılırken laboratuvar ortamında kompanzasyon sistemi kurulmamıştır. Fakat reaktif güç kompanzasyonunu sağlayacak PLC yazılımı tasarlanmış ve çıkışlar fiziksel olarak izlenmiştir. Burada PLC yazılımının içerisinde kompanzasyon sistemi simüle edilmiştir. Şekil 11' de şebeke için gerçek reaktif güç değeri ile simülasyon sonucu üretilen reaktif güç değeri karşılaştırılmıştır.



Şekil 11. Reaktif Güç Gerçek ve Simülasyon (Reactive Power Reality and Simulation)

SCADA sistemi için rapor sayfası da tasarlanmış olup ayrıca trend server için tanımlanan dosya altında da tüm trend taglarının geçmişe dönük bütün değerlerini rapor halinde görüntülemek mümkündür.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (RESULTS AND RECOMMENDATIONS)

Gelecekteki akıllı şebekeler, belirsiz koşullar altında güvenilir ve verimli enerji iletimi için esnek, gözlemlenebilir ve kontrol edilebilir bir şebeke mimarisi gerektirir [13]. Bu durum enerji yönetim yazılımlarının önemini ortaya koymaktadır. Özellikle fosil kökenli yakıtların azlığı ve çevresel faktörlerden dolayı elektrikli araçlar günümüzde yaygınlaşmaya başlamakta ve bu konudaki çalışmalar her geçen gün gelişme göstermektedir. Elektrikli araçların içten yanmalı motorların yerini alabilmesi için ülkelerin enerji altyapıları da değişmelidir. Altyapı olarak birçok bölgede şarj istasyonları kurulmalıdır. Söz konusu şarj istasyonları, aracı şarj ederken aktarılan enerji ücretlendirilmeli ve kayıt altına alınmalıdır. Ayrıca dağıtım şirketleri güç elektroniği dönüştürücülerinden kaynaklı harmoniklerin şebekedeki varlığını kısıtlayıcı önlemler almalı hatta hükümetler konuyla ilgili mevzuatlar çıkarmalıdır. Bu durum enerji dağıtım merkezlerinde THD ve harmoniklerin izlenmesi, arşivlenmesi ve buna bağlı algoritmaların geliştirilmesini zorunlu kılacaktır. Ayrıca özellikle ülkemizde kaçak elektrik kullanımı hem maddi kayıplara sebep olmakta hem de enerji tüketimini gereksiz artırmaktadır. Nitekim

bu çalışma, kaçak kullanım sorununu çözmek amacıyla daha önce yapılmış arduino tipi mikrodenetleyici ve GSM modülleri ile kaçak elektrik kullanımının takibi için prototip çalışmasına [14] katkı sağlayabilir ve daha sonra yapılacak çalışmalarla uygulanabilir bir model ortaya konulabilir. Örneğin bu çalışmada geliştirilen enerji yazılımının bir bölgedeki dağıtım trafo merkezlerine kurulması ve kablolu veri akışı sağlanması ile hem tek merkezden kaçak kullanımlar tespit edilebilir hem de otomatik olarak kaçak kullanılan çıkışlar kapatılarak kontrol sağlanmış olur. Böylelikle kaçak elektrik kullanımının belli oranlarda önüne geçilebilir. Bu bağlamda yapılan çalışma kapsamlı elektrik enerji yazılımı ve kontrolünün gelecek projeksiyonda önemini ortaya koymaktadır.

Bu çalışma Gazi Üniversitesi otomasyon laboratuvarında küçük güçlerde yapılmış olup sistem, endüstriyel uygulanabilirliği olacak şekilde tasarlanmıştır. Çalışmada bir tesisin enerji yönetimi ve akım, gerilim, güç faktörü, $\cos\phi$ (ana harmonik için güç faktörü), güç, frekans ve harmonikler gibi değerlerinin izlenmesi ve arşivlenmesi sağlanmıştır. Bu sayede çalışma, gerçek bir enerji sisteminde minimum arıza oluşumuna ve oluşan arızaların anında tespitine, enerji tasarrufu ile verimliliği arttırmaya, güç tüketiminin yoğun ve pahalı olduğu zaman aralıklarından ucuz olduğu aralıklara kaydırılarak maliyetin azaltılmasına, kritik yüklere kesintisiz ve kaliteli bir şekilde enerji aktarımına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. İnternet: EPDK, Türkiye'nin Elektrik Enerjisi Talep Projeksiyonu, URL: www.enerji.gov.tr, Son Erişim Tarihi: 25.05.2017.
2. Bayındır R., Demirbaş Ş., Bektaş A. ve Çolak İ., "Bir Endüstriyel İşletmede Elektrik Enerjisinin İzlenmesi", *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 24(1-2): 154-164, (2008).
3. Sivrikaya E. ve Özderli E., "Decoupling ve Yük Atma Sistemleri Uygulama Örneği", *II. Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi Bildirileri*, İzmir, (2011).
4. Gajbhiye Y.Y., Pjagtap P. and Helonde J.B., "Lab View Study of Electrical Power Distribution System by Using Simatic S7-300 PLC System", *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*, 3(4): 143-150, (2014).
5. Topuz M. ve Vardar K., "Düşük Maliyetli Bir Gömülü Güç Kalitesi İzleme Sistemi Tasarımı", *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 36: (2016).
6. Kaur K. and Kaur R., "Energy Management System using PLC and SCADA", *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 3(11): 528-531, (2014).
7. Kara M. ve Çelikkol S., "Kritik Altyapılar: Elektrik Üretim ve Dağıtım Sistemleri SCADA Güvenliği", *IV. Ağ ve Bilgi Güvenliği Sempozyumu*, Ankara, (2011).
8. Thamarai P. and Amudhevali R., "Energy Monitoring System USING PLC & SCADAS", *International Journal of Advanced Research in Electrical*, 3(2): 7126-7133, (2014).
9. Yurdabak M. ve Şekkeli M., "Elektrik Dağıtım Şebekelerinde Scada/Dms Sistemlerinin İncelenmesi ve Uygulanması", *KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17(2): 26-31, (2014).
10. Bekiroğlu E. ve Daldal N., "Transformatör Merkezlerinin Güvenlik Amaçlı Uzaktan İzlenmesi ve Otomasyonu", *e-Journal of New World Sciences Academy*, 4(4): 459-470, (2009).
11. Bayındır R., Sağiroğlu Ş., Çolak İ. ve Özbilen A., "İzlenebilir Elektrik Enerjisi Dağıtım Sisteminin Bilgi Güvenliği Açısından Endüstriyel Risklerinin Araştırılması ve Çözüm Önerileri", *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24(4): 715-723, (2009).
12. Rodney H.G., Lee C.H. and Mok V.H., "Automatic Power Meter Reading System Using GSM Network", *The 8th International Power Engineering Conference*, Singapore, (2007).
13. Alagoz B.B., Kaygusuz A. and Karabiber A., "A user-mode distributed energy management architecture for smart grid applications", *Elsevier Energy Journal*, 44: 167-177, (2012).
14. Güngör O., "Kaçak Elektrik Kullanımının GSM Aracılığıyla Takibi" *Elektrik Mühendisleri Odası Bilimsel Dergi*, 4(8): 29-33, (2015)