

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Araştırma Makaleleri / Research Article

	Sayfa No
Uğur S. SELAMOĞULLARI Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Sahip Bir Evin Talep Karakteristiğine Uygun Bir Inverter Tasarımının İncelenmesi Analysis of A Power Inverter Design Considering the Demand Characteristics of A House with Renewable Energy Sources	257-265
ÖZKAN OTKUN Scalar Speed Control of Induction Motors with Difference Frequency	
Farklı Frekans ile İndüksiyon Motorun Skalor Hız Denetimi	267-276
Mehmet Fatih AYCAN Farklı Martenzit Hacim Oranlarında Kırılma Tokluğu Değerlerinin İncelenmesi Investigation on Fracture Toughness Values for Various Martensite Volume Fractions	277-282
Mehmet Yasin DEMİREL, İbrahim KARAAĞAÇ 7075-T6 Alışımının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Tavlama İşleminin Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması Experimental Investigation of Annealing Parameters Effects on Microstructure and Mechanical Properties of 7075-T6 Alloy	283-289
Ahmet Kürşat BİLGİLİ, Ömer AKPINAR, Mustafa Kemal ÖZTÜRK, Süleyman ÖZÇELİK, Ekmel ÖZBAY XRD Vs Raman for Ingan-Gan Structures	
Ingan/Gan Yapılar için XRD-Raman Karşılaştırması	291-296
Hali Karakoç, Aytekin ULUTAŞ, Hamil ÇINÇI B,C/Sic/Al ₂ O ₃ Parçacık Takviyeli Alüminyum Sandwich Kâpük ile Ramor 500 Zırh Çeliğinin Bir Araya Getirilmesi ve Balistik Performansının Araştırılması B,C/Sic/Al ₂ O ₃ Particle Reinforced Aluminum Sandwich Foam and Ramor 500 Armor Steel to be Combined and Investigation of the Ballistic Performance	297-310
Murat TUYAN, Kübra Sevan SOYKAN, İrem NAMAL, Özge ANDİC Mineral Katkı İçeren Kalsiyum Alüminat Çimento Esaslı Harçların Mekanik, Dayanıklılık, Termal ve İyapı Özelliklerinin Araştırılması Investigation of Mechanical, Durability, Thermal and Microstructural Properties of Calcium Aluminate Cement Based Mortars Containing Mineral Admixtures	311-320
Mustafa HARMAN, Hakan ADA, Cemil ÇETNKAY Oste 420 TM Çeliğinin MAG Kaynak Yöntemiyle Kaynaklanmasında Dolgu Metali Türünün Metalürjik ve Mekanik Özelliklere Etkisinin Belirlenmesi Determination of the Effect of Filler Metal Type on Metallurgical and Mechanical Properties In Welding of Oste 420 TM Steel by MAG Welding Method	321-332
Abdulkadir KARACI Fiziksel ve Motor Engelli Çocukların Öz Bakım Problemlerinin Derin Sinir Ağları ile Sınıflandırılması Self-Care Problems Classification of Children with Physical and Motor Disability by Deep Neural Networks	333-341
Gazemur KASAP OKUT, Mustafa ALTINOK Doğal Ahşap Taneni ile Modifiye Edilmiş Bazı Ağaç Türlerinde Çürümeye Karşı Direncin İncelenmesi Investigation on the Decay of Some Wood Type Modified with Natural Wood Tannin	343-350
Sinan ATIL, Adnan ERGİN Analysing Mechanical Behaviors of Carbon Fiber Reinforced Silicone Matrix Composite Materials After Static Folding Carbon Fiber Takviyeli Silikon Matrisli Kompozit Malzemelerin Statik Katlama Sonrası Mekanik Davranışlarının Analiz Edilmesi	351-359
Mehmet Barış Can ULKER Constitutive Modelling of Monotonic Behavior of Clays: Mathematical Formulation, Numerical Implementation and Experimental Verification Çiğlerin Statik Bütme Davranışlarının Modellemesi: Matematiksel Formülasyon, Sayısal Uygulama ve Deneysel Doğrulama	361-369
Himmet Erdi TANÜRÜN, İsmail ATA, Mehmet Emin CANLI, Adem ACIR Farklı Açıklık Oranlarındaki NACA-0018 Rüzgâr Türbini Kanat Modeli Performansının Sayısal ve Deneysel İncelenmesi Numerical and Experimental Investigation of NACA-0018 Wind Turbine Aerofoil Model Performance for Different Aspect Ratios	371-381
Muharrem PUL, Volkan BAYDARÖGLÜ B,C/Sic Katkılı Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Mekanik Özelliklerin İncelenmesi ve Balistik Performanslarının Modellemesi Investigation of Mechanical Properties of B,C/Sic Additive Aluminum Based Composites and Modeling of Their Ballistic Performances	383-392
Ali Can YİĞİT, A. İbrahim ATILGAN Bir Buhar Kazanındaki Kızdırıcı – Ateşperator Sisteminin Mathecad Yazılım ile İteratif İsl Tasarım Modellemesi ve Performans Analizi Iterative Thermal Design Modelling and Performance Analysis of Superheater-Desuperheater System at A Steam Boiler Using Mathecad Software	393-408
Hasan ÇİÇEKLİ, İhsan KARACAN, Ahmet GÖKÇEN Current Operational Amplifier Based Voltage-Mode MOS-C All-Pass Filter and its Application Akım İşlemsel Kuvvetlendiricisi Tabanlı Gerilim-Modlu MOS-C Tüm-Geçiren Süzgeç ve Uygulaması	409-414
Osama M. İRFAN, Abdülaziz S. ALABOODI On the Compression Properties and Erosion-Corrosion Behavior of Al 6061/15%Si ₃ N ₄ Composite	415-425
İbrahim ÜNAL, Sevil KARATAY, Ali YEŞİL, Aybaba HANÇERLİOĞULLARI Seasonal Variations of Impedance in the Ionospheric Plasma İyonosferik Plazmadaki İmpedansın Mevsimsel Değişimi	427-433
Fulya ERDEMİR, Cengiz ELDEM Bir Döküm Atölyesindeki Çalışma Duruşlarının Dijital İnsan Modelleme Tabanlı REBA Yöntemi ile Ergonomik Analizi Ergonomic Analysis of Working Postures in a Foundry Workshop by Digital Human Modeling Based Reba Method	435-443
Hamdi Tolga KAHRAMAN, Sefa ARAS, Yusuf SÖNMEZ, Uğur GÜVENÇ, Eyüp GEDİKLİ Analysis, Test and Management of the Meta-Heuristic Searching Process: An Experimental Study on SOS Meta-Sezgisel Arama Sürecinin Analiz, Test ve Yönetimi: SOS Üzerine Deneysel Bir Çalışma	445-455
Yusuf ÖZCATALBAŞI (Derleme Makale / Review Article) Çeliklerin İşlenebilirliği: Kimyasal Bileşim, Mikroyapı, Mekanik Özellikler ve İşlenebilirlik İlişkisi Machinability of Steels: The Relationship Between Machinability and Chemical Composition, Microstructure and Also Mechanical Properties	457-482
Cetin KARAHAN, Ashhan TÜFEKÇİ Blok zincir Teknolojisinin Dijital Kimlik Yönetiminde Kullanımı: Bir Sistematik Haritalama Çalışması Blockchain Technology for Digital Identity Management: A Systematic Mapping Study	483-496
Hali Karikoç, İbrahim Okan ERDEN, Mustafa AYDIN Diffusion Welding of Al-A-Si ₃ N ₄ Composite Materials Al-A-Si ₃ N ₄ Kompozit Malzemelerin Difüzyon Kaynağı	497-503
İlker Şahin AKTAŞ, Tayfun MENLİK, Adnan SÖZEN Akıllı Bir Şebekedeki Risk İndikatörlerinin Bulank Analitik Hiyerarşi Prosesi ile Modellemesi Modelling of Risk Indicators in A Smart Grid by Fuzzy Analytic Hierarchy Process	505-513
Fatih KARİK, Ümit İSKENDER, Cuma KILINC Turkey's Energy Efficiency and its Relative Position Against OECD and BRICS Countries Türkiye'nin Enerji Etkinliği ve OECD ve BRICS Ülkeleri Arasındaki Görelî Konumu	515-525
İsmail ATA, Adem ACIR Hava Akışkanlı Güneş Kolektöründe Isı Transferi İyileştirilmesine Etki Eden Parametrelerin Taguchi Metodu ile Optimizasyonu Optimization of the Parameters Affecting the Heat Transfer Enhancement on the Solar Air Collector with Taguchi Method	527-535
Ming CHENG, Xinfu NING, Xinkai ZHU, Yubin WANG Tek ve Çift Kutuplu İçerikli Statorlu Olan 10 MW HTS Tahrikli Çift Statorlu Doğrudan Tahrikli Rüzgâr Jeneratörlerinin Uyarma Çalışma Noktasının Seçimi Selection of Excitation Operating Points of 10 MW HTS Exciting Double Stator Direct-Drive Wind Generators Having Single and Double Polarity Inner Stator	537-545
Üzeyir PALA Investigation of Thermal Comfort for Bus Passengers During A Cooling Test Inside A Climatic Chamber Klimatik Odada Yapılan Bir Sığıtma Testi Sırasındaki Otobüs Yolcuları İçin Termal Konfor Değişiminin Araştırılması	547-555
Esra SOĞUT, O. Ayhan ERDEM Endüstriyel Kontrol Sistemlerine (Scada) Yönelik Siber Terör Saldırı Analizi Cyber Terror Attack Analysis for Industrial Control Systems (Scada)	557-566
Eda Yive Sare AKBAY, Berkay DE RELİ, Oğuz TURGUT The Effect of Turbulence Model and Nanofluid on Fluid Flow and Heat Transfer in A Narrow Rectangular Duct Dar Dikdörtgenel Bir Kanalda Türbülans Modelinin ve Nanoakışkanın Isı Transferine ve Akışkan Akışına Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi	567-579
Barış İŞYARLAR, Tayfun MENLİK, Adnan SÖZEN Evaluation of Applicability of Thermophotovoltaic System in Combi Boiler	581-586
Bekir YELMEN, Metin DAĞTEKİN, Tarkan M. ÇAKIR Mersin İlinin Organik Atık Potansiyelinin Biyogaz Enerji Üretimine Etkisi The Effect of Organic Waste Potential of Mersin Province on Biogas Energy Production	587-595

POLİTEKNİK DERGİSİ

Journal of Polytechnic

POLİTEKNİK DERGİSİ

VOLUME / CİLT 23 NUMBER / SAYI 2 JUNE / HAZİRAN 2020

Politeknik Dergisi

Journal of Polytechnic

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

Yayın Yönetmeni / Publishing Manager
Prof. Dr. Süleyman TEKELİ
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
Doç. Dr. Serhat KARYEYEN
Gazi Üniversitesi / Gazi University

YARDIMCI EDİTÖRLER/ASSOCIATE EDITORS

Prof. Dr. Jose Manuel LOPEZ-GUEDE, University of the Basque Country
Prof. Sanjeevikumar PADMANABAN, University of Johannesburg
Prof. Dr. Josep M. GUERRERO, Aalborg University
Prof. Dr. Hacı Bayram KARADAĞ, İnönü Üniversitesi
Prof. Dr. İhsan ALP, Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Hilal KURT, Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. İbrahim ÇİFTÇİ, Çankırı Karatekin Üniversitesi
Prof. Dr. Figen BALO, Fırat Üniversitesi
Prof. Dr. Zafer TEKİNER, Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Hakan KESKİN, Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Ahmet DURGUTLU, Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Murat YÜCEL, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Bünyamin CİYLAN, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Mustafa ÖZER, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Hamit SOLMAZ, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Hülya DURMUŞ, Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Kasım SERBEST, Sakarya Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Amjad ANVARI-MOGHADDAM, Aalborg University

YAYIN DANIŞMA KURULU/EDITORIAL ADVISORY BOARD

Abid ABU-TAIR , Berzeit University	Murat HOŞÖZ , Kocaeli Üniversitesi
Adel NASİRİ , University of Wisconsin Milwaukee	Musa ATAR , Gazi Üniversitesi
Ali Kemal YAKUT , Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi	Mustafa AKTAŞ , Gazi Üniversitesi
Arcan DEREÇİOĞLU , Orta Doğu Teknik Üniversitesi	Myung Hyun KİM , Kyung Hee University
Arif WANI , California State University	Nadire Şule ATILGAN , Hacettepe Üniversitesi
Ayhan ÖZÇİFTÇİ , Aksaray Üniversitesi	Nizamettin KAHRAMAN , Karabük Üniversitesi
Bekir Sami YILBAŞ , King Fahd University	Nobumasa MATSUI , Nagasaki University
Dilek KUMLU TAŞ , Dokuz Eylül Üniversitesi	Nusret AS , İstanbul Üniversitesi
Engin ÖZDEMİR , Kocaeli Üniversitesi	Oğuz TURGUT , Gazi Üniversitesi
Erol ARCAKLIOĞLU , Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi	Osman İSIKAN , Marmara Üniversitesi
Farzollah MIRZAPOUR , University of Zanjan	Peter LUND , Helsinki University of Technology
Hakan YAVUZ , Çukurova Üniversitesi	Ramazan BAYINDIR , Gazi Üniversitesi
Hamit SARUHAN , Düzce Üniversitesi	Ramazan KÖSE , Dumlupınar Üniversitesi
Hani H.W.SAIT , King Abdulaziz University	Ramazan YILMAZ , Sakarya Üniversitesi
Henryka Danuta STRYCZEWSKA , Politechnika Lubelska	Recep ÇALIN , Kırkkale Üniversitesi
Hüseyin AKILLI , Çukurova Üniversitesi	Recep YAMANKARADENİZ , Bursa Uludağ Üniversitesi
Hüseyin Rıza BÖRKLÜ , Gazi Üniversitesi	Rodica MILICI , Stefan cel Mare Suceava University
İbrahim DİNÇER , University of Ontario, Institute of Technology	Saffa B. RIFFAT , Nottingham University
İbrahim SEFA , Gazi Üniversitesi	Sare SAHİL , Gazi Üniversitesi
İhsan KORKUT , Gazi Üniversitesi	Saw Sor HEOH , INTI International University
İlhami ÇOLAK , İstanbul Gelişim Üniversitesi	Sing LEE , Institute for Plasma Focus
İlker USTA , Hacettepe Üniversitesi	Souad A.M.ALBATHI , International Islamic University of Malaysia
İshak KARAKAYA , Orta Doğu Teknik Üniversitesi	Tayfun MENLİK , Gazi Üniversitesi
Jamal KHATIB , University of Wolverhampton	Turgay AKBULUT , İstanbul Üniversitesi
Jerzy SMARDZEWSKI , Ponzan University	Ulvi ŞEKER , Gazi Üniversitesi
John KINUTHIA , University of South Wales	Yasin VAROL , Fırat Üniversitesi
Mahmood GHORANNEUISS , Azad University	Yılmaz ARUNTAŞ , Gazi Üniversitesi
Metin GÜRÜ , Gazi Üniversitesi	Yunus ÇENGEL , Nevada Üniversitesi
Metin İPEK , Sakarya Üniversitesi	

Cilt / Volume : 23	Sayı / Issue : 2	Haziran / June : 2020
<p>Politeknik Dergisi Gazi Üniversitesi tarafından yılda dört sayı olarak yayınlanmaktadır / Journal of Polytechnic has been published four issues per year by Gazi University</p>		

BU SAYIYA (CİLT 23 SAYI 2) KATKI VEREN HAKEMLER (REVIEWERS)		
Abdulmecit GÜLDAŞ	Melika ÖZER	Tayfun MENLİK
Abdülkadir GÜMÜŞÇÜ	Muhammed Said FİDAN	Teyfik DEMİR
Adnan SÖZEN	Murat HOŞÖZ	Ugur CALIGULU (2 kez)
Ahmet Ali SÜZEN	Murat Yavuz SOLMAZ	Ulvi ŞEKER
Ali Hakan İSİK	Mustafa Bahadır ÖZDEMİR	Ümit CAN
Ali Kaya GÜR	Mustafa İLBAŞ	Yahya DOĞU
Ali Uğur ÖZTÜRK	Mustafa ÖZER	Yelda AKÇİN
Bilge DEMİR (2 kez)	Müjde ALTIN	Yusuf USTA
Burak SALTUK	Naim Süleyman TING	Zeynep Bala DURANAY
Derya İDE	Nalan YILDIZ	Zuhal AKYÜREK
Eda AKMAN AYDIN	Nazlı Gülüm MUTLU	
Engin GEDİK	Neslihan TÜRKMEÑOĞLU BAYRAKTAR	
Erol KURT	Nihat IŞIK	
Ertuğ AYDIN	Nilhan TAŞKIN	
Fatih Emre BORAN	Nizamettin KAHRAMAN	
Fatih KAHRAMAN	Oğuz TURGUT (2 kez)	
Garip ERDOĞAN	Onur ERTUĞRUL	
Hacer ATAR YILDIZ	Osman PERÇİN	
Hacer KARACAN	Refik SAMET	
Hasan KOTAN	Sabri KOCER	
Hasan SÖZEN	Sadettin ŞAHİN	
Hayri ARABACI	Said Mahmut ÇINAR	
Hilal KURT	Sami ACAR	
İbrahim ÇİFTÇİ	Sare ÇELİK	
İhsan KORKUT	Seçil ÇELİK ERBAŞ	
Kubilay ASLANTAŞ	Seda DEMİR	
Kurtuluş BORAN	Selçuk KILINÇ	
Lütfü NAMLI	Serhat DUMAN	
Mehmet İÇDUYGU	Seyfettin BAYRAKTAR	
Mehmet ÖZKAYMAK	Süleyman GÜNDÜZ	

Yazışma Adresi / Correspondence Address :

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

Tel : 0312-202 34 12

Fax : 0312-212 00 59

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

Teknik Sorumlu / Technical Manager: **Erdem ÇİFTÇİ**

Dizgi / Compositor: **İdris ÖZÇELİK**

e - ISSN : 2147-9429



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



Yenilenebilir enerji kaynaklarına sahip bir evin talep karakteristiğine uygun bir inverter tasarımının incelenmesi

Analysis of a power inverter design considering the demand characteristics of a house with renewable energy sources

Yazar (Author): Uğur S. SELAMOĞULLARI

ORCID: 0000-0002-2272-4355

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Selamoğulları U.S., “Yenilenebilir enerji kaynaklarına sahip bir evin talep karakteristiğine uygun bir inverter tasarımının incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 23(2): 257-265, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.521345

Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Sahip Bir Evin Talep Karakteristiğine Uygun Bir İnverter Tasarımının İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Uğur S. SELAMOĞULLARI*

Elektrik Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

(Geliş/Received : 02.02.2019 ; Kabul/Accepted : 28.03.2019)

ÖZ

Dünyamızın artan enerji gereksinimi yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmıştır. Özellikle, güneş ve rüzgar enerjili güç sistemleri şebekeden bağımsız/şebeke bağlantılı evsel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına sahip bir evde ihtiyaç duyulan sabit genlik ve frekansa sahip AC gerilimin elde edilmesinde bir evirici (inverter) devre kullanılmaktadır. Bir evin elektrik güç kullanımına ait ölçüm verisi incelendiğinde ev elektrik talebinin gün boyunca değişken olduğu ve büyük bir oranda düşük güçlerde kaldığı görülmüştür. Bu yüzden, böyle bir ev için inverter devresinin özellikle düşük güç bölgesindeki verimin iyileştirilmesi gereklidir. Bu çalışmada, inverter devresinde kullanılan LC filtre devresinde bulunan indüktör değerinin yük akımına göre değişken olmasının inverter devresinin verimi üzerine etkisi incelenmiştir. Kullanılan yöntemle inverter devresinden çekilen akımdaki dalgalanmanın düşürülebildiği ve inverter devresinin düşük güçlerdeki veriminin büyük oranda iyileştirilebildiği gösterilmiştir. Daha verimli bir inverter devresi ile yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerji daha etkin bir şekilde kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir enerji, inverter tasarımı, evsel elektrik güç talebi, verim artışı, değişken filtre indüktansı.

Analysis of a Power Inverter Design Considering the Demand Characteristics of a House With Renewable Energy Sources

ABSTRACT

Increasing energy demand in the world has shifted the interest to renewable energy sources. Specifically, solar and wind power systems for both grid connected and stand-alone homes have become a widespread application. An inverter is used to obtain AC voltage with fixed amplitude and frequency in a renewable energy supplied residential house. When measured residential electrical power demand data is analyzed, it is seen that the demand varies within a wide range during a day and stays at low power levels most of the day. Thus, the light load efficiency of inverter circuit must be improved for residential applications. In this study, the effect of variable inductor use-with reference to the load current- at the inverter LC filter circuit on the inverter light load efficiency is investigated. It is shown that the inverter light load efficiency can be considerably improved due to the reduction of current ripple drawn from the inverter. With more efficient inverter design, the energy from renewable sources can be utilized more efficiently.

Keywords: Renewable energy, inverter design, residential electrical power demand, efficiency improvement, variable filter inductance.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

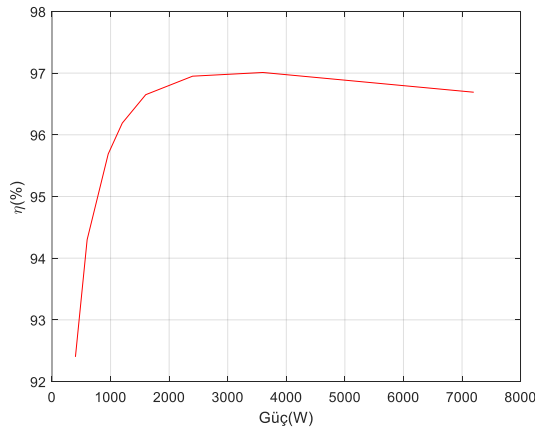
Dünyamızın artan enerji gereksinimi yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmış son yıllarda bu alandaki çalışmalarda büyük bir artış olmuştur. Özellikle, güneş ve rüzgar enerjili güç sistemleri hem şebekeden bağımsız hem de şebeke bağlantılı evsel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarından beslenen bir ev dikkate alınmıştır. Evin mümkün olduğunca şebekeden bağımsız olarak yenilenebilir enerji kaynaklarından beslendiği ancak gereklilik halinde şebeke bağlantısı üzerinden beslenebildiği kabul edilmiştir. Yenilenebilir

enerji kaynaklarından (rüzgar, güneş gibi) elde edilen AC/DC enerjinin, ev için gerekli olan sabit genlik ve frekansa sahip AC gerilime dönüştürülmesinde bir evirici (inverter) devre kullanılmaktadır. İnverter devrelerinde anahtarlama elemanı olarak yarı iletken anahtarlar (IGBT, MOSFET gibi) kullanılmaktadır. İnverter devrelerinde kullanılan bileşenlerin iç dirençleri nedeniyle ortaya çıkan kayıpların yanında yarı iletken anahtarlar ideal olmadıklarından kesim (turn-off), iletim (conduction) ve kapama (turn-on) anlarında da kayıplar ortaya çıkmaktadır. İnverter devresindeki toplam kaybın inverterden çekilen güce göre değişimi lineer olmadığından inverter devrelerinin verimleri yüklenme ile değişkenlik göstermektedir. Tipik bir inverter verim eğrisi Şekil 1'de verilmiştir [1]. Görüldüğü gibi düşük

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : selam@yildiz.edu.tr/ugursavas@yahoo.com

güçlerde verim değerleri de düşük iken yüklenme ile verim artmakta ve belirli bir maksimum yüklenme noktasından sonra verim değeri yine düşüşe geçmektedir.



Şekil 1. Tipik bir inverter devresine ait verim eğrisi (Typical efficiency curve of an inverter)

İnverter devreleri genellikle belirli bir güç aralığında yüksek verime sahip olacak şekilde ve sağlaması gereken maksimum güç değeri dikkate alınarak tasarlanmaktadır. Ancak, bir sonraki bölümde ele alınacağı gibi tekil bir evin elektrik güç talebi geniş bir aralıkta değişmekte ve büyük oranda düşük güçlerde kalmaktadır [1]. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynaklarından beslenen bir evde kullanılacak inverter devresinin veriminin özellikle düşük güç bölgesinde iyileştirilmesi gereklidir [1]-[3]. Bu amaçla, bu çalışmada evsel güç talebi karakteristiğini dikkate alarak inverter devresinin çıkışında kullanılan LC filtre devresindeki L değerinin yük akımına göre değişken olması durumunun inverter devresinin düşük güç bölgesindeki verimi üzerine etkisi incelenmiştir.

Literatürde değişken L değerinin elde edilmesi ile ilgili pek çok çalışma vardır. Kislovski tarafından yapılan çalışmada değişken indüktörün çalışma prensibi açıklanmıştır [4]. Değişken indüktör, ihtiyaç duyulan indüktans değerinin elde edilmesi için kullanılan sargıya ek olarak bir kontrol sargısının kullanılması ve bu kontrol sargısından geçen DC akımın (DC bias) ayarlanması ile elde edilmektedir [4]-[5]. Perdigao vd. tarafından yapılan çalışmada değişken değerli indüktörlerin ve transformatörlerin aydınlatma devre sürücülerinde kullanımı üzerine kapsamlı bir literatür özeti verilmiştir. Bu çalışmada değişken indüktörün temelleri ve çalışma prensipleri hakkında bilgi de verilmiştir [6]. Değişken indüktör yükseltici PFC (boost PFC) devrelerin düşük güçlerdeki verimini arttırmaya yönelik uygulamalarda [7]-[8], çok sıralı LED lambalar için dal akımlarının eşitlenmesinde [9]-[10], rezonans anahtarlamalı kondansatörlü LED sürücü devresinde ışık şiddetinin ayarlanmasında [11], tek kademeli LED sürücü devresinde ışık şiddetinin kontrol edilmesinde [12], elektronik balast kontrolünde [13],[14],[15], yüksek frekanslı rezonans güç devrelerinde [16], DC-DC dönüştürücülerde yumuşak anahtarlama sağlamada [17]-[18], düşürücü (buck) DC-DC dönüştürücü devresinin

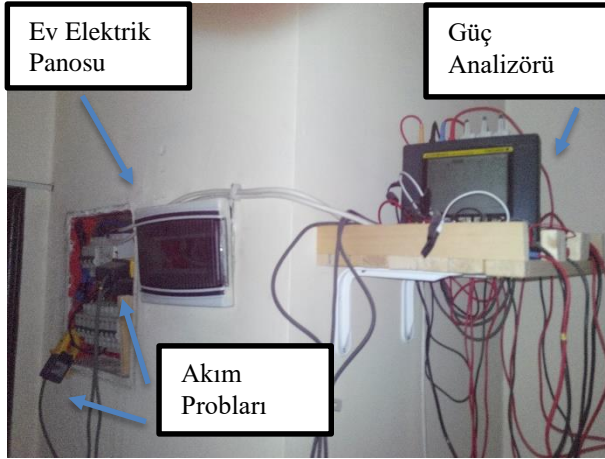
düşük ve orta yüklenme bölgelerindeki veriminin iyileştirilmesinde [19], yüksek güç yoğunluklu çift yönlü DC-DC dönüştürücünün geniş yük aralığında veriminin iyileştirilmesinde [20], elektrik güç sistemlerinde reaktif güç kompanzasyonu uygulamalarında [21]-[22] ve değişken hızlı motor sürücü devrelerinde daha iyi filtreleme ve sürüş etkisi elde etmek amacıyla kullanılmıştır [23]. Ahmed ve diğ. ve Kim ve diğ. tarafından yapılan çalışmalarda DC-DC dönüştürücü devrelerde kullanılan değişken indüktör davranışını elde etmek amacı ile MR (magnetoheological) sıvısının kullanımı incelenmiştir [20], [24]. Stenglein ve diğ. ve Ge ve diğ. tarafından yapılan çalışmalarda sırasıyla basamaklı ve 2D hava aralığı kullanımları ile değişken indüktör davranışının elde edilmesi incelenmiştir [25]-[26]. Perdigao ve diğ. ve Beraki ve diğ. tarafından yapılan çalışmalarda DC bias kullanılarak elde edilen değişken indüktör prototipinin elektrikli araçlarda kullanılan çift yönlü DC-DC dönüştürücülerde kullanımı incelenmiştir [27]-[28]. Değişken indüktör yapısı ile indüktör tasarımında kullanılan nüve malzemesinde %50'ye yakın azalma elde edilirken [27], akım dalgalanmasında yaklaşık %40 azalma elde edilmiştir [28].

Bu çalışmada literatürde verilen çalışmalardan farklı olarak inverter devresi çıkışında kullanılan LC filtre devresinde yük akımına göre değişen L kullanılmasının inverter devresinin özellikle düşük güçlerdeki verimi üzerine etkisi benzetim çalışması ile incelenmiştir. Böylece, bir evin yük karakteristiğine uygun bir inverter tasarımı elde edilmiştir.

Makalenin ikinci bölümde Türkiye'de 3 kişilik bir ailenin evsel elektrik güç tüketimine ait ölçüm sonuçlarının analizi verilmiştir. Evsel yük karakteristiğinin önemli özelliklerine dikkat çekilmiş ve bu tip bir evde kullanılacak inverter devresinin özellikle düşük güçlerde yüksek verime sahip olması gerekliliği ortaya konmuştur. Üçüncü bölümde benzetim çalışmalarının sonuçları verilmiştir. Elde edilen verim eğrileri karşılaştırılmıştır. Dördüncü bölümde ölçümden elde edilen yük talebi kullanılarak önerilen inverter tasarımı ile elde edilebilecek enerji kazanım analizi yapılmıştır. Son kısımda sonuçlar verilmiştir.

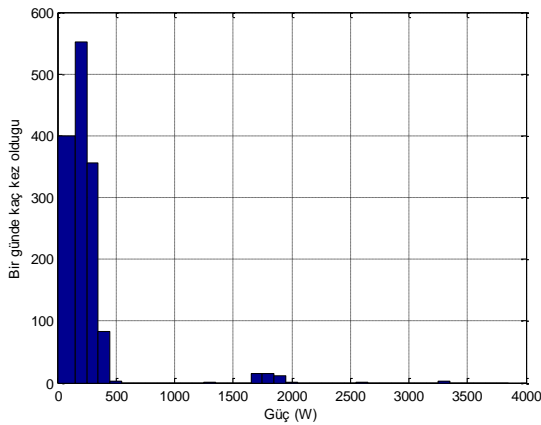
2. EVSEL ELEKTRİK GÜÇ KULLANIMININ ÖLÇÜMÜ (MEASUREMENT OF HOUSEHOLD ELECTRIC POWER USE)

Bir eve ait elektrik güç talebinin değişimini elde etmek amacı ile YOKOGAWA CW240 güç analizörü kullanılarak İstanbul, Türkiye'de yaşayan 3 kişilik üç kişilik bir aileye ait evde Şekil 2'de fotoğrafı verilen ölçüm sistemi kurulmuştur. Ölçüm yapılan evin girişine üç fazlı besleme gelmektedir ve yükler üç faza dağıtılmıştır. Her bir faza ait aktif güç ölçümünü yapabilmek amacı ile 3 adet akım probu kullanılmıştır. Gerilim ölçümleri için her bir faz-nötr gerilimi güç analizörüne doğrudan bağlanmıştır. Evin toplam aktif güç kullanımı her bir faza ait aktif güçlerin toplamıdır.



Şekil 2. Evsel elektrik güç tüketiminin ölçümü için kurulan sistem (Experimental setup to measure residential electrical power consumption)

Şekil 3'te ölçüm sonuçlarından elde edilen bir günlük aktif güç tüketimine ait histogram verilmiştir. Görüldüğü gibi maksimum güç tüketimi 3.5kW civarında iken güç tüketimi gün boyunca yüksek bir oranda 500W altında kalmaktadır.



Şekil 3. Bir evin günlük elektrik güç talebine ait histogram (Histogram of daily residential electrical power demand)

Çizelge 1'de belirli bir güç aralığındaki evsel elektrik güç talebinin yüzde oranları verilmiştir. Burada dikkat çeken nokta bir evdeki elektrik güç talebinin 24 saatin yaklaşık 23 saatinde 0-500 W aralığında kalmasıdır. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynaklarından beslenen böyle bir evde kullanılacak inverter devresinin veriminin özellikle düşük güç bölgesinde iyileştirilmesi oldukça önemlidir. Literatürde bu probleme dikkat çekilmiştir ve hibrit anahtar kullanımına yönelik çözümler önerileri incelenmiştir [1]-[3].

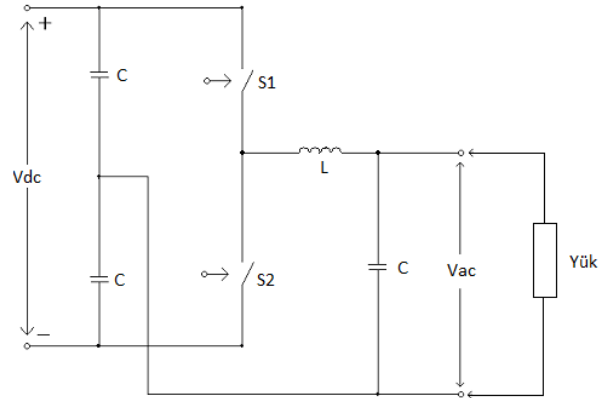
Çizelge 1. Bir evin günlük elektrik güç kullanımının zaman olarak dağılımı ve karşılık gelen yüzde değerleri (Calculated time and percentage values for different power ranges for daily residential electrical power consumption)

Güç (W)	Zaman (Saat)	Yüde (%)
$P \leq 100$	4.48	18.68
$100 < P \leq 200$	7.26	30.28
$200 < P \leq 300$	8.13	33.89
$300 < P \leq 400$	2.94	12.29
$400 < P \leq 500$	0.38	1.60
$P > 500$	0.78	3.26

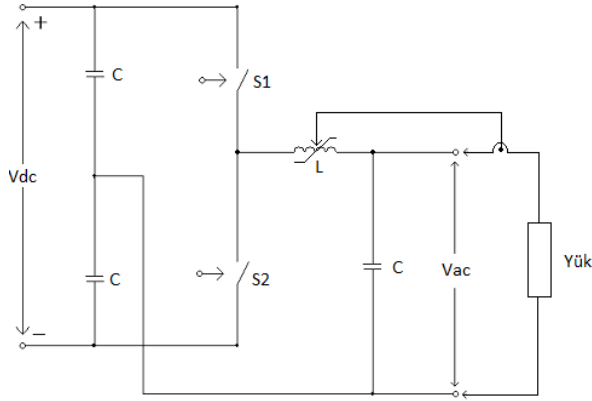
Böyle bir ev için genel olarak her evde bulunan elektrikli cihazların nominal güç değerleri dikkate alınarak elde edilen maksimum yüklenme değeri yaklaşık 10kW olmaktadır [29]. Bir evde bulunan yüksek güç tüketimine sahip yükler rezistif karakteristiğe sahip olduklarından (su ısıtıcısı, ütü, fırın, vb.) yüksek güç kullanım zamanlarında evin toplam güç faktörünün yaklaşık 1 olduğu kabul edilebilir. Bu nedenle, görünür güç yerine aktif güç değeri kullanılmıştır. Dolayısıyla, kullanılacak inverter devresi yaklaşık 10kW maksimum gücü karşılayabilecek şekilde tasarlanmalıdır. Ancak, Çizelge 1'den görüldüğü gibi inverter devresi kullanım süresinin büyük bir bölümünde 0-500W aralığında çalışacaktır. Bu nedenle, inverter devresinin özellikle düşük güçlerdeki verimi iyileştirilmelidir.

3. BENZETİM ÇALIŞMASI (SIMULATION STUDY)

Önerilen yük akımına göre değişen indüktör kullanımının inverter devresinin verimi üzerine etkisini incelemek amacı ile bir yarım köprü inverter devresi kullanılarak hem sabit değerli L durumu için hem de yük akımına göre değişen L durumu için PSIM programı kullanılarak benzetim çalışması yapılmıştır. Sabit L durumuna ve yük akımına göre değişen L durumuna ait devrelerin blok diyagramları sırasıyla Şekil 4'te ve Şekil 5'te verilmiştir.

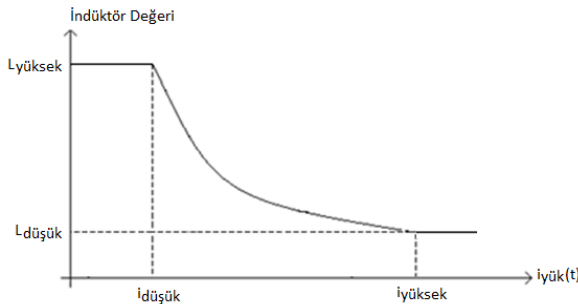


Şekil 4. Sabit L kullanılan filtre devresine sahip yarım köprü inverter devresi (Half bridge inverter circuit with constant filter inductor)



Şekil 5. Yük akımına göre değişen L kullanılan filtre devresine sahip yarı köprü inverter devresi (Half bridge inverter circuit with variable filter inductor with respect to load current)

Önerilen indüktör-yük akımı grafiği Şekil 6'da verilmiştir. Filtre devresinde kullanılan indüktör değerinin yük akımına göre nonlineer değişimi ile (düşük yük akımlarında yüksek L değerleri) inverter devresinden çekilen akımdaki dalgalanma sınırlandırılmış olacaktır, anahtar kayıpları ve devre elemanları iç dirençlerinde oluşan i^2R kayıpları azaltılacaktır. Böylece, inverter devresinin özellikle düşük güçlerdeki verimi önemli oranda iyileştirilebilecektir. Sinüzoidal olarak değişen bir yük akımını düşünüldüğünde, önerilen yöntemde yük akımının düşük değerlerinde yüksek L değeri devrede iken yük akımı tepe değerine yaklaştıkça L değeri küçülmektedir. Benzetim çalışmasında değişken L değerinin yük akımının belirli bir değerine kadar sabit kaldığı, daha sonra üstel bir şekilde azaldığı ve sonrasında yine sabit bir değerde kaldığı kabul edilmiştir. Benzetim çalışmasında $L_{yüksek} = 500\mu H$, $L_{düşük} = 250\mu H$, $i_{düşük} = 5A$, $i_{yüksek} = 10A$ olarak kabul edilmiştir.



Şekil 6. Filtre devresindeki L değerinin yük akımına göre değişimi (Variation of L value of filter circuit with respect to load current)

Bir indüktör için herhangi bir zaman aralığında akımın zamana göre değişimi 1'deki gibi ifade edilebilir:

$$\frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{\Delta V}{L} \quad (1)$$

1'den görüldüğü gibi inverter devresindeki anahtarlama frekansı, yük uçlarındaki gerilimin efektif değeri ve DC bara gerilimi belirlendikten sonra incelenen inverter devresinden çekilen akımdaki dalgalanma L değerinin değişimi ile kontrol edilebilir hale gelmektedir.

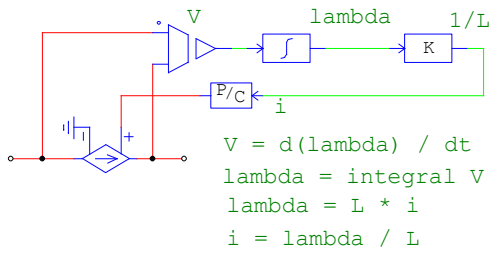
Önerilen yük akımına göre değişken L kullanımının inverter devresinin verimi üzerine etkisini incelemek için özellikle güç elektroniği devrelerinin benzetimi için tasarlanmış PSIM programında yarı köprü inverter devresine ait benzetim çalışmaları yapılmıştır. Anahtarlama frekansı 20 kHz ve ölü zaman $1\mu s$ olarak alınmıştır. Yarı köprü inverter devresinde 220Vrms çıkış gerilimi elde edebilmek amacı ile DC bara gerilimi 800V olarak seçilmiştir. Böylece, yaklaşık 0.8 modülasyon indeksi kullanılarak 220Vrms çıkış gerilimi elde edilebilmektedir. Sabit L değerli filtre devresindeki elemanların değerleri $L=250\mu H$ ve $C=10\mu F$ olarak hesaplanmıştır [30]. Yarı iletken anahtar olarak FGT40N120SMD anahtarına ait PSIM modeli oluşturulmuş ve benzetim çalışmasında kullanılmıştır [31]. Amacımız belli bir çalışma noktasında kararlı hale ulaştıktan sonra verim hesabı olduğundan, benzetim çalışmasında açık çevrim sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu kullanılmıştır. Her bir yüklenme durumu için inverter devresinin çıkışında hem sabit L değerli hem de değişken L değerli çıkış filtresinin bulunması durumları için yük uçlarındaki gerilimin 220Vrms olması sağlanmıştır. Böylece, inverter devresinin çıkış gücünün her bir durum için aynı olması sağlanmıştır.

Bir eve ait güç faktörü de gün boyunca değişiklik göstermektedir. Özellikle düşük güç kullanımının olduğu zaman aralığında (0-500W) en temel yük olarak buzdolabı karşımıza çıkmaktadır. Yapılan ölçümlerde düşük güçlerde güç faktörünün 0.8 civarında olduğu görülmüştür. Ancak, evin günlük güç faktörünün büyük bir zaman aralığında 1 değeri civarında kaldığı görülmüştür. Benzetim çalışmasında güç faktöründeki değişimi dikkate alabilmek amacı ile özellikle düşük güç bölgesinde (0-500W aralığında) güç faktörünün 0.8 olduğu kabul edilmiştir. 500W üzerindeki yüklenmeler için güç faktörü 1 olarak kabul edilmiştir. Güç faktöründeki değişimi elde etmek amacı ile inverter devresinin çıkışında seri bağlı bir RL yükü kullanılmıştır. Güç faktörünün 1 olması durumu için inverter devresinin çıkışında R yükü kullanılmıştır.

Verim hesabında her bir devre için DC bara gerilimi ile DC baradan çekilen akımın çarpımının ortalaması alınarak giriş gücü hesaplanmıştır. Yük tarafında harcanan aktif çıkış gücü yük uçlarındaki gerilim ile yükten geçen akımın anlık çarpımının bir periyot boyunca ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Her bir yüklenme durumu için çıkış gücünün giriş gücüne oranı alınarak verim değerleri elde edilmiştir. Benzetim çalışmasında yarı iletken anahtar modeli haricindeki tüm elemanlar idealdir. Bu nedenle, elde edilen sonuçlar önerilen değişken indüktör kullanımının yarı iletken anahtar kayıpları üzerindeki etkisini vermektedir. PSIM programında sunulan Device Database Editor vasıtasıyla

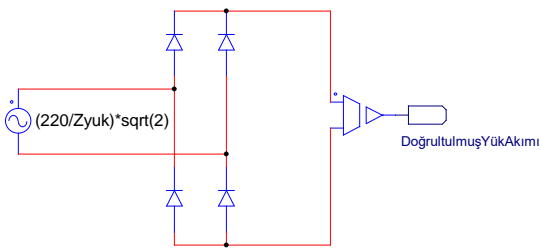
yarı iletken anahtar teknik veri dökümanında verilen V_{ce-I_c} , E_{on-I_c} , E_{off-I_c} , V_d-I_d gibi grafikler kullanılarak modellenilebilmektedir. Böylece, her benzetim adımında yarı iletken anahtardan geçen akım değerine karşılık gelen ilgili değerler grafikler kullanılarak bulunmaktadır. Böylece, yarı iletken anahtar kayıpları gerçeğe en yakın şekilde hesaplanabilmektedir [32].

Benzetim çalışmasında istenilen L değişimini elde edebilmek amacı ile PSIM programında bulunan indüktör modeli kullanılmıştır (Şekil 7). İndüktör bağımlı akım kaynağı olarak modellenmiştir. Bağımlı akım kaynağının uçlarındaki gerilimin integrali alınarak λ (flux linkage) değeri hesaplanmaktadır. İndüktör akımı ise λ/L formülü ile hesaplanmaktadır.



Şekil 7. Benzetim çalışmasında kullanılan indüktör modeli (Inductor model used in the simulation study)

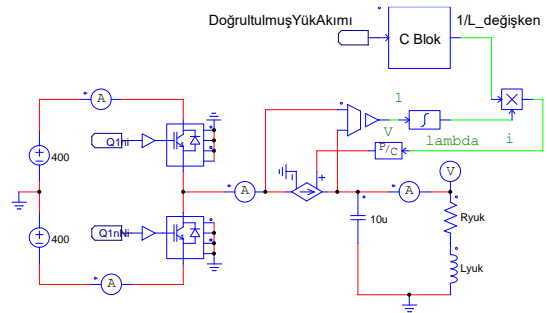
Yük akımı örneklemesini gerçekleştirmek için tepe değeri $\sqrt{2} \times 220/Z_{yük}$ olan bir gerilim kaynağı kullanılmıştır (Şekil 8). Yük akımına karşılık gelen bu gerilim bir doğrultucudan geçirilmiş ve elde edilen doğrultulmuş sinüs dalgası bir C blok girişinde kullanılarak Şekil 8'de verilen indüktör modelinde L değerinin yük akımına göre değişimi elde edilmiştir.



Şekil 8. Benzetim çalışmasında kullanılan yük akımı örnekleme devresi (Load current sampling circuit used in the simulation study)

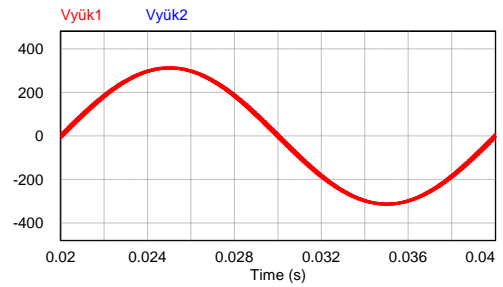
Yük akımına göre değişen indüktör kullanımına ait devre benzetim devresi Şekil 9'da verilmiştir. PSIM programında sunulan C Blok elemanı sayesinde yük akımının belirlenen eşik akım değerleri ile karşılaştırılması C programlama ile kolaylıkla yapılabilmektedir. C blok çıkışında indüktör modelinde kullanılan L değeri elde edilmiştir. L değerinin yük akımına göre değişimini gösterebilmek amacıyla 100W

ve 2000W yüklenme durumları için benzetim sonuçları aşağıda verilmiştir

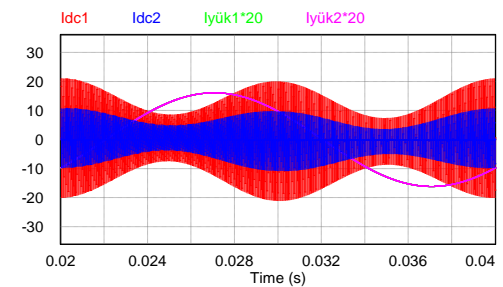


Şekil 9. Benzetim devresine ait şematik (Schematics of the simulation circuit)

Yükün aktif gücünün 100W olması durumu için sabit L ve değişken L durumlarına ait yük uçlarındaki gerilimler, yarı köprü inverter devresinde üst tarafta bulunan DC kaynaktan çekilen akımlar ve yük akımları Şekil 10'da verilmiştir. (Buradan itibaren şekillerde 1 indisi sabit L değerli duruma ait grafikleri gösterirken 2 indisi değişken L durumuna ait grafikleri göstermektedir).



(a)

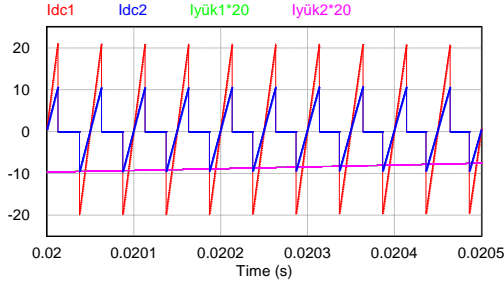


(b)

Şekil 10. 100W yüklenme durumu için (a) yük uçlarındaki gerilimler, (b) yarı köprü inverter devresinde üst tarafta bulunan DC kaynaktan çekilen akımlar ve yük akımları ((a) Load voltages for 100W loading, (b) DC currents from the top DC source of the half bridge inverter circuit and load currents for 100W loading)

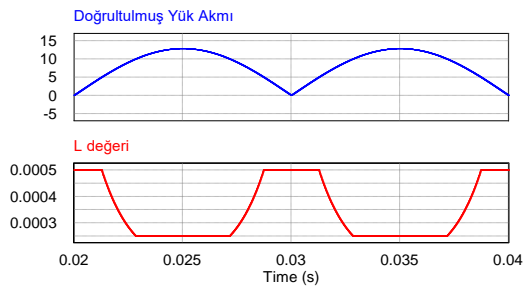
Şekil 11'de yarı köprü inverter devresinde üst tarafta bulunan DC kaynaktan çekilen akımların ve yük akımlarının detaylı gösterimleri verilmiştir. Bu yüklenme

durumunda yük akımının anlık değeri seçilen 5A'lık en düşük eşik akım değerini hiçbir zaman geçmediği için değişken L değeri $500\mu\text{H}$ olarak kalmaktadır. Idc2 akımı değişken L değerinin $500\mu\text{H}$ olduğu duruma ait akımı göstermektedir. Görüldüğü gibi DC kaynaktan çekilen akımın tepe değeri $250\mu\text{H}$ 'lik sabit indüktörlü durumda yaklaşık 20A iken yüksek L değerinin devrede bulunması durumunda yaklaşık 10A'dır.



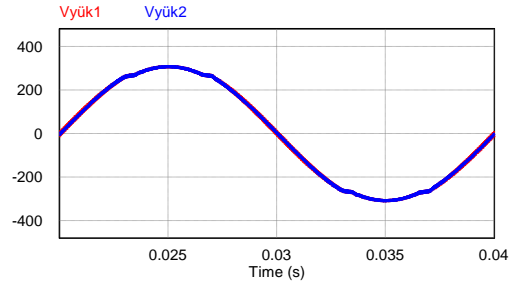
Şekil 11. 100W yüklenme durumu için yarım köprü inverter devresinde üst tarafta bulunan DC kaynaktan çekilen akımların ve yük akımlarının detaylı gösterimleri (20ms-20.05m aralığı) (Detailed views of the DC currents from the top DC source of the half bridge inverter circuit and load currents for 200W loading (20ms-20.05ms range))

2000W yüklenme durumunda yük akımının tepe değeri 12.85A olmaktadır. Bu durumda yük akımı 5A olana kadar L değeri $500\mu\text{H}$ olarak kalırken, yük akımının 5-10A aralığında olması durumunda L değeri $500\mu\text{H}$ den exponansiyel olarak $250\mu\text{H}$ değerine düşmektedir. Yük akımının 10A üzerinde olduğu durum için L değeri $250\mu\text{H}$ olmaktadır (Şekil 12).

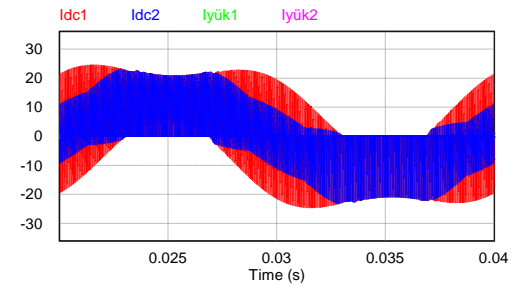


Şekil 12. 2000W yüklenme durumu için indüktör değerinin değişimi (Variation of L value under 2000W loading)

2000W yüklenme durumu için sabit L ve değişken L durumlarına ait yük uçlarındaki gerilimler, yarım köprü inverter devresinde üst tarafta bulunan DC kaynaktan çekilen akımlar ve yük akımları Şekil 13'te verilmiştir.



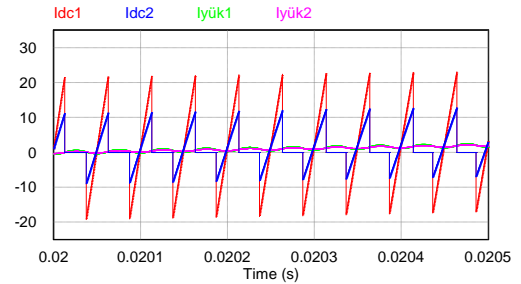
(a)



(b)

Şekil 13. 2000W yüklenme durumu için (a) yük uçlarındaki gerilimler, (b) yarım köprü inverter devresinde üst tarafta bulunan DC kaynaktan çekilen akımlar ve yük akımları ((a) Load voltages for 2000W loading, (b) DC currents from the top DC source of the half bridge inverter circuit and load currents for 2000W loading)

Şekil 14'te yarım köprü inverter devresinde üst tarafta bulunan DC kaynaktan çekilen akımların ve yük akımlarının detaylı gösterimleri verilmiştir.



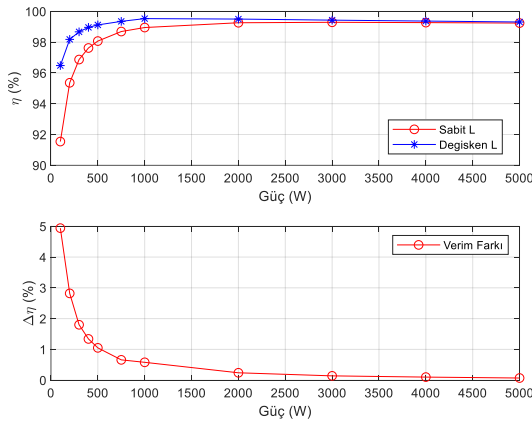
Şekil 14. 2000W yüklenme durumu için yarım köprü inverter devresinde üst tarafta bulunan DC kaynaktan çekilen akımların ve yük akımlarının detaylı gösterimleri (20ms-20.05ms aralığı) (Detailed views of the DC currents from the top DC source of the half bridge inverter circuit and load currents for 2000W loading (20ms-20.50ms range))

Tüm yüklenme durumlarına ait verim değerleri elde edilerek Çizelge 2'de özetlenmiştir. Çizelge 2'deki veriler kullanılarak elde edilen verim eğrileri ve her bir durum için elde edilen verim kazanımı ($\Delta\eta$) Şekil 15'te verilmiştir.

Çizelge 2. Benzetim çalışmasından elde edilen verim değerleri (Efficiency values obtained from the simulation study)

Güç (W)	Güç Faktörü	Sabit L	Değişken L [L:500µH↔250µH]
100	0.8	91.54	96.48
200	0.8	95.36	98.05
300	0.8	96.87	98.67
400	0.8	97.62	98.96
500	0.8	98.07	99.12
750	1	98.69	99.35
1000	1	98.95	99.53
2000	1	99.26	99.50
3000	1	99.29	99.43
4000	1	98.27	99.37
5000	1	99.24	99.31

Şekil 15'ten görüldüğü gibi inverter çıkışında bulunan filtre devresinde yük akımına göre değişen L kullanımı ile inverter devresinin özellikle düşük güç bölgesindeki (0-500W aralığında) veriminde önemli oranda artış elde edilmiştir. Evsel elektrik güç talebinin büyük oranda 0-500W aralığında kaldığı düşünüldüğünde önerilen filtre yapısı ile özellikle düşük güçlerde elde edilen verim artışı ile yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerji daha etkin bir şekilde kullanılabilir.



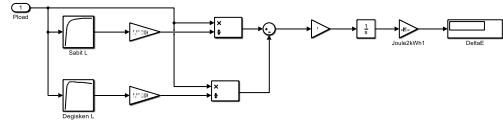
Şekil 15. Verim eğrileri ve elde edilen verim artışı (Efficiency curves and obtained efficiency improvement)

4. ENERJİ ANALİZİ (ENERGY ANALYSIS)

Enerji analizi için şebekeden bağımsız evin en az bir yenilenebilir enerji kaynağına sahip olduğu ve sistemde enerji depolama elamanı olarak batarya grubu bulunduğu kabul edilmiştir. Rüzgar ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynakları meteorolojik değişkenlere bağlı çıkış gücü ürettiklerinden böyle bir sistemde şebekeden bağımsız çalışma için bir batarya grubu gereklidir. Analizde batarya grubunun mümkün olduğunca yenilenebilir enerji kaynakları üzerinden şarj edildiği kabul edilmiştir. Ancak, gerekli durumlarda şebeke üzerinden şarj

işleminin de yapılabildiği kabul edilmiştir. Böyle bir ev üniversitemizde bulunan akıllı şebekeler laboratuvarında bulunmaktadır.

Önerilen yük akımına göre değişken L kullanımı ile inverter devresinin verimindeki artış ile elde edilebilecek enerji kazanımı hesabı için MATLAB/Simulink programında oluşturulan model Şekil 16'da verilmiştir. Bu modelde yük tarafından talep edilen güç sabit L değerli inverter devresinin ve değişken L değerli inverter devresinin verimlerine bölünerek her bir inverter devresinin DC bara üzerindeki güçler hesaplanmaktadır. Daha sonra hesaplanan bu güçler arasındaki farkın integrali alınarak elde edilecek enerji kazanımı hesaplanmaktadır. Yük profili olarak ölçüm sonucu elde edilen günlük güç değerleri kullanılmıştır. Benzetim çalışmalarında belirli güç değerlerindeki verim değerleri elde edilmiştir. Farklı güç değerlerindeki verim değerlerini bulmak amacıyla MATLAB/Simulink programında 'look-up' tablo kullanılmış ve ara güç değerleri için verim değerleri interpolasyon/extrapolasyon kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 16. Enerji kazanımı analizi için kullanılan MATLAB/Simulink blok diyagramı (MATLAB/Simulink block diagram used for energy saving analysis)

Daha verimli inverter devresi ile elde edilen günlük ve yıllık enerji kazanımları Çizelge 3'te verilmiştir. Yaklaşık bir hesap yapıldığından, yıllık enerji kazanımları günlük enerji kazanımı 365 ile çarpılarak bulunmuştur.

Çizelge 3. Daha verimli inverter tasarımı ile elde edilen günlük ve yıllık enerji kazanımları (Daily and yearly energy savings with more efficient inverter design)

Günlük Enerji Kazanımı [kWh/gün]	Yıllık Enerji Kazanımı [kWh/yıl]
0.1271	46.39

Türkiye İstatistik Kurumu tarafından yapılan araştırmada ülkemizdeki hane sayısı 19.481.678, ortalama hanehalkı büyüklüğü ise 3,8 olarak belirlenmiştir. Hanehalklarının %20'si tek katlı binalardaki, %25,5'i 4-5 katlı binalardaki, %23,1'i de 6 ve daha üzeri katlardaki binalardaki konutlarda yaşamaktadır [33]. Buna göre, güneş ve/veya rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kolaylıkla kullanılabilir olduğu tek katlı bina sayısı 3.896.336 olarak hesaplanmıştır. Bu tek katlı binaların %20'sinde yakıfın gelecekte yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanıldığı kabul edilirse, 779.268 binada önerilen inverter yapısı kullanılabilir. Bu durumda

Çizelge 3'te verilen yıllık enerji kazanımlarını 779.268 ile çarparak toplam enerji kazanımı 36.15GWh olarak bulunur. Dikkate alınan evlerin mümkün olduğunca şebekeden bağımsız bir yapıda çalıştığı kabul edilse de yenilenebilir enerji kaynaklarının meteorolojik koşullara bağlı güç üretimleri nedeni ile evin ihtiyacı olan elektrik enerjisinin %30'luk kısmının şebekeden alınmak zounda olduğu kabul edildiğinde 36.15GWh'lik enerji kazanımının %30'una karşılık gelen 10.845GWh'lik enerjinin şebeke tarafında üretilmesine gerek kalmayacağı sonucuna ulaşılabilir. Bu hesaplamalarda elde edilen değerler sadece yaklaşık değerlerdir. Amacımız küçük bir değer gibi gözükken günlük enerji kazanımının toplamda önemli bir enerji kazanımı sağlayabileceğini göstermektir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bir evin bir günlük elektrik güç tüketimi incelendiğinde, güç tüketiminin günün büyük bir zamanında düşük güçlerde (0-500W aralığında) kaldığı görülmüştür. Bu nedenle, tekil bir evin yenilenebilir enerji kaynaklarından beslenmesi durumunda DC-AC dönüşümü sağlayan güç inverter devresinin özellikle düşük güç bölgesindeki veriminin iyileştirilmesi oldukça önemlidir.

Bu çalışmada inverter çıkışında kullanılan LC filtre devresindeki L değerinin yük akımına göre değişken olması durumunun inverter devresinin düşük güç bölgesinde verimi üzerine etkisi benzetim tabanlı incelenmiştir. İnverter çıkış filtre devresindeki L değerinin yük akımının küçük değerleri için yüksek değere sahip olması ile inverter devresinden çekilen akımdaki dalgalanma azaltılmakta ve anahtarlama kayıpları düşürülmektedir. Elde edilen sonuçlar 0-500W aralığında inverter devresinin veriminde önemli oranda iyileştirme elde edilebileceğini göstermiştir.

Pratikte bu çalışmada önerilen yük akımına göre değişen L değeri aktif veya pasif tasarımlarla elde edilebilmektedir. Pasif indüktör tasarımında değişken indüktör, kullanılan hava aralığının yapısı ile oynanarak veya hava aralığında farklı manyetik geçirgenliğe sahip malzeme kullanılarak elde edilirken, aktif indüktör tasarımında değişken indüktör bir yardımcı sargı kullanılarak ve bu sargıdan geçen DC bias akımının ayarlanması ile nüvenin B-H eğrisi üzerinde hareket ederek elde edilmektedir. Bu çalışmada ele alınan 500uH-250uH'lik indüktör değişiminin pasif tasarımla elde edilebileceği kabul edilebilir. Bu nedenle, elde edilen verim farkı pratik uygulamada ulaşılacak bir hedef olacaktır. Aktif tasarım kullanılmasında kullanılacak ek sargıda oluşan kayıplar da dikkate alınmalıdır. Ancak, aktif tasarımda indüktör değişimi daha geniş aralıkta elde edilebilecektir. Buna karşılık düşük güçlerde elde edilebilecek verim farkı daha yüksek olacaktır.

Benzetim çalışmasında yarı iletken anahtar modeli haricindeki tüm elamanlar idealdir. Bu nedenle, elde edilen sonuçlar önerilen değişken indüktör kullanımının yarı iletken anahtar kayıpları üzerindeki etkisini vermektedir. Verimdeki değişimin nedeni filtre

devresinde yük akımına göre değişken indüktör kullanımı ile DC baradan çekilen akımın dalgalanmasının sınırlandırılması ile anahtar kayıplarının düşürülmesidir. 0-500W aralığında önerilen yöntemle elde edilen verim değerleri ile filtre devresindeki L değerinin sabit bir değere sahip olması durumundaki verim değerleri karşılaştırıldığında %5-%1 aralığında bir verim artışı elde edilmiştir. Daha verimli bir inverter devresi ile elde edilebilecek yaklaşık enerji kazanımları hesaplanmış ve yenilenebilir enerji kaynaklarından beslenen ev sayısının artması ile enerji kazanımının katlanarak artacağı gösterilmiştir.

Önerilen yük akımına göre göre değişen L değerinin kullanılması ile sabit anahtarlama frekansında çalışan bir inverter devresinde yüksek anahtarlama frekansı kullanılmış gibi bir etki elde edilmektedir. Yazarın bir sonraki çalışmasında önerilen değişken indüktör tasarımı pratik olarak gerçekleştirilecek ve deneysel çalışma yapılacaktır.

6. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- 1) Selamogullari, U.S., "A systems approach for stand-alone residential fuel cell power system design", *Doktora Tezi*, Rensselaer Polytechnic Institute, (2005).
- 2) Selamogullari U.S, Torrey D.A., Salon S. "A Systems Approach fo a Stand-alone Residential Fuel Cell Inverter Design", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 25: 741-749, (2010).
- 3) Akca H., Selamogullari U.S., "Hybrid switch use for light load efficiency improvement of a power inverter for stand-alone residential renewable energy system", *15th European Conference on Power Electronics and Applications*, 1-6, (2013).
- 4) Kislovski A. S., "Quasi-Linear Controllable Inductor", *IEEE Proceedings*, 75: 267-271, (1997).
- 5) Medini D., Ben-Yaakov S., A., "Current Controlled Variable-Inductor for High Frequency Resonant Power Circuits", *Ninth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Orlando, FL , USA, 219-225, (1994).
- 6) Perdigao, M.S., Menke, M.F., Seidel, A.R., Pinto, R.A., Alonso, J.M., "A Review on Variable Inductors and Variable Transformers: Applications to Lightning Devices ", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52: 531-547, (2016).
- 7) Li D., Zhu Z.Q, Qin Y. A., "Novel Variable Reactor and Its Application to Shunt Power Quality Controller", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31: 4148-4158, (2016).
- 8) Vaya, A.K., Parida, T. K., Singh, S.K., "Efficiency Improvement of a Boost PFC Converter using Non-linear Inductor", *International Conference on Power, Signals, Controls and Computation*, Thrissur, India, 1-6. (2014).
- 9) Alonso J.M., Perdigao M.S., Costa M. A. D., Martinez G., Osorio R., "Analysis and Experiments on a Single-Inductor Half-Bridge LED Driver With Magnetic Control", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32: 9179-9190, (2017).
- 10) Pinto R.F., Alonso J.M, Perdigao, M.S., F. da Silva M., N. do Prado R., "A New Technique to Equalize Branch Currents in Multiarray LED Lamps Based on Variable Inductors", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52: 521-530, (2016).

- 11) Martins M., Perdigao M.S., Mendes A.M.S., Pinto R.A., Alonso J.M., "Analysis, Design, and Experimentation of a Dimmable Resonant-Switched-Capacitor LED Driver With Variable Inductor Control", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32: 3051-3062, (2017).
- 12) Hu Y., Huber L., Jovanovic M.M., "Single-Stage, Universal-Input AC/DC LED Driver With Current-Controlled Variable PFC Boost Inductor", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27: 1579-1590, (2012).
- 13) Alonso J.M., Dalla Costa M. A., Rico-Secades M., Cardesin J., Garcia J., "Investigation of a New Control Strategy for Electronics Ballasts Based on Variable Inductor", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(1), 3-10, (2008).
- 14) Perdigao M.S., Saraiva, E.S, Alonso, J.M, Cervi, M., "The Controllable Non-linear Reactor in Electronic Ballasts Applications: A Behavioral Analysis of the Inductance as a Function of both ac and dc Bias Currents", *43rd International Universities Power Engineering Conference*, Padova-Italy, (2008).
- 15) Zhang L., Xia Y., Lu K., Fang Y., Ma J., Pan H., Wang D., "Stress-Based Variable Inductor for Electronic Ballasts", *IEEE Transactions on Magnetics*, 51: 840504, (2015).
- 16) Gulko M., Medini D., Ben-Yaakov S., "Inductor-controlled current sourcing resonant inverter and its application as a high pressure lamp driver", *Ninth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Orlando, FL, USA, 434-440, (1994).
- 17) Stadler M., Pforr J., "Feed-forward control of non-linear inductors providing soft switching of DC-DC converters", *European Conference on Power Electronics and Applications*, Aalborg, Danimarka, (2007).
- 18) Bakan A. F., "A new LVI assisted PSPWM DC-DC Converter", *International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, Bursa-Türkiye, 230-233, (2009).
- 19) Wang, L., Pei, Y., Yang, X., Qin, Y., Wang, Z., "Improving Light and Intermediate Load Efficiency of Buck Converters with Planar Nonlinear Inductors and Variable On Time Control", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27: 342-353, (2011).
- 20) Ahmed, H.F., Cha, H., Kim, S., Kim, D., Kim, H., "Wide Load Range Efficiency Improvement of a High-Power-Density Bidirectional DC-DC Converter Using an MR Fluid-Gap Inductor", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51: 3216-3226, (2015).
- 21) Li D., Zhu Z.Q, Qin Y., "A Novel Variable Reactor and Its Application to Shunt Power Quality Controller", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31: 4148-4158, (2016).
- 22) Nakamura K., Yamada Y., Nono R., Ohinata T., Arimatsu K., Ichinokura O., "A Novel 3-D Concentric-Winding-Type Three-Phase Variable Inductor for Reactive Power Compensation in Electric Power Systems", *IEEE Transactions on Magnetics*, 53: 2600204, (2017).
- 23) Bao-quan K., Hong-jiang T., Ying-qi L., "Research of Adjustable Inverter Output Filter Based on DC Magnetic Flux Controllable Inductor", *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Harbin-China, 1-5. (2008).
- 24) Kim, D., Cha, H., Lee, S., Kim, D., "Characteristic of a Variable Inductor Using Magneto-rheological Fluid for Efficient Power Conversion", *IEEE Transactions on Magnetics*, 49: 1901-1904, (2013).
- 25) Stenglein, E., Kuebrich, D., Albach, M., "Prediction of the Non-linear Behavior of a Stepped Air Gap Inductor", *IEEE 17th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics*, Torenheim-Norway, (2016).
- 26) Ge T., Ngo K. D. T., Moss J., "Two-Dimensional Gapping to Reduce Light-Load Loss of Point-of-Load Inductor", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32: 540-549, (2017).
- 27) Perdigao, M.S., Trovao, J. P., Alonso J.M., Saravia, E.S., "Large Signal Characterization of Power Inductors in EV Bidirectional DC-DC Converters Focused on Core Size Optimization", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62: 3042-3051, (2015).
- 28) Beraki M.W, Trovao J.P.F., Perdigao M.S, Dubois M.R., "Variable Inductor Based Bidirectional DC-DC Converter for Electric Vehicles", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(10): 8764-8772, (2017).
- 29) Elma, O., Selamogullari, U.S., "A new home energy management algorithm with voltage control in a smart home environment", *Energy*, 91: 720-731, (2015).
- 30) https://issuu.com/mahmoud66/docs/fuel_cell_inverter_-_10_kw_design__, "2001 Future Energy Challenge, Texas A&M University Fuel Cell Inverter", (01 Ocak 2019).
- 31) <http://www.onsemi.com/pub/Collateral/FGH40T120SMD-D.PDF>, "FGH40T120SMD teknik doküman", (01 Ocak 2019).
- 32) <http://powersimtech.com/drive/uploads/2017/11/PSIM-User-Manual.pdf>, "PSIM User Manual", (01 Ocak 2019).
- 33) www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=15843, "Türkiye İstatistik Kurumu, Nüfus ve Konut Araştırması", (24 Mayıs 2018).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



Scalar speed control of induction motors with difference frequency

Fark frekans ile indüksiyon motorun skaler hız denetimi

Yazar (Author): Özcan OTKUN

ORCID: 0000-0002-5025-1516

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Otkun Ö., “Scalar speed control of induction motors with difference frequency”, *Journal of Polytechnic*, 23(2): 267-276, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.474043

Scalar Speed Control of Induction Motors with Difference Frequency

Araştırma Makalesi / Research Article

Özcan OTKUN*

Department of Electrical and Electronics, 3Nokta Academy Company, 61100, Ortahisar, Trabzon, Turkey

(Geliş/Received : 23.10.2018 ; Kabul/Accepted : 02.04.2019)

ABSTRACT

Speed monitoring of electric motors has attracted the attention of many researchers from past to present. Induction Motor (IM), which is one of the electric motor types, falls behind the nominal speed in different loads. This study was conducted to increase the speed control performance of IM. In the study, speed control of IMs was realized by Difference Frequency (DF). The Scalar Control (SC) method was used in IM speed control. In order to increase the performance of SC, the frequency information received from IM was compared with the reference frequency. The resulting DF was applied to the system input again. For the performance analysis of the study; SC, PI + SC and DF + SC methods were compared. The results obtained from the study simulated in Matlab software show that the proposed method can be used in speed control.

Keywords: Speed control, scalar speed control, IM, frequency, V/f.

Fark Frekans ile İndüksiyon Motorun Skaler Hız Denetimi

ÖZ

Elektrik motorlarının hız denetimi geçmişten günümüze pek çok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Elektrik motor çeşitlerinden biri olan İndüksiyon Motor (IM) ya da Asenkron Motor (ASM) farklı yüklerde nominal hızın gerisinde kalmaktadır. Bu çalışmada IM'nin hız denetim başarımını artırmak amacıyla yapılmıştır. Yapılan çalışmada IM'lerin hız denetimi Fark Frekans (FF) ile gerçekleştirilmiştir. IM hız denetiminde Skaler Denetim (SD) yöntemi kullanılmıştır. SD'nin başarımını artırmak için IM'den alınan frekans bilgisi referans frekans ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen FF tekrar sistem girişine uygulanmıştır. Çalışmanın performans analizi için; SD, PI + SD ve FF + SD yöntemleri karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçları tablo ve grafikler ile sunulmuştur. Matlab yazılımında benzetimi gerçekleştirilen çalışmadan elde edilen sonuçlar önerilen yöntemin hız denetiminde kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Hız denetimi, skaler hız denetimi, IM, Frekans, V/f.

1. INTRODUCTION

Induction Motors (IM) are preferred in industrial areas due to advantages such as simple structure, low cost, low maintenance requirements and high efficiency [1] - [5]. This situation reveals the need for use of IMs at different speeds. However, the nonlinear dynamic model, the time varying parameters and external load torque of these motors makes the speed control quite complicated [6] - [9]. In this context, it is expected from the control system that to have proper behavior of location and speed at transient and steady state, to respond well to the variable speed, not to be affected by changes in the disruptive input parameter such as an external force (load torque) [1], [10], [11].

Speed control of IMs is carried out in two distinct ways: scalar and vector [12], [13]. Considering the industrial application; Scalar Control (SC) method is being used because of simple structure, easy application and low cost [14]. SC method is performed by maintaining

Voltage / frequency (V / f) rate constant. The goal here is to keep constant the motor torque desired to be operated at different speeds. However, when IMs operated at low speed, torque production is reduced due to the reduction of internal voltage drop and dynamic performance of the motor decreases due to disruptive influences such as external load conditions [15] - [18]. Therefore, SC method is used in conjunction with additional control methods such as Proportional-Integral-Derivative (PID) [19] - [21]. However, parameter sensitivity of the PID controls is fairly weak. If the system controller coefficients are set well, system can be controlled in a good way. However, any changes in system parameters affect the performance of the controller negatively. In this case, the PID control coefficients will need to readjust [19], [22].

In addition to classical methods of control, many methods have been suggested [23] - [25]. These; Kalman filter [26], field orientation [27], [28], position [29], adaptive [30], finite elements [31], finite differences [32], logic [33], state feedback [34], stator voltage [35], observer-based [36], matrix theory [37], shift mode [38],

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : ozcanotkun@gmail.com

digital signal processor [39], sensor-sensor-less [40], robust [41] control, etc.

When the studies in recent years are examined, it is understood that intelligent audit methods Artificial Neural Network (ANN), Fuzzy Logic (FL), Genetic Algorithm (GA) etc. and these methods are used together with classical methods. In addition to the above-mentioned methods, we observed that control methods such as ANN, FL, GA are used [42] - [45]. Referring to the literature, it is observed that intelligent control systems which can be used instead of the PID have been developed [46], [47]. These methods show the desired performance in the nonlinear case in system [48]. Also, the control performance system is less affected from parameter variations [49] - [51]. The aim of this study is not to reveal the positive and negative aspects of the known methods, but to reveal a different solution method.

The purpose of this study is to improve the performance of the SC method utilized in speed control of IMs without the need for additional controller. The motor that controls to be carried are required to reach the reference speed at idle and load. Therefore, Difference Frequency (DF) + SC method is recommended in control of IMs.

2. MATERIAL AND METHOD

2.1. Mathematical Expressions of IMs

In terms of ease of simulation biaxial mathematical expressions of IMs are used. These statements are [4], [52], [53];

The stator voltage equations of *dq* axis:

$$\begin{aligned} v_{sd} &= i_{sd}r_s + \frac{d}{dt}\psi_{sd} - w_e\psi_{sq} \\ v_{sq} &= i_{sq}r_s + \frac{d}{dt}\psi_{sq} - w_e\psi_{sd} \end{aligned} \quad (1)$$

Rotor voltage equations of *dq* axis:

$$\begin{aligned} v_{rd} &= i_{rd} + \frac{d}{dt}\psi_{rd} - (w_e - w_r)\psi_{rq} \\ v_{rq} &= i_{rq} + \frac{d}{dt}\psi_{rq} - (w_e - w_r)\psi_{rd} \end{aligned} \quad (2)$$

Here; $v_{rd} = v_{rq} = 0$ for squirrel cage IMs [1].

Stator and rotor flux given in these equations (Matrix expression):

$$\begin{bmatrix} \psi_{sq} \\ \psi_{sd} \\ \psi_{rq} \\ \psi_{rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \\ i_{rq} \\ i_{rd} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Flux equations in the air gap:

$$\begin{aligned} \psi_{mq} &= L_m(i_{sq} - i_{rq}) \\ \psi_{md} &= L_m(i_{sd} - i_{rd}) \end{aligned} \quad (4)$$

The equation of torque generated by the motor:

$$T_m = \frac{3}{2} \frac{p}{2} L_m(i_{rd}i_{sq} - i_{rq}i_{sd}) \quad (5)$$

The equation of electrical torque generated by the motor:

$$T_e = T_L + J \frac{2}{p} \frac{d}{dt} w_r + \frac{2}{p} B w_r \quad (6)$$

2.2. Mathematical Expressions of SC

SC simulation was performed with the angle and amplitude ratio obtained by calculating from the reference frequency entered into the system. Reference voltage equations are given below for three phases [12].

$$\begin{aligned} V_a &= V_m \sin(\theta) \\ V_b &= V_m \sin(\theta - 2\pi/3) \\ V_c &= V_m \sin(\theta + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (7)$$

2.3. Mathematical Expressions of DFs

DF's simple mathematical model;

$$DF = ref_f - \frac{w_e}{2\pi} \quad (8)$$

2.4. Methods for Control of IMs

2.4.1. SC method

IM simulation model of SC method is shown in Figure 1. Here, SC simulation will be carried out with the angle and amplitude ratio obtained by calculating from the reference frequency entered into the system. Current, torque and speed graphics will be obtained by running the motor at idle and load [54].

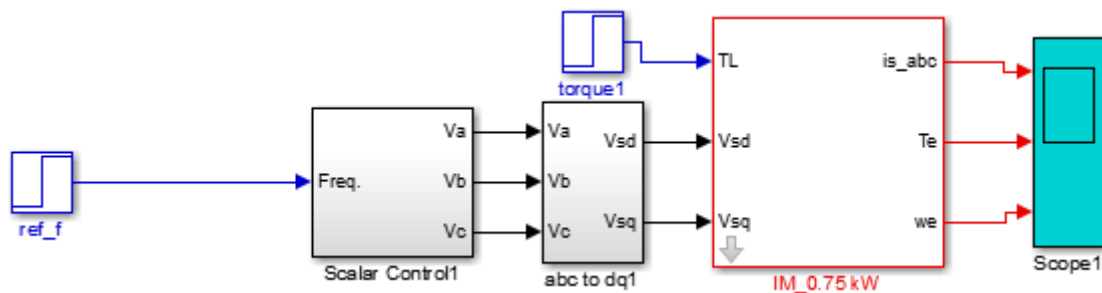


Figure 1. Simulation of SC Method

2.4.2. PI+SC method

IM simulation model of PI+SC method is shown in Figure 2. Here, PI sets the control input, reduces errors, and will work to achieve the desired reference frequency value. Current, torque and speed graphics will be obtained by running the motor at idle and load.

2.4.3. DF+SC method

IM simulation model of DF+SC method (The proposed method) is shown in Figure 3. Here, DF will be performed by adding the difference between the frequency obtained from motor speed and reference frequency to SC input. Current, torque and speed graphics will be obtained by running the motor at idle and load [55].

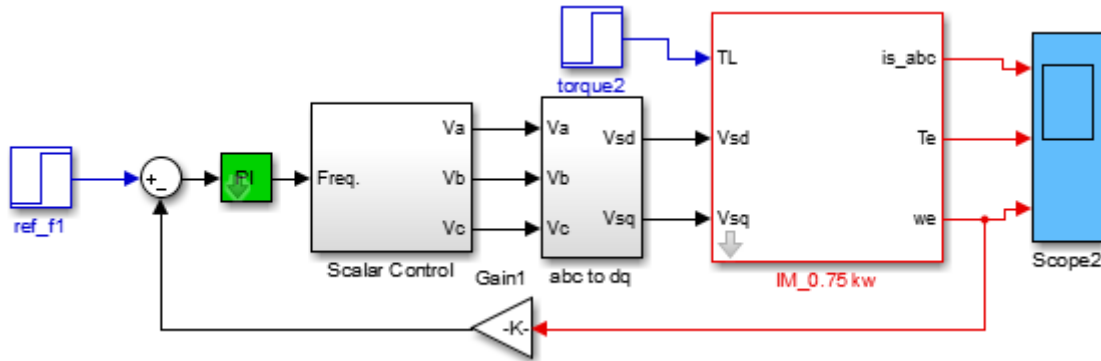


Figure 2. Simulation of PI+SC Method

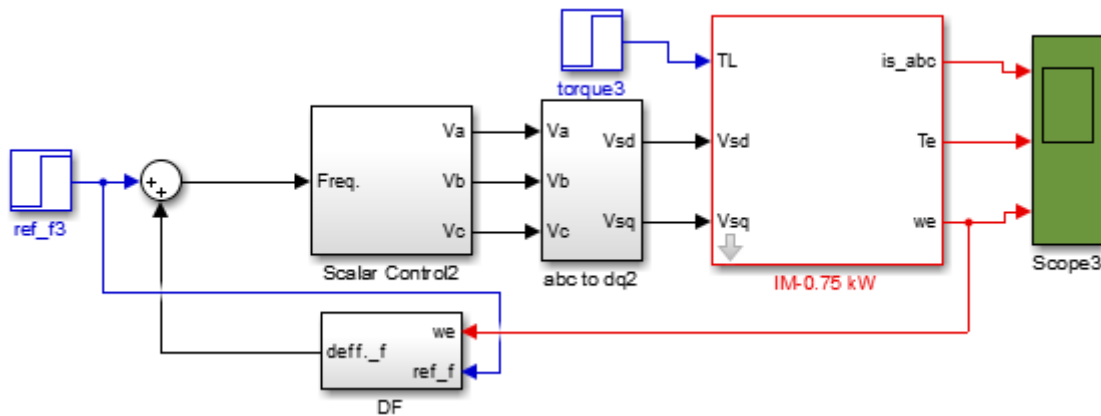


Figure 3. Simulation of DF+SC Method

3. RESULTS

Four simulation tests graphs and tables are given below. The simulation tests conducted are shown in the table and then on the graph. The first simulation test input information is given in Table 1 and simulation test results are shown in Figure 4.

The motor current, torque and speed graphs is given Figure 4 (a), respectively. Consequences are 5 Hz and 0

Nm in Figure 4 (a), 5 Hz and 0.25 Nm in Figure 4 (b), 5 Hz and 0.5 Nm in Figure 4 (c). It is seen that the motor current is equal to each other in three simulation tests. Also, it is understood that the motor torque graph is at the desired value. However, when speed graphs examined it is understood that the SC method could not be successful by the motor load torque increases. But DF+SC gave the same results with PI+SC method and it is observed that this method is successful at speed control.

Table 1. The first simulation tests input information

Tests	ref_f (Hz)	ref_Te (Nm)
1	5	0
2	5	0.25
3	5	0.5

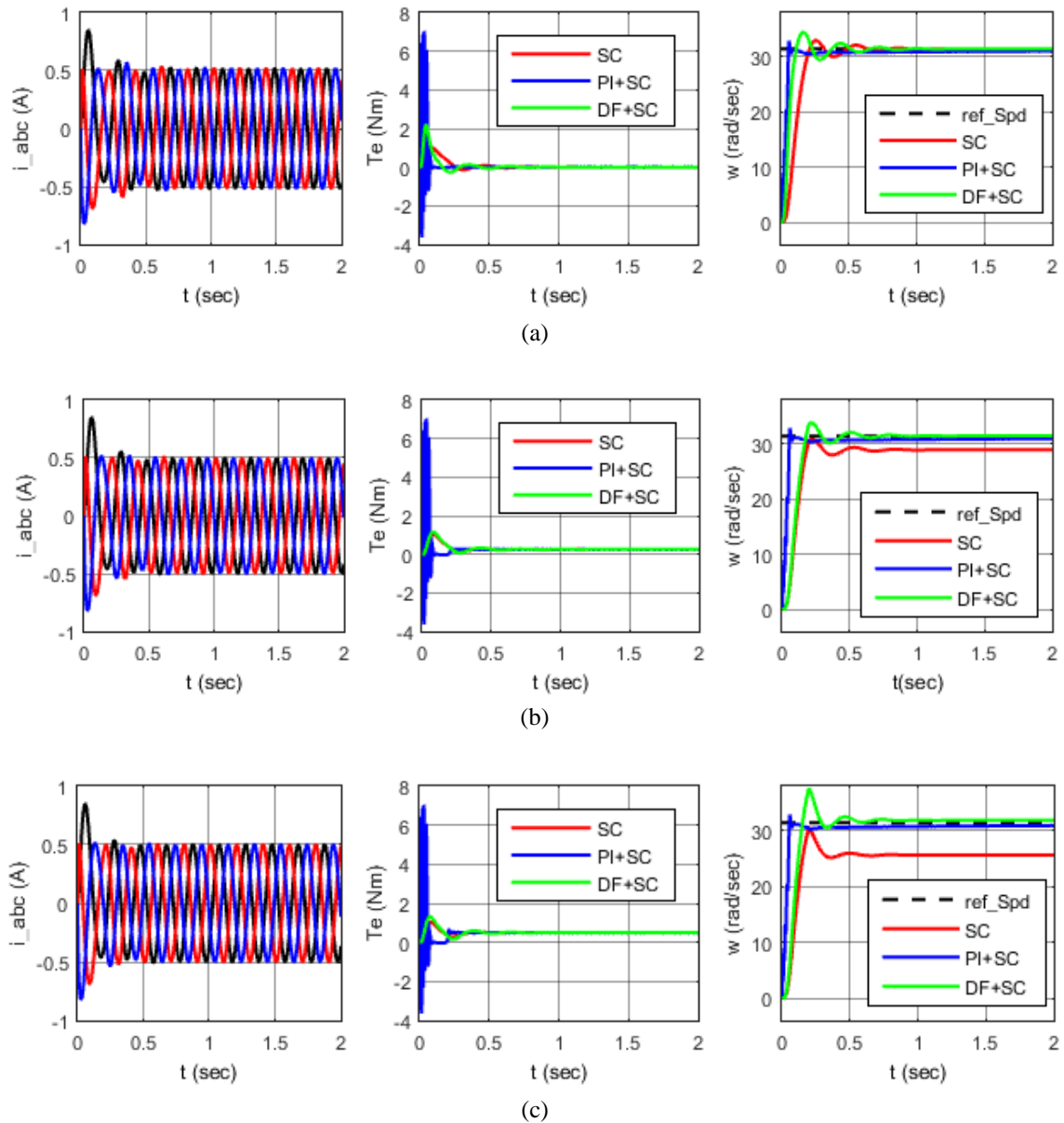


Figure 3. The first simulation test results

The second simulation test input information is given in Table 2 and simulation test results are shown in Figure 5. The motor current, torque and speed graphs is given Figure 5 (a), respectively. Consequences are 10 Hz and 0 Nm in Figure 5 (a), 10 Hz and 0.25 Nm in Figure 5 (b), 10 Hz and 0.5 Nm in Figure 5 (c). It is seen that the motor current is equal to each other in these three simulation tests. Also, it is understood that the motor torque graph is

at the desired value. However, when speed graphs examined it is understood that the SC method could not be successful by the motor load torque increases. But DF+SC gave about the same results with PI+SC method and it is observed that this method is successful at speed control.

Table 2. The second simulation tests input information

Tests	ref_f (Hz)	ref_Te (Nm)
1	10	0
2	10	0.25
3	10	0.5

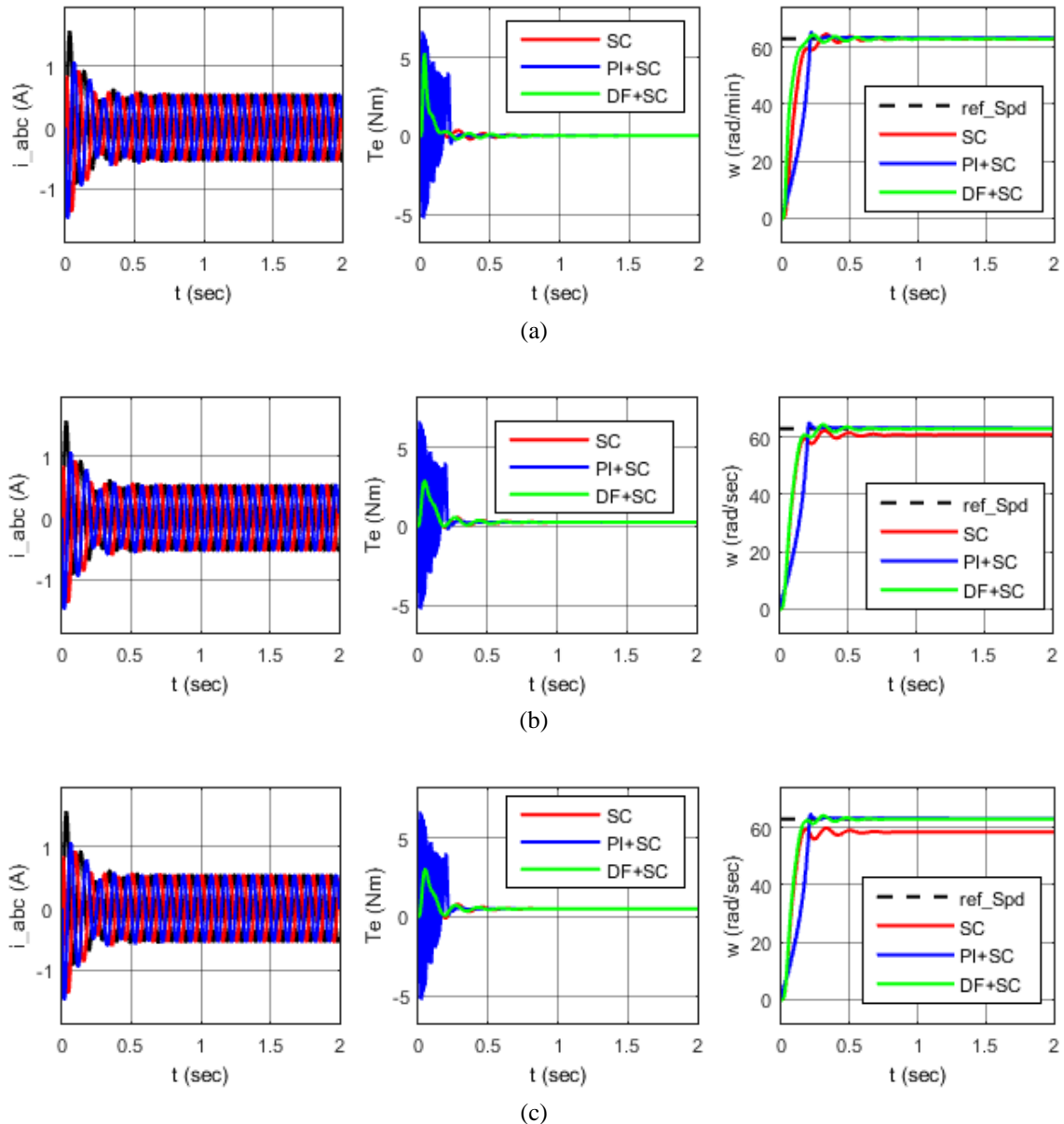


Figure 4. The second simulation test results

The third simulation test input information is given in Table 3 and simulation test results are shown in Figure 6. The motor current, torque and speed graphs is given Figure 6 (a), respectively. Consequences are 15 Hz and 0 Nm in Figure 6 (a), 15 Hz and 0.25 Nm in Figure 6 (b), 15 Hz and 0.5 Nm in Figure 6 (c). It is seen that the motor current is equal in these three simulation tests. Also, it is

understood that the motor torque graph is at the desired value at SC and DF+SC methods but it is not at the desired value at PI+SC method. When speed graphs examined it is understood that SC and PI+SC methods could not be successful by the motor load torque increases. For this simulation test, it is observed that DF+SC method is successful at speed control.

Table 3. The third simulation tests input information

Tests	ref_f (Hz)	ref_Te (Nm)
1	15	0
2	15	0.25
3	15	0.5

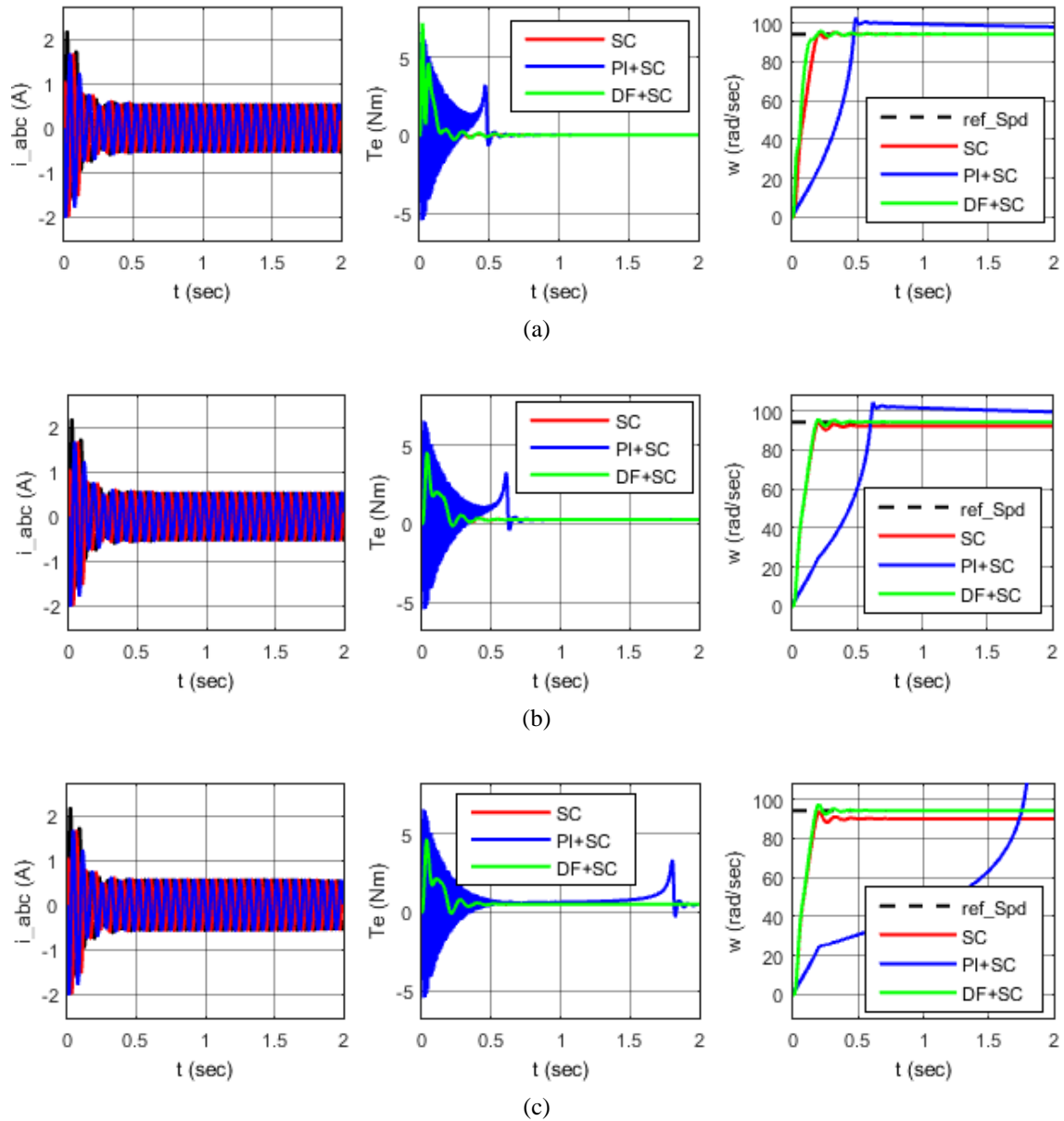


Figure 5. The third simulation test results

The fourth simulation test input information is given in Table 4 and simulation test results are shown in Figure 7. The motor current, torque and speed graphs is given Figure 7 (a), respectively. Consequences are 50 Hz and 0 Nm in Figure 7 (a), 50 Hz and 0.25 Nm in Figure 7 (b), 50 Hz and 0.5 Nm in Figure 7 (c). It is seen that the motor

current is equal in these three simulation tests. When examining torque graphs in three methods, it is seen that the desired result is obtained by SC and DF+SC methods. When speed graphs examined it is understood that SC and DF+SC methods are successful by the motor running at idle and load but PI+SC control is not successful.

Table 4. The fourth simulation tests input information

Tests	ref_f (Hz)	ref_Te (Nm)
1	50	0
2	50	0.25
3	50	0.5

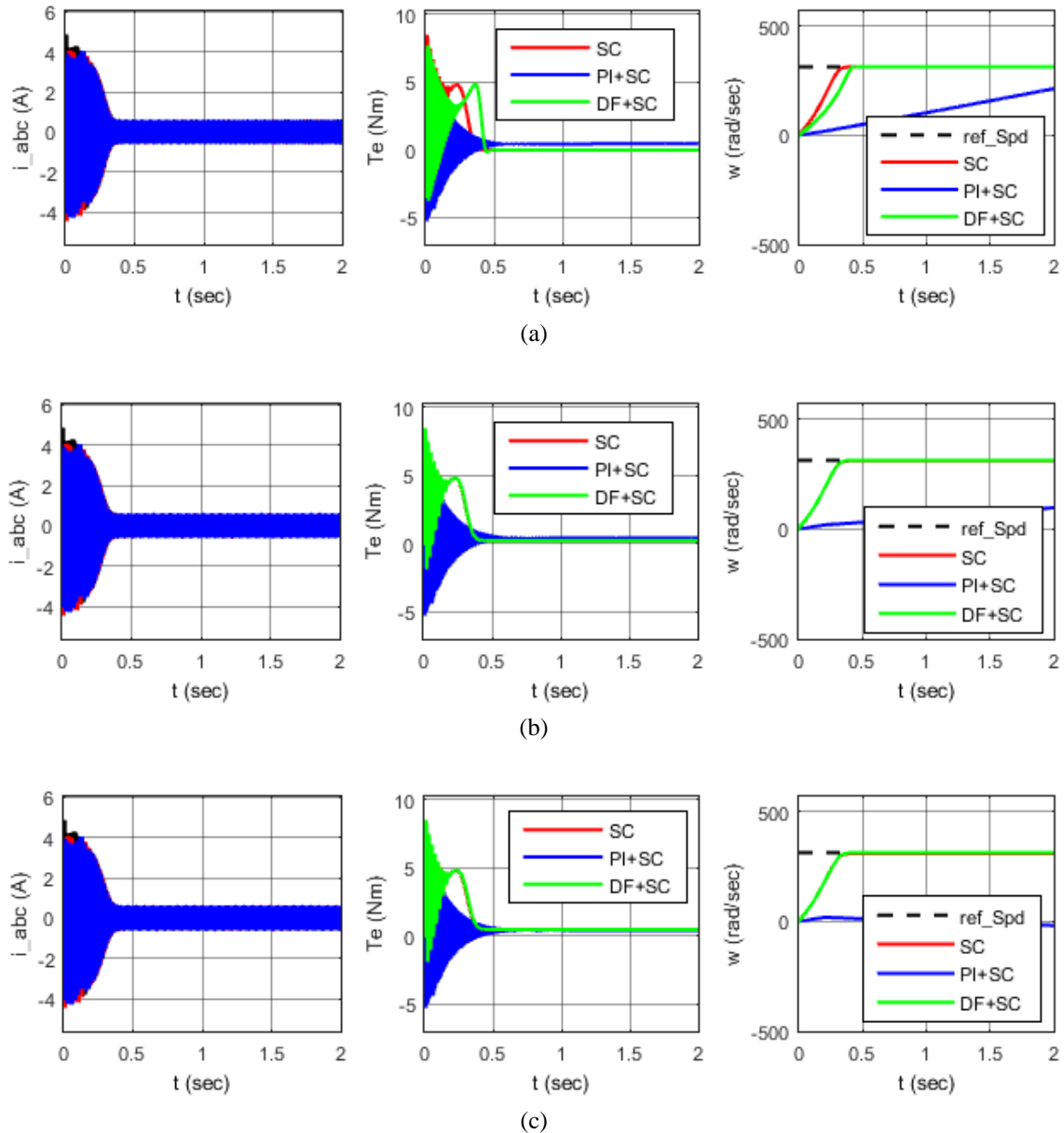


Figure 6. The fourth simulation test results

Figure 8 is presented for a better understanding of the performance of the proposed method. A frequency of 25 Hz was applied to the IM. The results obtained from different load moments are shown on the same graph and the traceability of the results has been increased.

In Figure 8 (a) shows the torque graph, (b) the velocity graph. Figure 8 (b) shows that the motor operates at a constant speed. It is understood that the motor has 0%, 0.25% and 0.51% speed error respectively when operating at 0, 0.25 and 0.5 Nm load torque.

4. CONCLUSION

In this study, IM' Scalar Speed Control with Difference Frequency were performed. The results obtained from this study can be listed as follows.

- SC: It shows desired performance in all speed during idling. When working in load, at low speeds it does not show the desired performance. The desired control results are obtained when working at high speed in idle and load [17].
- PI+SC: Coefficients determined for PI controller shows desired performance in specific speed ranges. Nevertheless, while the range of speed and torque changes it does not demonstrate the required performance [19], [22].
- DF+SC: This proposed method indicates the desired control performance in each case tested.

- The obtained results indicate that the proposed method will contribute speed control operations done in industrial areas. When considering developments in this area, much more work can be made.

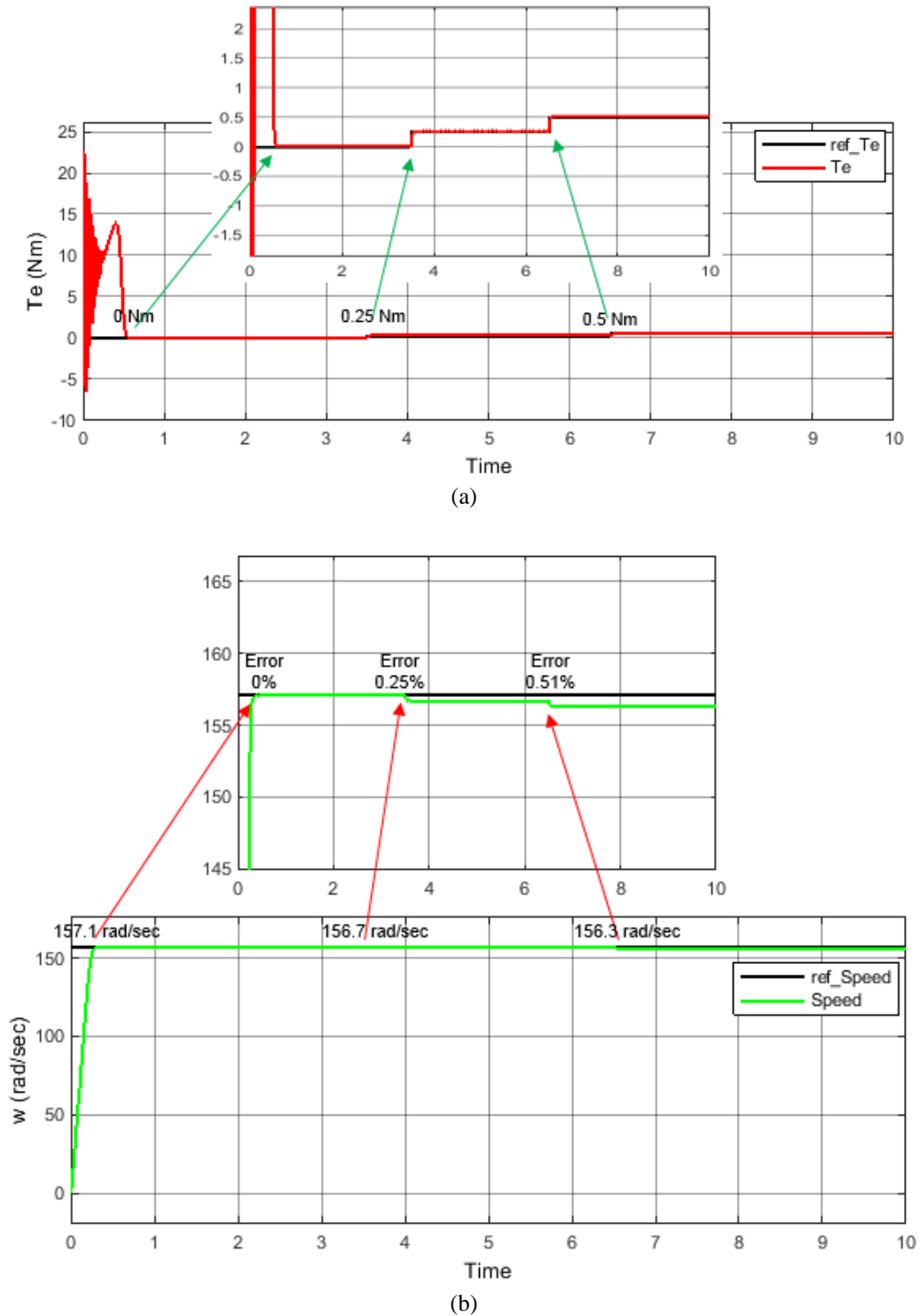


Figure 8. Performance analysis of motor at constant speed and different load moments

SYMBOLS AND ABBREVIATIONS

i_{sd}, i_{sq} : dq currents

Ψ_{sd}, Ψ_{sq} : dq fluxes

L_s : Statore inductance

L_r : Rotor inductance

L_m : Mutual inductance

r_s : Stator resistance

T_L : Load torque

w_e	: Electric angular speed
w_r	: Rotor angular speed
J	: Inertia constant
B	: Friction constant
p	: Number of poles

ACKNOWLEDGEMENT

I would like to express my gratitude to Dear Prof. Dr. A. Sefa AKPINAR, who died in 2015 (My PhD Consultant).

REFERENCES

- [1] Bose B.K., "*Modern Power Electronics and AC Drives*", Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall PTR, (2002).
- [2] Kouro S., Bernal R., Miranda H., Silva C.A., and Rodriguez J., "High-Performance Torque and Flux Control for Multilevel Inverter Fed Induction Motors", *IEEE Transaction on Power Electronics*, 22(6): 2116–2123, (2007).
- [3] Wang C.C. and Fang C. H., "Sensorless Scalar Controlled Induction Motor Drives with Modified Flux Observer", *IEEE Journals & Magazines*, 22(8): 61 – 61, (2002).
- [4] G. Fouad, "AC Electric Motors Control Advanced Design Techniques and Applications", Wiley, New Delhi, India, 2013.
- [5] Paula S. J., Jeromeb J., Kakania S., 'Active Rectifier Based Harmonic Compensator for a Direct Torque Controlled Induction Motor Drive', *IETE Journal of Research*, 61(6): 573-580, (2015).
- [6] Tuncer S., 'High-Performance Vector Control Strategy For Multilevel Inverter Fed Induction Motor', *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30(1), 119-130, (2015).
- [7] Zou X., Zhu P., Kang Y. and Chen J., 'Speed identification for vector control of induction motors with voltage decoupling control principle', *38th IAS Annual Meeting, Conference Record of the Industry Applications Conference*, 12-16 Oct., (2003).
- [8] A. Djahbar, B. Mazari, and M. Latroch, 'Control strategy of three-phase matrix converter fed induction motor drive system', *The IEE Pulsed Power symposium*, 8-8 Sept., Basingstoke, UK: IEEE, (2005).
- [9] Singh B., Garg V., Bhuvaneshwari G., 'A 24-pulse AC-DC converter employing a pulse doubling technique for vector-controlled induction motor drives', *IETE Journal of Research*, 54(4): 314-322, (2008).
- [10] Sen P.C., 'Electric Motor Drives and Control Past Present, and Future', *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 37(6): 562-575, (1990).
- [11] Ebrahim A., 'Adaptive nonlinear induction motor control.' PhD Thesis, The University of Alabama, Alabama, (2007).
- [12] Haitham A., Atif I., Jaroslaw G., '*High Performance Control of AC Drives With Matlab/Simulink Models*', Noida, India: Wiley, (2012).
- [13] Bay Ö., Görgünoğlu S. "Design and Implementation of 3-Phase Induction Motors Speed Controller by Using Low Cost 8-Bit Microcontroller". *Journal of Polytechnic*, 12(3): 143-150, (2009).
- [14] Irmak E. and Vadi S., "Asenkron Motorlarda Frekans Değişimi ile Hız Kontrolü Deneyinin Bilgisayar Üzerinden Gerçekleştirilmesi", *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 21(1): 57-62, (2011).
- [15] Ilango G. S., Rajasekar N., "An improved energy saving v/f control technique for solar powered single-phase induction motor", *Energy Conversion and Management*, 50(12): 2913-2918, (2009).
- [16] Liu Y., Piepenbreier B., "Comparison of Stabilization Methods for V/f controlled Induction Motor Drive System", *PCIM Europe 2014, International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion*, 20-22 May., Nuremberg: IEEE, (2014).
- [17] Bose B. K., 'Adjustable Speed AC Drives-A Technology Status Review', *Proceedings of the IEEE*, 70(2): 116-135, (1982).
- [18] Jisha L. K., Thomas A. P., 'A comparative study on scalar and vector control of Induction motor drives, International conference on Circuits', *Controls and Communications (CCUBE)*, IEEE Conference Publications; 27-28 Dec. 2013; Bengaluru, India: IEEE, (2013).
- [19] Rubaai A., Kotaru R., 'Online identification and control of a DC motor using learning adaptation of neural networks', *IEEE Transactions on Industry Applications*, 36(3): 935-942, (2000).
- [20] Menghal P.M., Laxmi A.J., 'Dynamic modeling, simulation & analysis of induction motor drives', *International Conference on Science Engineering and Management Research (ICSEMR)*, 27-29 Nov., Chennai: IEEE, (2014).
- [21] Draou A., Miloud A., Miloud Y., 'A Variable Gains PI Speed Controller In a Simplified Scalar Mode Control Induction Machine Drive - Design and Implementation', *International Conference on Control, Automation and Systems*; 27-30 Oct., South Korea, (2010).
- [22] Özçira S., '*Control Methods of Permanent Magnet Synchronous Motor and Industrial Applications.*' MSc, Yıldız Technical University, İstanbul, Turkey, (2007).
- [23] Trzynadlowski A.M., *Control of Induction Motors*, London, UK: Academic Press, (2001).
- [24] Krishnan R., *Electric Motor Drives-Modeling Analysis and Control*, NJ, USA: Prentice-Hall, (2001).
- [25] Irmak E. and Vadi S., "Asenkron Motorlarda Frekans Değişimi ile Hız Kontrolü Deneyinin Bilgisayar Üzerinden Gerçekleştirilmesi", *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 21(1): 57-62, (2011).
- [26] Zhang Y., ve et al., "A Novel Speed Estimation Method of Induction Motors Using Real-Time Adaptive Extended Kalman Filter", *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 13(1): 287-297, (2018).
- [27] Xin Z. and et al., "An improved flux observer for field-oriented control of induction motors based on dual second-order generalized integrator frequency-locked loop", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 5(1): 513-525, (2017).
- [28] Ehsani M., et al., *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles*, UK: CRC Press, (2018).
- [29] Zhou Z. and et al., "Neural network-based discrete-time command filtered adaptive position tracking control for

- induction motors via backstepping”, *Neurocomputing*, 260: 203-210, (2017).
- [30] Wang N., Haisheng Y. and Xudong L., “DTC of induction motor based on adaptive sliding mode control”, *2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*. IEEE, (2018).
- [31] Lftisi F. and Rahman M.A., “A novel finite element controller map for intelligent control of induction motors, Information Technology”, *Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*, 2017 8th IEEE Annual. IEEE, (2017).
- [32] Nozaki Y., Takafumi K. and Eisuke M., “Analysis of linear induction motors for HSST and linear metro using finite difference method”, *Proc. LDIA2005*, Tokyo, 168-171, (2005).
- [33] Zhao J. and Bose B.K., “Evaluation of membership functions for fuzzy logic controlled induction motor drive”, *In IECON-Proceedings*, 1: 229-234, (2002).
- [34] Rashed M., Peter M. and Stronach F.A., “Nonlinear adaptive state-feedback speed control of a voltage-fed induction motor with varying parameters”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 42(3): 723-732, (2006).
- [35] Paice D.A., “Induction motor speed control by stator voltage control”, *IEEE Transactions on power Apparatus and systems*, 2: 585-590, (1968).
- [36] Feng Y. and et al., “Speed Control of Induction Motor Servo Drives Using Terminal Sliding-Mode Controller”, *Advances in Variable Structure Systems and Sliding Mode Control—Theory and Applications*, 115: 341-356, (2017).
- [37] Guo Y. and et al., “Speed-sensorless direct torque control scheme for matrix converter driven induction motor”, *The Journal of Engineering*, 13: 432-437, (2018).
- [38] Lin F.-J., Shen P.-H. and Hsu S.-P., “Adaptive backstepping sliding mode control for linear induction motor drive”, *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 149(3): 184-194, (2002).
- [39] Kubota H., Kouki M. and Takayoshi N., “DSP-based speed adaptive flux observer of induction motor”, *IEEE transactions on industry applications*, 29(2): 344-348, (1993).
- [40] Holtz J., “Sensorless control of induction motor drives”, *Proceedings of the IEEE*, 90(8): 1359-1394, (2002).
- [41] Li J., Hai-Peng R. and Yan-Ru Z., “Robust speed control of induction motor drives using first-order auto-disturbance rejection controllers”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(1): 712-720, (2015).
- [42] Otkun Ö., Doğan R. Ö. and Akpınar A. S., “Neural Network Based Scalar Speed Control of Linear Permanent Magnet Synchronous Motor”, *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 30(3): 395-404, (2015).
- [43] Rao G. M. and Srikanth G., “Comparative Study of Maximum Torque Control by PI ANN of Induction Motor”, *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(7): 4620-4625, (2018).
- [44] Bulut M., Kurt M., Demirtaş M., “Application of Genetic-Fuzzy Controller to a DC Motor”, *Journal of Polytechnic*, 7(4): 277-283, (2004).
- [45] Hui L., Yunfei L., Xin D. and Huajug Z., “Optimization of Adaptation Gains of Full-order Flux Observer in Sensorless Induction Motor Drives Using Genetic Algorithm”, *Information Technology Journal*, 8(4): 577-582, (2009).
- [46] Douiri M. R., Belghazi O., Cherkaoui M., “Recurrent Self-Tuning Neuro-Fuzzy for Speed Induction Motor Drive”, *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 24(9): (2015).
- [47] Ustun S. V. and Demirtaş M., “Optimal tuning of PI coefficients by using fuzzygenetic for V/f controlled induction motor”, *Expert Systems with Applications*, 34(4): 2714-2720, (2008).
- [48] Chen C., Lai C. and Sun W., “Fuzzy Testing for Regression Coefficient of Fuzzy Numbers”, *Journal of Testing and Evaluation*, 41(1): 1-6, (2012).
- [49] Orłowska-Kowalska T., Blaabjerg F., Rodríguez J., *Advanced and Intelligent Control in Power Electronics and Drives*, Springer, New York, (2014).
- [50] Krim S., Gdaim S., Mtibaa A., et al., “Design and Implementation of Direct Torque Control Based on an Intelligent Technique of Induction Motor on FPGA”, *Journal of Electric Engineering and Technology*, 10(4): 30-40, (2015).
- [51] Shun-Yuan W., Chwan-Lu T., Shou-Chuang L., et al., “An Adaptive Supervisory Sliding Fuzzy Cerebellar Model Articulation Controller for Sensorless Vector-Controlled Induction Motor Drive Systems”, *Sensors*, 15(4): 7323-7348, (2015).
- [52] Adiuku C.O., Beig A.R., Kanukollu S., ‘Sensorless closed loop V/f control of medium-voltage high-power induction motor with synchronized space vector PWM’, *IEEE 8th., GCC Conference and Exhibition (GCCCE)*, 1-4 Feb., Muscat: IEEE, (2015).
- [53] Sarıoğlu M. K., Gökaşan M., Boğosyan O., ‘*Induction Machines and Control*’, İstanbul: Birsen Press, (2003).
- [54] Soliman H. M., "Studying the Steady State Performance Characteristics of Induction Motor with Field Oriented Control Comparing to Scalar Control." *European Journal of Engineering Research and Science*, 18-25, (2018).
- [55] Kiran K., Sukanta D. and Diksha S., "Model predictive field oriented speed control of brushless doubly-fed reluctance motor drive." *2018 International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC)*. IEEE, (2018).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



Farklı martenzit hacim oranlarında kırılma tokluğu değerlerinin incelenmesi

Investigation on fracture toughness values for various martensite volume fractions

Yazar(lar) (Author(s)): Mehmet Fatih AYCAN

ORCID: 0000-0001-9434-5955

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Aycan M.F., “Farklı martenzit hacim oranlarında kırılma tokluğu değerlerinin incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 23(2): 277-282, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.520142

Farklı Martenzit Hacim Oranlarında Kırılma Tokluğu Değerlerinin İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Mehmet Fatih AYCAN

Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 31.01.2019 ; Kabul/Accepted : 02.04.2019)

ÖZ

Bu çalışmada AISI 4140 ve AISI 4340 çeliklerde martenzit hacim oranlarının sertlik ve kırılma tokluğu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çeliklerin ara kritik sıcaklık aralıkları belirlenerek üçer farklı sıcaklıkta su verme işlemi, ardından görüntü işleme yöntemi ile içyapı görüntüleri üzerinde her koşul için martenzit hacim oranı belirlenmiştir. Ara kritik sıcaklığın artmasıyla martenzit hacim oranları artış göstermiştir. Numunelere sertlik ve kırılma tokluğu testleri uygulanmış, martenzit miktarının artmasıyla numunelerin sertlikleri artarken kırılma tokluğunun azaldığı belirlenmiştir. AISI 4340'ın, AISI 4140'a göre daha yüksek sertlik değerlerine sahip olmasına rağmen daha düşük kırılma tokluk değerlerine sahip olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: AISI 4140, AISI 4340, martenzit hacim oranı, mekanik özellikler.

Investigation on Fracture Toughness Values for Various Martensite Volume Fractions

ABSTRACT

In this study the effect of martensite volume fraction on hardness and fracture toughness properties of AISI 4140 and AISI 4340 steels were investigated. After determining of intercritical boundary temperatures for steels, the water quenching processes were performed at three intercritical annealing temperatures. The martensite volume fractions were determined from microstructure images for each condition by using image processing method. The martensite volume fraction increased with increasing intercritical temperature. The hardness and fracture toughness tests were conducted on the specimens. Increasing of martensite content increased the hardness values whereas decreased the fracture toughness values. Although AISI 4340 had higher hardness than AISI 4140, it had lower fracture toughness properties.

Keywords: AISI 4140, AISI 4340, martensite volume fraction, mechanical properties.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

AISI 4140 ve AISI 4340 çelikleri endüstride yaygın olarak kullanılan malzemeler arasında yerlerini almıştır. Birçok malzemeye göre daha iyi seviyede ısıtma işlemi ve sertleşebilirlik özellikleri ile söz konusu çelikler uzay, havacılık ve otomotiv sanayinde geniş uygulama alanı bulmaktadır [1]. Çeliklerde dayanım, sertlik ve kırılmaya karşı gösterilen direnç aranan mekanik özelliklerin başında gelmektedir. Bu özelliklerin elde edilmesi için çeliklere alternatif farklı malzeme türlerinin geliştirilmesinin yanında mevcut malzemelerin ısıtma işlemi ve termomekanik işlemler ile özelliklerinin iyileştirilmesi seçeneği de yaygın olarak tercih edilmektedir [2]. Örneğin yüksek dayanım değerlerine sahip AISI 4340'ın kısmen düşük tokluk ve süneklik değerleri, gerçekleştirilen ısıtma işlem süreçleri ile önemli ölçüde artırılarak yüksek dayanım ve yüksek tokluk değerleri elde edilmektedir [3].

Mekanik özelliklerin iyileştirilmesi noktasında kullanılan bir başka yöntem ise alaşımlı çeliklerden çift fazlı çeliklerin imal edilmesidir. Genellikle iki fazın aynı anda bulunduğu içyapıya sahip çelikler çift fazlı çelik

olarak adlandırılırken, bu çeliklerde ara kritik sıcaklık aralığında gerçekleştirilen ısıtma işlem uygulamaları ile kompozit malzemelerde olduğu gibi iki veya daha fazla yapının bir arada bulunması sağlanmaktadır. Bu şekilde mekanik özelliklerin iyileştirilmesi sağlanırken, aynı tür malzemelerde farklı mekanik özelliklerin elde edilmesi mümkün olmaktadır. Bu yapıların ilk diğeri yapılaraya göre kısmen daha sünek olan ferrit olurken, diğeri faz yapısı gerçekleştirilen ısıtma işlem uygulamasına bağlı olarak martenzit, beynit veya kalıntı östenitten oluşmaktadır [1],[4].

Çift fazlı çelikler geleneksel ısıtma işlem görmüş çeliklere göre dayanım ve tokluk değerlerinin daha yüksek olmasına bağlı olarak özellikle düşük ağırlık ve yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Çift fazlı çeliklerde fazlar arasında başarılı bir denge oluşturulması durumunda oldukça yüksek mekanik özellikler elde edilebilmektedir. Ferrit-martenzit ve ferrit-beynit çift fazlı yapılar çelik endüstrisinde yaygın olarak tercih edilmektedir [3],[5]. Östenitin belirli sıcaklık değerinden farklı soğuma hızlarında dönüşmesi ile elde edilen martenzitin beynite göre daha sert ve kırılma tokluğunda olması, ferrit-martenzit yapısını ferrit-beynit yapısına göre mekanik özellikler açısından tercih edilebilir hale getirmektedir. Çift fazlı

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

yapıda ferrit ve martenzit fazlarının hacimsel oranları malzemenin mekanik özellikleri üzerinde etkili olan temel faktör olarak kabul edilmektedir. Yapı içerisindeki martenzit hacim oranının artması malzemenin akma dayanımı, çekme dayanımı, sertlik vb. mekanik özelliklerinin artmasına neden olmaktadır [6],[7]. Bunun yanında yüksek martenzit oranları uzama, süneklik, kırılma tokluğu ve darbe enerjisi gibi mekanik özellikler üzerinde de olumsuz etki oluşturmaktadır [5],[8],[9]. Farklı ara kritik sıcaklık değerlerinde gerçekleştirilen ısı işlemler ile farklı martenzit hacim oranları elde edilirken, elde edilen hacim farkları mekanik özellikleri doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple malzemelerin mekanik özelliklerinin daha iyi seviyelere gelmesi için ideal hacim oranlarının belirlenmesi oldukça büyük önem kazanmaktadır. Bu sayede belirlenen uygun faz kombinasyonları ile dayanım değerleri yüksek, sert malzemeler elde ederken aynı zamanda kırılma tokluğu yüksek sünek malzemelerin elde edilmesi de sağlanmaktadır [10].

Bu çalışmada, martenzit hacim oranlarının farklı iki orta karbon düşük alaşım çeliğinin sertlik ve kırılma tokluğu üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmanın amacı endüstride ıslah çelikleri olarak da adlandırılan orta karbon düşük alaşım çeliklerinden AISI 4140 ve AISI 4340'ın başka bir ısı işlem sürecine maruz bırakılmadan su verme işlemleri sonrasında elde edilen martenzit fazı ile mekanik özellikler arasındaki değişimin ortaya konulması amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

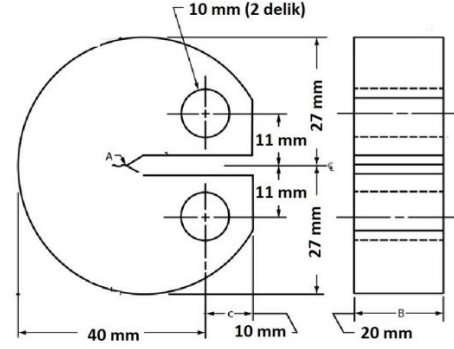
2.1 Deneysel Numunelerin Hazırlanması ve Isıl İşlem Uygulamaları (Preparing Specimens and Heat Treatment Processes)

AISI 4140 ve AISI 4340 çeliklerinin kullanıldığı çalışmada ASTM E399 standardına göre disk şekilli deney numuneleri üretilmiş ve belirlenen koşullarda ısı işlem uygulamalarına tabi tutulmuştur [11]. Çeliklerin üretici tarafından beyan edilen ortalama kimyasal bileşimleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Deneysel çalışmada kullanılan çeliklerin kimyasal bileşimi (% ağırlıkça) (Chemical composition of steels used in experimental studies (% wt))

	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
AISI 4140	0,39	0,21	0,65	0,93	0,23	0,01
AISI 4340	0,37	0,32	0,59	1,16	0,25	1,35

Silindirik olarak temin edilen malzemeler, gerekli talaşlı imalat işlemlerinden sonra ilgili standartta verilen nihai boyutlara getirilmiş olup, deney numunelerinin boyutsal ölçüleri Şekil 1'de verilmiştir. Numunelerin boyutsal ölçüleri ilgili şekilde oransal olarak gösterilmiştir.



Şekil 1. Deney numunesinin genel görünümü (General view of specimen)

Çeliklerin ara kritik sıcaklık aralığının alt ve üst sınırlarını ifade eden Ac1 ve Ac3 sıcaklık değerleri, Andrew deneysel denklemlerinin J. Trzaska ve L.A. DobrzaEski tarafından revize edilmiş versiyonu kullanılarak teorik olarak belirlenmiştir [12]. Belirlenen sınır değerler Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Teorik olarak elde edilen Ac1 ve Ac3 sıcaklık değerleri (The temperature of Ac1 and Ac3 determined theoretically)

AISI 4140		AISI 4340	
Ac1	Ac3	Ac1	Ac3
793°C	739°C	785°C	724°C

Her bir çelik için ara kritik sıcaklık aralığında ve ostenitleme bölgesinden su verme işlemleri gerçekleştirilmiştir. AISI 4140 çeliği 750°C, 780°C ve ostenitleme sıcaklığı olan 850°C'de, AISI 4340 çeliği ise 730°C, 750°C ve ostenitleme sıcaklığı olan 850°C'de su verme işlemlerine tabi tutulmuştur. Numuneler atmosfer kontrollü fırınlarda 30 dakika süreyle ısıtma işlemine maruz bırakılan oda sıcaklığındaki sürekli karıştırma işlemine maruz bırakılan suda soğutma işlemine tabi tutulmuştur.

2.2 Metalografik İnceleme ve Martenzit Hacim Oranlarının Belirlenmesi (Metallographic Investigation and Determining of Martensite Volume Fraction)

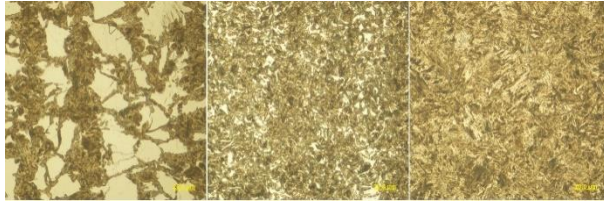
Su verme işlemlerinden sonra numunelerden örnekler alınarak içyapı incelemesi gerçekleştirilmiştir. Metalografik süreçlerin tamamlanmasının ardından optik mikroskop altında incelenen numunelerden farklı büyütme değerlerinde içyapı görüntüleri alınmıştır. Farklı büyütmelerde alınan içyapı görüntüleri, görüntü işleme yöntemi ile incelenmiş ve numunelerdeki ferrit ve martenzit hacim oranları belirlenmiştir. Martenzit hacim oranlarının belirlenmesi, içyapı görüntüsünde yer alan açık ve koyu renkli alanların dağılımların birbirine oranı şeklinde gerçekleştirilmiştir. Koyu renkler martenzit bölgeyi temsil ederken açık renkli alanlar ferrit olarak tanımlanmıştır. Kullanılan yöntemde, hacim oranları %5 hassasiyet ile hesaplanmıştır.

2.3 Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi (Determining of Mechanical Properties)

Sertlik ölçümleri Rockwell C yöntemi ile ASTM E18 standardına göre ve en az beş ölçüm alınarak gerçekleştirilmiştir [13]. Her iki malzeme grubu için de geçerli olmak üzere, sertlik değerleri dağılımlarının birbirine göre istatistiksel olarak anlamlı veya anlamsız olduğunun belirlenmesi amacıyla Student T analizleri yapılmıştır. Analizler sonunda elde edilen p değerleri 0,05'ten küçük ise dağılımlar birbirine göre anlamlı aksi halde anlamsız olarak kabul edilmiştir. Isıl işlem uygulamalarının tamamlanmasından sonra numunelerde ASTM E399 standardına göre ön çatlak oluşturulmuş ve daha sonra numuneler kırılma tokluğu deneyine tabi tutulmuştur. Deneyler, eksenel çekme yükü altında 60 kN kapasiteli Instron marka çekme deney cihazında 1 mm/min sabit hızda gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneylerde numunelerin kırıldığı andaki yükler kritik yükler olarak kabul edilmiş ve bu kritik yükler kullanılarak ilgili ASTM standardı referans alınarak her bir koşul için kritik gerilme yoğunluk faktörü (K_{Ic}) belirlenmiştir.

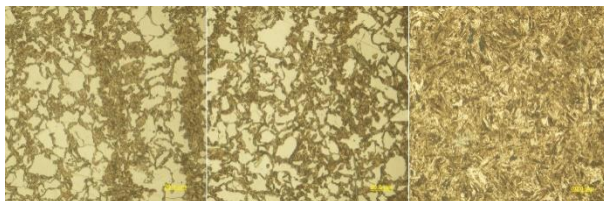
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Ara kritik sıcaklık değerlerinde gerçekleştirilen su verme işlemleri sonunda elde edilen içyapı görüntüleri incelendiğinde yapıların büyük ölçüde ikili yapıda olduğu belirlenirken, söz konusu ikili yapının da martenzit ve ferrit fazlarından oluştuğu görülmektedir. Elde edilen içyapı görüntüleri AISI 4140 ve AISI 4340 için sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3'te verilmiştir.



(a) (b) (c)

Şekil 2. AISI 4140 çeliğinin farklı martenzit hacim oranlarındaki içyapı görüntüleri; (a) %45, (b) %85, (c) %100 (Micrographs of AISI 4140 steel on different martensite volume fractions; (a) 45%, (b) 85%, (c) 100%)



(a) (b) (c)

Şekil 3. AISI 4340 çeliğinin farklı martenzit hacim oranlarındaki içyapı görüntüleri; (a) %40, (b) %55, (c) %100 (Micrographs of AISI 4340 steel on different martensite volume fractions; (a) 40%, (b) 55%, (c) 100%)

İçyapı görüntülerinde toplam alan içerisindeki martenzit fazının oranı olarak ifade edilen martenzit hacim oranları AISI 4140 için Çizelge 3 ve AISI 4340 için Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 3. AISI 4140 çeliğinin martenzit hacim oranları (Martensite volume fractions of AISI 4140)

Su Verme Sıcaklığı (°C)	Martenzit Hacim Oranı (%)
850	100
780	85
750	45

Çizelge 4. AISI 4340 çeliğinin martenzit hacim oranları (Martensite volume fractions of AISI 4340)

Su Verme Sıcaklığı (°C)	Martenzit Hacim Oranı (%)
850	100
750	55
730	40

Numuneler üzerinden alınan sertlik ölçümlerinin ortalamaları ve standart sapma değerleri her bir martenzit hacim miktarı için Çizelge 5'te, farklı sıcaklıklara ait sertlik dağılımlarının istatistiksel olarak anlamlı veya anlamsız olduğunu gösteren p değerleri ise Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 5. Numunelere ait sertlik değerleri (Hardness values of specimens)

	AISI 4140			AISI 4340		
Martenzit Hacim Oranı (%)	100	85	45	100	55	40
Sertlik (HRC)	54,9	49,4	32,4	58,2	49,7	30,4
Standart Sapma	1,65	1,55	1,95	1,50	0,92	0,82

Çizelge 6. Farklı su verme sıcaklıklarında elde edilen sertlik dağılımları için p değerleri (p values of hardness distributions for various water quenching temperatures)

	AISI 4140		AISI 4340		
	780°C	760°C	750°C	730°C	
850°C	2.82 E-06	8.23 E-10	850°C	2.37 E-06	7.23 E-10
780°C		2.76 E-09	750°C		9.99 E-09

Kırılma tokluğu deneyi sonucunda elde edilen kritik yüklerle bağlı olarak farklı ısıl işlem koşulları için hesaplanan kırılma tokluğu değerleri AISI 4140 ve AISI 4340 çelikleri için sırasıyla Çizelge 7 ve Çizelge 8'de verilmiştir.

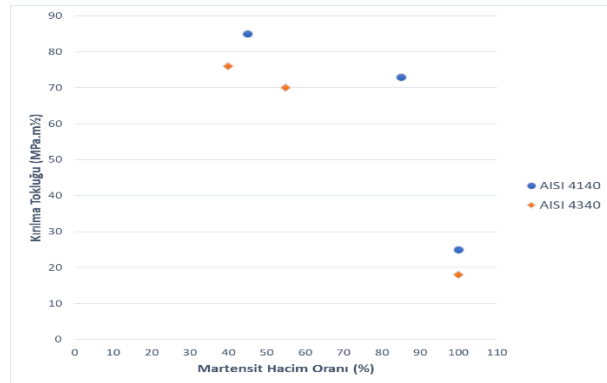
Çizelge 7. AISI 4140 çeliğinin farklı martenzit hacim oranlarında kırılma tokluk değerleri (Fracture toughness values of AISI 4140 steel for various martensite volume fractions)

Martenzit Hacim Oranı (%)	Kırılma Tokluğu (MPa.m ^{1/2})
100	25
85	73
45	85

Çizelge 8. AISI 4340 çeliğinin farklı martenzit hacim oranlarında kırılma tokluk değerleri (Fracture toughness values of AISI 4340 steel for various martensite volume fractions)

Martenzit Hacim Oranı (%)	Kırılma Tokluğu (MPa.m ^{1/2})
100	18
55	70
40	76

AISI 4140 ve AISI 4340 çeliklerinin her ikisine ait kırılma tokluğu değerlerinin martenzit hacim oranlarına göre değişimi Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Martenzit hacim oranlarına karşılık gelen kırılma tokluk değerleri (Fracture toughness values on various martensite volume fractions)

Alaşım elementlerinin miktarına göre elde edilen ara kritik sıcaklık sınır değerlerinin teorik olarak hesaplanmasından sonra farklı martenzit hacim oranlarının elde edilmesi amacıyla ara kritik bölgede her iki malzeme grubu için ikişer sıcaklık değeri belirlenmiştir. Belirlenen sıcaklıklarda gerçekleştirilen su verme işlemleri sonunda AISI 4140 çeliği için %45 ve %85 martenzit hacim oranları, AISI 4340 için ise %40 ve %55 martenzit hacim oranları elde edilmiştir. Bunun yanında östenitleme sıcaklığında gerçekleştirilen su verme işlemleri ile her iki malzeme grubu için de yapının tamamen martenzit olması sağlanmıştır. Ferrit ve östenitten oluşan yapının ara kritik sıcaklıklarda gerçekleştirilen su verme işlemlerinden sonra hızlı soğuma koşullarına bağlı olarak östenit fazının martenzite dönüşmesi sağlanarak, yapıların ferrit ve martenzitten oluşması gerçekleştirilmiştir [5]. İyapı görüntüleri incelendiğinde genel olarak açık renkli

bölgelerin ferrit, koyu renkli bölgelerin ise ağırlıklı olarak martenzit olduğu görülmektedir. İlgili sürekli soğuma eğrilerine göre oda sıcaklığında gerçekleştirilen su verme işlemi sonrasında teknik olarak beynit oluşma olasılığı oldukça düşük olmasına rağmen, uygulama sonrasında numune boyutlarının da etkisi ile koyu renkli bölgelerde çok az miktarda beynit fazı da oluşabilmektedir. Ancak incelenen numunelerin iç yapılarının ferrit ve martenzit fazlarından oluştuğu kabul edilmiştir.

Bir takım ısı işleme süreçlerinin gerçekleştirilmesiyle elde edilen çift fazlı çeliklerin, tek fazlı çeliklere göre daha iyi mekanik özelliklere sahip oldukları ve bazı ihtiyaçları aynı anda karşılayabildikleri bilinmektedir [14]. İyapının ferrit ve martenzitten oluşması sağlanarak çelik numunelerin kompozit malzeme gibi davranması sağlanmaktadır. Kısmen daha sünek olan ferrit ana yapı; dayanım ve sertlik değerleri oldukça yüksek olan martenzit ise takviye elemanı gibi rol oynamaktadır [4]. Ferrit içerisinde martenzitin bulunması yapıda dislokasyon yoğunluğunun artmasını ve buna bağlı olarak yapının dayanım değerlerinin yükselmesini sağlamıştır [15]. Gerçekleştirilen su verme işlemleri neticesinde numunelerin su verme sıcaklıklarına göre farklı iyapılara ve buna bağlı olarak da farklı mekanik özelliklere sahip oldukları görülmüş; iyapıdaki farklılaşmanın, numunelerin sertlik ve kırılma davranışları üzerinde doğrudan etkili olduğu belirlenmiştir. Numunelerin sertliklerine bakıldığında; sertliğin artan martenzit hacim oranları ile doğrusal olarak değiştiği, artan martenzit hacim oranı ile birlikte beklendiği gibi artış gösterdiği görülmektedir. Fereiduni ve Banadkouki'nin [7] AISI 4140'ın çift fazlı bölgede mekanik özelliklerini inceledikleri çalışmalarında sertlik değerlerinin %100 martenzit hacim oranında en yüksek olduğu, azalan martenzit hacim oranları ile doğrusal olarak azaldığı ve en düşük oran olan %40'ta ise en düşük sertlik değerine ulaştığı belirlenmiştir. Bunun yanında aynı koşullarda temperleme işleminin uygulanması durumunda martenzit hacim oranının sertlik üzerindeki etkisinin oldukça düşük olduğu tespit edilmiştir.

AISI 4340 çeliğinin daha düşük martenzit hacim oranlarına sahip olmasına rağmen, AISI 4140 çeliğine göre daha yüksek sertlik değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Aynı koşullarda gerçekleştirilen su verme işlemi ile iyapıların %100 martenzit olması durumunda AISI 4340'ın 58,2 HRC ile AISI 4140'a göre daha yüksek sertlik değerine ulaştığı, dolayısıyla AISI 4340 çeliğinin AISI 4140 çeliğine göre daha sertleşebilir nitelikte olduğu görülmektedir. Çeliklerin mekanik özelliklerindeki değişim davranışı genel olarak benzerlik göstermesine rağmen büyüklük olarak farklılık göstermektedir.

AISI 4140'tan farklı olarak AISI 4340'ta nikel bulunması, kritik soğutma hızını düşürmekte ve daha kolay ısı işleme tabi tutulmasını sağlamaktadır. Bunun yanında nikelin krom ile birlikte bulunması çeliklerde sertleşebilirlik, darbe dayanımı ve yorulma dayanımı gibi mekanik özellikleri önemli ölçüde iyileştirdiği geçmişte

yapılan çalışmalarda ortaya konmuştur [16]. Ayrıca nikelin çeliklerde yapı içerisindeki ferrit sertliğini artırmasına bağlı olarak, çift fazlı yapıda ana yapının toplam sertliği artarken beraberinde yapının daha gevrek bir ferrit ile çevrenmesine bağlı olarak da malzemenin süneklik davranışının olumsuz etkilenmesine neden olmaktadır [17]. Bunun yanında AISI 4140'ın su verme işlemi ile hızlı soğumaya maruz kalması neticesinde östenitin martenzite dönüşmesi esnasında numunelerin iç kısımlarında çok az miktarda kısmen beynitin de var olması, beraberinde yapının AISI 4340'a göre göreceli olarak daha sünek olmasında etkili olmuştur.

Kırılma tokluğu deneyi sonunda elde edilen değerler incelendiğinde her iki malzeme için de kırılma tokluğunun martenzit hacim oranı ile ters orantılı olarak değiştiği belirlenmiştir. Artan martenzit hacim oranı ile birlikte daha kırılma hale gelen numunelerin kırılma tokluk değerleri azalma eğilimi göstermiştir. Numunelerin sertlik değerleri kırılma tokluğu ile ilgili bir gösterge kabul edilmesine rağmen, her iki mekanik özelliğin birbiri için tahmin aracı olarak kullanılmasının uygun olmadığı ortaya konmuştur [18]. Zamani ve arkadaşları [19] ara kritik sıcaklıklarda su verme işlemleri sonunda AISI 4130 çeliğinin mekanik özellikleri ve kırılma davranışındaki değişimi incelemiştir. Artan su verme sıcaklıklarına bağlı olarak sertlik değerlerinin yükseldiği, bunun aksine kırılma davranışının olumsuz etkilendiği ortaya konmuştur. Sertlik değerlerinin yükselmesinde ve dayanım değerlerindeki azalma eğiliminde martenzit fazı içerisindeki karbon miktarının etkili olduğu tespit edilmiştir. Orta karbonlu AISI 4130 çeliğinde yüksek martenzit fazı içerisinde bulunan yüksek karbon miktarı yapının gevrek bir hale gelmesinde birincil etken olarak ifade edilmiştir.

Kırılma yüzeyleri incelendiğinde düşük martenzit oranına sahip numunelerin daha mat ve dalı yapıda olduğu, yüksek martenzit oranına sahip olanların ise parlak ve az çukur yapısına sahip olduğu tespit edilmiştir. Singh ve arkadaşları [20] düşük karbonlu çeliğin (%0,21 C) farklı ara kritik sıcaklıklardaki su verme işlemlerinin sertlik ve tokluk özellikleri üzerindeki etkisini inceledikleri çalışmada, artan kritik sıcaklık değerine bağlı olarak tokluk ve sertlik değerlerinin artış gösterdiğini belirlemiştir. Düşük karbonlu çeliklerde tokluk özellikleri artan martenzit hacim oranı ile artış gösterirken, orta karbonlu çeliklerde yüksek karbon miktarının etkisi ile tokluk özelliklerinin azalma gösterdiği ortaya konmuştur. Movaheda ve arkadaşları [21] SAE 1010 düşük karbonlu çeliğin beş farklı martenzit hacim oranında mekanik özelliklerindeki değişimi incelemiştir. Sertlik değerlerinin martenzit miktarının artması ile artış gösterdiği ancak çekme dayanımı ve darbe enerjisinin ise %50 martenzit hacim oranına kadar yükselme eğiliminde olduğu fakat sonrasında azalmaya başladığı tespit edilmiştir. Martenzit fazındaki karbon miktarının çift fazlı çeliklerin dayanım değerleri, süneklik ve kırılma özellikleri üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Faz dönüşümü

sonrasında oluşan dislokasyon yoğunluğunun bu özellikleri olumlu etkilediği ancak artan martenzit hacim oranının artmasıyla martenzit içerisindeki karbon miktarının azalması ile söz konusu değerlerin azalmaya başladığı ortaya konmuştur.

AISI 4140 çeliğinin tamamen martenzit yapıda olması durumunda 25 MPa/m² olan kırılma tokluğu değerinin martenzit hacim oranının %45'e düştüğünde 85 MPa/m²'ye yükseldiği belirlenmiştir. Benzer şekilde AISI 4340 çeliğinin %100 martenzit hacim oranında 18 MPa/m² olan kırılma tokluğu, %40 martenzit hacim oranında 76 MPa/m²'ye yükselmiştir. Martenzit hacim oranlarının farklı olması ve kırılma tokluk değerlerinin birbirine yakın olması nedeniyle çeliklerin kırılma davranışları ile ilgili karşılaştırma yapılmasının istatistiksel olarak anlamlı olmamasının yanında, genel olarak benzer kırılma davranışı sergiledikleri görülmektedir. Her iki çeliğin aynı koşullarda gerçekleştirilen su verme işlemleri sonunda AISI 4140 çeliğinin AISI 4340 çeliğine göre daha yüksek kırılma tokluğuna sahip olduğu görülmektedir. Prabhu ve arkadaşları da [22] SAE 1040, SAE 4140 ve SAE 4340 çeliklerine farklı ara kritik sıcaklıklarda su verme işlemi uygulamış ve mekanik özelliklerinin sıcaklığa bağlı değişimlerini incelemiştir. Çekme dayanımı ve sertlik değerlerinin artan sıcaklıkla birlikte her üç çelik türü için de artma eğiliminde olduğu bunun yanında darbe dayanımının ise azalma gösterdiği belirlenmiştir. SAE 4340'ın içerdiği nikel sayesinde diğer çeliklere göre sertleşebilirlik ve dayanım değerlerinin daha iyi olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca SAE 4140 ve SAE 4340'ta bulunan krom ve molibdenin oluşan karbürlerinin her iki çeliğin kırılma tokluğunu olumsuz etkilediği ifade edilmiştir.

Martenzit hacim oranının artmasına bağlı olarak yapı içerisinde dislokasyon yoğunluğunun artması ile dislokasyon hareketliliği sınırlanmaktadır. Sınırlanan dislokasyon miktarının artması yapının sünekliği üzerinde olumsuz etki oluşturmaktadır. Yüksek ara kritik sıcaklık değerlerinde gerçekleştirilen su verme işlemleri ile sınırlı biçimde ve yüksek yoğunluklu martenzit oluştuğundan yapının sünekliği azalmaktadır [4]. Sünekliğin düşmesi beraberinde tokluk ve darbe enerjisinin de düşmesine neden olmaktadır. Yapının dayanım ve sertlik değerlerini artıran dislokasyon yoğunluğu ve hareketleri, beraberinde süneklik, tokluk ve darbe enerjisini düşürdüğü ortaya konmuştur [23].

Diğer yandan yapıda martenzit hacminin artması numunelerde mikro çatlak oluşma ve gevrek kırılma görülme olasılığını oldukça artırmaktadır. Östenitin martenzite dönüşmesi esnasında oluşan mikro çatlaklar, numunelerin kırılma davranışını ve darbe dayanımını hatta çekme dayanımını olumsuz etkilemektedir [24]. Ayrıca, ferrit fazının bu noktada engelleyici veya geciktirici rol oynamasından dolayı, toplam ferrit miktarının azalması da malzemenin uzama ve darbe enerjisi üzerinde olumsuz etki oluşturduğu belirlenmiştir [3].

6. SONUÇ (CONCLUSION)

Orta karbon düşük alaşım çelikleri ara kritik sıcaklık bölgesinde yapılan su verme işlemi ile elde edilen farklı martenzit hacim oranlarında farklı sertlik ve kırılma tokluk değerlerine sahip olmaktadır. Artan martenzit hacim oranlarına bağlı olarak sertlik değerleri artış gösterirken, kırılma tokluk değerleri azalma göstermektedir. Her iki malzemenin mekanik özelliklerinin genel olarak benzer olmasına rağmen, AISI 4140 çeliğinin AISI 4340 çeliğine göre daha düşük sertlik değerlerine sahip olduğu fakat daha yüksek kırılma tokluk değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. İslah çelikleri olarak adlandırılan AISI 4140 ve AISI 4340 çeliklerinin normal koşullarda birçok uygulama için yeterli mekanik özelliklere sahip olmasına rağmen, bu çeliklerin çift fazlı bölgede gerçekleştirilecek uygun ısıtma işlem uygulamaları ile mekanik özelliklerinin daha iyi hale getirilebileceği ortaya konmuştur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Zare A. and Ekrami A., "Influence of martensite volume fraction on impact properties of triple phase (TP) steels", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22(3): 823-829, (2013).
- [2] Saeidi N. and Ekrami A., "Impact properties of tempered bainite-ferrite dual phase steels", *Mater. Sci. Eng. A*, 527(21-22): 5575-5581, (2010).
- [3] Saeidi N. and Ekrami A., "Comparison of mechanical properties of martensite/ferrite and bainite/ferrite dual phase 4340 steels", *Materials Science and Engineering A*, 523(1-2): 125-129, (2009).
- [4] Dalalli Isfahani A., Shafye A. and Sharifi H., "Impact and tensile properties of ferrite-martensite dual-phase steels", *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 38(2): 141-147, (2009).
- [5] Güral A. and Tekeli S., "Microstructural characterization of intercritically annealed low alloy PM steels", *Materials and Design*, 28(4): 1224-1230, (2007).
- [6] Zare A. and Ekrami A., "Influence of martensite volume fraction on tensile properties of triple phase ferrite-bainite-martensite steels", *Materials Science and Engineering A*, 530(1): 440-445, (2011).
- [7] Fereiduni E. and Banadkouki G., "Improvement of mechanical properties in a dual-phase ferrite-martensite AISI4140 steel under tough-strong ferrite formation", *Materials and Design*, 56(1): 232-240, (2014).
- [8] Topçu O. and Übeyli M., "On the microstructural and mechanical characterizations of a low carbon and micro-alloyed steel", *Materials and Design*, 30(8): 3274-3278, (2009).
- [9] Asadi M., De Cooman B.C. and Palkowski H., "Influence of martensite volume fraction and cooling rate on the properties of thermomechanically processed dual phase steel", *Materials Science and Engineering A*, 538(1): 42-52, (2012).
- [10] Kumar A., Singh S. and Ray K., "Influence of bainite/martensite-content on the tensile properties of low carbon dual-phase steels", *Materials Science and Engineering A*, 474(1-2): 270-282, (2008).
- [11] ASTM E399-17, "Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials", *ASTM International*, (2017).
- [12] Pawłowski B., "Critical points of hypoeutectoid steel - prediction of the pearlite dissolution finish temperature A_{c1f} ", *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 49(2): 331-337, (2011).
- [13] ASTM E18-18a, "Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials", *ASTM International*, (2018).
- [14] İkpeseni, S., Onyekpe, B. and Ovri, H., "Influence of intercritical annealing temperature on mechanical properties and microstructure of 0.23%C low alloy steel", *Nigerian Journal of Technology (NIJOTECH)*: 34(3): 499-505, (2015).
- [15] Karimi M., Kheirandish S. and Gomes U., "Study on work hardening behaviour of ferritic-bainitic dual phase steels", *22th CBECiMat-Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, Natal, RN, Brasil, 6226-6235, (2016).
- [16] El-Bitar T., Gamil M., Mousa I. and Helmy F., "Development of carbon-Low alloy steel grades for low temperature applications", *Materials Science and Engineering A*, 528(18): 6039-6044, (2011).
- [17] Shibuya M., Toda Y., Sawada K., Kushima H. and Kimura K., "Effect of nickel and cobalt addition on the precipitation-strength of 15Cr ferritic steels", *Materials Science and Engineering A*, 528(16-17): 5387-5393, (2011).
- [18] Funni S., Koul M. and Moran A., "Evaluation of properties and microstructure as a function of tempering time at intercritical temperatures in HY-80 steel castings", *Engineering Failure Analysis*, 14(5): 753-764, (2007).
- [19] Zamani M., Mirzadeh H. and Ghasemi H. M., "Mechanical properties and fracture behavior of intercritically annealed AISI 4130 chromoly steel", *Materials Research Express*, 5(6): 066548, (2018).
- [20] Singh V.P., Gaikwad A., Khan M.Z.R. and Tiwari K., "Development of dual phase steel and determination of its mechanical properties and comparison with low carbon steel", *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*: 5(7): 151-159, (2014).
- [21] Movaheda P., Kolahgara S., Marashia S.P.H., Pouranvarib M. and Parvina N., "The effect of intercritical heat treatment temperature on the tensile properties and work hardening behavior of ferrite-martensite dual phase steel sheets", *Materials Science and Engineering A*, 518(1-2): 1-6, (2009).
- [22] Prabhu S.M., Kini U.A., Sharma S.S. and Gurumurthy B.M., "Heat treatment and mechanical characterization of dual phase (ferrite-martensite) medium carbon low alloy steels", *International Journal for Technological Research In Engineering*, 3(8): 1776-1779, (2016).
- [23] Sun C., Liu S., Misrac R., Li Q. and Li D., "Influence of intercritical tempering temperature on impact toughness of a quenched and tempered medium-Mn steel: Intercritical tempering versus traditional tempering", *Materials Science & Engineering A*, 711(1): 484-491, (2018).
- [24] Manoj M.K., Pancholi V. and Nath S.K., "Mechanical properties and fracture behavior of medium carbon dual phase steels", *International Journal of Research in Advent Technology*, 2(4): 2443-249, (2014).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



7075-T6 alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerine tavlama işleminin etkisinin deneysel olarak araştırılması

Experimental investigation of annealing parameters effects on microstructure and mechanical properties of 7075-T6 alloy

Yazar(lar) (Author(s)): Mehmet Yasin DEMİREL¹, İbrahim KARAAĞAÇ²

ORCID¹: 0000-0002-4244-8562

ORCID²: 0000-0001-6727-3650

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Demirel M. Y., Karaağaç İ., “7075-T6 alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerine tavlama işleminin etkisinin deneysel olarak araştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 23(2): 283-289, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.534322

7075-T6 Alaşımının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Tavlama İşleminin Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması

Araştırma Makalesi / Research Article

Mehmet Yasin DEMİREL^{1*}, İbrahim KARAAĞAÇ²

¹Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

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

(Geliş/Received : 01.03.2019 ; Kabul/Accepted : 02.04.2019)

ÖZ

7075-T6 alaşımları yüksek mekanik özelliklere ve oda sıcaklığında sınırlı şekillendirilebilirliğe sahip malzemelerdir. Şekillendirme öncesi uygulanan tavlama işlemi alüminyum alaşımlarında şekillendirilebilirliği arttırmakta ancak alaşımın mekanik ve mikroyapı özelliklerini de etkilemektedir. Bu etkileri belirlemek amacıyla, 7075-T6 sac malzemesinin mekanik ve mikroyapı özelliklerine tavlama işleminin etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Tavlama sıcaklığı (100°C, 200°C, 300°C ve 400°C) ve tavlama süresi (6, 30 ve 60 dk.) deney parametreleri olarak belirlenmiştir. Alaşımın mekanik özelliklerindeki değişimi tespit etmek için çekme ve sertlik ölçme testleri kullanılmıştır. Tavlama işleminin 7075-T6 malzemesinin mekanik özelliklerini azalttığı gözlemlenmiştir. Oda sıcaklığı (20°C)'nden 100°C-60 dk. tavlama parametresine kadar sac malzemenin mekanik özelliklerinde değişim gözlemlenmezken, 200°C-6 dk. tavlama parametresinden itibaren mekanik özelliklerin azalmaya başladığı ve 200°C-60 dk.'dan sonra da bu azalmanın belirgin bir şekilde arttığı tespit edilmiştir. Malzemenin oda sıcaklığında sahip olduğu mekanik özelliklerin 400°C deki tavlama işlemi sonucunda %68,85 azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durumun, 200°C tavlama sıcaklığı 60 dk. tavlama süresinden sonra malzemenin mikroyapısında çökelti oluşumunun ve tanecik boyutunun artmaya başlamasından kaynaklandığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: 7075-T6, tavlama süresi, tavlama sıcaklığı.

Experimental Investigation of Annealing Parameters Effects on Microstructure and Mechanical Properties of 7075-T6 Alloy

ABSTRACT

7075-T6 alloys have high mechanical and limited formability properties at room temperature. In aluminium alloys, the applied annealing process before the forming operation improve formability but also affect the mechanical and microstructural properties of the alloy. In order to determine these effects, the effects of annealing parameters on the mechanical and microstructural properties of 7075-T6 sheet material were investigated experimentally. Annealing temperature (100, 200, 300 and 400 °C) and annealing time (6, 30 and 60 min.) were determined as experimental study parameters. Tensile and hardness measurement tests were used to observe the variation in mechanical properties of the alloy. It was observed that the annealing process reduces the mechanical properties of the 7075-T6 material. In experimental study, it was determined that while annealing parameters changed from 20°C to 100 °C-60 min. mechanical properties of sheet were not changed. Also, it was determined that the mechanical properties of sheet started to decrease after the 200°C-6 min. annealing parameter and this decrease was significantly increased after 200°C-60 min. annealing parameter. It was observed that the mechanical properties of the material at 20°C were decreased by 68,85% as a result of the annealing process at 400°C. It was determined that, this situation comes from due to precipitation formation and material grain size increase after the 200 °C annealing temperature and 60 min. annealing time.

Keywords: 7075-T6, annealing time, annealing temperature.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

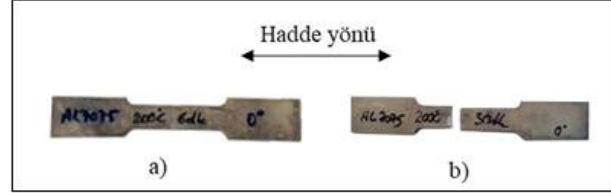
Havacılık başta olmak üzere çok sayıda endüstrisinde sıklıkla kullanılan ve ısıl işlem uygulanabilen 7XXX serisi alüminyum alaşımları, yüksek mekanik özelliklere ve oda sıcaklığında düşük şekillendirilebilirlik özelliklerine sahiptirler. Şekillendirme kabiliyetini arttırmak için, Al-Zn-Cu alaşımı olan 7XXX serisi alüminyum malzemelere şekillendirme öncesi ısıl işlem

uygulamak veya şekillendirme esnasında ısı kullanmak gerekmektedir [1, 2]. 7075 malzemeler için sıklıkla uygulanan yaşlandırma ısıl işlemi, bu alaşıma yaygın olarak uygulanan ısıl işlem yöntemidir. Bu ısıl işlem süreci sırasıyla; çözültü alma, su verme ve yaşlanma olmak üzere üç basamakta gerçekleşmektedir. Çözültü alma işleminde fazların çözülmesi, su verme işleminde aşırı doymuş yapının oluşturulması ve yaşlanma işleminde ise çözünen atomların oda sıcaklığında veya daha yüksek sıcaklıklarda çökmesi işlemlerinden oluşmaktadır. 7XXX alaşımlarının oda sıcaklığı gibi

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : yasindemirel@outlook.com

düşük sıcaklıklarda yaşlandırılmasıyla, yoğun Guinier - Preston (GP) bölgelerinin oluşumu sağlanmaktadır. T6 işlemi, çözelti ısıl işlemi görmüş ve suni olarak yaşlanmış olarak tanımlanmaktadır [3, 4]. Literatürde 7075 malzeme için tavlama ve yaşlandırma ısıl işlemleri için sınırlı sayıda çalışma yapıldığı tespit edilmiştir. Isadare v. d. yaptıkları çalışmalarında tavlama ve yaşlandırma ısıl işleminin Al-Zn alaşımının mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerine etkilerini deneysel araştırmışlardır. Tavlama işleminin malzemede yüksek tokluk ve süneklik, yaşlandırma ısıl işleminin ise yüksek çekme, akma dayanımı ve sertlik değerleri oluşturduğu gözlemlenmiştir [5]. Diğer taraftan literatürde tavlama ısıl işleminin 7075 alaşımının mekanik özelliklerine etkileri de deneysel araştırılmıştır. Çetin v. d. çalışmalarında, 7075-T6 alüminyum alaşımının 20°C, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C ve 300°C sıcaklıklardaki çekme davranışlarını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Çalışmalar sonucunda, 100°C sıcaklığa kadar 7075-T6 malzemenin mekanik özelliklerinin sıcaklıkla önemli bir oranda değişim göstermediğini, 100°C'den 250°C'ye kadar lineer azalan bir trendle

kullanılmıştır. Deney numuneleri 0° hadde yönünde, tel erozyon tezgahında ASTM-E8M standardına uygun olarak kesilerek, çekme testi için hazırlanmıştır. Hazırlanan çekme numuneleri 100, 200, 300 ve 400°C sıcaklıklarda ve 6, 30, 60 dk. tavlama süreleri parametrelerine göre elektronik kontrollü fırında tavlantıya alınmıştır. Çekme numunelerinin test öncesi ve test sonrasında ait görüntüleri Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. 7075-T6 çekme testi numuneleri a) Test öncesi b) Test sonrası (7075-T6 tensile test samples a) Before the test b) After the test)

Malzemenin yapılan kimyasal analiz testi sonucu elde edilen kimyasal bileşimi de Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. 7075-T6 alüminyum alaşımının kimyasal analiz sonuçları (Chemical analysis result of 7075-T6 aluminium alloy)

Malzeme	% Al	% Zn	% Cu	% Cr	% Ti	% Fe	% Mn	% Zr	% Ni	% Diğer
7075-T6	92,432	5,481	1,534	0,169	0,144	0,112	0,037	0,035	0,016	0,04

mekanik özelliklerin değiştiğini, 300°C sıcaklıkta ise mekanik değerlerin ciddi oranda düştüğünü tespit etmişlerdir [6]. Panigrahi ve Jayaganthan da çalışmalarında, 7075 alaşımına -150°C ve -75°C sıcaklıkta uygulanan kriyojenik soğutma işlemi (CR) sonrasında 150°C ile 400°C sıcaklıkları arasında 1 saat boyunca tavlama işlemi uygulamışlardır. CR işlemi uygulanmış 7075 alaşımının yeniden kristalleşme sürecinin 150°C tavlama sıcaklığında başladığı ve 250°C sıcaklıkta tamamlandığı gözlemlenmiştir. Bu alaşımın sertlik ve çekme mukavemeti değerlerinin 150°C ile 250°C tavlama sıcaklıkları arasında ani olarak azaldığı ancak daha sonraki sıcaklık değerlerinde ise ani bir değişiklik olmadığını gözlemlemiştir [7].

Literatürde 7075 malzemenin ısıl işlemi ile ilgili çalışmalarda tavlama sürelerinin etkilerinin yeterince araştırılmadığı belirlenmiştir. Ayrıca, yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde ısıl işlemin malzemeye olan etkileri de araştırılmamıştır. Yapılan bu çalışmada, endüstriden hazır olarak temin edilen çözelti ısıl işlemi görmüş ve suni olarak yaşlandırılmış 7075-T6 sac malzemenin, elektronik kontrollü fırınla tavlama işlemi sonucunda malzemenin mikroyapısındaki ve mekanik özelliklerindeki değişimlerin deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Deneysel çalışmada; T6 ısıl işlemi uygulanmış 3 mm kalınlığında 7075 alüminyum sac levha malzeme

2.1. Tavlama İşlemi (The Annealing Process)

Çalışma kapsamında mikroyapı incelemesi ve sertlik ölçümü için 20 mm x 40 mm boyutlarında kesilerek hazırlanan deney malzemelerine değişen sıcaklıklarda (100, 200, 300, 400°C) ve değişen tavlama sürelerinde (6, 30, 60 dk.) tavlama ısıl işlemi uygulanmıştır. Tavlama sıcaklığında bekleme süreleri, literatürde 25,4 mm (1 inch) parça kalınlığı için 1-2 saat olarak belirlenmiştir [8]. Bu çalışma kapsamında da 3 mm kalınlığındaki deney numuneleri için tavlama sıcaklığında bekletilme süresi 6 dk. olarak hesaplanmıştır. Diğer tavlama süreleri ise tavlama süresinin etkilerini daha iyi gözlemlemek amacıyla 30 ve 60 dk. olarak belirlenmiştir.

Tavlama işleminde çekme numuneleri ve deney malzemeleri fırın içerisinde bulunan seramik raflara yerleştirilerek fırının kapağı kapatılmıştır. Fırının kontrol ünitesinden tavlama işlemi için ayarlanan program numarası seçilerek tavlama işlemine başlanmıştır. 60 dk.'da belirlenen tavlama sıcaklığına ulaşan fırın, bu sıcaklıkta belirlenen tavlama süresince bekletilmiştir. Tavlama sıcaklığında bekleme süresi bittikten sonra, sirkülasyon fanı çalışır halde fırının kapağı kapalı olarak oda sıcaklığına ulaşana kadar beklenmiştir. Oda sıcaklığına gelen fırının kapağı açılarak numuneler çıkarılmış ve ayrı ayrı numune kaplarına konulmuştur. Tavlama işleminde kullanılan fırın ve tavlama işlemi için deney numunelerinin fırındaki yerleşimleri Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Tavlama işlemi ortamı a) Elektronik kontrollü fırın b) Tavlanan deney numuneleri (The environment of annealing process a) Electronic controlled furnace b) Annealed test samples)

2.2. Mikroyapı İncelemesine Hazırlık (The Preparation for The Microstructure Investigation)

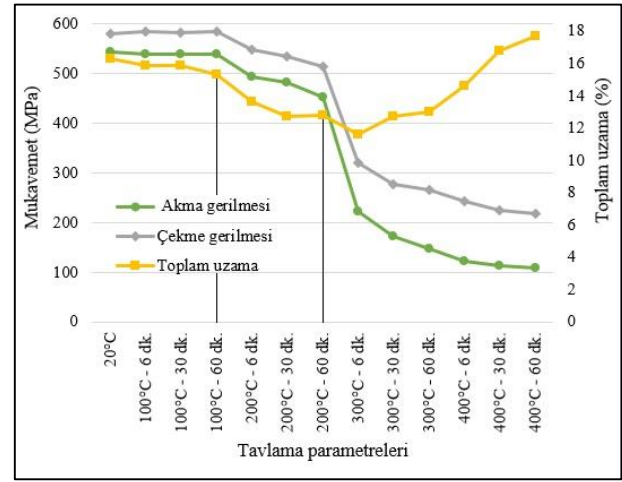
7XXX alaşımları genellikle GP bölgeleri ve / veya η' / η çöktürmeleri içermektedir. GP bölgeleri çözülmüş elementlerle zenginleştirilmiş ve istisnai olarak küçük boyutlara (<3 nm) kümeler benzemektedir. Yaşlandırma ısıl işlemi sırasında, kararlı GP bölgeleri, T6 temperin güçlendirici fazı olan yarı kararlı η' (MgZn₂) fazının çekirdeklenme merkezleri olarak işlev görmektedir. Bu alaşımların sertleşme kabiliyeti buna bağlı olarak hem çözelti hem de söndürme banyosu sıcaklığına ve ayrıca soğuma hızına bağlı olmaktadır [9-11].

Tavlama sıcaklıklarının ve tavlama sıcaklığında bekletme sürelerinin deney malzemelerinin mikro yapısına etkilerinin incelemek amacı ile çalışma kapsamında deney malzemelerinin mikro yapılarının incelemesi taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Mikro yapı incelemesi öncesinde deney numuneleri metalurjik ön işlemlerden geçirilerek hazırlanmıştır. Deney numunelerinin dağlanmasında Keller ayracı (1 ml HF, 1,5 ml HCl, 2,5

ml HNO₃, 95ml H₂O) kullanılarak yaklaşık 30 sn. boyunca dağlama işlemi yapılmıştır.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

7075 alüminyum alaşımına değişen sıcaklık ve sürelerde uygulanan tavlama işleminin mekanik özelliklere etkileri incelenmiştir. Bu amaçla; öncelikli olarak tavlanan malzemelere çekme deneyleri uygulanarak gerilim uzama diyagramları elde edilmiştir. Şekil 3'te tavlama parametrelerine göre çekme testinden elde edilen mekanik özelliklerdeki değişimler grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 3. Tavlama parametrelerine göre mukavemet ve toplam uzama değişimi (Strength and total elongation change according to annealing parameters)

7075-T6 malzemenin 100°C sıcaklık ve 60 dk. tavlama süresine kadar mekanik özelliklerinde herhangi bir değişim gözlenmediği 20°C'de ki özelliklerini koruduğu gözlemlenmiştir. Malzemenin 200°C sıcaklık ve 60 dk.

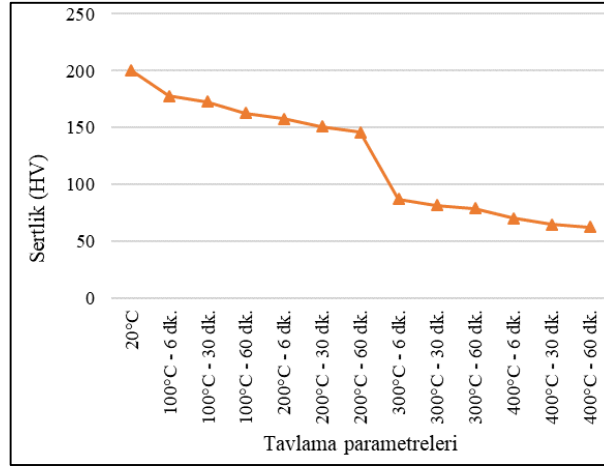
Çizelge 2. Tavlama parametrelerine göre 7075-T6 sac malzeme çekme testi sonuçları (The tensile test results for 7075-T6 sheet material according to annealing parameters)

Sıcaklık (°C)	Süre (dk.)	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Maksimum çekmedeki çekme gerinimi (%)	Kopmadaki çekme gerinimi (%)
20	-	542,253	579,336	0,163	0,191
100	6	539,156	583,438	0,159	0,191
	30	538,755	581,581	0,159	0,200
	60	538,688	583,365	0,153	0,194
200	6	493,425	548,164	0,136	0,162
	30	482,021	533,840	0,127	0,155
	60	451,467	513,534	0,128	0,156
300	6	221,437	319,663	0,116	0,154
	30	172,125	277,109	0,127	0,171
	60	148,134	265,356	0,130	0,175
400	6	123,105	241,977	0,146	0,192
	30	113,081	223,914	0,168	0,216
	60	108,317	218,203	0,177	0,225

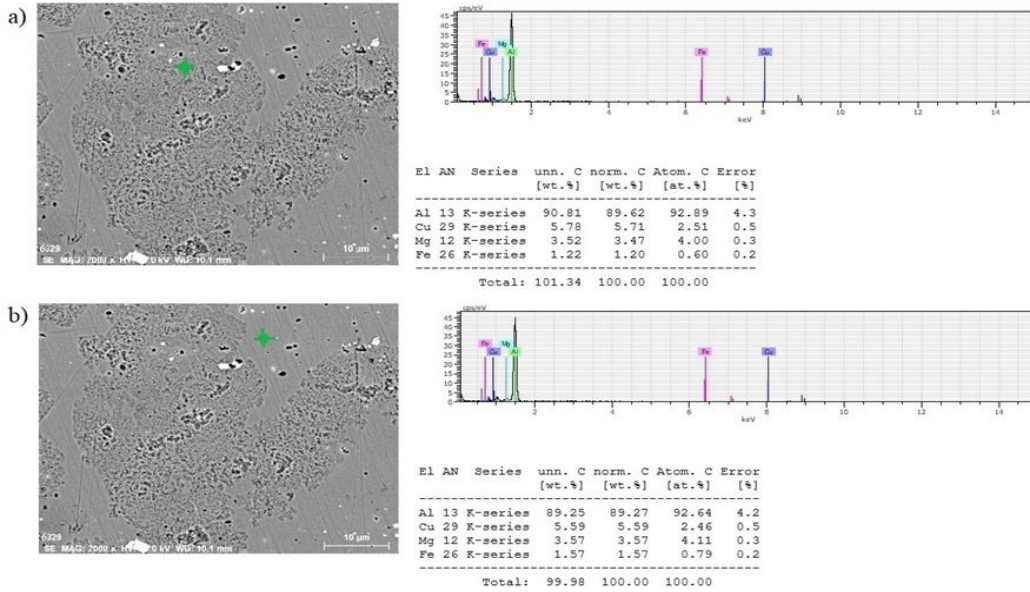
tavlama süresine kadar akma gerilmesinin %16,74 oranında azaldığı tespit edilmiştir. 300°C sıcaklık ve 6 dk.'lık tavlama işleminin kritik bir işlem olduğu mekanik özelliklerin %59,16 oranında belirgin bir şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Aynı şekilde sıcaklığın 400°C'ye kadar artırılması ile de mekanik özelliklerin azalmaya devam

numunelerin sertlik ölçümlerinden elde edilen sertlik değerleri Şekil 4'te verilmiştir.

Deney numunelerinin ölçülen sertlik değerlerinde 200°C sıcaklık ve 60 dk. tavlama süresine kadar düzgün bir azalma gözlemlenmiştir. Bu noktaya kadar sertlik değerlerinin %27,24 oranında azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4. Tavlama parametrelerine göre sertlik değerlerindeki değişim (Change in hardness values according to annealing parameters)



Şekil 5. 20°C mikroyapı incelemesi a) Ana metal b) Tanecik / çökelti (RT microstructure analysis a) Base metal b) Particle / precipitate)

ettiği gözlemlenmiştir. Tavlamanın mekanik özelliklere etkisi çekme testleriyle de gözlemlenmiştir. Test sonrası elde edilen mekanik özellikler de Çizelge 2'de verilmiştir.

Numunelerin sertlik değerleri parçanın uzun kenarı referans alınarak aralarında 10 mm uzaklık olan birbirini izleyen 3 noktadan Vickers sertlik ölçüm cihazı ile ölçülmüş, ölçülen değerlerin ortalamaları alınmıştır. Malzemenin 20°C'de ki sertlik değeri 200,67 HV ölçülmüştür. Farklı tavlama parametrelerinde tavlanan

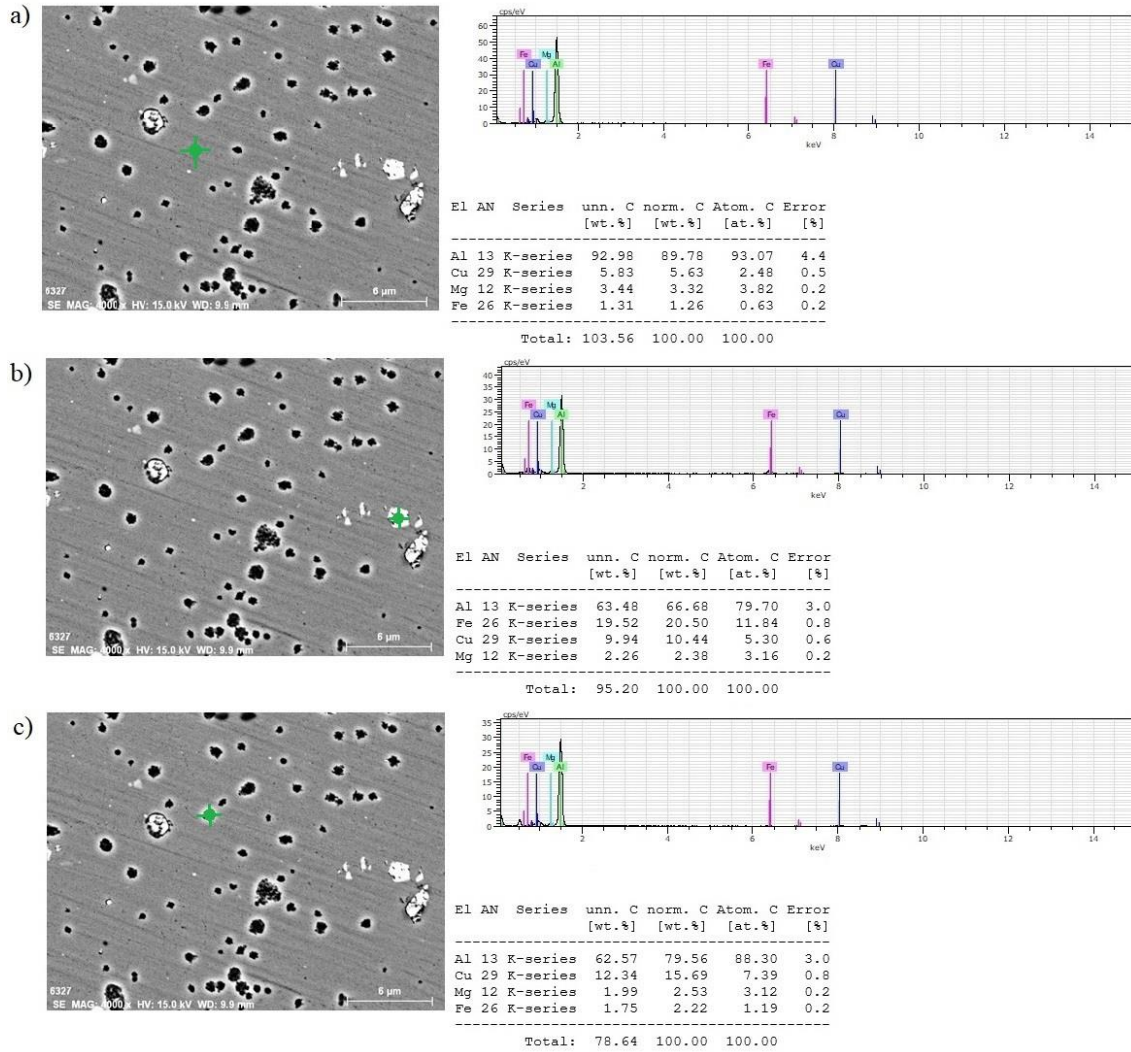
300°C sıcaklık ve 6 dk.'lık tavlama işlemi sonucunda ölçülen sertlik değerinde %56,39 oranında belirgin bir şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen tavlama işlemlerinde süre artışına paralel olarak sertlik ve mekanik değerlerin azalmasının, GP bölgeleri ile η' fazının ana yapı içerisinde çözünmesinin bir sonucu olduğu literatürde de belirtilmiştir. Ayrıca, yüksek tavlama sıcaklıklarında ise aşırı yaşlanma ile tane içi ve tane sınırlarındaki çökeltilerin kabalaşmasına bağlı olarak sertlik değerlerinin azaldığı belirtilmektedir [12].

Mekanik özelliklerdeki değişimi daha iyi yorumlamak için ısıtılma işlemlerinin malzemenin iç yapısında oluşturduğu etkiler de araştırılmıştır. Mikroyapıya ait SEM görüntüleri ve analiz sonuçları Şekil 5-7'de verilmiştir.

Mikroyapı incelemeleri baz metalde bazı intermetaliklerin varlığını göstermektedir. Bu intermetalikler literatürde Al_7Cu_2Fe , $(Al, Cu)_6(Fe, Cu)$ ve Mg_2Si olarak tanımlanmıştır. T6 tavlama işlemi sonrası oluşan karakteristik mikroyapı bileşenleri GP bölgeleri ile yarı kararlı η' ($MgZn_2$) çökeltilerinden oluşmaktadır. Buna bağlı olarak, malzemede $20^\circ C$ ile $200^\circ C$ sıcaklık 60 dakika tavlama süresi arasında yüksek mekanik özellikler görülmektedir. Bu durum malzemelerin uzama miktarlarında da azalmaya sebep olmaktadır. Düşük sıcaklık değerlerinde, nanometre boyutlu yarı kararlı η' çökeltiler, uyumlu GP bölgelerine bağlıdır. Bu çökeltiler, dislokasyon hareketlerini önleyen bir sabitleme mekanizması gibi hareket ederek, mukavemet değerlerinin artmasına yol açmaktadır [13-15].

$217-250^\circ C$ 'de η' fazının oluşması, η fazının çözünmesi ve η fazının oluşması bir arada gerçekleşmektedir. Ortalama $250^\circ C$ 'de kararlı η fazının çekirdeklenmesinin ve büyümesinin gerçekleşmeye başladığı literatür araştırmasında da görülmüştür (Şekil 6) [16]. η fazının oluşumu genellikle alüminyum alaşımının mukavemetinde azalmaya yol açmaktadır [17]. Buna bağlı olarak, $200^\circ C$ sıcaklıkta 60 dakika tavlama noktasından sonra malzemelerin mekanik özelliklerinde ani bir azalma olduğu gözlemlenmektedir.

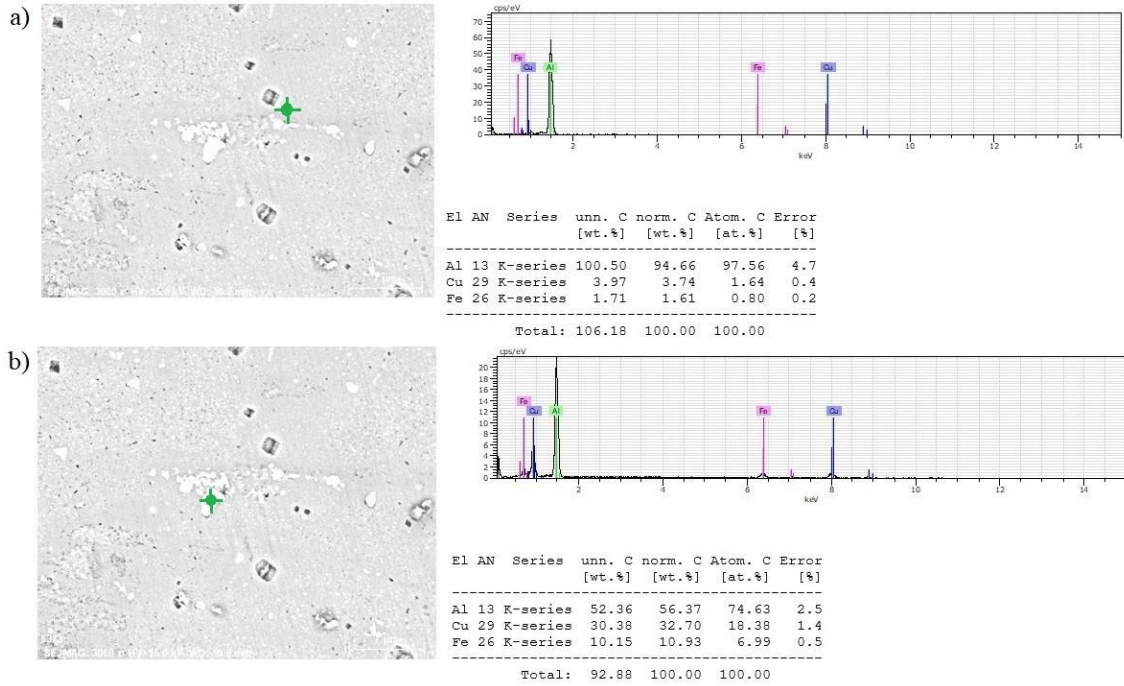
$300^\circ C$ 'nin üzerindeki tavlama sıcaklıklarında tavlama işlemi malzemelerin mekanik değerlerinde ise ani bir değişim olmamıştır. Sıcaklığın ve sürenin artması tanelerin difüzyon imkanı bularak zamanla büyümesine neden olmaktadır. Şekil 7'de verilen mikroyapıda gözlemlenen tane büyümesi ile malzemenin mukavemet ve sertliğinde azalma olmaktadır [18]. $300^\circ C$ ve $400^\circ C$ sıcaklıklarda farklı sürelerde gerçekleştirilen tavlama işlemi sonucunda, çökeltilerin boyutlarının artışının mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilemiş olduğu, ölçülen



Şekil 6. $200^\circ C$ 60 dk. tavlama parametresinde mikroyapı incelemesi a) Ana metal b) Tanecik / çökeltiler c) Tanecik / çökeltiler (Microstructure analysis at annealing parameter $200^\circ C$ 60 min. a) Base metal b) Particle / precipitate c) Particle / precipitate)

sertlik ve mukavemet değerlerindeki azalma ile de gözlemlenmiştir. Aynı zamanda malzemenin süneklik değerlerinde de artış belirlenmiştir.

gözlemlenmiştir. 200°C 60 dk. tavlama parametresinden sonra η fazının çekirdeklenmesinin ve büyümesinin gerçekleşmesiyle akma ve çekme gerilmesinin sırasıyla %59,16 ve %44,82 oranında belirgin bir şekilde azaldığı



Şekil 7. 400°C 60 dk. tavlama parametresinde mikroyapı incelemesi a) Ana metal b) Tanecik / çökelti (Microstructure analysis at annealing parameter 400°C 60 min. a) Base metal b) Particle / precipitate)

Tavlama sıcaklığında bekleme süresindeki artış tane büyümesine, difüzyonun artmasına ve malzemede renk dönüşümüne neden olmaktadır. Deneysel çalışmalarda, estetik açıdan problem oluşturabilecek düzeyde artan renk değişimleri gözlemlenmiştir.

4. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada, oda sıcaklığında şekillendirilebilirliği kısıtlı olan 7075-T6 alaşımına farklı sıcaklık ve sürelerde tavlama işlemi uygulanarak malzemenin mekanik özelliklerine ve mikroyapısına etkileri incelenmiştir. Bu etkileri daha iyi görebilmek için tavlama sıcaklıkları yeniden kristalleşme sıcaklığının altındaki ve üzerindeki sıcaklıklar (100, 200, 300 ve 400°C) seçilmiştir. Tavlama sıcaklığında bekletilme süresi 6 dk. olarak hesaplanmıştır. Diğer tavlama süreleri ise tavlama süresinin etkilerini daha iyi gözlemlenmek amacıyla 30 ve 60 dk. olarak belirlenmiştir.

1. 7075-T6 malzemenin tavlama işlemine karşı duyarlı olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklığın artmasına bağlı olarak, tane sınırlarının ergimesiyle mukavemet ve mekanik özelliklerde azalma gözlemlenirken, süneklik değerlerinde ise artış gözlemlenmiştir.

2. Akma ve çekme gerilmesinde 100°C 6 dk. tavlama parametrelerine göre anlamlı bir değişim gözlemlenmezken, bu değerden sonra akma ve çekme gerilmesinin 200°C 60 dk. tavlama parametresine kadar sırasıyla %16,74 ve %11,35 azalmaya başladığı

gözlemlenmiştir.

3. Tavlamanın etkisi ile mikroyapıdaki bu değişimler sebebiyle, 20°C'den 400°C sıcaklık ve 60dk.'lık tavlama parametrelerine kadar akma gerilmesi %80,02 sertliğin de %68,65 azaldığı ancak toplam uzamanın %8,58 arttığı gözlemlenmiştir.

4. Malzemede tavlama sıcaklığına ve süresine bağlı olarak aşırı yaşlanma meydana geldiği için tane içi ve tane sınırlarındaki çökeltilerin kabalaşmasına bağlı olarak mekanik özelliklerin azaldığı tespit edilmiştir.

5. Tavlama sıcaklığı ve bekleme süresindeki artışın malzemede çok belirgin olmayan renk dönüşümüne neden olduğu ver malzeme renginin sarı renge almaya başladığı gözlemlenmiştir.

5. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Vallengano C., Morales D., and Garcia-Lomas F., "A study to predict failure in biaxially stretched sheets of aluminum alloy 2024-T3", *Materials and Manufacturing Processes*, 23 (3): 303-310, (2008).
- [2] Hui W., et al., "Warm forming behavior of high strength aluminum alloy AA7075", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22 (1): 1-7, (2012).
- [3] Gülerüz K. and Kaçar R., "Deformasyon yaşlanmasının AA7075 alüminyum alaşımının mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi", *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, (2011).

- [4] Zhao Y., et al., "Enhanced mechanical properties in ultrafine grained 7075 Al alloy", *Journal Of Materials Research*, 20 (2): 288-291, (2005).
- [5] Isadare A.D., et al., "Effect of heat treatment on some mechanical properties of 7075 aluminium alloy", *Materials Research*, 16 (1): 190-194, (2013).
- [6] Çetin M.H., et al., "AA7075-T6 alaşımının farklı sıcaklıklardaki çekme davranışının deneysel ve nümerik yöntemler ile incelenmesi", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6 (4): 902-915, (2018).
- [7] Panigrahi S.K. and Jayaganthan R., "Effect of annealing on thermal stability, precipitate evolution, and mechanical properties of cryorolled Al 7075 alloy", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 42 (10): 3208-3217, (2011).
- [8] LeMaster R., et al., "Grinding induced changes in residual stresses of carburized gears", *Lateral*, 4 (3): 42-47, (2007).
- [9] Bobor K., et al., "Microstructure and mechanical properties of Al 7075 alloy processed by differential speed rolling", *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 56 (2): 111-115, (2012).
- [10] Karaaslan A., Kaya I., and Atapek H., "Effect of aging temperature and of retrogression treatment time on the microstructure and mechanical properties of alloy AA 7075", *Metal Science and Heat Treatment*, 49 (9-10): 443-447, (2007).
- [11] Mukhopadhyay A., "Development of reproducible and increased strength properties in thick extrusions of low-alloy Al-Zn-Mg-Cu based AA 7075", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 28 (11): 2429-2433, (1997).
- [12] Yılmaz R., Özyürek D., and Kibar E., "Yeniden çözeltiye alma parametrelerinin 7075 alüminyum alaşımlarının sertlik ve aşınma davranışlarına etkisi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27 (2): 429-438, (2012).
- [13] Naeem H.T., Mohammad K.S., and Ahmad K.R., "The effect of microalloying of nickel, RRA treatment on microstructure and mechanical properties for high strength aluminum alloy", *Advanced Materials Research*, 925: 253-257, (2014).
- [14] Kumar P.V., Reddy G.M., and Rao K.S., "Microstructure, mechanical and corrosion behavior of high strength AA7075 aluminium alloy friction stir welds-Effect of post weld heat treatment", *Defence Technology*, 11 (4): 362-369, (2015).
- [15] Özyürek D., Yılmaz R., and Kibar E., "RRA işleminde yeniden çözeltiye alma parametrelerinin 7075 alüminyum alaşımlarının çekme dayanımına etkisi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27 (1): 193-203, (2012).
- [16] Temmar M., Hadji M., and Sahraoui T., "Effect of post-weld aging treatment on mechanical properties of Tungsten Inert Gas welded low thickness 7075 aluminium alloy joints", *Materials & Design*, 32 (6): 3532-3536, (2011).
- [17] Chen J., et al., "Investigation of precipitation behavior and related hardening in AA 7055 aluminum alloy", *Materials Science and Engineering: A*, 500 (1-2): 34-42, (2009).
- [18] Kavaklıoğlu Z.B., "Alüminyum alaşımlarında yeniden kristalleşme", *6. Aluminium Symposium*, İstanbul, Türkiye, (2013).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



XRD vs Raman for InGaN/GaN structures

InGaN/GaN yapılar için XRD-Raman karşılaştırması

Yazar(lar) (Author(s)): Ahmet Kürşat BİLGİLİ¹, Ömer AKPINAR², Mustafa Kemal ÖZTÜRK³, Süleyman ÖZÇELİK⁴, Ekmel ÖZBAY⁵

ORCID¹: 0000-0003-3420-4936

ORCID²: 0000-0002-5172-8283

ORCID³: 0000-0002-8508-5714

ORCID⁴: 0000-0002-3761-3711

ORCID⁵: 0000-0003-2953-1828

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Bilgili A. K., Akpınar Ö., Öztürk M. K., Özçelik S., Özbay E. “XRD vs Raman for InGaN/GaN structures”, *Politeknik Dergisi*, 23(2): 291-296, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.537733

XRD vs Raman for InGaN/GaN Structures

Research Article / Araştırma Makalesi

**Ahmet Kürşat BİLGİLİ^{1*}, Ömer AKPINAR¹, Mustafa Kemal ÖZTÜRK¹,
Süleyman ÖZÇELİK¹, Ekmel ÖZBAY²**

¹Gazi University, Photonics Research Center, Ankara/Turkey

²Bilkent University, Physics Department, Ankara/Turkey

(Geliş/Received : 03.03.2019 ; Kabul/Accepted : 04.04.2019)

ABSTRACT

In this study, InGaN/GaN structures are grown by using Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD) technique. Some structural, optical and morphological properties of InGaN/GaN structures are investigated in detail. For structural analysis, X-ray diffraction (XRD), for optical, Raman and morphological, Atomic Force Microscopy (AFM) measurement techniques are used. In XRD analysis both samples presented hexagonal crystal structure. XRD peaks for these two samples showed small differences dependent on growth conditions. Strain and stress values are determined from XRD and they are compared with Raman results. In Raman analysis, five different chemicals are determined in both samples. Raman analysis results are in good accordance with XRD, growth conditions and AFM images. In AFM images, there can be seen hills and holes and they are partly homogeneous. There are also some white regions in AFM images. According to Raman peak center data, these white regions are detected as white rust.

Keywords: XRD, InGaN, GaN, MOCVD, AFM, raman.

InGaN/GaN Yapılar için XRD-Raman Karşılaştırması

ÖZ

Bu çalışmada, InGaN/GaN yapılar Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD) yöntemiyle büyütülmüştür. Bu InGaN/GaN yapıların bazı yapısal, optik ve morfolojik özellikleri detaylı olarak incelenmiştir. Yapısal analiz için X-ışınları kırınımı (XRD), optik özellikler için Raman ve morfolojik özellikler için Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) kullanılmıştır. XRD analizine göre her iki örnek altıgen yapı sergilemiştir. Bu iki örnek için elde edilen XRD pikleri büyüme şartlarına bağlı olarak küçük farklılıklar göstermiştir. Gerilme ve stress değerleri XRD den elde edilip Raman sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Raman analizinde, her iki örnekte beş farklı kimyasal tespit edilmiştir. Raman analizi sonuçları XRD ile büyüme koşulları ile ve AFM görüntüleriyle iyi bir uyum içindedir. AFM görüntülerinde tepeler ve çukurlar görülebilir ve bunlar kısmen homojendir. AFM görüntülerinde bir de beyaz bölgeler vardır. Raman pik merkezi verilerine göre bu beyaz bölgeler Beyaz Pastrı.

Anahtar Kelimeler: XRD, InGaN, GaN, MOCVD, AFM, raman.

1. INTRODUCTION

Semiconductor nitrides such as GaN and InGaN have a potential use area in optoelectronic and electronic industry because of their physical properties. Both semiconductor structures are in hexagonal shape in thermodynamic equilibrium. GaN and InGaN are binary and triple compounds of nitride based semiconductors. They have a wide energy band gap range in electromagnetic spectrum. This range changes from near-infrared to ultraviolet region (0.7-6.2 eV) [1].

This property makes nitride based semiconductors important in designing optoelectronic devices such as light emitting diodes (LEDs), laser diodes, ultraviolet (UV) photodetectors and solar cells. Also, nitride based semiconductors can operate at high power, frequency and temperature [2].

Although there are some important improvements in optoelectronic device technology containing $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ in

their active layers, there are still some uncertainties about the fundamental physics of these structures. Because some physical and chemical properties of InGaN (band gap, lattice parameters, and elastic coefficients) can not be determined accurately, it is also not possible to determine some optical and structural properties certainly. It is known that these parameters for InGaN alloys are strongly dependent on growth conditions [3-4]. A small variation in growth conditions may cause a great quality difference in InGaN thin films. Lee and co-workers showed that if growth speed is decreased the threatening dislocation density decrease 100 times less than the previous value in InGaN/GaN quantum wells [5]. In order to make such materials more common in use and improve them, optimization of production and fabrication should be made. The operation mechanism of them should be understood well. The importance of this study is that stress is calculated from Raman spectra and compared with XRD stress measurements.

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

2. MATERIAL and METHOD

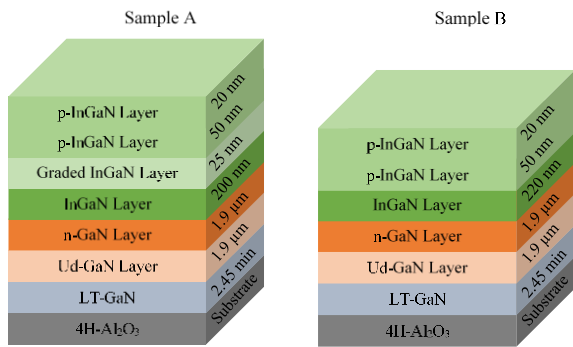


Figure 1. Schematic diagram of (a) S.A and (b) S.B.

InGaN/GaN structures are grown on c-oriented sapphire (Al_2O_3) substrate by using the MOCVD technique. Before growth procedure, in order to remove dirty on the surface of the epitaxial films, they are cleaned at 1100°C under H_2 atmosphere for 10 minutes. After the cleaning process is finished, epitaxial growth operation started with growth of GaN nucleation layer at 575°C [6-7]. During this growth operation, TMGa (*Trimethylgallium*) flow rate, NH_3 flow rate and growth pressure are adjusted as 10 sccm, 1500 sccm and 200 mbar respectively. The thickness of this nucleation layer is 10 nm. After the growth of this layer, GaN buffer layer is grown on it at 1070°C . During the growth of this buffer layer, TMGa flow rate, NH_3 flow rate and growth pressure are adjusted as 15 sccm, 1800 sccm and 200 mbar, respectively. p-type doped InGaN layer is grown by using Mg doping source. The flow rate of this source is 35 sccm. During the growth of InGaN layer, the sources which were on during growth of other layers are kept off. In order to make more doping, Mg flow rate is kept at 40 sccm. Figure.1 (a) and (b) illustrates the schematic diagrams of sample A (S.A) and sample B (S.B).

The thickness of GaN buffer layer is $1.6\ \mu\text{m}$. Growth procedure continued by opening the SiH_4 source and with the help of this source n-type GaN layer is grown. Flow rate of this layer is 10 sccm. $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$ active layers are grown at 745°C with 75 sccm In flow rate. Active layers are grown between $1.9\ \mu\text{m}$ n-type GaN and p-type InGaN contact layers.

3. RESULTS and DISCUSSION

In this study, parameters such as dislocation density and stress are estimated by using HR-XRD technique. It is found that dislocation density is high both in S.A and S.B. So peak intensity ratio is used to determine amount of chemicals from Raman spectra instead of peak area ratio. Also, stress measurement results are compared between XRD and Raman. It is known that XRD analysis gives more accurate results for stress [8]. Also in Raman spectra very dense white rust peaks are detected. These white rust can be seen in AFM images.

3.1. XRD analysis

Compounds and alloys such as GaN and InGaN have hexagonal structure. Crystal quality of them can be measured by broadening of symmetric peaks. In such layers broadening of rocking curves is maintained by variation of lateral crystal dimensions parallel to wafer surface and tilt angles [9]. HR-XRD omega peaks are given in Figure 2 (a) and (b).

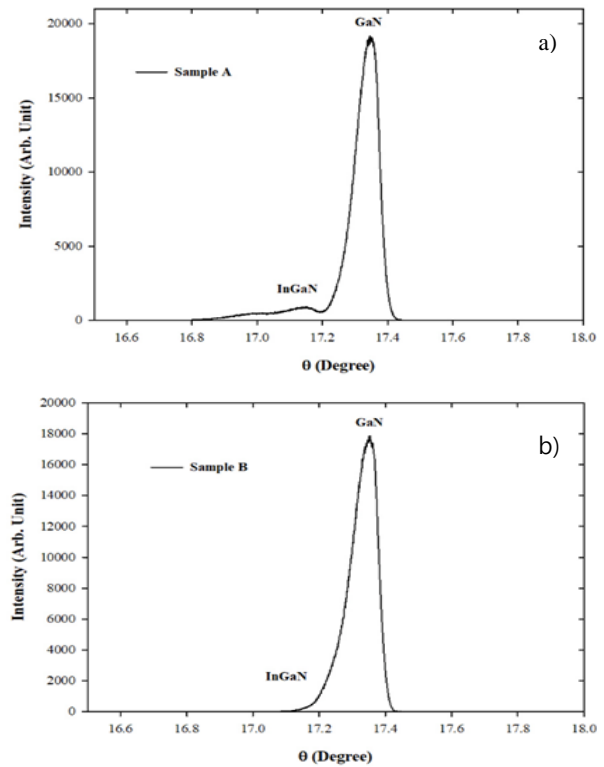


Figure 2. HR-XRD omega peaks for S.A and S.B.

The Full Width at Half Maximum (FWHM) values are given in Table 1. If measured values are compared it is seen that both samples have similar FWHM values for GaN but InGaN layer in S.A has smaller FWHM value than S.B. This result indicates that S.A has a better crystal quality [10].

Table 1. Peak positions and FWHM values for GaN and InGaN layers.

	S.A	S.B
FWHM GaN(002)	0.1	0.103
FWHM InGaN(002)	0.166	0.175
Peak position GaN(101)	18.47	18.26
Peak position InGaN(002)	16.92	17.13

3.1.1 Dislocations

A method for calculating lateral and screw type dislocations is dependent on Burgers vector. Metzger and co-workers showed that [11] Burgers vector of mean tilt

angle $b=1/3\langle 11-20 \rangle$ is related with lateral type dislocations and Burgers vector of mean tilt angle $b=\langle 0001 \rangle$ is related with screw type dislocations. Dislocation density can be calculated with equation (1) [12-13]. Burgers vector is the same with lattice parameters.

$$D_{screw} = \frac{\beta_{(0002)}^2}{9b_{screw}^2}, \quad D_{edge} = \frac{\beta_{(10-12)}^2}{9b_{edge}^2} \quad (1)$$

β in equation (1) is the FWHM value, b is the Burgers vector. For GaN layer $b_{screw}=0.5185$ nm, $b_{edge}=0.3189$ nm. For InGaN layer $b_{screw}=0.5198$ nm, $b_{edge}=0.3417$ nm [14].

Table 2. Edge and screw type dislocation density values for S.A and S.B

	S.A		S.B	
	Edge ($D.Lx10^9$)	Screw ($D.Lx10^8$)	Edge ($D.Lx10^9$)	Screw ($D.Lx10^8$)
GaN	1.55	1.25	2.36	1.25
InGaN ₁	9.55	1.64	10.80	9.55
InGaN ₂	10.80	1.60	42.90	3.62

3.1.2 Stress from XRD

It is possible to determine stress by using strain measurements [15]. Strain (ϵ_a) is given with stress in equation (2).

$$\epsilon_a = \frac{\sigma^*(1-\nu)}{E} \quad (2)$$

Here ϵ_a is the strain, σ^* is stress, ν is Poisson's ratio and E is Young modulus [16]. ϵ_a value in equation (2) can be determined by plotting $\sin\theta$ versus $\beta\cos\theta$. Here β is the FWHM value. This plot is shown in Figure.3. Tilt of the fits in this plot gives ϵ_a . Young modulus is taken as 305 and Poisson's ratio is taken as 0.183 in this study. Strain and stress values are determined as -0.0015, -0.5599 for S.A and -0.0016, -0.5973 for S.B in GPa.

3.2 Raman Analysis

Raman scattering occurs when light interacts with molecular vibrations. This resembles infrared absorption spectroscopy but it has some different properties. The first step to gain Raman spectra is to send a monochromatic beam, like laser, to the sample. Energy of most of the photons forming this beam does not change. This situation is called Rayleigh scattering.

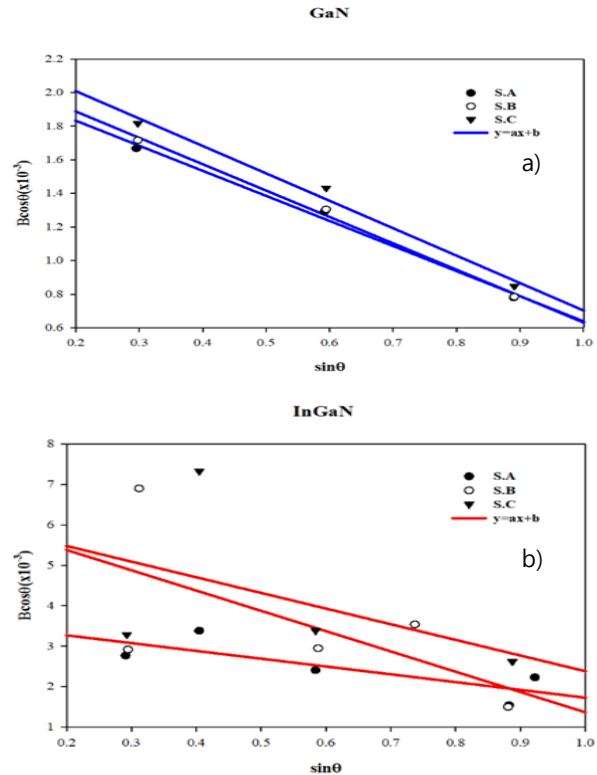


Figure 3. Sinθ versus βcosθ plot for GaN and InGaN layers

$1/10 \times 10^6$ photons lose their energy or gain more energy. This situation is called Raman scattering. The reason for this Raman shift is interaction of photons with molecular vibrations. The situation that photons lost energy is called STOKES and the situation they gained energy is called ANTI-STOKES. The variation on the energy of sent photons is dependent on the vibrational frequency of the molecules. If vibration is fast (high frequency) it means light atoms are connected each other with strong bonds. In this situation energy variation is important. If vibration is slow (low frequency), it means heavy atoms are connected with weak bonds. In this situation energy variation is small.

In infrared spectroscopy, absorption in infrared region excites vibration and rolling levels of the molecules. Energy of the photons in infrared region is not sufficient for destroying bonds of molecules and they also do not make electronic excitation. But infrared photons can increase amplitude of the vibrations dependent on the molecular geometry and strength of bonds. For Raman Effect a molecular polarization variation during vibration is needed [17].

In this study, for gaining Raman spectra imaging (micro publisher 5.0 RTV) Raman spectrometer is used. Both samples are scanned with 785 nm. Wavelength laser for a duration of 60 s. Raman spectra for S.A and S.B are presented in Figure.4

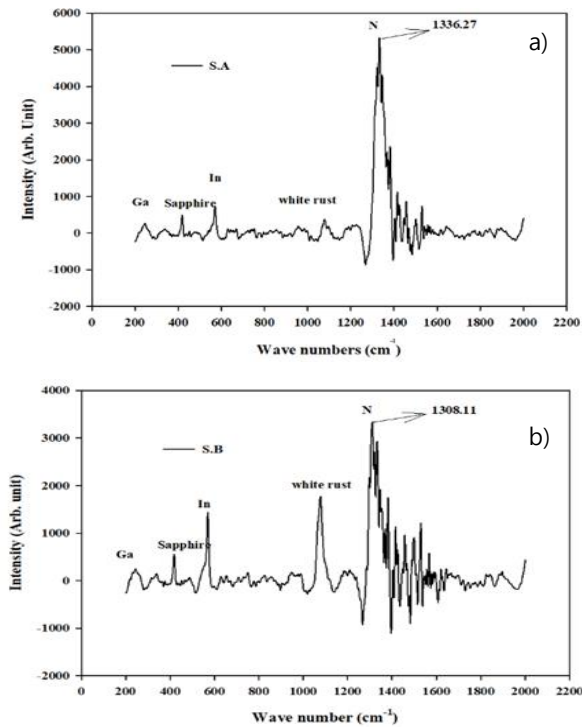


Figure 4. Raman spectras for S.A and S.B

As in the previous sections of this study, identification of material, stress and particle size can be estimated by using Raman spectra. Raman spectroscopy data presented some important knowledge about InGaN/GaN structure. Peak center, peak height, peak area and FWHM values are presented in Table.3 for Ga, N, In and Sapphire. Also one more layer is detected in Raman spectra. That is white rust formed by touching air for a long time.

As can be seen in Table.3 peak intensity ratio and peak area ratios are calculated to estimate amount of materials in the samples. Because dislocation density is high, as shown in XRD section, peak intensity ratio is a more trustable result for amount of materials in percentage. FWHM values in Raman are related with particle size. It is possible to calculate atomic radius of single atoms by using equation (3) [18].

$$r = r_0 \cdot A^{1/3} \tag{3}$$

Table 3. Raman analysis data for S.A and S.B

	S.A					S.B				
	Ga	Al ₂ O ₃	In	N	White rust	Ga	Al ₂ O ₃	In	N	White rust
Peak Center	244	419	571	1336.27	1078	244	419	571	1308.11	1078
Peak Area Ratio(%)	3.28	1.95	8.20	17.60	3.24	3.21	2.62	9.47	17.39	6.92
Peak Height Ratio(%)	2.22	5.83	10.74	76.03	5.16	5.82	7.98	18.89	45.53	21.76
FWHM	34.09	8.91	12.48	26.69	xxxx	33.83	9.54	10.65	25.37	xxxx

Here r_0 is coefficient approximately taken as 1.2 fm, A is atomic number in periodic table and r is the atomic radius. Atomic radius of Ga and N are compared with FWHM values in Table.3 gained from Raman analysis. As can be seen they are in good agreement. The order of atomic numbers for N and Ga are, $Ga > N$ and FWHM values for them are like $Ga > N$. If Table.3 is examined carefully FWHM values for S.A are generally bigger than the ones for S.B. This result also indicates that crystal quality is better in S.A.

Also stress values are calculated from Raman spectra. It is possible to look up the unstressed peak center values for the materials mentioned above from RRUFF database. If these values are subtracted from experimental values and divided by calibration constants we gain stress in MPa. The formula showing this relation is given in equation (4) [19].

$$\sigma(MPa) = \Delta w(cm^{-1}) \tag{4}$$

Comparison of stress values gained from XRD and Raman is made in Table.4. Calculation of stress is made by using N peak center values because it is the most intense peak in both samples.

As can be seen in Table.4 there is great difference in the results gained from XRD and Raman. Because of the physics of Raman scattering it can not detect wafer bending or dislocations, so here XRD results are more trustable. Minus sign in stress values indicate that there is compressive stress in the structure.

Table 4. Comparison of stress values from Raman and XRD.

	S.A	S.B
Stress from XRD(MPa)	-559.9	-597.3
Stress from Raman(MPa)	1.017	-5.69

As mentioned above there is one more layer detected by Raman spectroscopy in the samples. That is white rust ($3Zn(OH)_2ZnCO_3 \cdot H_2O$). White rust is formed over the samples by touching the air for a long time. Peak intensity of white rust is less in S.A.

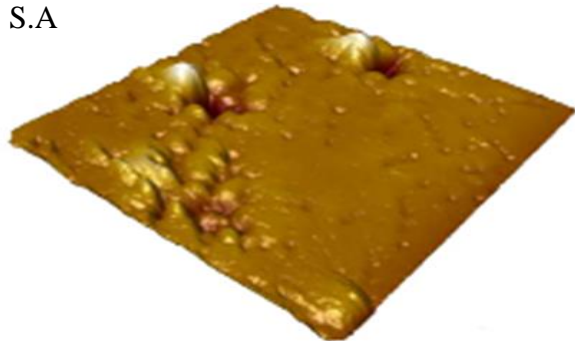
The reason for this is cleaning procedure of the samples for different durations.

3.3 AFM

In epitaxial structures, difference of the layers may cause great topographic variations on the surface of the samples [20]. For this reason surface morphology of the samples are investigated with AFM. Surface images of the samples are taken with Omicron VT STM/AFM device. Scanning of the surfaces is made in an area of $5 \times 5 \mu\text{m}^2$. In Figure.5 AFM images of S.A and S.B are shown. It is obvious in the images that surface morphology of the samples are quite different from each other. On the surface of both samples pits are seen. This is a typical situation for InGaN based hetero structures. On the surface of S.A pits are dominant but on S.B hillocks are dominant. This is related with diffusion of island atoms.

On the other hand roughness is a kind of surface defect. There are many parameters in determining roughness [21]. Root Mean Square (RMS) is the most common parameter to determine surface roughness. For samples A and B RMS values are measured as 2.23 and 4.87. Chen and co-workers reported that In vacancy islands on the surface of the samples or ordered vacancy rows caused lateral segregation [22]. The surface roughness of the samples may be attributed to In segregation and white rust [23]. White rust can be seen on the surface of both samples in AFM images.

S.A



S.B

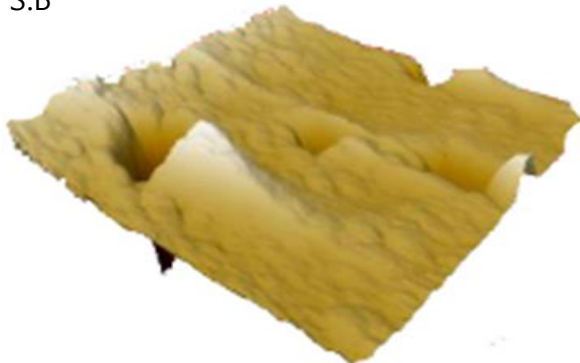


Figure 5. AFM images of S.A and S.B

4. CONCLUSION

In this study, InGaN/GaN structures grown by MOCVD technique on sapphire are investigated in detail by using HR-XRD and Raman spectroscopy. Dislocations are determined with XRD method in order to show dislocation density is high. According to this result peak intensity ratio is more valid than peak area ratio in Raman. Strain and stress values are determined from XRD method and stress values are compared with the ones gained from Raman. Because Raman spectra does not take into account dislocations and wafer bending, values gained from XRD for stress are more valid. All the data gained from Raman spectra are presented in Table.3. Except from the stress and amount of chemicals in the samples, there is one more important result gained from Raman spectra. That is white rust formed over the samples by touching the air for a long time. These white rust can be seen in AFM images clearly. FWHM values gained from Raman spectra are in fact related with crystallite, therefore particle size also effects it. Particle size for single atoms are compared with each other related with FWHM. This study is important because XRD analysis does not show white rust peaks clearly but Raman spectra shows them clearly. Also it is rare in literature to calculate stress from Raman spectra. Stress from XRD is more common in literature.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Presidency Strategy and Budget Directorate (Grants Numbers: 2016K121220).

REFERENCES

- [1] Huang C.F., Hsieh W.Y., Hsieh B.C., Hsieh C.H. and Lin C.F., "Characterization of InGaN-based photovoltaic devices by varying the indium contents", *Thin Solid Films*, 529: 278-281, (2013).
- [2] Neudeck P.G., R.S Okojie. and L.Y. Chen., "High-temperature electronics - A role for wide bandgap semiconductors", *Proceedings of the Ieee*, 90(6): 1065-1076, (2002).
- [3] Monemar B, Paskov P.P. and Kasic A., "Optical properties of InN—the bandgap question", *Supperlatt. Microstruct*, 38, (2005).
- [4] Nanishi Y., Saito Y. and Yamaguchi T., "RF-Molecular Beam Epitaxy Growth and Properties of InN and Related Alloys", *Japan J. Appl. Phys*, 42: 2549, (2003).
- [5] Lee S.N., Tan N., Lee W., Paek H., Seon M., Lee I.H., Nam O. and Park Y., "Characterization of optical and crystal qualities in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ multi-quantum wells grown by MOCVD", *J. Cryst. Growth*, 250: 256, (2003).
- [6] Lafont U., Zeijl H. and Zwaag S., "Increasing the reliability of solid state lighting system via self-healing approaches", *Microelectronic Reliability*, 52(1): 71- 89, (2012).
- [7] Akpınar., O., Bilgili A.K., Öztürk M.K., Özçelik S. and Özbay E., "On the elastic properties of INGAN/GAN LED structures", *Applied Physics a-Materials Science & Processing*, 125(2): (2019).

- [8] Oura K., Lifshits V.G., Saranin A.A., Zotov A.V. and M. Katayama., “Surface science (First edition)”, **Berlin: Springer** 166 (229): 378-382, (2003).
- [9] Arulkumaran S., Egawa T., Ishikawa H. and Jimb T., “Characterization of different-Al-content $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ heterostructures and high-electron-mobility transistors on sapphire”, **Journal of Vacuum Science & Technology**, 21(2): 888-894, (2003).
- [10] Akasaki I. and Amano H., “Breakthroughs in Improving Crystal Quality of GaN and Invention of the p-n Junction Blue-Light-Emitting Diode”, **Japanese Journal of Applied Physics**, 47(5): 3781-3781, (2008).
- [11] Ambacher O., “Growth and applications of Group III-nitrides”, **Journal of Applied**, 31(1): 2653–2710, (1998).
- [12] Vickers M.E., Kappers M.J., Datta R., McAleese C., Smeeton T.M., Rayment F.D.G. and Humphreys C.J., “In-plane imperfections in GaN studied by x-ray diffraction”, **Journal of Physics D: Applied Physics**, 38(A10): A99-A104, (2006).
- [13] Moram M.A. and Vickers M.E., “X-ray diffraction of III-nitrides”, **Reports on Progress in Physics**, 72(3): (2009).
- [14] Yu H., Ozturk M.K., Ozcelik S. and Ozbay E., “MOCVD growth and optical properties of non-polar (11-20) a-plane GaN on (10-12)r-plane sapphire substrate”, **J. Cryst. Growth**, 293: 273, (2006).
- [15] Harutyunyan V.S., Aivazyan A.P., Weber E.R., Kim Y., Park Y. and Subramanya S.G., “High resolution x-ray diffraction strain-stress analysis of GaN/Sapphire heterostructures”, **Journal of Physics D: Applied Physics**, 34(10A): A35-A39, (2009).
- [16] Halliwell M.A.G., “X-ray diffraction solutions to heteroepitaxial growth problems”, **Journal of Crystal Growth**, 170(1-4): 47-54, (1997).
- [17] Xu H.X., Bjerneld J., Kall M. And Börjesson L., “Spectroscopy of single hemoglobin molecules by surface enhanced Raman scattering”, **Physical Review Letters**, 83(21): 4357-4360, (1999).
- [18] Heilig K., “Changes in Mean-Square Nuclear-Charge Radii from Optical Isotope Shifts of Long Chains of Isotopes”, **Hyperfine Interactions**, 24(1-4): 349-375, (1985).
- [19] C.P. Constable, Lewis D.B., Yarwood J. And Münz W.D., “Raman microscopic studies of residual and applied stress in PVD hard ceramic coatings and correlation with X-ray diffraction (XRD) measurements”, **Surface & Coatings Technology**, 184(2-3): 291-297, (2004).
- [20] Yıldız A., Öztürk M.K., Bosi M., Özçelik S. and M. Kasap, “Structural, electrical and optical characterization of InGaN layers grown by MOVPE”, **Chinese Physics B**, 18(9): 4007-4012, (2009).
- [21] Dunn C.G., Kogh E.F., “Comparison of dislocation densities of primary and secondary recrystallization grains of Si-Fe”, **Acta Metallurgica**, 5(10): 548-554, (1957).
- [22] Tao T., Zhao Z., Lian L., Hui S., Zili X., Rong Z., Bin L., Xiangqian X., Li Y., Ping H., Yi S. and Youdou Z., “Surface morphology and composition studies in InGaN/GaN film grown by MOCVD”, **Journal of Semiconductors**, 32(8): 1-3, (2011).
- [23] Çörekçi S., Öztürk M.K., Akaoglu B., Çakmak M., Özçelik S. and Özbay E., “Structural, morphological, and optical properties of AlGaIn/GaN heterostructures with AlN buffer and interlayer”, **Jour**



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



B₄C/SiC/Al₂O₃ parçacık takviyelendirilmiş alüminyum sandviç köpük ile Ramor 500 zırh çeliğinin bir araya getirilmesi ve balistik performansının araştırılması

B₄C/SiC/Al₂O₃ particle reinforced aluminum sandwich foam and Ramor 500 armor steel to be combined and investigation of the ballistic performance

Yazar(lar) (Author(s)): Halil KARAKOÇ¹, Aytekin ULUTAŞ², Hanifi ÇİNİCİ³

ORCID¹: 0000-0002-2444-6037

ORCID²: 0000-0002-5230-7122

ORCID³: 0000-0002-2590-1118

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Karakoç H., Ulutaş A., ve Çinici H., “B₄C/SiC/Al₂O₃ parçacık takviyelendirilmiş alüminyum sandviç köpük ile Ramor 500 zırh çeliğinin bir araya getirilmesi ve balistik performansının araştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 23(2): 297-310, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.527770

B₄C/SiC/Al₂O₃ Parçacık Takviyelendirilmiş Alüminyum Sandviç Köpük ile Ramor 500 Zırh Çeliğinin bir Araya Getirilmesi ve Balistik Performansının Araştırılması

Araştırma Makalesi / Research Article

Halil KARAKOÇ^{1*}, Aytekin ULUTAŞ², Hanifi ÇİNİCİ³

¹Hacettepe ASO 1.OSB Meslek Yüksek Okulu, Makine Bölümü, Hacettepe Üniversitesi, Türkiye

²Edremit Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Balıkesir Üniversitesi, Türkiye

³Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 15.02.2019 ; Kabul/Accepted : 09.04.2019)

ÖZ

Bu çalışmada toz metalurjisi yöntemi ile hazırlanan SiC, B₄C ve Al₂O₃ içeren ve parçacık içermeyen Al sandviç köpüklerin (ASK) balistik performansları araştırılmıştır. Bu amaçla, karışım tozlar soğuk presleme işleminden sonra ekstrüze hadde işlemine tabi tutularak 690 °C köpürtme sıcaklığında 50x50x20 mm² ölçülerinde blok şeklinde sandviç köpükler üretilmiştir. Üretilen sandviç köpükler 50x50x7 mm² boyutlara sahip olan Ramor 500 zırh çeliği silikon esaslı reçine ile yapıştırılarak balistik test için zırh numuneleri hazırlanmıştır. Yapılan çalışmada sandviç köpüklerin önde olduğu tasarımlarda zırh çeliğinden kopan parçacık çapının daha az olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca balistik çarpma sonucunda sandviç köpüklerde lokalize yoğunlaşma ve taç yaprağı şeklinde hasar meydana geldiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Balistik, sandviç köpük, zırh.

B₄C/SiC/Al₂O₃ Particle Reinforced Aluminum Sandwich Foam and Ramor 500 Armor Steel to be Combined and Investigation of the Ballistic Performance

ABSTRACT

In this study, the ballistic performances of particle-free Al sandwich foams (ASK) containing SiC, B₄C and Al₂O₃ prepared by powder metallurgy were investigated. For this purpose, the mixture powders were subjected to extrusion milling after cold pressing and sandwich foams of 50x50x20 mm² were produced at 690 °C foaming temperature. Produced sandwich foams, 50x50x7 mm² dimensions of ramor 500 armor steel with silicon resin was glued and the armor samples were prepared for ballistic testing. In the study, it was determined that the particle diameter which is broken from the armor steel is less in the designs where the sandwich foams are leading. In addition, ballistic collisions resulted in localized condensation and petal damage in the sandwich foams.

Keywords: Ballistic, sandwich foam, armor.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Metalik köpükler, iyi enerji sönmleme özelliği, yüksek basma dayanımı, düşük özgül ağırlık ve yüksek rijitlik gibi mekanik ve fiziksel özellikleri ile bilinir [1]. Çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanım alanı bulabilen malzemeler olarak son yıllarda oldukça ilgi çekmektedir.

Özellikle alüminyum esaslı metalik köpükler, kapalı hücre yapısı ve çok hafif olması ile göze çarpmaktadır. Alüminyum köpükler, darbe enerjisini plastik enerjiye dönüştürebilir ve birçok metalden daha fazla enerji sönmleyebilir [2,3]. Alüminyum köpük malzemeler

otomotiv sanayinde, uzay sanayinde, demir yolu taşımacılığında, imalat makine gövdelerinde ve savunma sanayinde kullanılmaktadır [4-7].

Sandviç metalik köpükler iki metal levha arasında köpürtülmüş metal içeren yapılardır. Bu yapılar genelde köpürtülecek metal alüminyum, çelik ve titanyum gibi geleneksel metal levhalarının arasında haddelenerek veya yapıştırılarak elde edilebilir. Son işlem olarak uygulanan ısı ile sandviç yapılar meydana geldiğinde sadece merkezdeki köpürtülecek malzeme genişler ve yüzey levhalarının yoğunluğu değişmez [8]. Bir sistem yardımıyla fırlatılan cisimlerin (özellikle mermilerin) namlu içerisindeki hareketlerini, atmosferik koşullarda yerçekimi kuvvetinin etkisiyle yapmış olduğu

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : halil.karakoc@hacettepe.edu.tr

hareketleri ve hedef üzerindeki etkileri inceleyen bilim dalı olan balistik mekanik biliminin özel bir alanı olarak bilinmektedir [9,10].

Balistik zırhların geliştirilmesine yönelik yapılan çalışmalara Wilkins ve arkadaşlarının yaptığı seramik/metal zırhlar ile ilgili çalışmalar öncülük etmiştir [11]. Seramik/destek plakasından (metal veya kompozit) oluşan zırha merminin çarpması ile ara yüzeyde meydana gelen gerilme dalgasının etkisi destek plakasının dayanımına bağlıdır ve seramiğin kırılmasında önemli rol oynar [12,13]. Seramiğin kırılması ince seramik parçacıkları meydana getirir. Meydana gelen bu ince seramik parçacıkları yüksek iç sürtünmelere yol açarak merminin ilerleme hızının azalmasına neden olabilir [14]. Eğer seramik iyi desteklenir ve dalga hasarından korunursa yüksek dirençli geçirgenlik gösterir [15,16].

Bazle ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda [13] Al köpük içeren ve içermeyen balistik hedefler tasarlanmış ve alüminyum köpük içerisinde şok dalga yayılımı kıyaslanması için test edilmiştir. Al esaslı metalik köpüklerin dinamik deformasyonu çarpma yüzeyinde başlamış ve yoğunluk tamamlanıncaya kadar kalınlık içerisinde yayılmıştır. Alüminyum köpüğün gözenekli yapısı gerilme dalgalarını dağıtır ve ince dalgalar olarak hareket ettirir. Alüminyum köpük içerisinde gerilme dalgalarının dağılım etkisi sadece yoğunluk tamamlandıktan sonra meydana gelmektedir. Al bazlı metalik köpüğün kullanılmadığı bir tasarımda ilk başta görülmektedir [13]. Köpükte kısmi yoğunlaşma meydana geldiğinde gerilme dalgaları filtre edilerek hareket edebilir. Bu sayede alüminyum köpüğün arka plakaya iletilen gerilmenin etkisini azalttığı tespit edilmiştir. Son zamanlarda özellikle ABD de Al esaslı metalik köpüğün darbe emme özelliği sebebi ile integral zırh malzemesi üretiminde kullanılması konusunda yoğun çalışmalar yapılmaktadır [13].

Bu çalışmada, alüminyum alaşım (Al7Si0,6Mg0,8TiH₂) sandviç köpük malzemeler ve B₄C, SiC ve Al₂O₃ parçacık takviyeli kompozit sandviç köpük malzemeler üretilmiştir. Üretilen parçacık ilaveli Al esaslı sandviç köpükler Ramor 500 zırh çeliği ile bir araya getirilerek 7,62x51mm çelik çekirdek zırh delici mermiler karşısındaki balistik performansı araştırılmıştır. Balistik test sonrası malzeme yüzeyinde meydana gelen hasar mekanizmaları incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

ASK malzemelerin üretilmesinde Al, Si, Mg, TiH₂, B₄C, SiC ve Al₂O₃ tozları kullanılmıştır. Kullanılan tozların fiziksel özellikleri çizelge 1’de verilmiştir. ASK malzemelerin üretilmesinde ilk olarak tozların karışım oranları belirlenmiştir ve hassas mikro terazi yardımı ile tartılarak karışımlar hazırlanmıştır. Al, %7Si, %0,6 Mg, %0,8 TiH₂ tozları ve %5 oranında parçacıklardan (SiC, B₄C ve Al₂O₃) oluşan tozlar Turbola marka karıştırıcıda 30 dakika boyunca homojen olarak karıştırılmıştır. Çalışmada 4 farklı karışım oranına sahip tozlar

kullanılmıştır (Çizelge 2). Karışım tozlar soğuk presleme kalıbında 300 MPa basınç altında preslenerek sıkıştırılmış toz metal blok numuneler elde edilmiştir. Sıkıştırılmış toz metal blok numuneler yaklaşık olarak ortalama %75 yoğunluktadır. Elde edilen toz metal blok numuneler 500 °C sıcaklıkta 1/4 oranında ekstrüze edilmiştir. ekstrüze edilen köpürebilir preform numuneler 2 mm kalınlığındaki alüminyum levhalar arasına konularak sıcak olarak haddelenmiştir. Haddelene işleminden sonra 50x50x12 mm ölçülerinde getirilen preform numuneler 690 °C sıcaklıkta köpürtülerek sandviç metalik köpükler üretilmiştir. ASK malzemelerin üretim yöntemi Şekil 1’de gösterilmiştir.

Elde edilen ASK malzemeler ile 50x50x7 mm² ölçülerine sahip olan Ramor 500 zırh çeliği 300 °C ısıya dayanıklı çekomastik 803 marka kırmızı silikon ile birleştirilmiştir. Ramor 500 zırh çeliğinin kimyasal analizi ve mekanik özellikleri Çizelge 3 ve Çizelge 4’de verilmiştir. Üretilen ASK malzemenin ve Ramor 500 zırh çeliğinin resimleri Şekil 2’de verilmiştir.

Çizelge 1. ASK malzemelerin üretiminde kullanılan tozların özellikleri (Properties of powders used in the production of ASF materials)

Kullanılan tozlar	Yoğunluk (g/cm ³)	Ortalama toz tane boyutu (µm)
Al	2,7	<160
Si	2,33	<10
Mg	1,74	<10
TiH ₂	3,91	<45
B ₄ C	2,52	<10
SiC	3,10	<8
Al ₂ O ₃	3,97	<12

Çizelge 2. ASK malzemelerin üretiminde kullanılan tozların karışım oranları (Mixing ratios of powder used in the production of ASF materials)

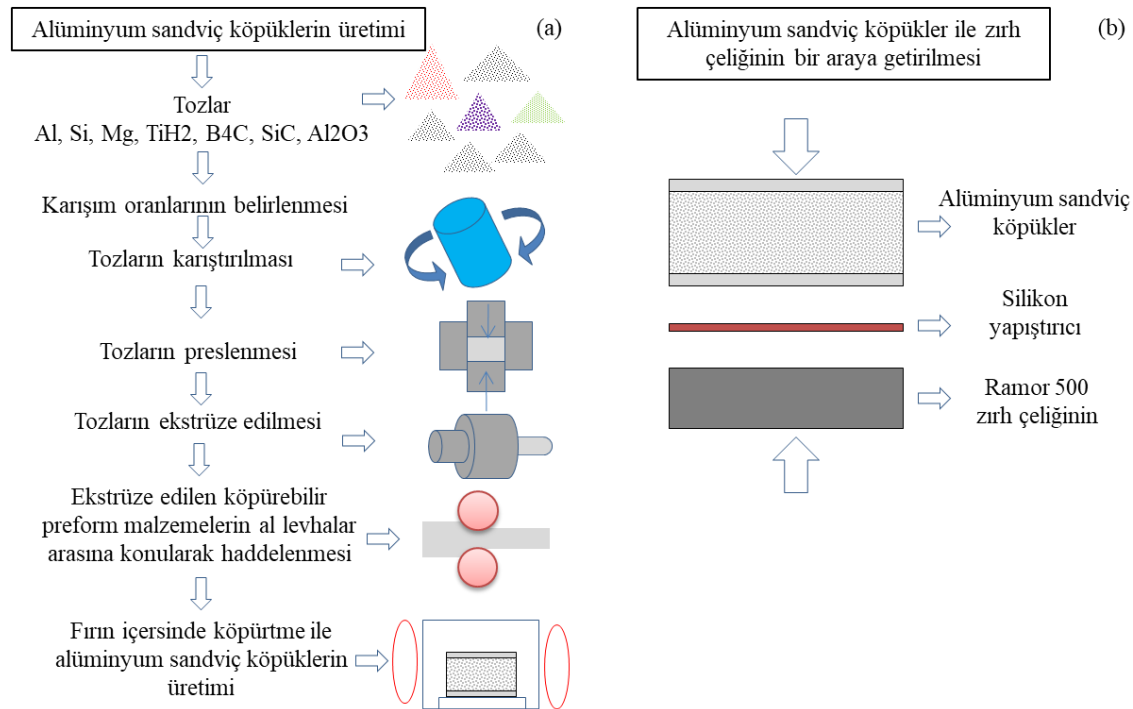
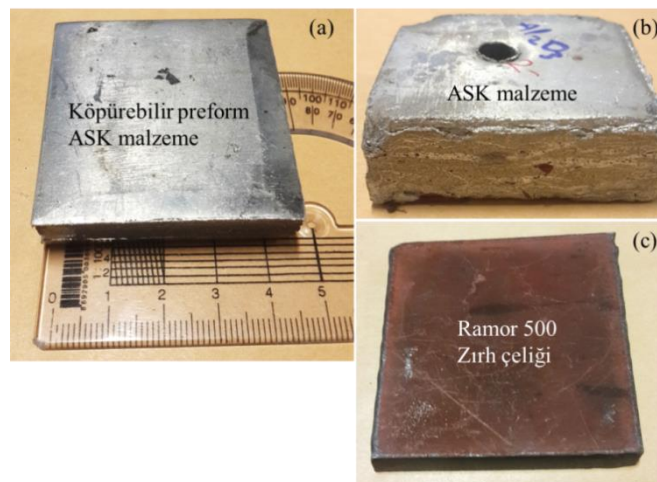
Karışım 1 (AlSi7Mg0,6) Ağırlıkça (%)	Karışım 2 (B ₄ C) Ağırlıkça (%)	Karışım 3 (SiC) Ağırlıkça (%)	Karışım 4 (Al ₂ O ₃) Ağırlıkça (%)
91,6	86,6	86,6	86,6
7	7	7	7
0,6	0,6	0,6	0,6
0,8	0,8	0,8	0,8
---	5	---	---
---	---	5	---
---	---	---	5

Çizelge 3. Ramor 500 zırh çeliğinin kimyasal kompozisyonu (Ramor 500 armor steel chemical composition) [17,18].

Kimyasal kompozisyon (% oran)										
Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B	Fe
Ramor 500	0.32	0.70	1.50	0.015	0.005	1.00	2.00	0.70	0.005	kalan

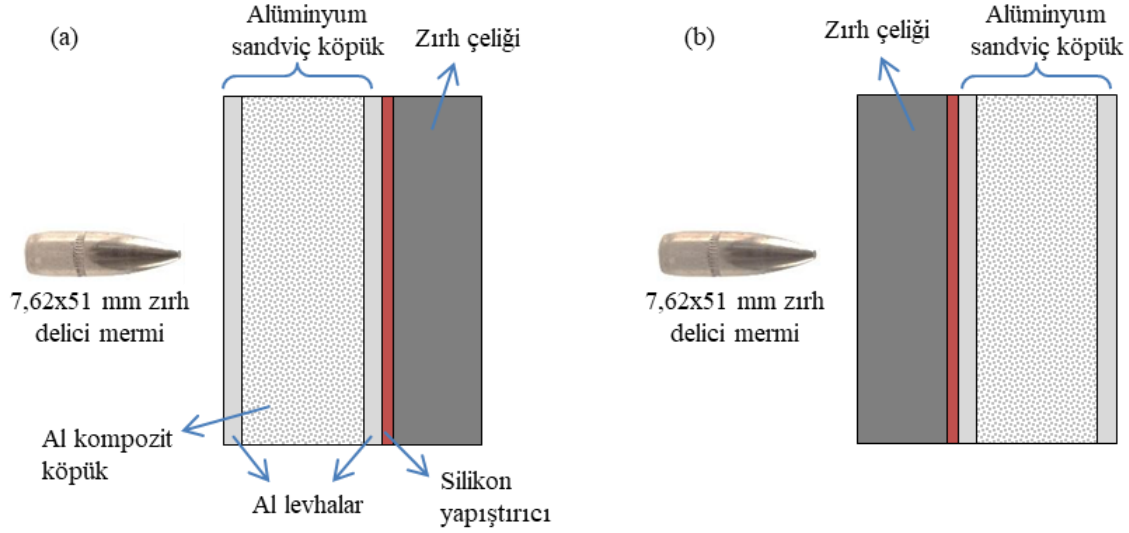
Çizelge 4. Ramor 500 zırh çeliğinin mekanik özellikleri (Mechanical properties of Ramor 500 armor steel) [17,18].

Mekanik özellikler				
Malzeme	Gerilme dayanımı Rm (MPa)	Esneklik %5	Sertlik (HB)	Tokluk Charpy (V J)
Ramor 500	1700	7	480-560	20

**Şekil 1.** (a) ASK malzemelerin üretim yolu, (b) ASK malzemeler ile zırh çeliğinin bir araya getirilmesi ((a) Production of ASK materials, (b) combining ASK materials and armor steel)**Şekil 2.** (a) köpürebilir ASK malzeme (b) köpürme sonrası ASK malzeme (c) Ramor 500 zırh çeliği ((a) foamable ASF material (b) after foaming ASK material (c) Ramor 500 armor steel)

Balistik testler için, mermi çekirdeğinin geliş yönüne göre alüminyum sandviç köpüklerin önde ve arkada olduğu iki farklı tasarım yapılmıştır (Şekil 2-a-b). Numunelerin her birine, aynı test parametrelerinde tek atış yapılmış ve zırh malzemesinde meydana gelen hasar

mekanizması incelenmiştir. ASK ve zırh çeliği kombinasyonu ile üretilen zırh malzemesinin balistik performansları piyade tüfeği ile yapılan ve 7.65x51 mm çelik mermilerin kullanıldığı atışlar ile ölçülmüştür. Balistik testlerin yapılacağı malzeme bileşimleri ve kalınlıkları Çizelge 5’de verilmiştir.



Şekil 3. Mermi geliş yönüne göre ASK malzeme ile Zırh çeliğinin pozisyonu (Position of armor steel with ASF material according to the direction of the projectile)

Çizelge 5. Balistik test yapılan malzemeler ve kalınlıkları (Materials and thicknesses of ballistic testing)

Mlz. No	Alüminyum sandviç köpük malzeme (ön taraf)	Köpürme sonrası kalınlık (mm)	Ramor 500 zırh çeliği (arka taraf)	Ramor 500 zırh çeliği Kalınlık (mm)	Birleştirme	Toplam kalınlık (mm)	Mermi
1	AlSi7Mg0,6	23,1	Ramor 500	7	Çekomastik	30,1	7,62x51 mm çelik uçlu zırh delici
2	B ₄ C	16	Ramor 500	7	Çekomastik	23	
3	SiC	18	Ramor 500	7	Çekomastik	25	
4	Al ₂ O ₃	21	Ramor 500	7	Çekomastik	28	
Mlz. No	Ramor 500 zırh çeliği (ön taraf)	Ramor 500 zırh çeliği Kalınlık (mm)	Alüminyum sandviç köpük malzeme (arka taraf)	Köpürme sonrası kalınlık (mm)	Birleştirme	Toplam kalınlık (mm)	
5	Ramor 500	7	AlSi7Mg0,6	23,1	Çekomastik	30,1	
6	Ramor 500	7	B ₄ C	16	Çekomastik	23	
7	Ramor 500	7	SiC	18	Çekomastik	25	
8	Ramor 500	7	Al ₂ O ₃	21	Çekomastik	28	

ASK malzemelerin mikroyapı özelliklerini belirlemek amacı ile metalografik numuneler kesilmiştir. Kesilen numuneler sırası ile 240, 400, 800,1200 numaralı zımparalar ile zımparalanarak kabaca yüzeyler iyileştirilmiştir. Sonrasında ise 6-3 ve 1 mikronluk elmas parlatıcılarda parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Elde edilen malzemelerin yüzeyi parlatılmış numunelerin makro resimleri alınarak gözenek boyutları

belirlenmiştir. Al levha ile köpük arasında oluşan arayüzey bağımlı görebilmek için Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü’nde bulunan JEOL JSM 6060LV marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.

Elde edilen alüminyum sandviç köpükler (ASK) 0,1 mg hassasiyetindeki Sartorius marka terazide kuru ve su içerisinde tartılmış ve Arşimet formülü yardımıyla

yoğunlukları hesaplanmıştır. Yoğunluk hesabı için kullanılan Arşimet prensibi Eşitlik 1’de verilen formüle göre yapılmıştır [18].

$$p^* = \frac{m^*}{m^* - m_s} \quad (1)$$

ρ = Köpüğün yoğunluğu (g/cm³),

m^* = Köpüğün havadaki ağırlığı (g),

m_s = Köpüğün su içerisindeki ağırlığı (g)

Gözeneklilik miktarı ise Eşitlik 2’ de verilen formüle göre yapılmıştır [19]. Bu formüle V^* köpüğün hacmini, V ise köpürtme öncesi numunenin ilk hacmini ifade etmektedir.

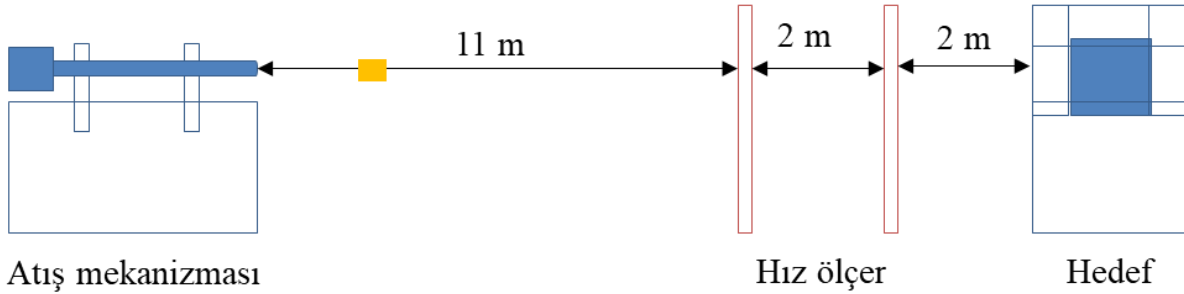
$$\text{Gözeneklilik} = \left(1 - \frac{v}{v^*}\right) \times 100 \quad (2)$$

Sandviç metalik köpüklerin lineer uzama oranları (Lu) literatürden [20] yararlanılarak aşağıdaki Eşitlik 3’e göre hesaplanmıştır. Bu eşitlikte, L_s köpüğün maksimum

yüksekliğini (mm) ve L_i köpürtme öncesi ön şekil numunenin yüksekliğini (mm) ifade etmektedir.

$$Lu = \frac{L_s - L_i}{L_i} \times 100 \quad (3)$$

Balistik testler Kırıkkale makine kimya sanayinde bulunan atış poligonunda gerçekleştirilmiştir. Balistik testler Şekil 4’de verilen şematik çizime göre yapılmıştır. Tüfek ile hedef arasında 15 metre mesafe bırakılmıştır. Hedefin 4 metre önünde ise hızölçer perdeler konularak merminin hedefe çarpmadan önceki hızları belirlenmektedir. Balistik testler 7,62x51 mm’lik zırh delici mermiler ile NIJ IV standardında yapılmıştır. Balistik test sonrası oluşan hasar çapı kumpas yardımı ile iç çap ölçülerek yapılmıştır. Ayrıca malzemelerin makro resimleri çekilerek resimler üzerinde hasar mekanizmaları tartışılmıştır. Metalik köpükte oluşan hasarlar makro boyutta incelenmiştir.

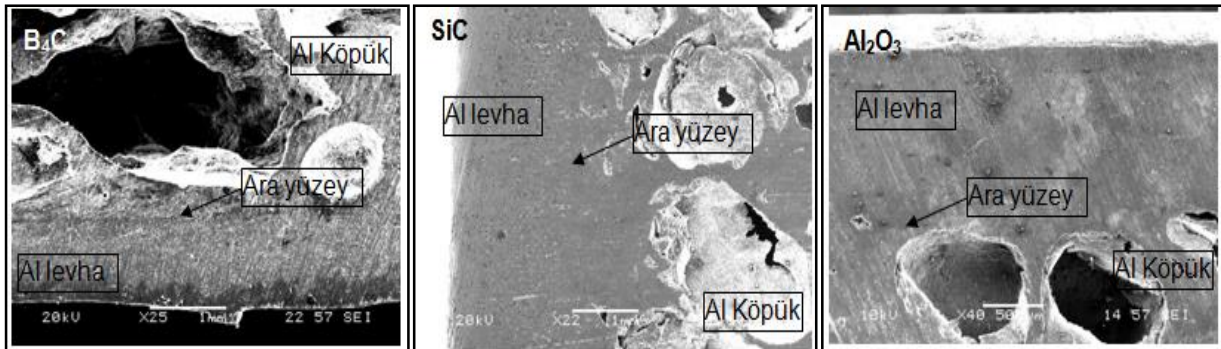


Şekil 4. Balistik test ünitesinin şematik görünümü (Schematic view of ballistic test)

3. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

%5 B₄C, %5 SiC ve %5 Al₂O₃ ilaveli kompozit ASK malzemelerin köpük ile Al levha arasında oluşan arayüzey durumunu gösteren resimler Şekil 5’de verilmiştir. B₄C ilaveli ASK’lerde levha-metal köpük arasında birleşmenin olduğu ancak belirgin bir çizgi şeklinde arayüzey oluşmuştur. SiC ilaveli ASK’lerde de

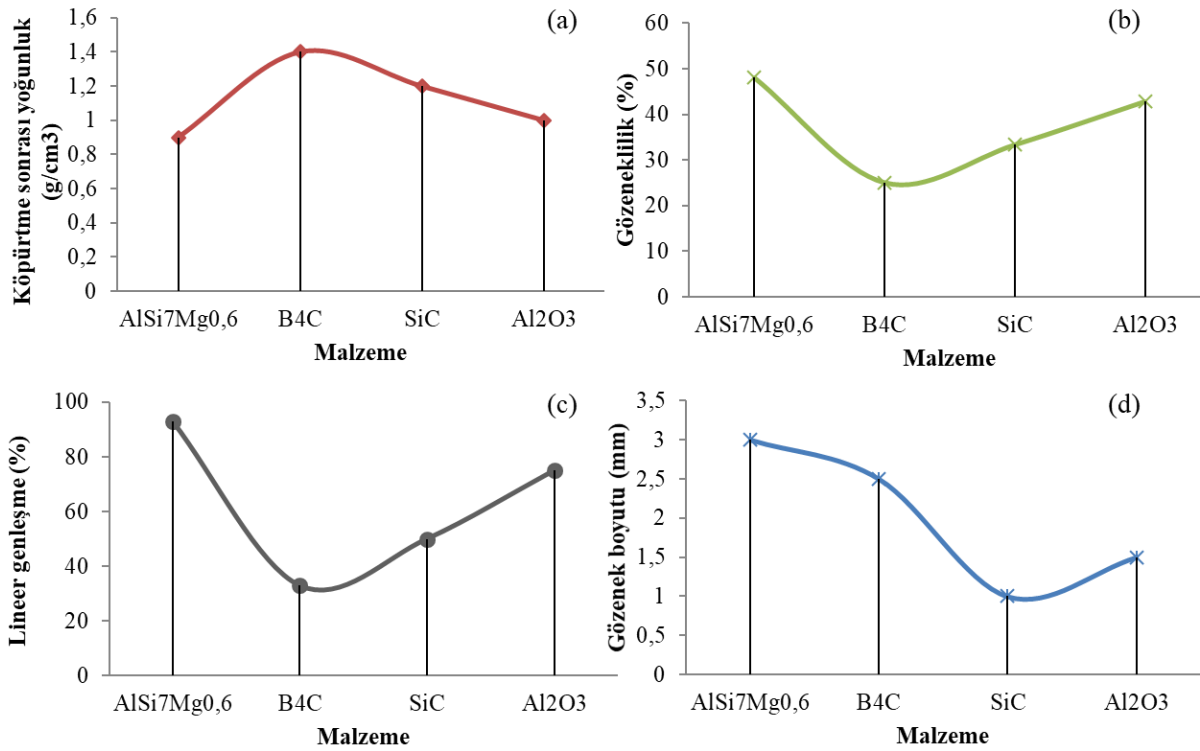
levha-metal köpük arasında birleşmenin olduğu ve bu birleşme bölgesinde arayüzey çizgisinin oluşmadığı görülmüştür. Al₂O₃ ilaveli ASK’lerde metalik köpük-levha arasında meydana gelen belirgin çizgi B₄C ilaveli ASK’lerde meydana gelen arayüzey çizgisine göre daha azdır.



Şekil 5. ASK malzemelerde al levha ile al köpük ara yüzeyinin SEM resmi (Image of al plate and al foam interface in ASF materials)

Parçacık ilaveli ASK'lerin köpürebilirlik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla preform numuneler 690 °C sıcaklıkta serbest köpürtülmüştür. Serbest köpürtme sonrası elde edilen köpürebilirlik özellikleri Şekil 6'da verilmiştir. Köpürtme sonrası yoğunluklar incelendiğinde en düşük yoğunluk parçacık takviyesiz olan AlSi7Mg0,6 ASK malzemesinde gerçekleşmiştir. En yüksek yoğunluk ise B₄C parçacık takviyeli ASK malzemesinde gerçekleşmiştir. Yoğunluklar sırası ile AlSi7Mg0,6, B₄C, SiC ve Al₂O₃ parçacık takviyeli ASK malzemelerde 0,9, 1,4, 1,2 ve 1 olarak bulunmuştur. Gözeneklilik oranına baktığımızda ise en yüksek gözeneklilik AlSi7Mg0,6 ASK malzemesinde olurken en düşük gözeneklilik B₄C parçacık takviyeli ASK malzemelerde olduğu gözlemlenmiştir. Metalik köpük malzemelerde köpürmenin karşılığı olan lineer genişleme oranlarına baktığımızda takviye elemanlarının lineer

genleşmeyi çok fazla etkilemediği Şekil 6-c'de görülmektedir. En iyi lineer genişleme yüzdesi takviyesiz olan AlSi7Mg0,6 ASK malzemesinde (%93) oluşmuştur. Al₂O₃ parçacık takviyeli ASK malzemesinde %75, SiC parçacık takviyeli %50 en düşük olan B₄C parçacık takviyeli ASK malzemesinde ise %33 lineer genişleme meydana gelmiştir. Yapılan çalışmada B₄C parçacık takviyeli ASK malzemelerin lineer genişleme oranını çok fazla miktarda artırmadığı gözlemlenmiştir. Gözenek boyutlarını incelediğimizde ise en büyük gözenek boyutu AlSi7Mg0,6 ASK malzemesinde görülürken en düşük gözenek boyutu ise SiC parçacık takviyeli ASK malzemesinde görülmüştür.



Şekil 6. ASK'lerin köpürebilirlik özellikleri (Foamability properties of ASFs)

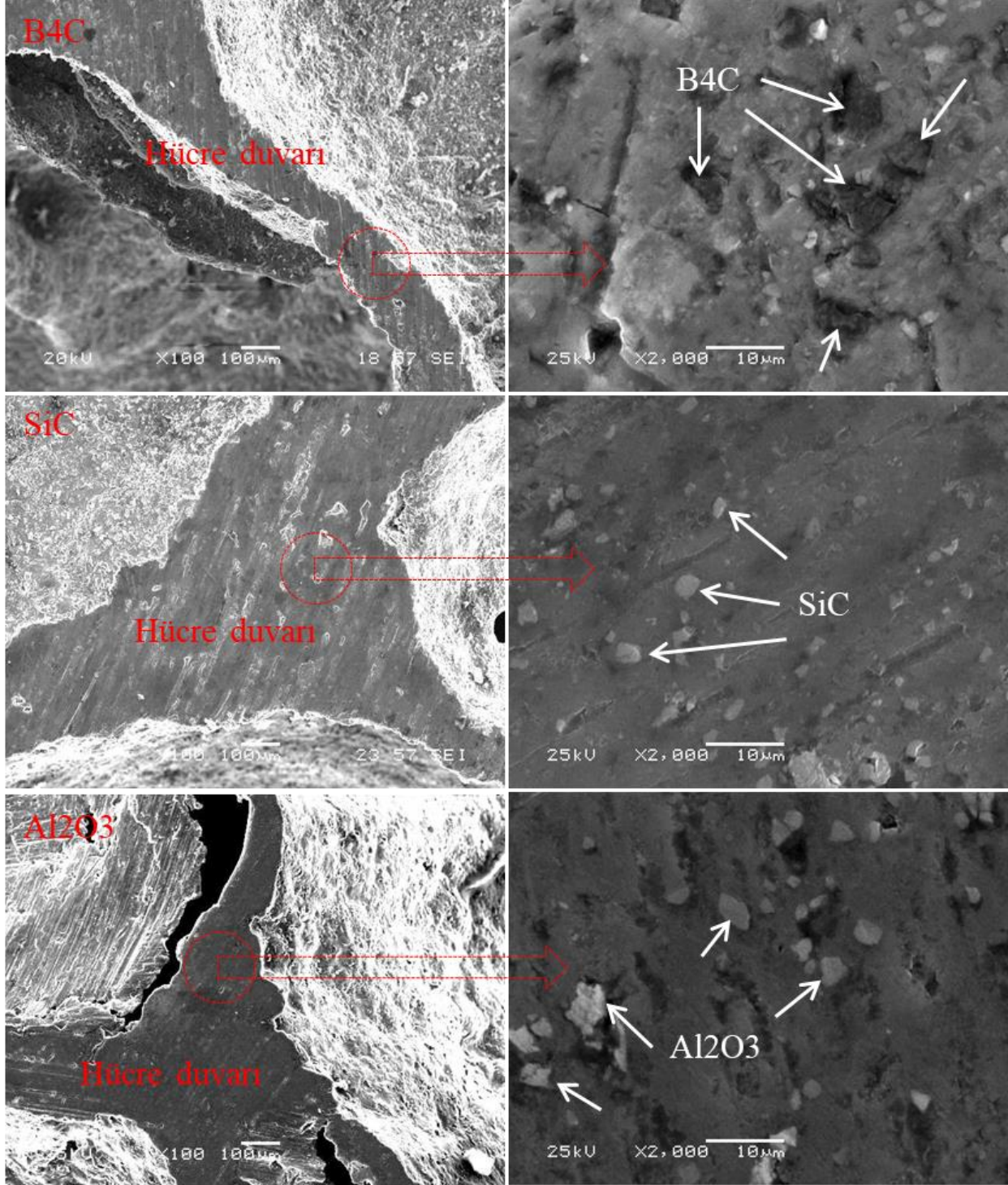
Şekil 7'de seramik parçacıklarının gözenek duvarı içerisindeki konumunu belirleyen SEM resimleri verilmiştir. B₄C takviyeli ASK malzemelerde B₄C parçacıklarının etrafında boşlukların oluştuğu görülmüştür. Bu durum B₄C parçacıklarının matris fazı ile iyi bir ıslatma özelliği sergilememesinden kaynaklanmaktadır. B₄C ile Alüminyum fazı arasında ıslatma probleminin olduğu bazı kaynaklarda verilmektedir [21]. B₄C parçacığı ile Alüminyum fazı arasında meydana gelen boşluklar malzemenin köpürme öncesi gözenekli olmasına neden olmaktadır. Metalik köpüklerde iyi bir köpürebilirlik sergilemenin şartlarından bir tanesi yüksek yoğunluklu köpürebilir

preform üretmektir [22]. Bu sebepten dolayı B₄C parçacık takviyeli ASK malzemelerde köpürme oranı (lineer genişleme) diğerlerine göre oldukça düşük olmuştur (Şekil 6-c). SiC Parçacıkları matris ile uyumlu ara yüzey oluşturmuş ve köpürebilirliği olumlu etkilemiştir. Al₂O₃ parçacıkları ise kısmen iyi bir ara yüzey bağı gerçekleştirmiştir. Al₂O₃ parçacık takviyeli Alüminyum köpüklerin üretilmesi ile ilgili yapılan çalışmada Al₂O₃ %b7'ye kadar köpürebilirliği olumlu yönde etkilediği bilinmektedir [23].

Balistik testlerin yapılmasında mermi çekirdeğin namludan çıktığı hız 838 ± 9,1 m/s'dir. Mermi mühimmatının sahip olduğu barut oranına göre

çekirdeğin namludan çıktığı hız $\pm 9,1$ m/s kadar değişebilmektedir. Bu sebeple mermi çekirdeğinin namludan çıkıp hedefe varıncaya kadar kaybettiği hızlar bir miktar değişebilmektedir. Yapılan çalışmada ASK malzemenin önde ve arkada olduğu iki farklı tasarımda

hedefe çarpan mermi çekirdeğinin hızları Çizelge 6'de verilmiştir. ASK'lerin balistik performansının belirlenmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmalarda zırh malzemesinin hasar analizi üzerinde durulmuştur.



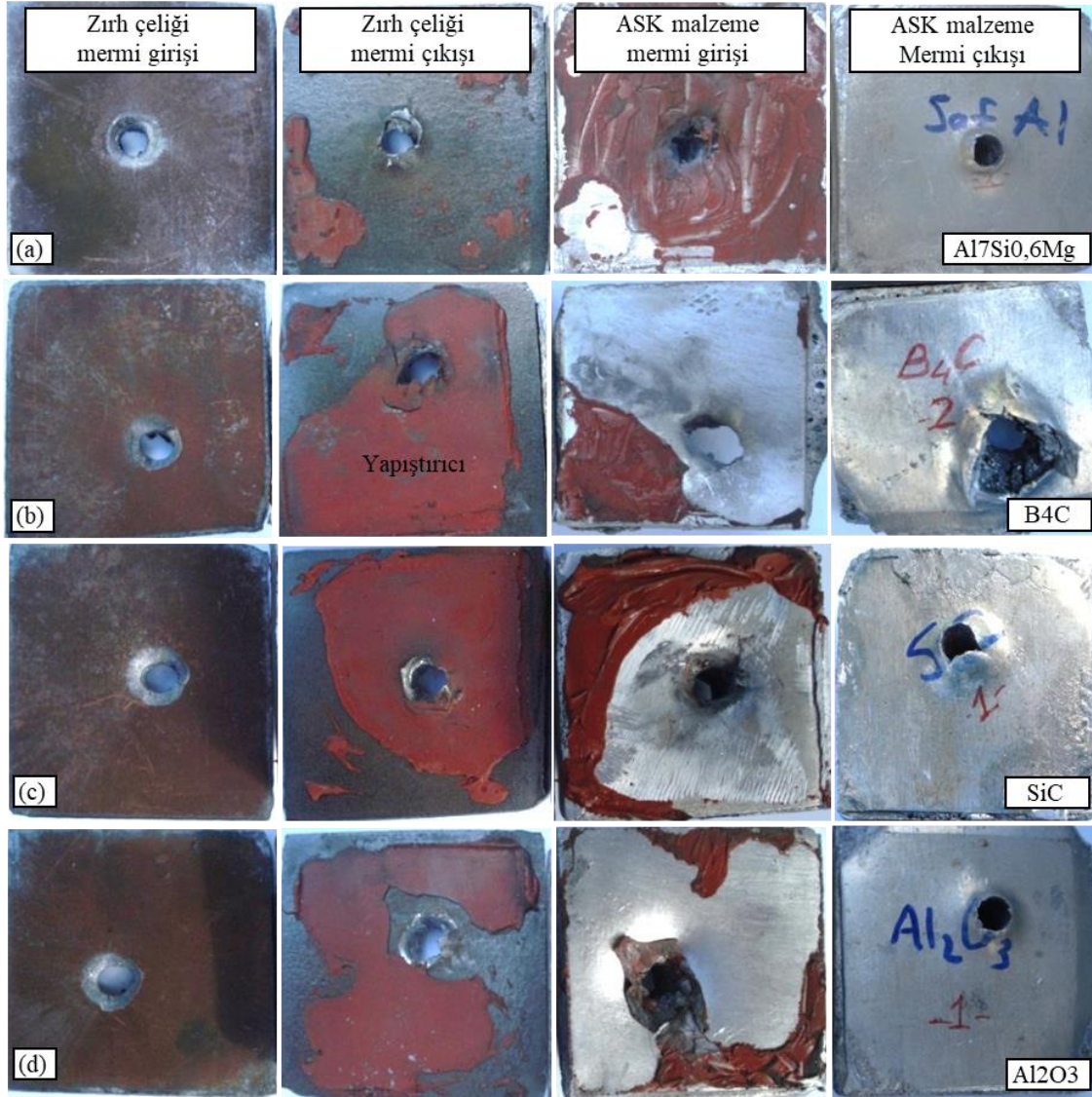
Şekil 7. ASK malzemelerin hücre içerisinden alınan SEM resim görüntüleri (Images of SEM images taken from the cell of the ASF materials)

Çizelge 6. Mermilerin hedefe çarpmadan önceki hızları (The velocity of bullets before impact)

ASK malzeme	Mermi çekirdeğinin hedefe çarpma hızı	
	Zırh çeliği+ASK	ASK+Zırh çeliği
AlSi7Mg0,6	800 m/sn.	794 m/sn.
SiC	787 m/sn.	800 m/sn.
Al ₂ O ₃	798 m/sn.	794 m/sn.
B ₄ C	792 m/sn.	796 m/sn.

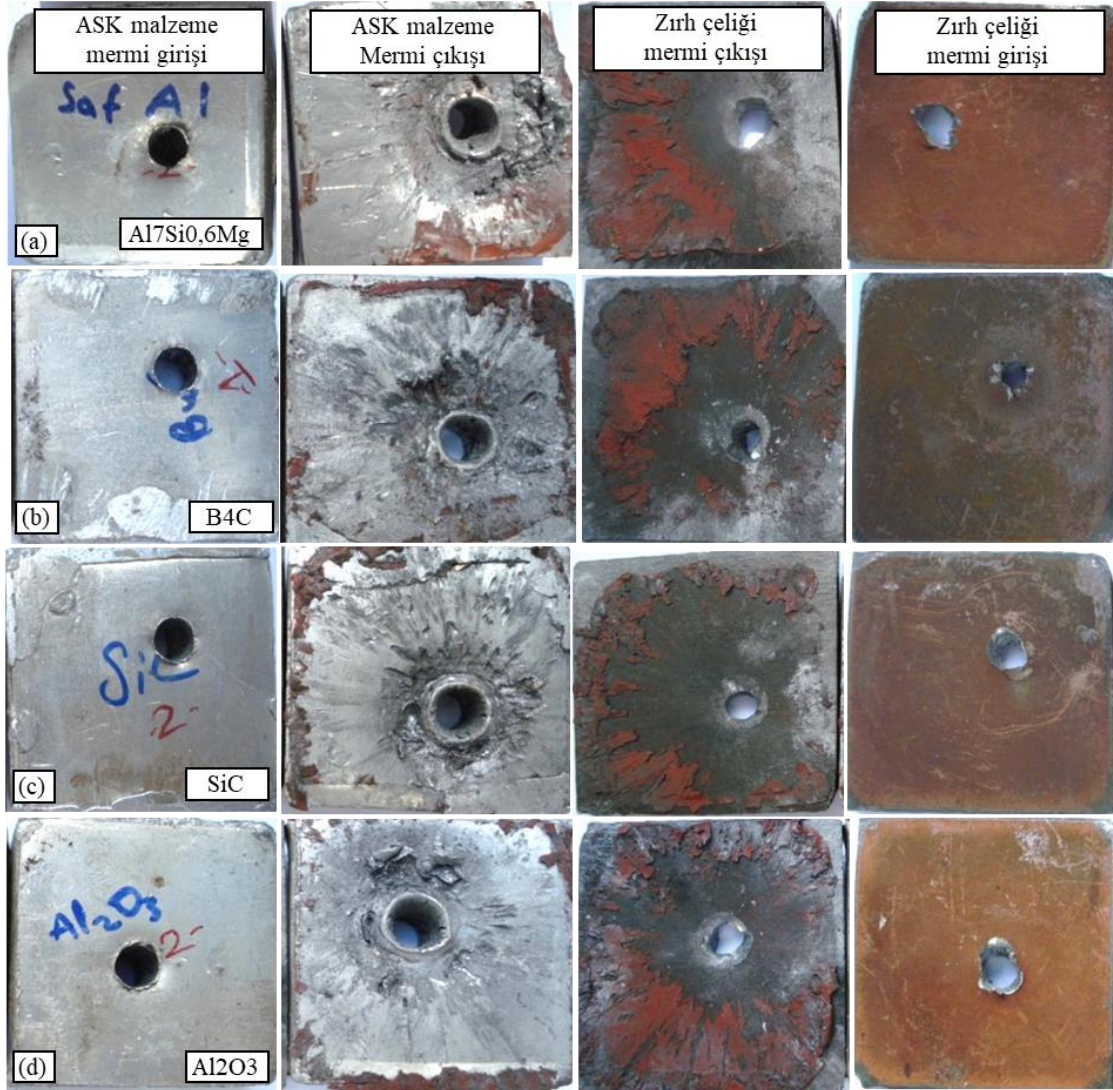
ASK malzemelerin ön tarafta ve arka tarafta yer aldığı iki farklı tasarım yapılararak balistik atışlar gerçekleştirilmiştir. balistik test sonrası her iki tasarım içinde makro boyutta resimler alınmıştır (Şekil 8- Şekil 9). Şekil 8'de mermi çekirdeğinin hareket yönüne göre zırh çeliğinin (ZÇ) önde ASK'nin ise arkada yer aldığı

tasarımın balistik test sonucu oluşan hasar mekanizmasını gösteren resimler verilmiştir. Zırh çeliğinin delinmesi sırasında çarpışma yüzeyinde çukur şeklinde darbe hasarı oluşmuş ve mermi zırh çeliğinden çıkarken belli bir miktar malzemeyi dışarı doğru sürüklemiştir. Metallerin yüzeyinde çarpma etkisine bağlı olarak darbe hasarı meydana gelmesi genellikle bir tehlike olarak kabul edilmez çünkü metaller plastik şekil değiştirme kabiliyetlerinden dolayı enerjinin büyük miktarını absorbe edebilir. Oluşacak kopmalar ani ve beklenmedik olmaz. Benzer durum ASK'lerde de görülmüştür. Özellikle SiC ve B₄C ilave edilerek üretilen ASK'lerde mermi, çarpma yüzeyinde daha derin ve çukur şeklinde hasar oluşturarak ASK'nin arka yüzeyinde taç yaprağı şeklinde bir yapı oluşturmuştur. ASK'lerin ön yüzeyinde çarpmanın etkisiyle kopmaların görülmemesi ise ASK'lerin enerji absorbe etme potansiyelinin yüksek olmasının göstergesidir.

**Şekil 8.** Zırh çeliğinin önde bulunduğu zırh malzemesinin hasar resimleri (Damage pictures of armor material with armor steel)

ASK'ların önde bulunduğu tasarımlarda, ASK'nin merminin çarptığı yüzeyinde oluşan hasarın çukur şeklinde değil zımba şeklinde olduğu görülmüştür. Bunun mermi çekirdeğinin daha yüksek hızda ASK'ye çarpmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Mermi çekirdeğinin ASK'yi terk ederken ASK ile zırh çeliği ara

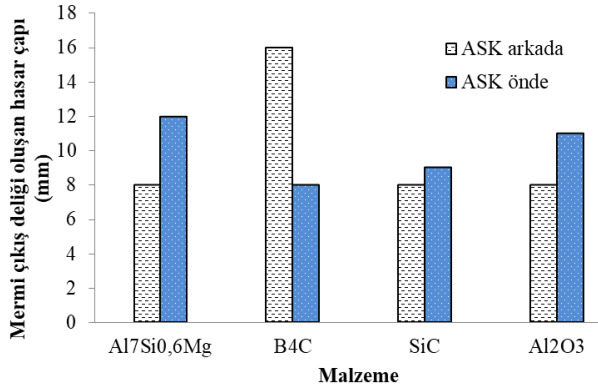
yüzeyinde basınç ve sıcaklık etkisi ASK'nin arka yüzeyinde çukur ve ergime oluştururken zırh çeliğinin çarpma bölgesinde çukur şeklinde hasarın oluşmasına neden olmuştur. Mermi çekirdeğinin zırh çeliğini terk ederken taç yaprağı şeklinde hasar oluşmasına neden olduğu görülmüştür (Şekil 9).



Şekil 9. ASK'lerin önde bulunduğu zırh malzemesinin hasar resimleri (Aluminum sandwich foams contained in the armor material damage pictures)

Mermi çekirdeğinin malzemeye çarptıktan sonra belirli bir çapta hasar oluşturarak çıkış yapmaktadır (Şekil 10). Çıkış deliği hasar çaplarına bakıldığında ASK arka tarafta yer aldığı durumda en yüksek hasar çapı B₄C parçacık takviyeli ASK malzeme gerçekleşmiştir. Diğerlerinde ise hasar çapları birbirine yakın çıkmıştır. ASK malzemelerin ön tarafta yer aldığı durumlarda ise

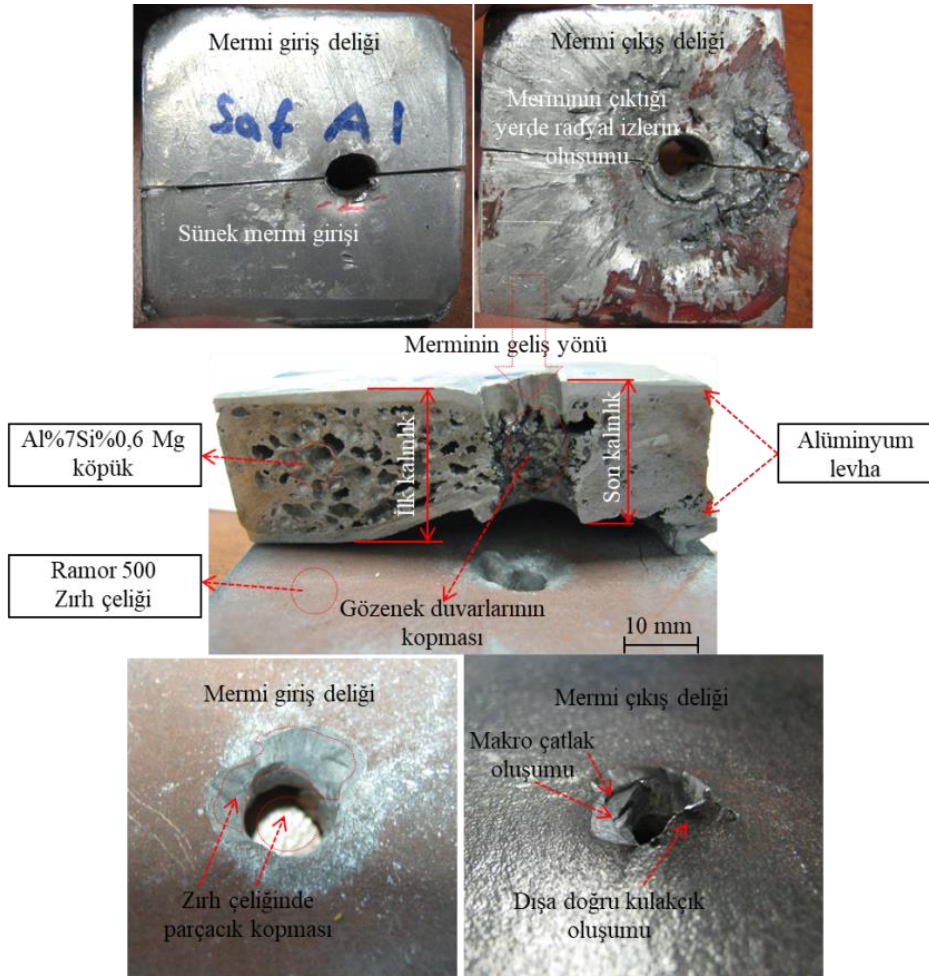
en yüksek mermi çıkış hasar çapı Al₇Si_{0,6}Mg ASK malzemelerde gözlemlenirken daha sonra sırasıyla Al₂O₃, SiC ve B₄C parçacık takviyeli ASK malzemelerde görülmüştür. Çelik plakada meydana gelen hasar çapı ön tarafta yer alan ASK malzemenin merminin uç enerjisini yavaşlatması ile ilgilidir. Hasar çapı ne kadar küçük olursa mermi o kadar kolaylıkla malzemeyi terk etmektedir.



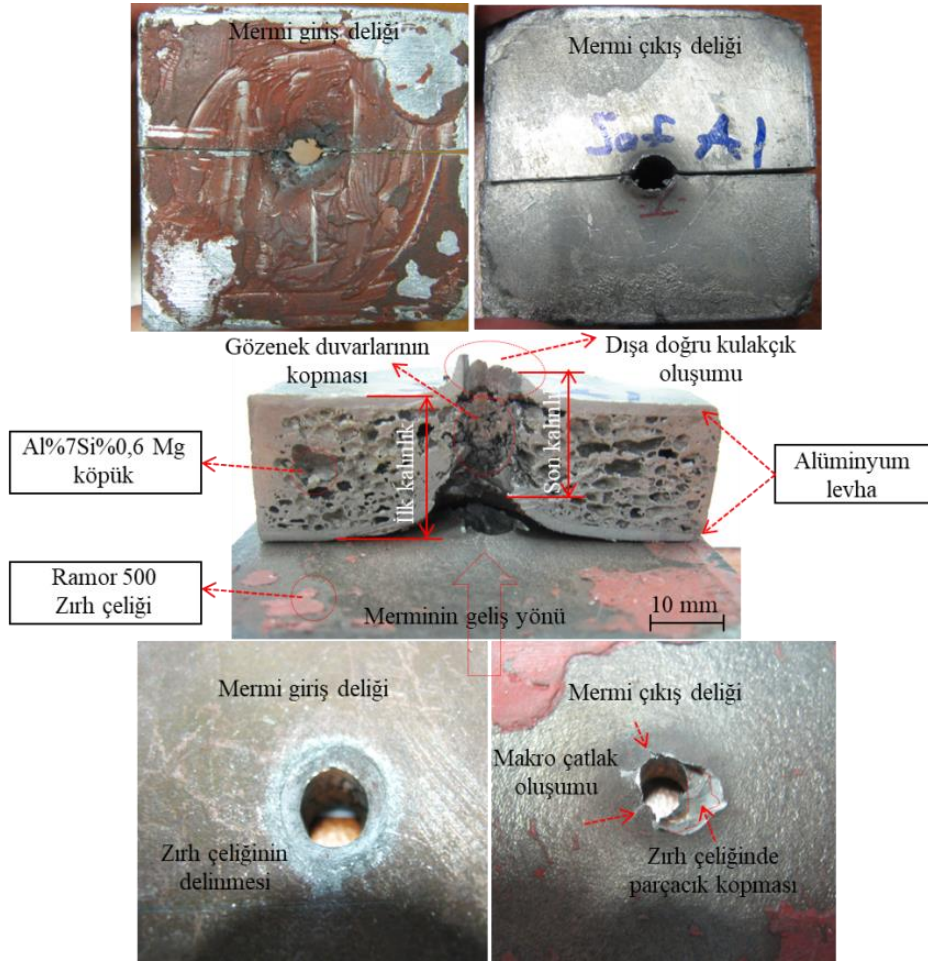
Şekil 10. Farklı tasarımlardaki ASK'lerde mermi çarpmasıyla zırh sisteminde meydana gelen hasar çapı (The diameter of the damage in the armor system due to the impact of the nozzle in the ASFs of different designs)

Al7Si0,6Mg ASK malzemenin ön tarafta ve arka tarafta yer aldığı iki farklı tasarım için balistik test sonrası kesit

resimler Şekil 11 ve Şekil 12'de verilmiştir. Şekil 11'de Al7Si0,6Mg ASK malzemenin ön tarafta yer aldığı görülmektedir. Şekil incelendiğinde mermi çekirdeğinin ilk çarptığı yerde sünek bir delik geçişi olduğu görülmüştür. ASK malzemenin çıkarken ise radyal bası dalgaları ASK malzemenin gözeneklerinin birbirine geçmesine neden olmuştur. Bu esnada mermi çekirdeğinden bir miktar enerjiyi absorbe etmiştir. Ramor 500 zırh çeliğinin giriş kısmında kopmaların meydana geldiği görülmüştür. Çıkış kısmında ise makro çatlaklar ve dışa doğru kulakçık oluştuğu gözlemlenmiştir. Şekil 12'de yer alan ASK malzemenin arka tarafta yer aldığı durumda ise mermi çekirdeği zırh çeliğini delip geçerken çelikten parçacık koparmıştır. Çeliğin çıkış kısmında ise radyal çatlaklar oluştuğu ve kısmen parçacık kopması gerçekleştiği görülmüştür. ASK malzeme içerisinden hareket eden mermi çekirdeği ASK malzemeyi ileri doğru hareket ettirmiştir. Bu hareket esnasında metalik köpükte gözeneklerin çöktüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca ASK malzeme çıkışında dışa doğru kulakçık oluştuğu görülmüştür.



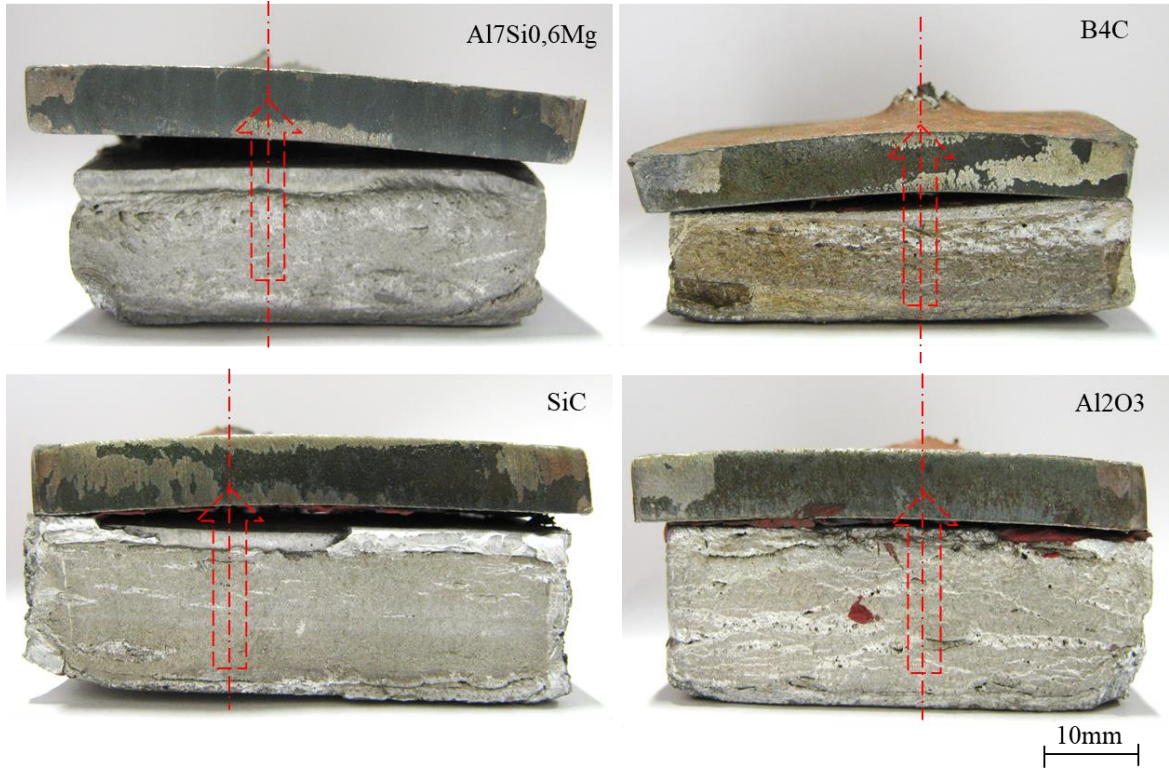
Şekil 11. Ön tarafta yer alan ASK malzemenin mermi çarpma sonrası kesit görünümü (Cross-sectional views of the ASF material on the front after the projectile)



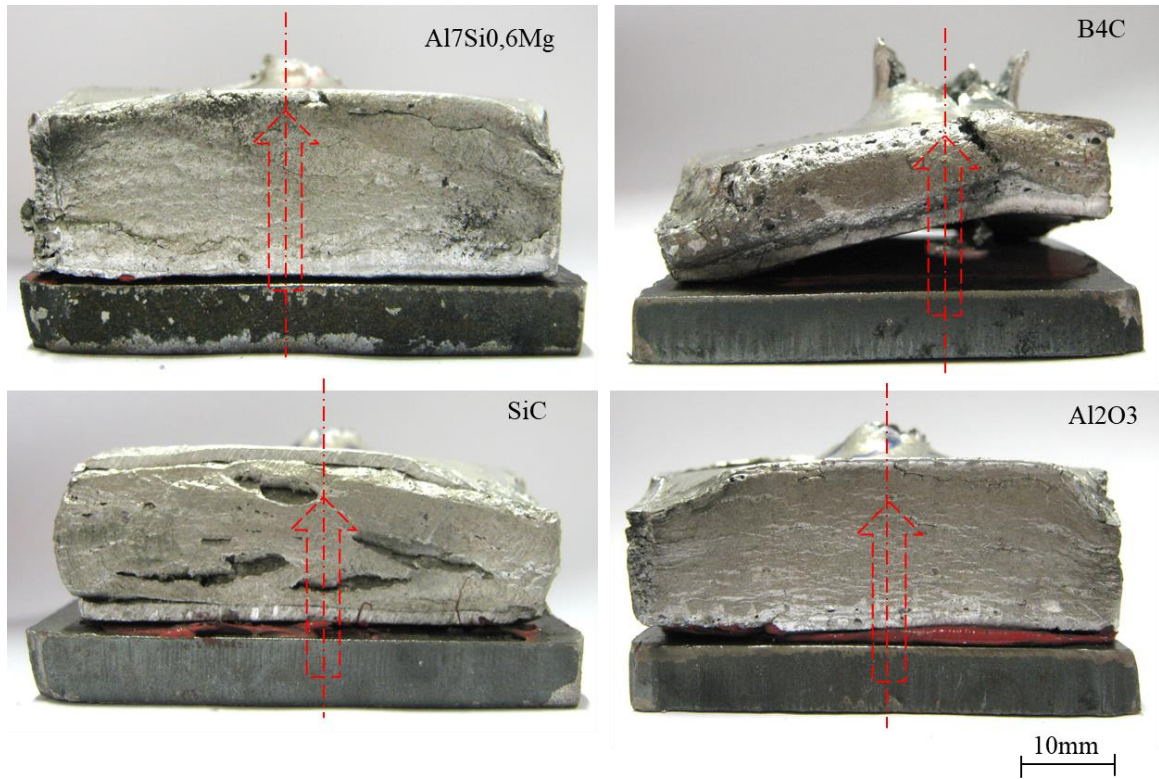
Şekil 12. Arka tarafta yer alan ASK malzemenin mermi çarpma sonrası kesit görüntüleri (Cross-sectional view of the ASK material at the rear after the projectile)

Şekil 13 ve Şekil 14’de balistik test sonrası (ASK malzemelerin önde ve arkada olduğu durumda) resimleri verilmiştir. Al7Si0,6Mg ASK malzemesinin önde ve arkada olduğu duruma bakılırsa zırh çeliğinin önde olduğu durumda çelikte herhangi bir eğilme oluşmadığı gözlemlenirken çeliğin arkada olduğu durumda ise çelikte eğilme olduğu görülmüştür. Bu durum ASK malzemenin önde olmasından kaynaklı mermi çekirdeğinin hızını yavaşlatmasından

kaynaklanmaktadır. Mermi çekirdeği çelik plakaya hızlı çarparsa herhangi bir eğilme olmaksızın çeliği delip geçerken çelik plaka arka tarafta olduğunda öndeki ASK malzeme hızını yavaşlatarak merminin çelik levhayı deforme etmesini sağlamaktadır. Dolayısı ile ön tarafta bulunan ASK malzemeler mermi çekirdeğinin hızını yavaşlatmada önemli bir etkiye sahiptir. Diğer seramik parçacık takviyeli ASK malzemelerde de arka tarafta bulunan çelik levhanın deformasyonla eğildiği görülmüştür.



Şekil 13. ASK malzemelerin ön tarafta yer aldığı durumda merminin hareketi (Motion of the projectile when the ASF materials are in the front)



Şekil 14. ASK malzemelerin arka tarafta yer aldığı durumda merminin hareketi (Motion of the projectile in the case of ASF materials)

4. SONUÇ CONCLUSION)

Bu çalışmada toz metalürjisi yöntemi ile takviyeli ve takviyesiz ASK malzemeler üretilmiştir. Üretilen ASK malzemeler ile Ramor 500 zırh çeliği bir araya getirilerek zırh istemi oluşturulmuştur. Deneysel çalışmalar sonucunda;

- B₄C parçacık takviyeli ASK malzemede Al levha ile köpük arasında birleşme ara yüzey çizgisinin belirgin olduğu görülmüştür. SiC parçacık takviyeli ASK malzemede ise Al levha ile köpük arasındaki ara yüzey bağının olduğu ve herhangi bir sınır çizgisinin oluşmadığı tespit edilmiştir. Al₂O₃ parçacık takviyeli ASK malzemede ise B₄C'ye göre daha az belirgin bir ara yüzey çizgisi oluşmuştur.
- Köpürme sonrası yoğunluklar incelendiğinde en düşük yoğunluk parçacık takviyesiz olan AlSi7Mg0,6 ASK malzemede gerçekleşmiştir. En yüksek yoğunluk ise B₄C parçacık takviyeli ASK malzemede gerçekleşmiştir.
- En yüksek gözeneklilik AlSi7Mg0,6 ASK malzemede olurken en düşük gözeneklilik B₄C parçacık takviyeli ASK malzemelerde olduğu gözlemlenmiştir.
- En iyi lineer genleşme yüzdesi takviyesiz olan AlSi7Mg0,6 ASK malzemede (%93) oluşmuştur. Al₂O₃ parçacık takviyeli ASK malzemede %75, SiC parçacık takviyelide %50 en düşük olan B₄C parçacık takviyeli ASK malzemede ise %33 lineer genleşme meydana gelmiştir.
- Yapılan çalışmada B₄C parçacık takviyeli ASK malzemelerin lineer genleşme oranını çok fazla miktarda artırmadığı gözlemlenmiştir.
- Gözenek boyutlarını incelediğimizde ise en büyük gözenek boyutu AlSi7Mg0,6 ASK malzemede görülürken en düşük gözenek boyutu ise SiC parçacık takviyeli ASK malzemede görülmüştür.
- B₄C takviyeli ASK malzemelerde B₄C parçacıklarının etrafında boşlukların olduğu görülmüştür. SiC Parçacıkları matris ile uyumlu ara yüzey oluşturmuş ve köpürebilirliği olumlu etkilemiştir. Al₂O₃ parçacıkları ise kısmen iyi bir ara yüzey bağı gerçekleştirmiştir.
- Çıkış deliği hasar çaplarına bakıldığında ASK arka tarafta yer aldığı durumda en yüksek hasar çapı B₄C parçacık takviyeli ASK malzemede gerçekleşmiştir. Diğerlerinde ise hasar çapları birbirine yakın çıkmıştır. ASK malzemelerin ön tarafta yer aldığı durumlarda ise en yüksek mermi çıkış hasar çapı Al7Si0,6Mg ASK malzemelerde gözlemlenirken daha sonra sırasıyla Al₂O₃, SiC ve B₄C parçacık takviyeli ASK malzemelerde görülmüştür.
- Al7Si0,6Mg ASK malzemesinin önde ve arkada olduğu duruma bakılırsa zırh çeliğinin önde olduğu durumda çelikte herhangi bir eğilme oluşmadığı gözlemlenirken çeliğin arkada olduğu durumda ise çelikte eğilme olduğu görülmüştür.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Balistik testlerin yapılmasında sağladığı imkânlardan dolayı Makine ve Kimya Endüstrisi Kurumuna teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Seitzberger, M., Rammerstorger, F.G., Degischer, H.P., "Crushing of axially compressed steel tubes filled with aluminium foam", *Acta Mechanica*, 125: 95-103, (1997).
- [2] Hanssen, A.G., Langseth, M., Hopperstad, O.S., "Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminium foam filler", *Int. J. of Impact Eng.*, 24 (5): 475-507, (2000).
- [3] Elbir, S., Yılmaz, S., Güden, M., "Kapalı hücre alüminyum köpük metallerin üretim metodları ve mekanik özellikleri", *TMMOB Metalurji Dergisi*, 23 (120): 35-42, (1999).
- [4] Banhart, J., & Seeliger, H. W. (2008). Aluminium foam sandwich panels: Manufacture, metallurgy and applications. *Advanced Engineering Materials*, 10(9): 793-802.
- [5] Davies, G. J., & Zhen, S. (1983). Metallic foams: their production, properties and applications. *Journal of Materials science*, 18(7): 1899-1911.
- [6] Banhart, J. (2001). Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in materials science*, 46(6): 559-632.
- [7] Experimental study of ballistic resistance of sandwich targets with aluminum face-sheet and graded foam core. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 1099636218757669.
- [8] Kuang, K.S.C., Zhang, L., Cantwell, W.J., Bennion, I., "Process monitoring of aluminum-foam sandwich structures based on thermoplastic fibre-metal laminates using fibre Bragg gratings" *Composites Science and Technology*, 65: 669-676 (2005).
- [9] Thomas J.H., "Elements of Ordnance", John Wiley & Sons, Inc., New York, (1938).
- [10] Lowry E.D., "Interior Ballistics", New York, Doubleday & Company, (1968).
- [11] Wilkins, M. L. (1978). Mechanics of penetration and perforation. *International Journal of Engineering Science*, 16(11): 793-807.
- [12] Cortes, R., Navarro, C., Martinez, M. A., Rodriguez, J., & Sanchez-Galvez, V. (1992). Numerical modelling of normal impact on ceramic composite armours. *International journal of impact engineering*, 12(4): 639-650.
- [13] Gama, B. A., Bogetti, T. A., Fink, B. K., Yu, C. J., Claar, T. D., Eifert, H. H., & Gillespie Jr, J. W.. Aluminum foam integral armor: a new dimension in armor design. *Composite Structures*, 52(3-4): 381-395, (2001).
- [14] Navarro, C., Martinez, M. A., Cortes, R., & Sanchez-Galvez, V. (1993). Some observations on the normal impact on ceramic faced armours backed by composite plates. *International journal of impact engineering*, 13(1): 145-156.
- [15] Shockey, D. A., Marchand, A. H., Skaggs, S. R., Cort, G. E., Burkett, M. W., & Parker, R. (1990). Failure phenomenology of confined ceramic targets and

- impacting rods. *International Journal of Impact Engineering*, 9(3), 263-275.
- [16] Gur, A. K., Orhan, A., & Taskaya, S. (2019). Joining of Ramor 500 Steel by Submerged Welding and its Examination of Thermal Analysis in Ansys Package Program. *Thermal Science and Engineering Progress*.
- [17] N. Yigittürk, Ramor Armor Steels of AISI 304 Stainless Steel With Double Transfer of Plasma Arc Welding Method And Investigation In Joining, Firat University, Science and Technology Institute, Metallurgy and Materials Engineering, Elazig, Turkey, 2016.
- [18] Stöbener, K., Lehnhus, D., Avasse, M., Peroni, L., Buse, M., “Aluminum foampolymerhybrid structures (APM aluminum foam) in compression testing”, *International Journal of Solids and Structures*, 45: 5627-5641 (2008).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



Mineral katkı içeren kalsiyum alüminat çimento esaslı harçların mekanik, dayanıklılık, termal ve içyapı özelliklerinin araştırılması

Investigation of mechanical, durability, thermal and microstructural properties of calcium aluminate cement based mortars containing mineral admixtures

Yazar(lar) (Author(s)): Murat TUYAN¹, Kübra Sevcan SOYKAN², İrem NAMAL³, Özge ANDIÇ ÇAKIR⁴

ORCID¹: 0000-0003-2149-8437

ORCID²: 0000-0003-3490-5425

ORCID³: 0000-0001-7962-5780

ORCID⁴: 0000-0001-5662-3555

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Tuyan M., Soykan K. S., Namal İ. ve Andiç Çakır Ö., “Mineral katkı içeren kalsiyum alüminat çimento esaslı harçların mekanik, dayanıklılık, termal ve içyapı özelliklerinin araştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 23(2): 311-320, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.483543

Mineral Katkı İçeren Kalsiyum Alüminat Çimento Esaslı Harçların Mekanik, Dayanıklılık, Termal ve İy Yapı Özelliklerinin Araştırılması

Araştırma Makalesi / Research Article

Murat TUYAN^{1*}, Kübra Sevcan SOYKAN², İrem NAMAL², Özge ANDIÇ ÇAKIR^{2,3}

¹Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir Demokrasi Üniversitesi, Türkiye

² Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ege Üniversitesi, Türkiye

³Merkezi Araştırma Test ve Analiz Laboratuvarı U.A.M. (Ege-Matal), Ege Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 15.11.2018 ; Kabul/Accepted : 10.04.2019)

ÖZ

Bu çalışmada, kalsiyum alüminat çimentosunun ağırlıkça %10'u ile %40'ı oranında yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ile kısmi ikame edilmesi sonucu elde edilen kalsiyum alüminat çimento esaslı harç karışımlarının mekanik, dayanıklılık, termal ve iy yapı özellikleri incelenmiştir. Karışımların basınç ve eğilme dayanımları 3, 7, 28 ve 90. günlerde belirlenmiştir. Harç karışımları üzerinde sülfat ve asit direnci, yüksek sıcaklık direnci, termogravimetrik analiz (TGA), bilgisayarlı mikro tomografi (MicroCT) ve x-ışını foto elektron spektroskopisi (XPS) analizleri gerçekleştirilmiştir. Kalsiyum alüminat çimentosunun %10 yüksek fırın cürufu ve %20 uçucu kül ile ikame edilmesi sonucu üretilen harçlar üzerinde basınç dayanımı, yüksek sıcaklık direnci ve dayanıklılık deney sonuçları kontrol karışımı ile karşılaştırılmıştır. Mineral katkı ilavesi nedeniyle karışımların gözenek yapısında değişiklikler olmasına rağmen, karışımların kimyasal özelliklerinde önemli bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Deney sonuçları, yüksek fırın cürufunun ve uçucu külün kalsiyum alüminat çimentosu yerine kısmen kullanılması ile ekolojik verimli ve uygun maliyetli bir bağlayıcı yapı malzemesi üretebileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Kalsiyum alüminat çimentosu, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, mekanik, dayanıklılık, termal, iy yapı.

Investigation of Mechanical, Durability, Thermal and Microstructural Properties of Calcium Aluminate Cement Based Mortars Containing Mineral Admixtures

ABSTRACT

In this study, mechanical, durability, thermal and microstructural properties of calcium aluminate cement-based mortar mixtures incorporating 10% to 40% partial replacement by weight of blast furnace slag and fly ash were investigated. Compressive and flexural strength tests were performed at 3, 7, 28 and 90 days. Sulfate and acid resistance, high temperature resistance, thermogravimetric analysis (TGA), micro-tomography (MicroCT) and x-ray photo electron spectroscopy (XPS) analyses were also performed on the mortar mixtures. The compressive strength, high temperature resistance and durability test results on mortars incorporating 10% blast furnace slag and 20% fly ash partial replacement for calcium aluminate cement were comparable to that of the control mixture. Although there were changes in pore structure due to mineral admixture addition, no significant change was observed in the chemical properties of the mixtures. Results indicate that blast furnace slag and fly ash partial replacement for calcium aluminate cement can produce an eco-efficient and cost-effective binder.

Keywords: Calcium aluminate cement, ground granulated blast furnace slag, fly ash, mechanical, durability, thermal, microstructure.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kalsiyum alüminat çimentosu, kullanım amacına ve gösterdiği performansa bağlı olarak Portland çimentosundan daha farklı saha uygulamalarında tercih edilmektedir. Kalsiyum alüminat çimentosu ile Portland çimentosunu birbirinden ayıran başlıca özellik, hidrasyon sonucunda ortaya çıkan reaksiyon

ürünlerinin birbirinden farklı olmasıdır. Bu fark, çimentonun priz alma ve dayanım kazanma davranışını oldukça etkilemektedir. Kalsiyum alüminat çimentosu Portland çimentosuna göre çok daha hızlı priz alma ve dayanım kazanma özelliğine sahiptir. Ancak, kalsiyum alüminat çimentosu erken yaşta hızlı dayanım kazanmasına rağmen bu çimentonun ileri yaştaki dayanımında azalmalar olmaktadır. Buna rağmen, bu çimentonun sülfat direnci, yüksek sıcaklık direnci, aşınmaya karşı dayanıklılığı ve asit etkisine dayanıklılığı Portland çimentosuna göre daha üstün olmaktadır [1-3].

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : murat.tuyan@idu.edu.tr

Kalsiyum alüminat çimentosunun ortam sıcaklığında (20-25°C) hidratasyonu sonucu oluşan ana ürünler, CAH_{10} ve C_2AH_8 gibi altıgen kalsiyum alüminat hidratlar ve bununla beraber AH_3 gibi alüminyum hidroksittir (çimento kimyasında ve dolayısıyla bu çalışmada kullanılan kısaltmalar: C-CaO, A- Al_2O_3 , H- H_2O , S- SiO_2 , c- CO_2). Altıgen hidratlar, CAH_{10} ve C_2AH_8 , yarı kararlı ürünlerdir. Bunlar zamanla veya daha yüksek sıcaklıkta ve nem varlığında kaçınılmaz olarak kübik C_3AH_6 ve AH_3 'e dönüşür. Bu dönüşümün etkisiyle sertleşmiş bağlayıcı malzemenin dayanımında azalma meydana gelmektedir [1, 4].

Kalsiyum alüminat çimentosu, özellikle Portland çimentosu ile karşılaştırıldığında daha pahalı bir yapı malzemesidir. Bu nedenle, beton içindeki kalsiyum alüminat çimentosu miktarının azaltılması veya diğer ucuz malzemelerle kısmi ikame edilmesi amaçlanmaktadır. Kalsiyum alüminat çimentosunun hidratasyonu sonucu oluşan alüminatın dönüşümünün bir sonucu olarak betondaki dayanım azalmasının ortadan kaldırmasının başarılması durumunda, kalsiyum alüminat çimentosunun uygulamadaki başarısı potansiyel olarak daha fazla olabilecektir [4].

Kalsiyum alüminat çimentosunun ileri yaşlarda dayanım kaybetmesine bir çözüm bulabilmek amacıyla silis dumanı [5, 6], uçucu kül [7, 8], cüruf [8, 9], diğer alüminosilikat esaslı malzemeler [10] gibi atık ürünlerin ve Portland çimentosunun kalsiyum alüminat çimentosu ile birlikte kullanılması ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların sonucunda ayrıca daha gelişmiş ve/veya değişik özelliklere sahip bağlayıcı ürünlerin geliştirilmesi ve kullanılması muhtemel olabilecektir.

İnşaat sektöründe çevre ve sürdürülebilirlik, son yıllarda bu konularla ilgili bilincin ve yaptırımların artmasıyla önemli bir konu haline gelmiştir. Bu açıdan, çimento üretiminin azaltılması ve katkılı çimentoların kullanımının yaygınlaşması konusunda oldukça fazla çalışma gerçekleştirilmektedir. Katkılı çimentolar Portland çimentosunun belirli oranında mineral katkı kullanımı ile üretilmektedir. Bu mineral katkılar da genel olarak endüstri atığı olarak ortaya çıkan yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi malzemelerdir [11]. Mineral katkılarının çimentoda kullanımı sonucunda, ilave bir enerjiye ihtiyaç duyulmaması ile birlikte, katkılı çimentoların karbondioksit salımında önemli bir azalmanın meydana geldiği görülmektedir [12]. Malhotra [13] yaptığı çalışmada, uluslararası platformda karbondioksit salımı ve sera gazı emisyonlarının dünyaya verdiği zararların 1990'lı yıllarda ele alındığını ve bunun sonucunda birçok ülkede çimento sektöründe bu gazların salımını azaltacak yönetmeliklerin ve uygulamaların hayata geçtiğini belirtmiştir. Sürdürülebilir bir beton elde etmek amacıyla Wu vd. [14], yüksek oranda uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanarak ultra ince çimento üretmiş ve bu çimentonun Portland çimentosuna göre enerji tüketimi ve karbon emisyonları sırasıyla %47 ve %41 oranında azaldığını rapor etmiştir. İshak ve Hashim [15] yaptığı çalışmada, karbon ayak izi ve enerji tüketimini azaltmak amacıyla bazı teknik ve stratejileri

ele almış ve enerji verimliliğini artırma, yenilenebilir enerji kullanma veya alternatif bir Portland çimentosu üretme gibi konular üzerine yoğunlaşmıştır. Maddalena vd. [16] gerçekleştirdiği çalışmada ise, jeopolimer betonun, karbon emisyonlarını %20-%50 oranında azaltan sürdürülebilir bir alternatif bağlayıcı malzemesi olduğu bildirilmiştir.

Collepari vd. [7], %20 ve %40 oranında F tipi uçucu kül ikamesi ile kalsiyum alüminat çimentolu betonlar oluşturmuş ve 5°C, 20°C ve 40°C kür sıcaklığına maruz bırakmıştır. Deneysel sonuçlarına göre, bütün kür sıcaklıklarında uçucu kül ikame edilen beton karışımlarında önemli ölçüde dayanım kaybı yaşandığı gözlemlenmiştir. F tipi uçucu külün, kalsiyum alüminat çimentosunda meydana gelen altıgen hidratın kübik hidrata dönüşümünü engelleyememesinden dolayı, kalsiyum alüminat çimentosu ile birlikte kullanılmasının uygun olmadığı belirtilmiştir. Kotwica ve Łapka [8], kalsiyum alüminat çimentolu betonlarda yüksek fırın cürufu ve F tipi uçucu külü ikame malzemesi ve filler malzemesi olarak kullanımının basınç dayanımına etkisini araştırmıştır. Deneysel sonuçları, mineral katkılarının %20 ikame edilerek oluşturulan beton karışımlarının %20 ilave filler malzemesi olarak kullanılan beton karışımlarına göre daha düşük dayanıma sahip olduğunu göstermiştir. Kırca vd. [9], kür sıcaklığının yüksek fırın cürufu içeren kalsiyum alüminat çimentolu beton üzerindeki etkisini araştırmıştır. Kalsiyum alüminat çimentosu yerine ağırlıkça %80'e kadar yüksek fırın cürufu kullanılarak oluşturulan betonlar 20°C ile 50°C arasında kür sıcaklığına maruz bırakılmıştır. Bütün kür sıcaklıklarında, yüksek fırın cürufunun %40 seviyesine kadar ikame edilmesi sonucunda, betonların ileri yaştaki basınç dayanımları kademeli olarak artmıştır. %60 ve %80 oranlarında ikame edilen beton karışımlarında ise basınç dayanımlarında düşüş meydana gelmiştir. Bu etki düşük kütleme sıcaklıklarında daha belirgin ortaya çıkarken, yüksek kütleme sıcaklıklarında ise dayanım düşüşleri daha az seviyede kalmıştır.

Mevcut literatürdeki çalışmalar göz önüne alındığında, kalsiyum alüminat çimentosu yerine yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi mineral katkılarının kullanımı sonucunda oluşan bağlayıcı malzemelerin hidratasyon mekanizmaları ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu tür bağlayıcıların durabilite, termal ve içyapı özellikleri hakkında literatürde bilgi eksikliği olduğu tespit edilmiştir. Bu amaçla, bu çalışmada, yüksek fırın cürufu ve uçucu külün kalsiyum alüminat çimentosu yerine kullanılması sonucu elde edilen harç karışımlarının mekanik, dayanıklılık, termal ve içyapı özellikleri araştırılmıştır. Bu amaçla, kalsiyum alüminat çimentosu yerine ağırlıkça %10, %20, %30 ve %40 oranında yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanılarak harç karışımları elde edilmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışmada, bağlayıcı malzeme olarak ÇİMSA A.Ş. firmasından temin edilen kalsiyum alüminat çimentosu (KAÇ), yüksek fırın cürufu (YFC) ve uçucu kül (UK) kullanılmıştır. Kullanılan bağlayıcı malzemelerin kimyasal özellikleri Çizelge 1’de, fiziksel özellikleri ise Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 1. Bağlayıcı malzemelerin kimyasal özellikleri (Chemical composition of binders)

Bileşen (%)	KAÇ	YFC	UK
CaO	40.60	36.58	26.33
SiO ₂	4.17	38.18	40.52
Al ₂ O ₃	30.50	11.76	19.77
Fe ₂ O ₃	20.50	1.20	4.55
MgO	0.22	6.58	1.86
K ₂ O	0.14	1.15	1.25
Na ₂ O	0.09	0.40	0.48
SO ₃	0.03	1.23	3.76
Kızdırma kaybı	0.90	0.84	1.03

Çizelge 2. Bağlayıcı malzemelerin fiziksel özellikleri (Physical properties of binders)

Özellik	KAÇ	YFC	UK
Yoğunluk (g/cm ³)	3.29	2.88	2.53
Blaine inceliği (cm ² /g)	3540	3380	3450
Priz başlangıcı (dakika)	245	-	-
Priz sonu (dakika)	265	-	-

Çalışmada harç karışımlarının elde edilmesi amacıyla agrega olarak TS EN 196-1 [17] standardına uygun, maksimum tane çapı 2 mm olan silis esaslı standart kum kullanılmıştır.

Harç karışımları üzerinde gerçekleştirilen tüm deneyler için Çizelge 3’te verilen karışım oranlarına göre 9 farklı seri numune hazırlanmıştır.

Harç karışımlarının hazırlanması için öncelikli olarak, kalsiyum alüminat çimentosu ve mineral katkı homojen hale gelene kadar karıştırılmıştır. Daha sonra kalsiyum alüminat çimentosu ve mineral katkı karışımına su ilave edilerek harç mikserinde 70 dev/dk hızda 30 saniye karıştırılmıştır. Hamur karışımının üzerine silis kumu ilave edilerek 90 saniye daha karıştırıldıktan sonra oluşan harç karışımları üzerinde yayılma tablası deneyi gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan harç karışımları 24 saat oda koşullarında bırakıldıktan sonra kalıptan alınmış ve 20±2°C sıcaklık ve % 95 nem ortamında 3, 7, 28 ve 90 gün boyunca suda kürlenmiştir.

Harçların eğilme ve basınç deneyleri 10 ton kapasiteli test cihazı ile TS EN 196-1 [17] standardına göre

belirlenmiştir. Eğilme deneyi tek noktadan (merkezi) yükleme metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Harçların sülfat etkisi sonucu boy değişimlerini incelemek amacıyla ASTM C1012 [18] standardına göre Na₂SO₄ ve MgSO₄ çözeltileri hazırlanmış ve 25x25x285 mm ayrıtlı prizma numuneler altı ay boyunca bu çözeltilerin içerisinde bekletilmiştir. Harç numunelerindeki boy değişimi periyodik olarak ölçülmüştür. Harçların asit etkisi sonucu boy değişimlerini incelemek amacıyla ASTM C279 [19] standardına göre H₂SO₄ çözeltisi hazırlanmış ve 25x25x285 mm ayrıtlı prizma numuneler üç ay boyunca bu çözeltilerin içerisinde bekletilmiştir. Harç numunelerindeki boy değişimi periyodik olarak ölçülmüştür. Harç numunelerinin yüksek sıcaklıktaki davranışını belirlemek amacıyla numuneler 150°C, 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklıklarda üç saat yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Hedeflenen sıcaklığa ulaşmaya kadar sıcaklık artışı 5°C/dakika olarak belirlenmiştir. Khaliq ve Kodur [20] yaptığı çalışmada, beton içerisindeki sıcaklıktaki artışın betonun düşük ısı iletkenliği nedeniyle beton yüzeyi ve fırın sıcaklığından daha yavaş olduğunu ve bundan dolayı betonda sabit durum koşullarına (termal denge) ulaşmak için en az 2 saatlik bir maruz bırakma süresi olması gerektiğini belirtmiştir.

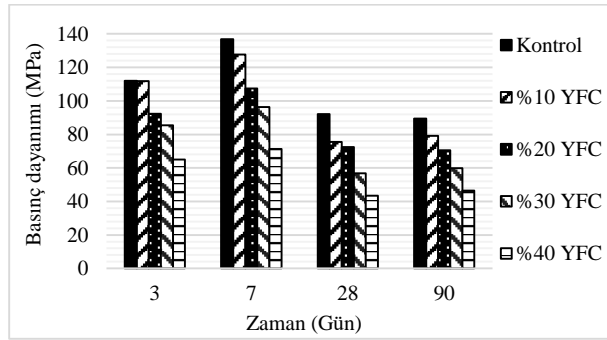
Hamur karışımlarının termal özelliklerini belirlemek için yapılan termogravimetri analizi (TGA), TA Instruments SDT Q600 marka cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Deneyde, toz haline getirilen bağlayıcı hamur numuneleri kullanılmıştır. Deneyler, 25°C ile 1000°C sıcaklık arasında ve dakikada 10°C sıcaklık artış hızı ile uygulanmıştır. Bağlayıcı hamur karışımlarının boşluk yapısının incelenmesi amacıyla karışımlar hazırlanmış ve Scanco Medical µCT 50 marka Micro CT cihazı ile katı numuneler üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Micro CT taraması 90 kV enerji ve 155 µA yoğunlukta, 20 µm voksel boyutlarında gerçekleştirilmiştir ve x-ışınının malzemeye uygulama süresi 600 ms olarak ayarlanmıştır. Tarama sonucunda elde edilen iki boyutlu görüntüler “µCT Evaluation Program v6.5” yazılımı ile analiz edilerek ortalama gözenek çapı ve yüzde porozite değerleri tespit edilmiştir. Bağlayıcı hamurların yüzeyinin kimyasal yapısı hakkında bilgi sağlamak amacıyla karışımlar hazırlanmış ve Thermo Scientific K-Alpha marka XPS cihazı ile toz numuneler üzerinde analizler yapılmıştır. Analizde X-ışını kaynağı olarak Monokromatik, Al K_α kullanılmış ve 60x60 mm’lik örnekleme alanında çalışılmıştır.

Çizelge 3. Harç karışım oranları (Mix proportions of mortar mixtures)

	Kontrol	%10 YFC	%20 YFC	%30 YFC	%40 YFC	%10 UK	%20 UK	%30 UK	%40 UK
KAÇ (g)	450	405	360	315	270	405	360	315	270
YFC (g)	0	45	90	135	180	0	0	0	0
UK (g)	0	0	0	0	0	45	90	135	180
Kum (g)	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Su (ml)	225	225	225	225	225	225	225	225	225

3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA (TEST RESULTS and DISCUSSION)

Katkısız ve YFC katkılı harç numunelerinin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri Şekil 1’de verilmiştir. Deneysel sonuçlarına göre, harçların 3 günlük basınç dayanımları kontrol ve %10 YFC ikameli harç karışımlarında 100 MPa’ın üzerine çıkmıştır. %20, %30 ve %40 YFC ikameli harç karışımlarının dayanımları ise kontrol ve %10 YFC karışımına göre oldukça düşük değerler almıştır. Harçların 7 günlük basınç dayanımlarına bakıldığında, en yüksek dayanım değerleri 7 gün kürlenmiş harç numunelerinden elde edildiği gözlemlenmiştir. Kalsiyum alüminat çimentosunun doğası gereği tüm harç karışımları erken yaşta çok hızlı dayanım kazanmış ve ileri yaşlarda dayanımlar belirli miktarda azalmıştır. Kalsiyum alüminat çimentosu içinde serbest C_3A ve $Ca(OH)_2$ bulunmamaktadır. Kalsiyum alüminat çimentosunda serbest halde bulunan CaO , Al_2O_3 ile tepkimeye girerek erken yaş dayanımlarının nedeni olan monokalsiyum alüminatı (CA) oluşturmakta ve buna bağlı olarak erken yaş dayanımları daha yüksek olmaktadır.

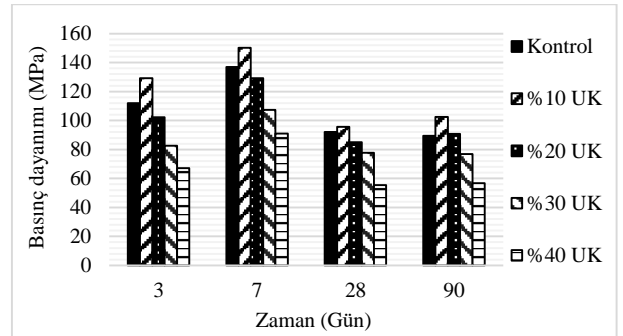


Şekil 1. Kontrol ve YFC katkılı harç numunelerinin basınç dayanımı (Compressive strength of control and GGBFS blended mortar specimens)

YFC içeren harç numunelerinde, YFC ikame miktarına bağlı olarak numunelerin basınç dayanımı değerlerinde sistematik bir azalma meydana gelmiştir. 90 gün kürlenmiş karışımlarda kontrol numunesine kıyasla %10, %20, %30 ve %40 YFC ikameli numunelerde ikame miktarı arttıkça basınç dayanımı sırasıyla %11, %19, %33 ve %48 oranında azalmıştır. YFC’nin, kalsiyum alüminat çimentosunda bulunan ürünlerle reaksiyona giremediği ve ilave bağlayıcılık özelliği gösteren ürünlerin oluşmadığı söylenebilir. Ancak YFC, yüksek CaO içeriği ve camı yapısından dolayı kendi başına az da olsa bağlayıcılık özelliği gösterebilmektedir [21]. YFC ikameli harçların basınç dayanımında meydana gelen düşüşün nedeninin, YFC’nin inceliğinin yeterli miktarda olmamasından (Çizelge 2) ve camı fazlarının az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kotwica ve Łapka [8] tarafından yapılan çalışmada ise %10 YFC kullanılan karışım ile kontrol karışımının dayanımları birbirine çok yakın değerler alırken, %20 ve %30 YFC kullanımında ise kontrol karışımına göre yaklaşık %25 ve %38 oranında azalma meydana geldiği tespit

edilmiştir. Çalışmada, karışımlardaki bu dayanım düşüşünün kalsiyum alüminat çimentosunun hidrat dönüşümünden kaynaklandığı ve YFC’nin bu dönüşümü engelleyemediği rapor edilmiştir.

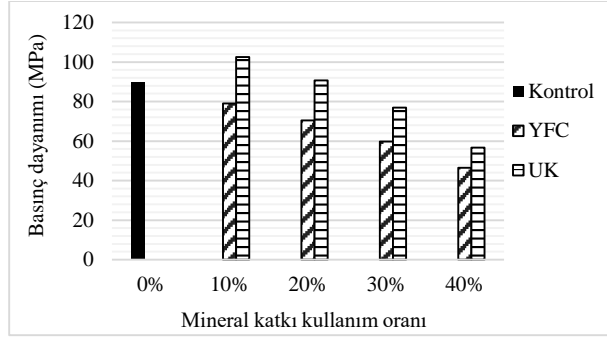
Kontrol ve UK katkılı harç numunelerinin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları Şekil 2’de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, katkısız ve UK ikameli karışımların erken yaştaki dayanımları ileri yaştaki dayanımlarına göre daha yüksek çıkmıştır. En yüksek dayanım değerleri 7 gün kürlenmiş karışımlarda meydana gelmiştir. Her yaşta %10 ikameli UK karışımının dayanımı kontrol karışımına göre daha yüksek ölçülmüştür. İkame oranı %20, %30 ve %40 olan numunelerde ise dayanım değerleri kademeli olarak düşmüştür. 90 gün kürlenmiş karışımlar incelendiğinde, UK içeren numunelerde, UK ikame miktarı %10 iken basınç dayanımının kontrol numunesine göre %11 oranında yüksek çıktığı, ancak ikame miktarı %20, %30, %40’a arttırıldığında bu dayanımların sırasıyla %5, %19 ve %37 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Kotwica ve Łapka [8] yaptığı çalışmada ise, kalsiyum alüminat çimentosu yerine %20 oranında F tipi UK kullanılması sonucunda basınç dayanımının UK içermeyen harç karışımına göre yaklaşık %20 oranında azaldığı belirlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan UK’nın kimyasal kompozisyonuna bakıldığında (Çizelge 1) CaO miktarının yüksek yani C tipi bir UK olduğu belirlenmiştir. C tipi UK’nın kalsiyum alüminat çimentosu yerine az miktarda kullanımı ile UK’nın kendi başına bağlayıcılık özelliği ortaya çıktığı ve harç dayanımının kontrol karışımına kıyasla bir miktar arttığı düşünülmektedir.



Şekil 2. Kontrol ve UK katkılı harç numunelerinin basınç dayanımı (Compressive strength of control and FA blended mortar specimens)

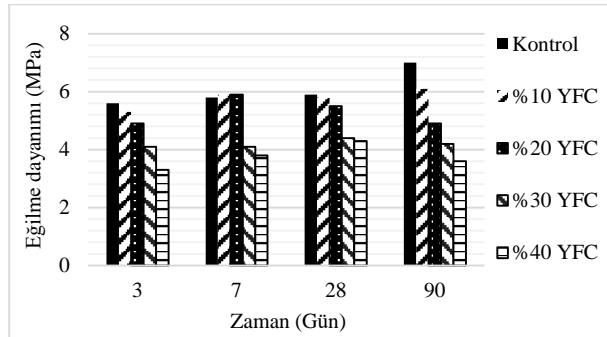
90 günlük kontrol, YFC katkılı ve UK katkılı harç numunelerinin basınç dayanımları Şekil 3’te gösterilmiştir. Kontrol karışımının uzun dönemli basınç dayanımı 89.5 MPa olarak ölçülmüştür. Kalsiyum alüminat çimentosu yerine ağırlıkça %10 YFC ve UK kullanımı ile basınç dayanımları sırasıyla 102.5 MPa ve 79.1 MPa olarak belirlenmiştir. %20 YFC ve UK kullanımında ise, YFC katkılı harçın dayanımı 70.5 MPa olarak ölçülürken, UK katkılı harçta ise basınç dayanımı kontrol karışımının dayanım değeri seviyesine gelmiştir. UK katkılı harçların genel olarak dayanım

performansının YFC katkılı harçlara göre daha yüksek olduğu deney sonuçlarından açıkça anlaşılmaktadır.



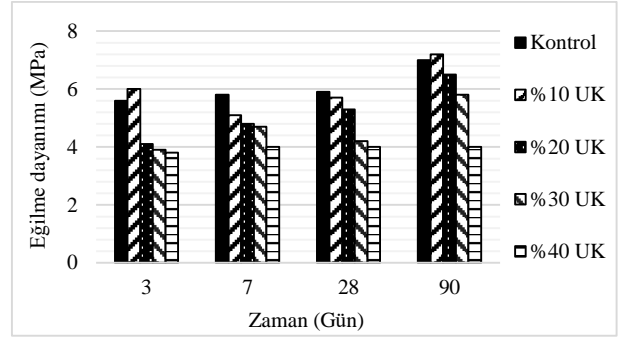
Şekil 3. 90 günlük kontrol, YFC katkılı ve UK katkılı harç numunelerinin basınç dayanımları (Compressive strength of 90-day control, GGBFS blended and FA blended mortar specimens)

Kontrol ve YFC katkılı harç karışımlarının 3, 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları Şekil 4'te verilmiştir. Kontrol ve YFC katkılı harç karışımlarının eğilme dayanımları genel olarak zaman içerisinde artış göstermiştir. 90 günlük eğilme dayanımı sonuçlarına göre kontrol karışımının eğilme dayanımı 7 MPa, %10 YFC katkılı karışımın eğilme dayanımı ise 6.1 MPa ölçülmüştür. Harç karışımlarına YFC ilave edilmesi ile eğilme dayanımlarının her yaş için kademeli olarak azaldığı gözlemlenmiştir. Bu eğilimin, karışımların basınç dayanımında gözlemlenen eğilime benzer olduğu tespit edilmiştir.



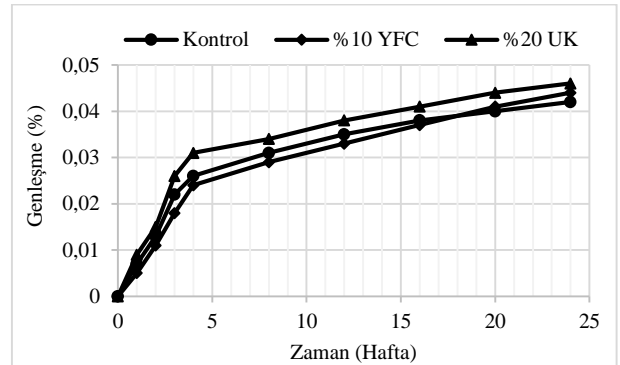
Şekil 4. Kontrol ve YFC katkılı harç numunelerinin eğilme dayanımları (Flexural strength of control and GGBFS blended mortar specimens)

Kontrol ve UK katkılı harç karışımlarının 3, 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları Şekil 5'te gösterilmiştir. YFC katkılı harç karışımlarında olduğu gibi UK katkılı harç karışımlarında da zaman içerisinde eğilme dayanımı değerlerinde artış olduğu gözlemlenmiştir. 90 günlük eğilme dayanımı sonuçlarına göre, %10 UK katkılı karışımın eğilme dayanımı (7.2 MPa) kontrol karışımına (7 MPa) göre bir miktar daha fazla ölçülmüştür. UK ikamesi %10'un üzerine çıktığı zaman eğilme dayanımlarında kademeli azalma tespit edilmiştir. Bu davranışın yine karışımların basınç dayanımındaki davranışa benzer çıktığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5. Kontrol ve UK katkılı harç numunelerinin eğilme dayanımları (Flexural strength of control and FA blended mortar specimens)

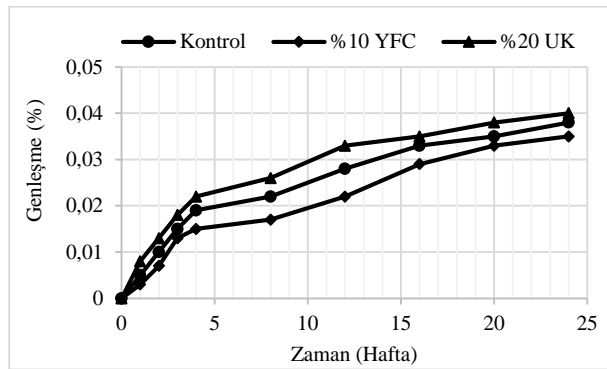
Yirmi dört hafta boyunca sodyum sülfata maruz kalan harç karışımlarının genleşmeleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Sülfat etkisi deneyi kontrol karışımı ve kontrol karışımına dayanım olarak en yakın YFC ve UK katkılı karışımlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, tüm karışımlarda zaman içerisinde bir miktar genleşme gözlemlenmiştir. Ancak bu genleşme değerleri çok düşük mertebelerde kalmıştır. Kalsiyum alüminat çimentosunun yapısından dolayı genleşmeler, Portland çimentosu esaslı harç karışımları kadar yüksek çıkmamıştır. Kalsiyum alüminat çimentosunun içerisinde kalsiyum hidroksit bulunmadığı için sülfat etkisi ile oluşabilecek genleşmeler meydana gelmemektedir. YFC ve UK katkılı harç karışımlarının sodyum sülfat etkisi ile genleşmeleri kontrol karışımına hemen hemen yakın çıkmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi UK katkılı harç karışımının genleşmeleri kontrol karışımına göre bir miktar yüksek çıkmıştır. Bu artışın UK'nın bünyesinde oluşan kalsiyum hidroksitten kaynaklandığı düşünülmektedir. YFC katkılı harç karışımlarında ise genleşme kontrol karışımına göre çok az miktarda fazla çıkmıştır. Yine bu artışın sebebinin YFC'nin bünyesinde oluşan kalsiyum hidroksitten kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 6. Seçilen serilerin sodyum sülfat etkisi deney sonuçları (Sodium sulfate test results on selected mortar series)

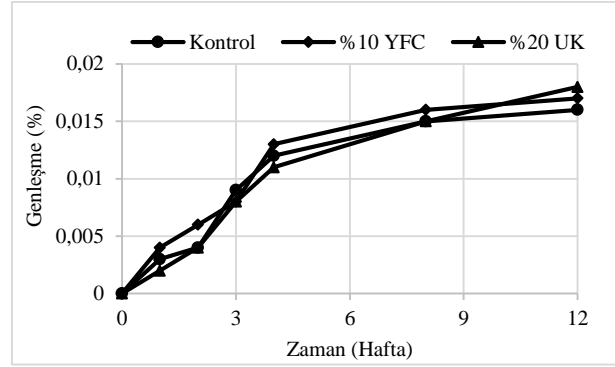
Yirmi dört hafta boyunca magnezyum sülfat etkisine maruz kalan harç numunelerinin genleşmeleri Şekil 7'de verilmiştir. Magnezyum sülfat etkisine maruz kalan numunelerin genleşmelerinin sodyum sülfat etkisine

maruz kalan numunelerin genleşme değerlerine benzer olduğu tespit edilmiştir. Magnezyum sülfatın Portland çimentosuna etkisinin sodyum sülfata göre daha fazla olduğu bilinmektedir. Magnezyum iyonları Portland çimentosunun ana hidrasyon ürünü olan kalsiyum silikat hidratın yapısını bozarak çimentonun bağlayıcılığını önemli ölçüde etkilemektedir [22]. Ancak, kalsiyum alüminat çimentosunda kalsiyum silikat hidrat ürünü oluşmadığı için bu olumsuz etki gözlemlenmemektedir. Bu açıdan karışımların genleşmelerinin yüksek mertebelerde olmadığı tespit edilmiştir. YFC ve UK katkılı harç karışımlarının magnezyum sülfat etkisi sonucundaki genleşmelerine bakılacak olursa, genleşmelerin kontrol karışımına göre UK katkılı karışımda bir miktar yüksek, YFC katkılı karışımda ise bir miktar düşük olduğu gözlemlenmiştir.



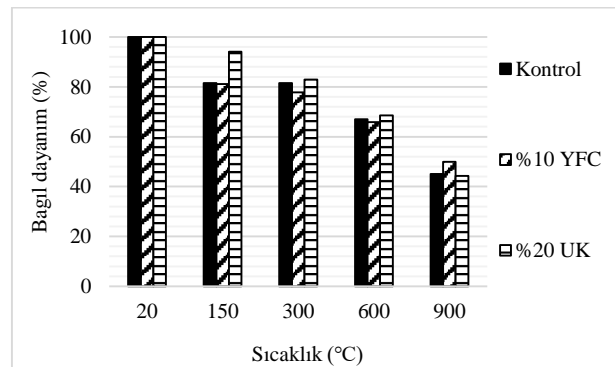
Şekil 7. Seçilen serilerin magnezyum sülfat etkisi deney sonuçları (Magnesium sulfate test results on selected mortar series)

On iki hafta boyunca H_2SO_4 çözeltisinde bırakılan harç numunelerinin genleşmeleri Şekil 8'de gösterilmiştir. Deney sonucunda harç karışımlarında meydana gelen genleşmelerin tüm karışımlar için çok düşük mertebede olduğu gözlemlenmiştir. Portland çimentosu esaslı harçlar pH 6 değerinin altında bir ortamla karşılaştığında çözünmeye başlamaktadır. Bunun temel sebebi, bu çimentonun bağlayıcı ürünü olan kalsiyum silikat hidratın asidik ortamda parçalanmasıdır [23]. Kalsiyum alüminat çimentosunda ise bu ürün oluşmamaktadır. Ayrıca, kalsiyum bileşeni asidik ortamda çözüldükten sonra AH_3 ürününü oluşturarak harç içerisindeki boşluklu yapının bu faz ile dolmasını sağlamakta ve dışarıdan gelecek etkilere karşı koruyucu olmaktadır. Kalsiyum alüminat çimentosunun asit etkilerine karşı dayanıklı olmasının bu nedenden kaynaklandığı düşünülmektedir. YFC ve UK katkılı harç karışımlarının asit etkisi sonucundaki genleşmelerine bakılırsa, kontrol karışımına çok yakın değerler aldığı sonucuna varılabilir.



Şekil 8. Seçilen serilerin asit etkisi deney sonuçları (Acid test results on selected mortar series)

Kontrol, %10 YFC katkılı ve %20 UK katkılı harç karışımlarının $150^\circ C$, $300^\circ C$, $600^\circ C$ ve $900^\circ C$ sıcaklığa maruz kalması sonucu meydana gelen dayanım kayıpları Şekil 9'da verilmiştir. $150^\circ C$ sıcaklığa maruz kalan kontrol ve YFC katkılı karışımda dayanım kaybı %20 mertebesinde olurken, UK katkılı karışımda kayıp %6 mertebesinde kalmıştır. $300^\circ C$ sıcaklığa maruz kalan kontrol ve YFC katkılı karışımda dayanım kaybı $150^\circ C$ sıcaklığa maruz kalan numunelerden çok farklı olmazken, UK katkılı karışımda kayıp yaklaşık %17'ye çıkmıştır. $600^\circ C$ sıcaklığa maruz kalan numunelerde dayanım kaybının %32-35 mertebesinde olduğu gözlemlenmiştir. $900^\circ C$ sıcaklığa maruz kalan numunelerde ise dayanım kaybının %50-56 mertebesinde olduğu sonucuna varılmıştır. $900^\circ C$ sıcaklıkta kontrol ve %20 UK katkılı numunelerin dayanım kaybı birbirine çok yakın değerler alırken (~%55), %10 YFC katkılı numunenin dayanım kaybı bir miktar daha az (%50) çıkmıştır. Tüm karışımlarda özellikle $600^\circ C$ sıcaklığın üzerinde meydana gelen dayanım kayıplarının bir nedeni de karışımda kullanılan kireçtaşı agregasının o sıcaklıklarda fiziksel olarak bozulmaya başlamasından kaynaklandığı düşünülmektedir [21]. Deney sonuçlarına göre, kalsiyum alüminat çimentosu yerine %10 YFC ve %20 UK kullanımının harç karışımlarının yüksek sıcaklık davranışına olumsuz bir etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır.

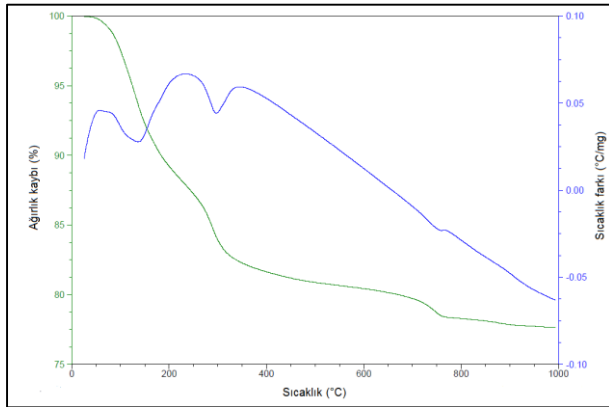


Şekil 9. Seçilen serilerin yüksek sıcaklık etkisi deney sonuçları (High temperature resistance test results on selected mortar series)

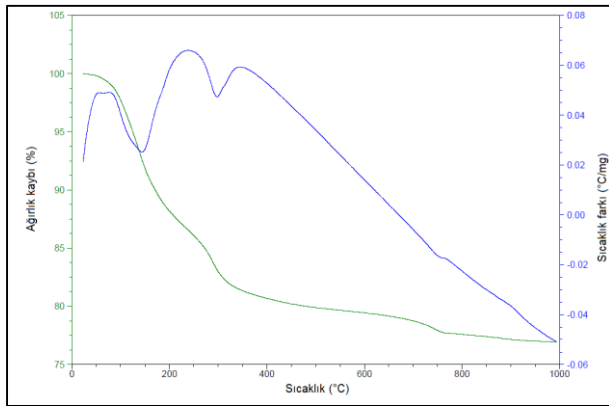
TGA analizi sonuçları Şekil 10 - Şekil 14'te gösterilmiştir. Analiz sonuçlarına göre yaklaşık 400°C'ye kadar numunelerin ağırlıklarında %15 - %20 arasında ağırlık kaybı görülmüştür. Yaklaşık 160°C'de meydana gelen sıcaklık farkı kalsiyum alüminat çimentosunda bulunan dikalsiyum alüminatın (C_2AH_8) dehidratasyonundan kaynaklanmaktadır [23]. 300°C civarında meydana gelen sıcaklık farkı ise C_3AH_6 kararlı kübik fazının dehidratasyonundan kaynaklanmaktadır [23].

Mineral katkı içeren karışımların TGA analizi sonuçları kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında ise, mineral katkı ilavesinin TGA analizleri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını göstermektedir.

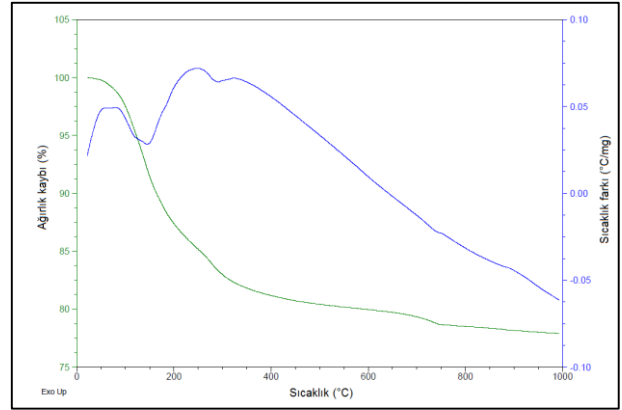
TGA analizi sonucunda numunelerin 400°C'den sonra daha kararlı bir yapıda olduğu söylenebilir. Yüksek sıcaklık deneyinde ise sıcaklığın artması ile karışımların dayanımlarında kademeli olarak düşüşler gözlemlenmiştir. Bu iki deney arasındaki farkın sebebi, yüksek sıcaklık deneyinde harç numunesi, TGA analizinde ise hamur numunesi kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Harç numunelerinde sıcaklık arttıkça agrega ile hamurun farklı termal genişlemelere sahip olmasından dolayı numuneler zayıflamakta ve dayanım kayıpları meydana gelmektedir [22].



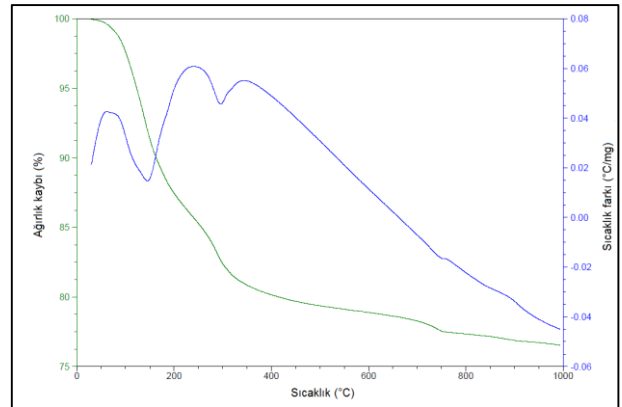
Şekil 10. Kontrol numunesinin TGA analizi (TGA analysis of control specimen)



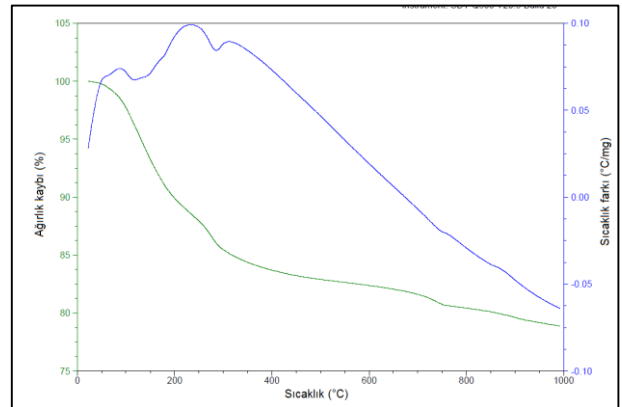
Şekil 11. %10 YFC numunesinin TGA analizi (TGA analysis of 10% GGBFS blended specimen)



Şekil 12. %40 YFC numunesinin TGA analizi (TGA analysis of 40% GGBFS blended specimen)



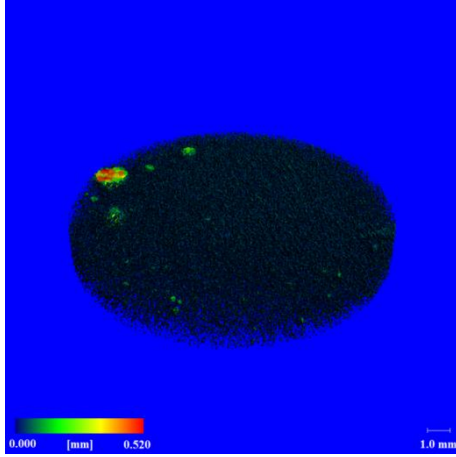
Şekil 13. %10 UK numunesinin TGA analizi (TGA analysis of 10% FA blended specimen)



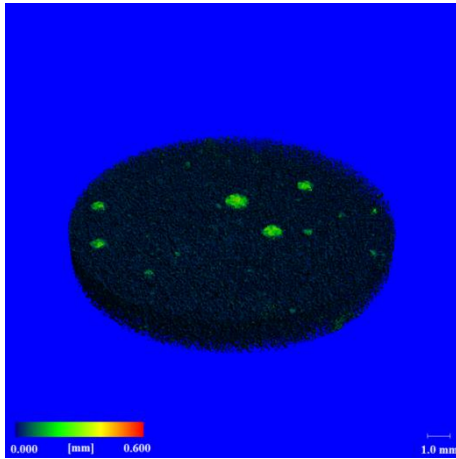
Şekil 14. %40 UK numunesinin TGA analizi (TGA analysis of 40% FA blended specimen)

Bilgisayarlı mikro tomografi analizi sonucunda elde edilen numunelerin ortalama gözenek çapı ve porozite değerleri Çizelge 4'te, boşluk dağılım modelleri ise Şekil 15'de verilmiştir. UK ilavesi ile karışımların ortalama gözenek çapının arttığı ancak, porozite değerlerinin ise düştüğü gözlemlenmiştir. YFC ilavesi ile de karışımların ortalama gözenek çapının bir miktar azaldığı, bunun aksine porozite değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Mineral katkı ilavesi ile ortaya çıkan bu değişimin YFC ve UK'nın morfolojisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, mineral katkı içeren bağlayıcı

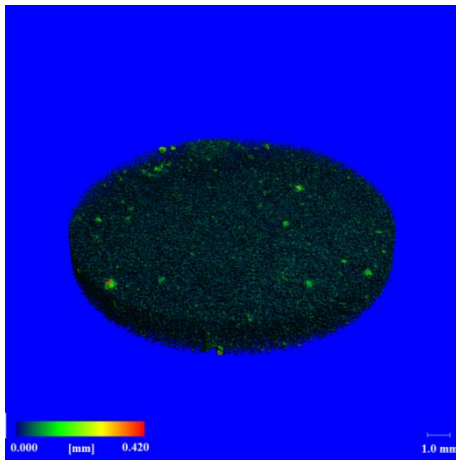
hamur karışımlarının porozitelerindeki bu farkın, mineral katkıların puzolanik reaksiyonları sonucu ortaya çıkan ürünlerden de kaynaklandığı düşünülmektedir. Diğer taraftan, karışımların porozite değerleri ile harç karışımlarının basınç dayanımları karşılaştırıldığında ise aralarında anlamlı bir ilişkinin bulunmadığı sonucuna varılmıştır.



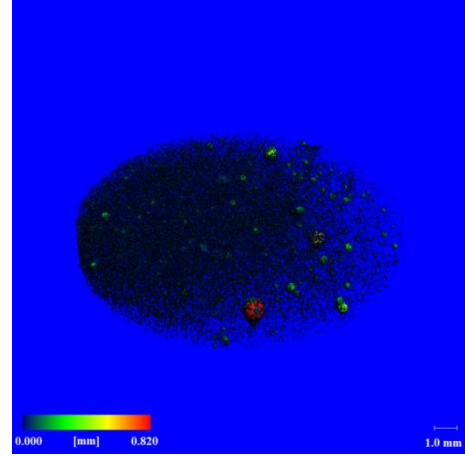
(a)



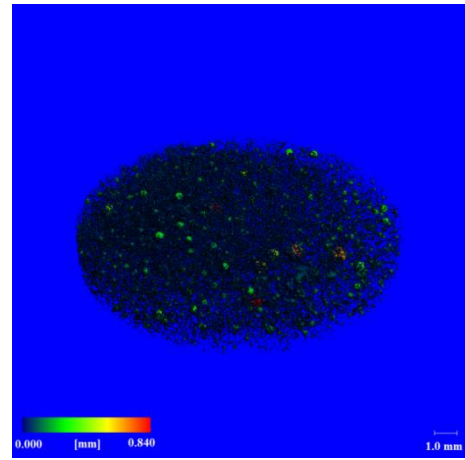
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 15. Hamur karışımlarının MicroCT analizi ile elde edilen boşluk dağılımları (a) kontrol; (b) %10 YFC; (c) %40 YFC; (d) %10 UK; (e) %40 UK (Pore distributions obtained by MicroCT analysis of paste mixtures (a) control; (b) 10% GGBFS; (c) 40% GGBFS; (d) 10% FA; (e) 40% FA)

X-ışını fotoelektron spektroskopisi analizi sonucunda hamur karışımlarının yüzeyinde bulunan kimyasal bileşikler tespit edilmiş ve Çizelge 5'te gösterilmiştir. Analiz sonucunda tüm karışımlarda en fazla bulunan bileşiğin metal karbonat olduğu belirlenmiştir. Bunun dışında, karbonat, kalsiyum karbonat, alüminosilikat, SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 bileşiklerinin de numunelerin bünyesinde bulunduğu tespit edilmiştir. Kalsiyum alüminat çimentosuna mineral katkı ikamesi ile karışımların kimyasal bileşiklerinde önemli bir değişimin olmadığı sonucuna varılmıştır.

Çizelge 4. Hamur karışımlarının ortalama gözenek çapı ve porozite değerleri ile harç karışımlarının basınç dayanımı değerleri (Average void diameter and porosity of paste mixtures as well as compressive Strength of mortar mixtures)

	Kontrol	%10 YFC	%40 YFC	%10 UK	%40 UK
Ortalama gözenek çapı (μm)	74	66	56	102	148
Porozite (%)	8.1	9.1	11.6	2.8	4.5
Harç karışımı basınç dayanımı (MPa)	89.5	79.1	46.5	102.5	56.7

Çizelge 5. Hamur karışımlarının yüzeyinde bulunan kimyasal bileşikler (Chemical compounds on the surface of paste mixtures)

Atomik %	Kontrol	%10 YFC	%40 YFC	%10 UK	%40 UK
Metal karbonat	44.8	42.7	40.8	43.7	40.9
Karbonat	27.3	33.8	32.5	28.1	30.9
Kalsiyum karbonat	6.3	5.8	5.5	5.9	5.4
Alüminosilikat	10.6	9.7	9.5	10.1	10.7
SiO ₂	2.8	2.6	3.2	2.8	2.1
Al ₂ O ₃	0.2	0.9	1.2	1.1	0.8
Fe ₂ O ₃	-	-	-	1.1	1.3

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Çalışma kapsamında kullanılan malzeme ve uygulanan deneylere göre aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Yüksek fırın cürufu katkılı karışımda %10, uçucu kül katkılı karışımda ise %20 mineral katkı ikamesi ile elde edilen karışımların ileri yaştaki basınç dayanımları sırasıyla 79.1 MPa ve 90.7 MPa olarak belirlenmiştir. Bu ikame oranlarının, kontrol karışımının basınç dayanımına (89.5 MPa) en yakın değerler olduğu tespit edilmiştir. elde edilmiştir.
- Uçucu kül katkılı karışımların mekanik özelliklerinin yüksek fırın cürufu katkılı karışımlara göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.
- Kontrol, %10 yüksek fırın cürufu ve %20 uçucu kül ikameli harç karışımlarında sodyum sülfat, magnezyum sülfat ve asit etkisi sonucundaki genleşmeler düşük mertebede kalmıştır. Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkılı karışımlardaki genleşmeler, kontrol karışımına göre bir miktar yüksek çıkmasına rağmen, ihmal edilebilecek düzeyde kalmıştır.
- Yüksek sıcaklık etkisi sonucunda kontrol, %10 yüksek fırın cürufu katkılı ve %20 uçucu kül katkılı harç karışımlarında sıcaklığa bağlı olarak kademeli olarak bir dayanım kaybı meydana gelmiştir. 900°C sıcaklık etkisinde oluşan dayanım kayıpları, kontrol ve uçucu kül katkılı karışımlarda yüksek fırın cürufu katkılı karışımlarına göre bir miktar daha fazla meydana gelmiştir.
- Termal analiz sonucunda yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ilavesinin kalsiyum alüminat esaslı

bağlayıcı karışımlar üzerinde önemli bir olumsuz etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır.

- Porozite analizi sonucunda uçucu kül katkılı karışımların porozitesi kontrol karışımına göre daha düşük, yüksek fırın cürufu katkılı karışımların porozitesi ise daha yüksek çıkmıştır. Ancak bu durumun, harçların mekanik özelliklerine olumlu ya da olumsuz bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir.
- Kontrol karışımına en yakın mekanik özelliğe sahip %10 yüksek fırın cürufu katkılı ve %20 uçucu kül katkılı harç karışımlarının dayanıklılık ve yüksek sıcaklık etkisi özelliklerinin kontrol karışımına benzer olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, kalsiyum alüminat çimentosu esaslı harçlar için yüksek fırın cürufunun optimum ikame oranı %10, uçucu külün ise %20 olarak belirlenmiştir.

Çalışma sonucunda bu çalışmaya benzer çalışmalara yön verecek bazı öneriler şu şekildedir:

- Kalsiyum alüminat esaslı harç karışımlarının özellikle refrakter malzeme olarak kullanılması durumunda 900°C'den daha yüksek sıcaklıklardaki davranışının da bilinmesi gerekmektedir. Bu açıdan, 900°C'den daha yüksek sıcaklıklar (1050°C gibi) için de deneyler gerçekleştirilebilir.
- Kalsiyum alüminat çimentosunun farklı sıcaklıklarda kürlenmesinin mineral katkılı harçların dayanıklılık ve termal özelliklerine etkisi incelenebilir.
- Farklı kimyasal, fiziksel ve mineralojik özelliğe sahip yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkılı kalsiyum alüminat esaslı harçların özellikleri

incelenip, mineral katkıların bu özelliklerinin harçların performansına etkisi incelenebilir.

- Farklı mineral katkıların bir arada kullanılması ile elde edilen harç karışımlarının mekanik ve dayanıklılık özellikleri belirlenip, uygun oranlarda üçlü sistemlerin kullanılması önerilebilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar, çalışma kapsamında gerekli malzemelerin temininde katkı sağlayan Çimsa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye, laboratuvar çalışmalarına yardımcı olan Ege Üniversitesi Merkezi Araştırma Test ve Analiz Laboratuvarı UAM çalışanları Arş. Gör. Dr. Çisem Altun Ayar, Arş. Gör. Dr. Ece Bayır ve Arş. Gör. Dr. Gökhan Özdamar'a, 2016-EGEMATAL-002 nolu Bilimsel Araştırma Projesi ile finansal destek sağlayan Ege Üniversitesi'ne ve 2209-B Sanayiye Yönelik Lisans Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında proje desteği sağlayan TÜBİTAK'a teşekkür ederler.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Scrivener K.L., Capmas A., "Calcium Aluminate Cements, Chapter 13, in: P.C. Hewlett (Ed.), *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*", John Wiley & Sons, New York, (1998).
- [2] Barnes P., Bensted J., "Structure and Performance of Cements", CRC Press, Boca Raton, (2002).
- [3] Scrivener K.L., Cabiron J.L., Letourneux R., "High-performance concretes from calcium aluminate cements", *Cement and Concrete Research*, 29: 1215-1223, (1999).
- [4] Pacewska B., Wilinska I., Nowacka M., "Studies on the influence of different fly ashes and Portland cement on early hydration of calcium aluminate cement", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 106: 859-868, (2011).
- [5] Hidalgo Lopez A., Garcia Calvo J.L., Cruz Alonso M., Fernandez L., Andrade C., "Microstructure development in mixes of calcium aluminate cement with silica fume or fly ash", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 96: 335-345, (2009).
- [6] Hidalgo Lopez A., Garcia Calvo J.L., Garcia Olmo J., Petit S., Cruz Alonso M., "Microstructural evolution of calcium aluminate cements hydration with silica fume and fly ash additions by scanning electron microscopy, and mid and near-infrared spectroscopy", *Journal of American Ceramic Society*, 91: 1258-1265, (2008).
- [7] Collepardi M., Monosi P., Piccioli P., "The influence of pozzolanic materials on the mechanical stability of aluminous cement", *Cement and Concrete Research*, 25: 961-968, (1995).
- [8] Kotwica L., Łapka P., "The influence of mineral additives on properties of calcium aluminate cement mortars", *Cement Wapno Beton*, 2016(3): 191-198, (2016).
- [9] Kırca Ö., Yaman İ.Ö., Tokyay M., "Compressive strength development of calcium aluminate cement-GGBFS blends", *Cement and Concrete Composites*, 35: 163-170, (2013).
- [10] Pacewska B., Wilinska I., Bukowska M., "Calorimetric investigations of the influence of waste aluminosilicate on the hydration of different cements", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 97: 61-66, (2009).
- [11] Lothenbach B., Scrivener K.L., Hooton R.D., "Supplementary cementitious materials", *Cement and Concrete Research*, 41, 1244-1256, (2011).
- [12] Juenger M.C.G., Siddique R., "Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete", *Cement and Concrete Research*, 78, 71-80, (2015).
- [13] Malhotra V.M., "Making concrete 'greener' with fly ash", *Indian Concrete Journal*, 73(10): 609-614, (1999).
- [14] Wu M., Zhang Y., Ji Y., Liu G., Liu C., She W., Sun W., "Reducing environmental impacts and carbon emissions: study of effects of superfine cement particles on blended cement containing high volume mineral admixtures", *Journal of Cleaner Production*, 196: 358-369, (2018).
- [15] Ishak S.A., Hashim H., "Low carbon measures for cement plant e a review", *Journal of Cleaner Production*, 103: 260-274, (2015).
- [16] Maddalena R., Roberts J.J., Hamilton A., "Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements", *Journal of Cleaner Production*, 186: 933-942, (2018).
- [17] TS EN 196-1, "Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2016).
- [18] ASTM C1012, "Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution", *Annual Book of ASTM Standard*, USA, (2015).
- [19] ASTM C 279, "Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes" *Annual Book of ASTM Standard*, USA, (2012).
- [20] Khaliq W., Kodur V., "High temperature properties of fiber reinforced high strength concrete", *American Concrete Institute, ACI Special Publication (279 SP)*, 77-118, (2011).
- [21] Mehta P.K., Monteiro P.J.M., "Concrete Microstructure, Properties and Materials", McGraw-Hill, 659p, (2006).
- [22] Neville A.M., "Properties of Concrete", Longman Group Limited, London, (2011).
- [23] Cohen M.D., Bentur A., "Durability of Portland cement-silica fume pastes in magnesium sulfate and sodium sulfate solutions" *ACI Materials Journal*, 85(3): 148-157, (1988).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



QStE 420 TM çeliğinin MAG kaynak yöntemiyle kaynaklanmasında dolgu metali türünün metalürjik ve mekanik özelliklere etkisinin belirlenmesi

Determination of the effect of filler metal type on metallurgical and mechanical properties in welding of QStE 420 TM steel by MAG welding method

Yazar(lar) (Author(s)): Mustafa HARMAN¹, Hakan ADA², Cemil ÇETİNKAYA³

ORCID¹: 0000-0001-6045-0570

ORCID²: 0000-0002-0412-5789

ORCID³: 0000-0002-0298-1143

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Harman M., Ada H. ve Çetinkaya C., "QStE 420 TM çeliğinin MAG kaynak yöntemiyle kaynaklanmasında dolgu metali türünün metalürjik ve mekanik özelliklere etkisinin belirlenmesi", *Politeknik Dergisi*, 23(2): 321-332, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.550032

QStE 420 TM Çeliğinin MAG Kaynak Yöntemiyle Kaynaklanmasında Dolgu Metali Türünün Metalürjik ve Mekanik Özelliklere Etkisinin Belirlenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Mustafa HARMAN¹, Hakan ADA^{2*}, Cemil ÇETİNKAYA³

¹Çankırı Makina ve Kimya Endüstrisi Kurumu, Türkiye

²Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Kastamonu Üniversitesi, Türkiye

³Teknoloji Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 05.04.2019 ; Kabul/Accepted : 15.04.2019)

ÖZ

Bu çalışmada; savunma sanayi, otomotiv sanayi gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılan ince taneli ve mikro alaşımlı yapıya sahip QStE 420 TM kalitesindeki çelik sac plaka malzeme, metal aktif gaz kaynağı yönteminde masif ve özlü tel kullanılarak ayrı ayrı birleştirilmiştir. Farklı dolgu tellerinin kaynak bölgesi (ana malzeme, ısının tesiri altındaki bölge ve kaynak metali) üzerinde oluşturduğu mekanik ve metalürjik etkiler; çekme, eğme, çentik - darbe, sertlik testleri ve makro grafik, mikro grafik muayeneler yapılarak incelenmiştir. Gerçekleştirilen testler sonucunda; seçilen kaynak parametrelerinin, kaynaklı birleştirmelerin kendinden beklenen mekanik ve metalürjik özellikleri sağladığı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: QStE 420 TM, MAG kaynağı, makro yapı, mikro yapı, özlü tel.

Determination of the Effect of Filler Metal Type on Metallurgical and Mechanical Properties in Welding of QStE 420 TM Steel by MAG Welding Method

ABSTRACT

In this study; QStE 420 TM steel sheet plate material with fine grained and micro alloy structure, which is widely used in sectors such as defense industry and automotive industry, has been welded separately by massive and fluxed cored filler wire in metal active gas welding method. The mechanical and metallurgical effects of different filler wires on the weld zone (main metal, heat affected zone and weld metal) were investigated by tensile, guided bend, notch impact, hardness measurement tests and macro graphic, micro graphic examinations. As a result of the tests performed; it was observed that the selected welding parameters provided the expected mechanical and metallurgical properties of welded joints.

Keywords: QStE 420 TM, MAG Welding, macrostructure, microstructure, cored wire.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüksek mekanik özellikler, plastik deformasyon kabiliyeti, hafiflik ve aynı zamanda kolay kaynaklanabilirlik gibi üstün özellikleri nedeniyle ince taneli yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelikler (YMDA): mühendislik çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Böylece daha hafif ve daha güçlü konstrüksiyonlar üretilebilmektedir [1]. YMDA çeliklerinin, akma mukavemeti 360 N/mm²'den fazla olup, günümüzde ekonomik açıdan gittikçe yaygınlaşan bir kullanım alanı bulunmaktadır.

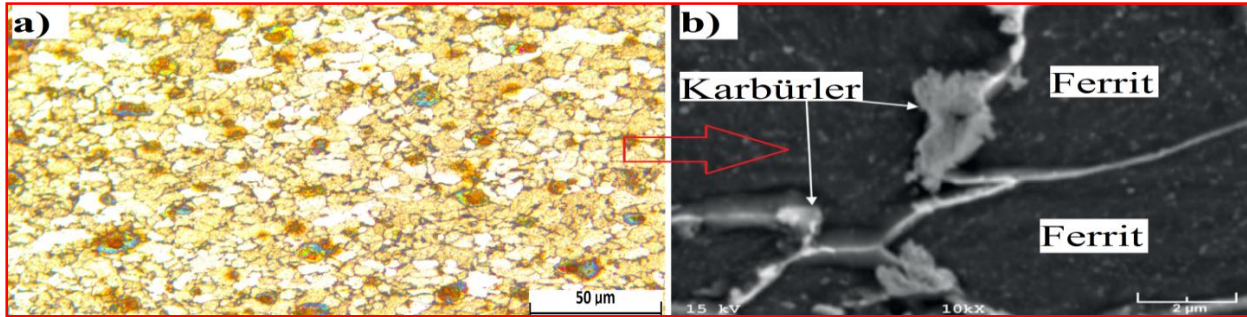
YMDA çelikleri geniş bir alanda özellikle yük taşıyıcı sistemlerde olmak üzere ince cidar kalınlığının verdiği hafiflik ve iyi şekil verilebilirlik özelliği ile konvansiyonel çeliklerin yerini almıştır. Özellikle otomobil sektöründe yaygın bir kullanım ağı olan bu çeliklere ait tipik uygulamalar; çekme kancaları,

endüstriyel silolar, araç koltuğu bileşenleri şeklindedir [2]. YMDA çelikleri savunma sanayi, taşımacılık ve gemicilik sektörü ile uluslararası boğaz köprüleri gibi önemli yapılarda da yaygın olarak kullanılmaktadır. ABD'de yapı çeliklerinin dayanımının yetersizliği sebebiyle geliştirilen ve 70'li yıllardan sonra hız kazanan mikro alaşımlama çalışmaları ile geliştirilen YMDA çeliklerine; aşınmaya, korozyona, darbeye dayanıklılık gibi çok geniş özellikler kazandırılmıştır. YMDA çelikleri piyasada ve literatürde mikro alaşımlı çelikler (micro alloyed steel): yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelikler (HSLA - high strength low alloys steel): Z StE çelikleri veya ZE çelikleri olarak da adlandırılmaktadır [3]. YMDA çelikleri standartlarda ve piyasada düşük mukavemetten yüksek mukavemete doğru 3 grup altında üretilmektedir. Bu gruplar; 1- Normalizasyon haddelemesi yapılmış çelikler (S420N, S460N): 2- Termo mekanik şekillendirilmiş çelikler (S420M, S460M): 3- Su verilmiş ve temperlenmiş (ıslah edilmiş) ince taneli yapı çelikleri (S460Q, S690Q, S960Q) şeklindedir [4].

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta: mustafa.harman18@gmail.com

QStE 420 TM çeliği YMDA çelik grubundan olup, içerdiği tane inceltici elementler (V, Ti, Nb) sayesinde, yüksek dayanıma sahip bir malzemedir [3]. Şekil 1.a'da QStE 420 TM çeliğinde tane içi ve tane sınırlarında çok küçük boyutlarda bulunan karbürler, nitrürler ve karbonitrürler 1100°C'ye kadar çözeltiyeye geçmeden azotu nitrür şeklinde tane sınırlarında bağlayarak, tane büyümesine engel olmak suretiyle mukavemeti yükseltip tok bir malzeme grubunun ortaya çıkmasını sağlarlar [5]. Yine YMDA çeliklerinde, yapı içerisinde oluşan mikro karbürler, tane sınırları veya tane içlerinde çökerek, heterojen çekirdeklenme yoluyla yeni faz ve tanelere sahip yapıları ortaya koyabilir [6]. Çeliklerde bulunma formlarına göre literatürde 5 sınıfa ayrılan karbürlerden (M_2C , M_3C , M_7C_3 , $M_{23}C_6$, MC) bazıları temperleme sıcaklığında çözülürken, bazılarının ise östenitleme süresince bile çözülmeden kalabildiği görülmüştür [7].

Ayrıca bir başka YMDA çeliğinin (S315MC) Şekil 1.b'de verilen detaylı SEM fotoğrafında; tane sınırlarında mikro karbürlerle aşırı doymuş östenitin ferrite dönüşümü sonrası dışarı attığı fazla karbürlerin tane sınırlarında kümelenmesi (aglomerasyon) görülmektedir [2,8]. Tane sınırı karbürleri, topaklanmış (aglomerasyon) karbürler ve büyük noktasal karbürlerin maruz kaldığı östenitleme sıcaklığı ve zamanı arttıkça östenit içinde daha ince dağılımlı karbürler elde edilmekte ve bu karbürler hızlı soğumanın ardından östenitin dönüştüğü faz içinde çökelmektedirler. Östenitin içinde karbür çözünmesi maksimuma ulaştığında, çözünme durmakta ve bu sefer doymuş östenit içindeki fazla karbürler yüksek sıcaklıkta uzun bekleme süresi boyunca östenit tane sınırlarında biraraya gelerek kümelenmektedir [2,6,8,9].



Şekil 1. a) QStE420TM çeliği mikro yapısı, b) YMDA çeliği detaylı SEM fotoğrafı [2] (a) Micro structure of QStE 420 TM steel, b) Detailed SEM photograph of YMDA steel)

Termomekanik haddeme ile üretilen, yüksek mukavemetli ve ince taneli QStE 420 TM çeliğinde, kaynak sonrası yüksek mukavemet ve mekanik özelliklerin sürdürülebilir olması için teknik kuralların tümüne uyulması gerekmektedir [4]. QStE 420 TM çeliklerinden imal edilecek makine, konstrüksiyon, silah, araç ve teçhizat gibi ürünlerden gereken düzeyde mukavemet, uygun geometrik boyut ve toleranslarda olma, en az süreksizliklere sahip olma ve hafiflik gibi bir takım özellikler beklenmektedir. Günümüzde kaynak işlemlerinin hâlâ çoğunlukla elle veya ancak kısmen mekanize şekilde uygulanması nedeniyle ürünlerin kalitesi, diğer bir imalat yönteminde olmadığı kadar kaynakçıya ve onun maharetine bağlıdır. Bu maharetin devamlı olarak yapılan işin kalitesine yansıtılabilmesi gerekmektedir. Kaynakçıların yeterlilikleri zaman içerisinde ölçülmesine rağmen, her zaman sabit sonuçları elde etmek mümkün değildir. Bu yüzden insan faktörünün minimum seviyeye indirilmesi zorunludur [10].

QStE 420 TM çeliğinin birleştirildiği imalat işlerinde genel olarak, kaynak parametreleri ile malzemenin mekanik özellikleri, kimyasal kompozisyonu ve kaynak dikişinde istenilen performans özellikleri (mukavemet ve tokluk gibi) arasında bir ilişkinin kurulabilmesi, kaynak yöntem parametrelerinin doğruluğunun yöntem testleri ile doğrulanması, işletme açısından kaynakta sürdürülebilir kalite güvence sisteminin kurulabilmesi

için önemlidir. Böylece fire verilmeden konstrüksiyon veya üründe kaynağa bağlı olarak ortaya çıkan belirli hataların (yüksek ısı girdisi, çatlama, çarpılma, iç gerilme, vb.) önüne geçilebileceği gibi, aynı zamanda güvenilirlik sağlanarak, üretim hızı artırılmış olacaktır. Ayrıca kaynak akım şiddetinin yüksek tutulmasına bağlı gereksiz ısı girdisinin neden olduğu çarpılmalar, ana malzemede dayanım kayıpları ve gereğinden fazla metal yığılma oranı ile çalışma nedeniyle ürünün kullanılamaz duruma gelmesi, verimliliğin düşmesi ve maliyetlerin artması gibi olumsuzluklar da engellenmiş olacaktır.

YMDA çelikleri alanında günümüze kadar yapılan çalışmalarda ergitmeli ve ergitmesiz kaynak yöntemlerinde kaynaklı bölgeler üzerinde mekanik ve mikro yapısal incelemeler ile kaynaklanabilirliğin laboratuvar ortamında test edildiği kaynak termal çevrim simülatörleri (Smitweld, Gleeble, Thermorestor) [11,12] ile yapılmış bazı çalışmalar bulunmaktadır.

YMDA çelikleri kaynağı alanında en çok tercih edilen MIG/MAG kaynağı elektrik ark kaynağına göre daha hızlıdır, dikiş kalitesi daha yüksektir, daha az kaynakçı becerisine ihtiyaç duyar, daha az maliyetlidir (seri imalatta daha az dolgu metali harcanması gibi); birim uzunluğa daha az ısı girdisi uygular [13]. Kaynakçının dikişin kalitesine etkisini ortadan kaldırarak, gaz altı kaynak yöntemiyle kaynak işlemi hızlanmıştır [14]. MIG/MAG yarı otomatik kaynak makinesinde bulunan iç ayar mekanizması sayesinde sabit gerilimde, tel sürme

hızı artırıldığında orantılı olarak akım şiddeti de artar [15]. Kaynakçı yalnızca kaynak hızını, kaynak doğrultusunu ve torcun pozisyonunu ayarlar [13].

Öztlü tel elektrotla ark kaynağını diğer kaynak yöntemlerinden ayıran özellik MIG/MAG yarı otomatik kaynak makinası ile uygulanıyor olması ve cüruf bileşenlerinin tel elektrot içinden kaynak bölgesine geçmesidir. Bu sayede açık arazide, hava cereyanı olan atölyelerde dahi gaz koruması olmadan da gaz altı kaynağı yapılabilmektedir [16]. YMDA çeliklerinin özellikle saha uygulamalarında (Boğaz köprüleri, raylı demir yolu inşaatları, yüksek konstrüksiyonlar v.b) öztlü telle kaynak uygulamaları büyük avantajlar sağlamaktadır [16]. MIG/MAG kaynak yöntemi diğer kaynak yöntemleri ile kıyaslandığında; yüksek kaynak hızları, öztlü tellerde yüksek metal transfer oranı, yüksek verim ve yüksek kaynak kalitesi vermektedir [15,17].

Bu çalışmada, hem literatüre katkı sunmak hem de bahsedilen eksiklikleri ortadan kaldırmak için, QStE 420 TM çeliğinin MAG kaynak yönteminde farklı iki ilave

metalde ortaya çıkan metalürjik ve mekanik özellikleri irdelenmiştir. MAG kaynak metodu kullanılarak, 8 mm parça kalınlığında masif ve öztlü ilave teller ile iki farklı ısı girdisi, koruyucu gaz ve paso sıralamasında yapılan kaynaklı birleştirmelerin mekanik ve metalürjik özelliklerinin belirlenmesi için uluslararası standartlarca belirlenmiş kurallar referans alınmıştır. Kaynaklı birleştirmelerden elde edilen numuneler tahribatlı muayenelerden sonra elde edilen sonuçlar ile birlikte değerlendirilerek ilave metal türünün kaynak metaline ve ana malzemeye olan etkileri detaylı incelenmiştir [18].

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

2.1. Materyal (Material)

Bu çalışmada ince taneli yüksek mukavemetli termomekanik haddelenmiş QStE 420 TM yapı çeliğine birleştirme işlemleri uygulanmıştır. Çalışmada kullanılan QStE 420 TM çeliğinin kimyasal analizi ve mekanik özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. QStE 420 TM malzeme kimyasal analizi ve mekanik özellikleri (Chemical composition and mechanical properties of QStE 420 TM material)

Kimyasal analiz								
Element (% Ağırlık değerleri)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
	0,0659	0,0165	1,33	0,0167	0,0056	0,0403	0,0041	0,0334
	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb
	0,0298	0,0112	0,0204	0,0392	0,0146	0,0052	<0,0050	0,0015
	Sn	As	Zr	Bi	Ca	Ce	Sb	Se
	0,0109	<0,0010	0,0012	0,004	0,0006	0,0042	<0,0010	<0,0020
Ta	B	Zn	La	N	Fe	Te		
<0,0070	0,00087	0,0028	<0,00030	0,0056	98,3	<0,0010		
Mekanik özellikler								
Akma Mukavemeti (MPa)			Kopma Mukavemeti (MPa)		Minimum Toplam Uzama (%)		Darbe Enerjisi (0 °C) Ortalama (Joule)	
≥420			480-620		19		202	

QStE 420 TM malzemenin genel olarak savunma sanayi başta olmak üzere makine imalat sektörü ve MAG kaynağı uygulamalarında en çok tercih edilen 8 mm kesit kalınlık çalışmamızda tercih edilmiştir. Çizelge 1'de kimyasal analizi ve mekanik özellikleri verilen QStE 420 TM çeliği MAG kaynak yöntemiyle 1,2 mm tel çapında masif ve öztlü tel kullanılarak birleştirilmiştir. MAG kaynağında masif tel olarak MG 182 (AWS/ASME SFA-5.28 ER110S-G): öztlü tel olarak ise FCW 140 (AWS/ASME SFA-5.29 E81T1-Ni1C) ilave metal kullanılmıştır. Kaynaklı birleştirme işlemlerinde kullanılan MG 182 ve FCW 140 ilave telin kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri Çizelge 2 ve 3'te sırasıyla verilmiştir. Üretici firmadan alınan tavsiyeler

[19,20] ve endüstriyel uygulamalarda yaygın kullanım şekilleri dikkate alındığında [21] kaynaklı birleştirmelerden optimum mekanik ve metalürjik özellikler elde edilebilmesi için, MAG kaynağında masif tel birleştirmesinde [22] M21 kodlu karışım gazı (%82 Ar, 18 CO₂): öztlü tel birleştirmesinde [23] ise C1 kodlu %100 CO₂ gazı kullanılmıştır. Ayrıca %100 CO₂ gazı ve karışım gazı (%82 Ar, 18 CO₂) kullanılarak yapılmış öztlü tele ait kaynaklı uygulamalar karşılaştırıldığında; %100 CO₂ gazının metal transfer oranını, kaynak kalitesini ve verimliliğini artırdığı görülmüştür [24]. Yukarıdaki nedenlere bağlı olarak bu çalışmada koruyucu gaz türü, kullanılan ilave metalin türüne (masif veya öztlü tel) göre değişmektedir.

Çizelge 2. AWS/ASME SFA-5.28. ER110S-G kodlu dolgu teli kimyasal analizi ve mekanik özellikleri (Chemical composition and mechanical properties of AWS/ASME FA.5.28. ER110S-G coded filler wire)

Kimyasal analiz						
Element (%)	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
	0,09	0,55	1,55	0,25	1,35	0,25
Mekanik özellikler						
Test Şekli	Koruyucu Gaz	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Uzama A5 (%)	Çentik Darbe Dayanımı ISO-V (J)	
Kaynak Sonrası	M21	≥690	≥770	≥17	20°C → ≥100	-60°C → ≥47

Çizelge 3. AWS/ASME SFA-5.29. E81T1-Ni1C kodlu toz özlü dolgu teli kimyasal analiz ve mekanik özellikleri (Chemical composition and mechanical properties of AWS/ASME SFA-5.29. E81T1-Ni1C coded flux cored filler wire)

Kimyasal analiz					
Element (%)	C	Si	Mn	Ni	
	0,04	0,4	1,2	1	
Mekanik özellikler					
Test Şekli	Koruyucu Gaz	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Uzama A5 (%)	Çentik Darbe Dayanımı ISO-V (J)
Kaynak sonrası	C1	≥500	600-680	20	-40°C → ≥50

2.2. Metod (Method)

DeneySEL çalışmalarında; birleştirme metodu olarak endüstriyel uygulamalarda en çok tercih edilen yöntemlerden biri olan MAG kaynak yöntemi tercih edilmiştir. Kaynak işlemleri Makina ve Kimya Endüstrisi (MKE) fabrikalarında bulunan Gedik marka DP 500 model MIG/MAG kaynak makinesi ile gerçekleştirilmiştir.

8 mm kalınlığındaki QStE 420 TM ana malzemeden üretilen plakalar 150 x 350 mm ebatlarında kesilerek kaynak işlemine hazırlanmıştır. Kaynak ağız hazırlığında kaynak kök yüksekliği ve geometrisi önem arz etmektedir. Kaynak ağız hazırlama esnasında mekanik metodlarla açılan kaynak ağızlarında kalan çapak veya keskin uç, köşe, kenar gibi yapıların alınması veya bunlara pah kırılması, radius çekilmesi gerekmektedir. Aksi halde bu yapılar kaynak ısısı altında ergimek yerine yanacak ve kaynak metalinden çıkamayan bu oksit kalıntıları kaynaktan beklenen mukavemeti almamıza engel olacağından [25] kaynak ağız hazırlığı Şekil 2.b'de

görülen ölçülere göre yapılmış ve kaynak işlemi esnasında endüstriyel fırçalar ve temizlik ekipmanları kullanılmıştır.

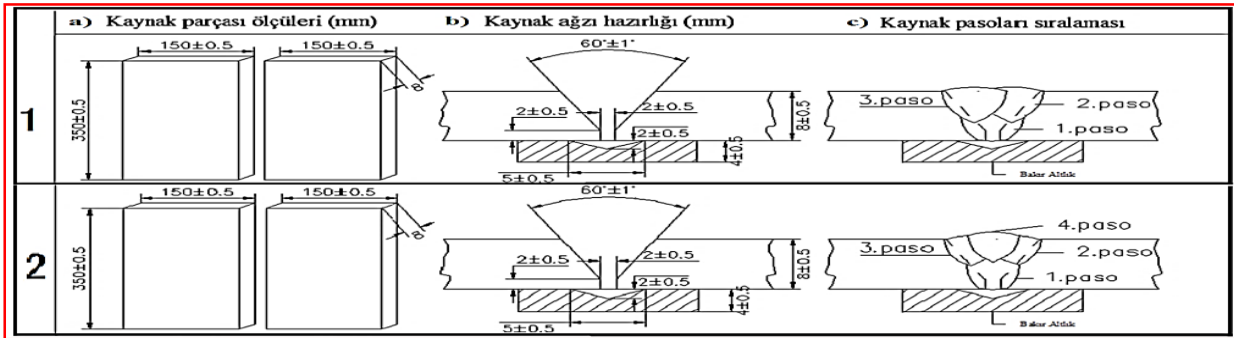
Kaynaklı birleştirme aşamasında; QStE 420 TM çeliği için TS EN 10025-6+A1 [26] standardına göre metalürjik özellikler ve SEW 088:1993 [27] standardında göre bilimsel veriler ile kaynaklanabilirlik tavsiyeleri referans alınmıştır. Kaynak esnasında TS EN ISO 15614-1 [28], kaynak prosedürü deneyi kuralları ile TS EN 9606-1 [29] kaynakçı yeterlilik sınavı kapsamında yapılan birleştirmelerde kaynak işlemi esnasında bir noktada kaynağa ara verilip tekrar devam edilmiştir. Çizelge 4'teki kaynak parametreleri EN ISO 14731'e [30] uygun şekilde hazırlanmış ve bu parametrelere göre kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Birleştirme işlemlerinde kullanılan kaynak parçası ölçüleri, kaynak ağız geometrisi ve paso sıralaması ise her bir kaynak metodu için ayrı ayrı Şekil 2'de verilmiştir.

Çizelge 4. Deneylere göre kaynak parametreleri (Welding parameters according to the experiments)

Deney No	Paso no	Tel sür. hızı m/dk.	Akım şid. (Amp.)	Gerilim (Volt)	Kaynak hızı (mm/sn.)	Isı girdisi / kJ/mm	Ort. Isı girdisi / kJ/mm
1	1	5,1	177	24,5	4,48	0,78	0,66
	2	5,1	155	23,7	4,86	0,61	
	3	5,9	155	23,7	4,86	0,61	
2	1	7	175	27	3,95	1,08	0,84
	2	7	175	27	6,16	0,69	
	3	7	175	27	6,00	0,69	
	4	7	175	27	4,76	0,89	

Aynı çaptaki özlü telin masif tele oranla daha yüksek metal yığıma oranına sahip olduğu ve buna bağlı olarak daha yüksek tel sürme hızı, akım şiddeti gerektirdiği bilinmektedir [17]. Bu sebepten 2. deneyde 4 paso

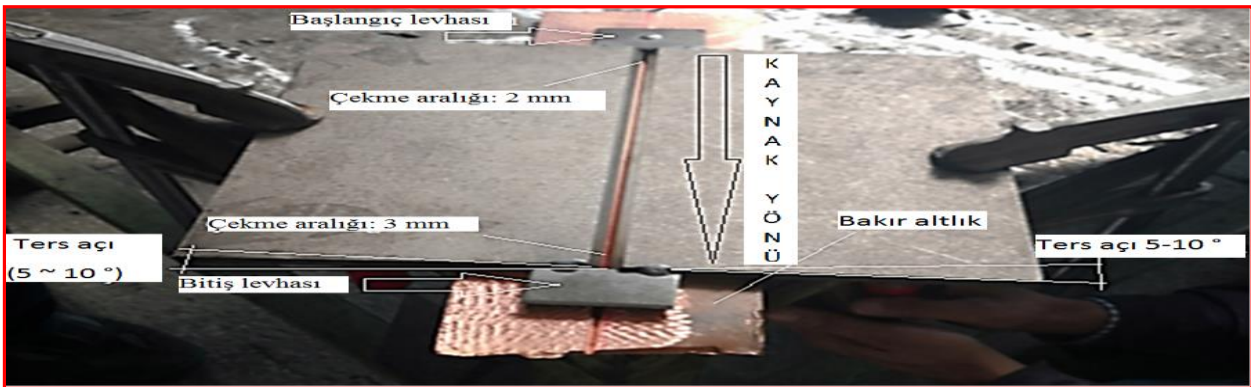
kaynak dikişi ile çizgisel paso tekniği korunarak birleştirme işlemi yapılmış ve buna bağlı olarak Çizelge 4'te görülen tel sürme hızı, akım şiddeti gibi parametreler 1. deneye göre farklılık göstermiştir.



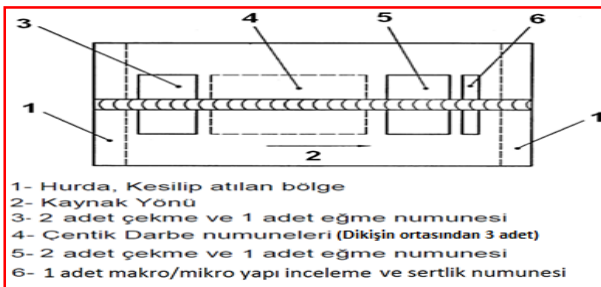
Şekil 2. a. Kaynak parçası ölçüleri, b. Ağız tasarımı, c. Pasoların sıralaması (a.Dimension of weld piece, b.Joint design c.Sequence of passes)

Test parçaları TS EN ISO 15614-1 [28] standardına göre 150 x 350 mm ölçülerinde, kaynak ağızında ısıdan etkilenmiş bölge oluşturmayan su jeti yönteminde kesildikten sonra talaşlı imalatta 30° kaynak ağızı ve Şekil 2.a ve b'de verilen ölçülere işlenmiştir. Kaynaklı birleştirme işlemlerinde Şekil 2.c'de ki paso sıralamasına

uygun kaynak işlemine geçebilmek için, test plakaları işkenceler yardımıyla ve 4 mm kalınlıkta bakır altlıkla kök tarafı desteklenmiş biçimde Şekil 3'te gösterilen şekilde bağlanarak Çizelge 4'te belirlenen parametreler dâhilinde kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. Kaynak işlemi için hazırlanan test parçaları (Test parts prepared for welding process)



Şekil 4. Test numunelerinin plakadan çıkarılan yerleri (Test specimens removed from the plate) [28]

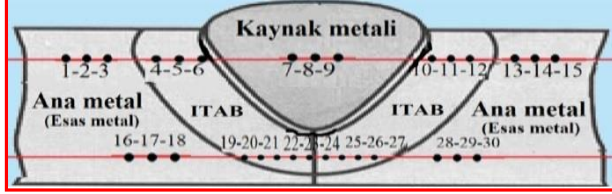
Kaynaklı birleştirmelerde minimum ön ısıtma sıcaklığı 100°C ve pasolararası maksimum sıcaklık 200°C olacak şekilde uygulanmıştır. QStE 420 TM kalite test parçalarının kaynak dikişinin birim uzunluğuna daha az ısı girdisi uygulaması için metal aktif gaz kaynağı (MAG) birleştirme metodu olarak tercih edilmiştir. Standartta uygun olarak test parçalarından Şekil 4'te gösterilen bölgelerden 4'er adet çekme numunesi, 3'er adet (2 set) çentik darbe numunesi, 2'şer adet eğme numunesi ve 1'er adet sertlik ve makro-mikro yapı inceleme numunesi olmak üzere 26 adet numune su jeti ile kesilerek çıkarılmıştır [28] [31].

Makro yapı, mikro yapı ve makrosertlik incelemeleri için numune hazırlama işlemleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarlarında, yapısal inceleme işlemleri ile makrosertlik, çekme, çentik - darbe, eğme testleri ise MKE laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

Birleştirmelerin makrosertlik davranışlarını kontrol etmek, makro ve mikro yapı analizlerini yapmak için metalografik test numuneleri alınmıştır. Alınan numuneler, TS EN ISO 17639 [32] standardı ve metalografik numune hazırlama kurallarına uygun olarak sırasıyla 200, 400, 600, 800 ve 1200 gritlik zımparalarla zımparalanmış, daha sonra ise sırayla 6, 3 ve 1 µm'lik keçe ve uygun solüsyonlar ile parlatılmıştır. Parlatma işleminden sonra numuneler % 5 Nital (5 ml HNO₃, 95 ml Etil alkol) çözeltisiyle dağlanmıştır. Dağlanan numunelerin makro - mikro yapı analizleri ve makrosertlik test işlemleri, Qness makro - makro sertlik ölçme ve makro yapı, mikro yapı görüntü alma cihazında gerçekleştirilmiştir.

Sertlik uygulamaları TS EN ISO 9015-2011 [33] standardına göre 10 kg'lık yük ile Vickers cinsinden ölçümlerle belirlenmiştir. Şekil 5'te şematik görüntüsü verilen bölgelerde kep ve kök yüzeylerinin 2 mm kadar

altından 3 tane ana malzemeden, 3 tane ITAB'dan, 3 tane de kaynak metalinden olmak üzere simetrik olarak toplamda 30 noktadan Vickers (HV₁₀) makro sertlik ölçümü yapılmıştır. Sertlik ölçümleri, cihazda bulunan 10 kg'lık yük uygulayan taban alanı kare şeklinde olan ve karşılıklı yüzeyleri arasında 136° açı bulunan düzgün piramit şeklindeki elmas batıcı uç yardımıyla yapılmıştır [33].



Şekil 5. Sertlik ölçüm bölgelerinin şematik örneği (Schematic illustration of hardness measurement zones)

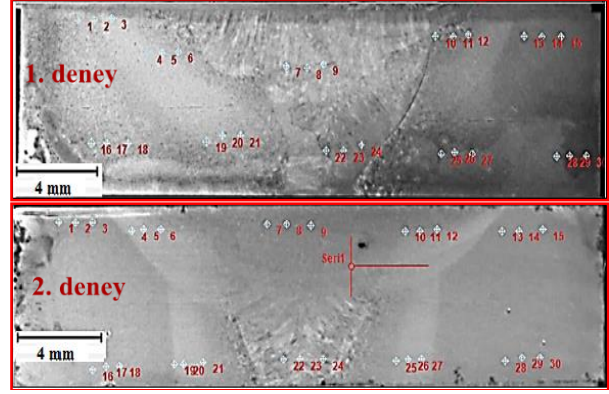
Çekme numuneleri TS EN 4136 [34] standardına göre hazırlanarak 150 kN çekme kapasiteli Instron marka çekme cihazında test edilmiştir. Deneylerde maksimum akma, çekme mukavemeti ve % uzama değerlerine bakılarak, ortalama değerler belirlenmiştir.

Eğme testlerinde, TS EN ISO 5173:2010/A1 [35] standardı kurallarına göre hazırlanan 240 mm uzunluğundaki numuneler yine aynı cihazda 16 mm çapında eğme mandreli kullanılarak, 90 mm mesnet merkezleri arası açıklıkta, 5 mm/dk deformasyon hızında, 180° açığa kadar kök eğme (root bend) ve kep eğme (face bend) gerçekleştirilmiştir.

Çentik - darbe testleri için numunelere TS EN ISO 9016:2012 [36] standardına göre 2 mm derinlikli 45° açılı, 0,25 mm V çentik açıldıktan sonra sıvı azot banyosu içerisinde 0 °C sıcaklıkta 5 dakika kadar bekletildikten sonra, numunenin ısınmasına zaman bırakmadan teste başlanmıştır. Çentik darbe testlerinde 300 joule enerji ölçebilen çarpma hızı 5.5 m/s olan Galdabini marka cihaz kullanılmıştır.

3. DENEYSSEL BULGULAR (EXPERIMENTAL FINDINGS)

TS EN ISO 17639 [32] standart metalografik numune hazırlama kurallarına uygun olarak hazırlanan ve kaynak test plakalarından Şekil 3'te 6 numara ile gösterilen alandan çıkarılan numuneler, makro yapı, mikro yapı ve makro sertlik incelemelerine tabi tutulmuştur. Makrosertlik ölçümlerini de ifade eden makroyapı görüntüleri Şekil 6'da verilmiştir. Makro yapı fotoğraflarında homojen ve ince tane yapı ana malzeme, geçiş bölgesinin karakteristik özelliklerini gösteren ITAB ve sütünsal tane yapısına sahip kaynak metali bölgeleri net olarak görülmektedir.

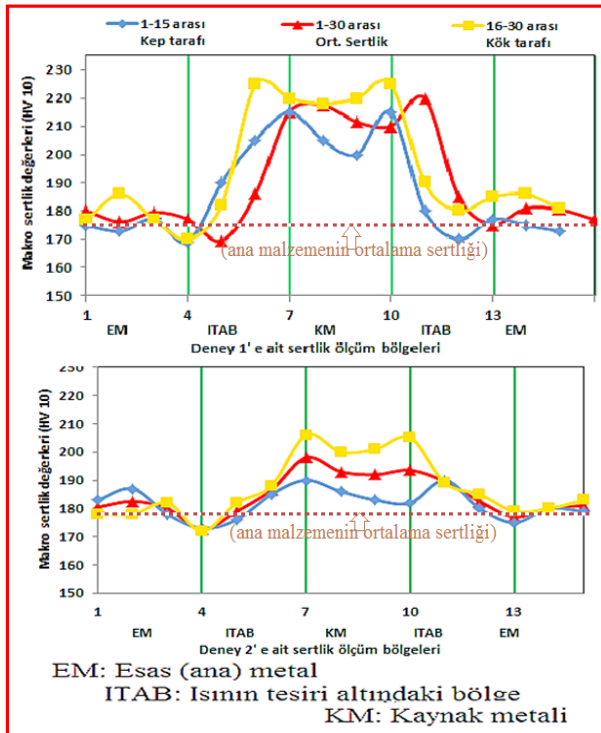


Şekil 6. Kaynaklı birleştirmelerin makrografi görüntüleri (Macrographic images of welded joints)

1. deneye ait fotoğraf 3 pasonun yer aldığı 2 dikiş katmanından, 2. deneye ait fotoğraf ise 4 pasonun yer aldığı 2 katmandan oluşmaktadır. 1.deneyde ortalama ITAB genişliği yaklaşık 3,5 mm iken 2.deneyde 4 mm'dir. Her iki makro yapıda bulunan ITAB genişliklerinin ısı girdisi (kJ/mm) ile orantılı olarak aşağıdan yukarı doğru genişlediği görülmektedir. 2. deneyde kök pasoda, 1. deneyde ise yüzeye yakın pasolarda hızlı soğumaya bağlı olarak görülen dendritik katılma dikkat çekmektedir.

2. deneyde pasolar arasında kep yüzeyinin 1 mm kadar aşağısında yaklaşık 0,2 mm çapında gözenek süreksizliği görülmekte olup, bu süreksizlik TS EN 6520-1 metalik malzemelerde geometrik kusurların sınıflandırılması standardında [15] belirtilen bir hata boyutunda değildir. Her iki deneyde de; aynı ana iki metalin veya farklı metallerin kaynaklandığı durumlarda ilave metal kullanılarak yapılan katılma türlerinden "epitaksiyel olmayan katılma" yani homojen veya heterojen olarak ayrılan katılma görülmektedir [37]. Bu durumda ergime çizgisinde (Bkz. Şekil 8-9'da kaynak bölgesi şematik resminde 2 numara) heterojen bölgelerde ana metalle ilave metalin taneleri etkileşmekte, rastgele yönelme ile karşılaştıkları ana metal tanesinin spesifik büyüme yönü oryantasyonuna uyum sağlayarak epitaksiyel olmayan bir katılma oluşturmaktadır [37]. 2. deneyde ıslah pasosunun (Bkz. Şekil 2.c'de 4.paso) alttaki pasolara yaptığı normalizasyon etkisi ile taneler 1. deneydeki döküm katılmasına benzer yapıdan çıkarak, normalizasyon işlemi uygulanmış ince tane yapısına geçmiştir [15].

Makro yapı fotoğraflarında meydana gelen kaynak metalindeki katılma ve ITAB'da soğuma esnasında meydana gelen faz dönüşümleri sonucunda Şekil 5'te görülen farklı sertlik ölçüm bölgeleri oluşmuştur. Şekil 5'te görülen ana metal, ITAB ve kaynak metali bölgelerinden 3'er adet olmak üzere, kep ve kök yüzeyinin 2 mm kadar derinliğinde bir hat üzerinde toplamda 30 noktadan yapılan makro sertlik değerlerine ait sertlik profili grafikleri Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Vickers sertlik profillerine ait grafikler (Charts of the Vickers hardness profiles)

Şekil 7’de her iki deneyde de ana malzeme (EM – esas metal) sertliği ortalama 175 Vickers olarak ölçülmüştür. Kaynak telinin kimyasal kompozisyonu ve uygulanan ısı girdilerinin farklılık göstermesi nedeniyle her iki deney için kaynak bölgelerinde farklı sertlik değerleri oluştuğu Şekil 7’de görülmektedir. 1. deneyde kaynak metalinde sertlik ortalama 220 Vickers civarında iken, 2. deneyde 190 Vickers civarında ortalama sertlik değeri elde edilmiştir.

Her iki deneyde de en yüksek sertlik değerleri ITAB’ın ergime hattına yakın kısmında oluşmaktadır [11,12, 43]. Bu nokta aynı zamanda östenitin karbonca en zengin olduğu noktadır ve bu noktada gerçekleşen faz dönüşümü sert ve kırılğan martenzit fazının oluşmasını sağlayacak kadar hızlıdır [15, 38]. Bu noktadan sonra hem kaynak metalini hem de ITAB yönünde sertlik azalmaktadır. ITAB’ta sertlik düşüşü ve oluşan fazlar sürekli soğuma diyagramları ile açıklanırken kaynak metalinde meydana gelen sertleşme ve katılaşma ilave telin kimyasal bileşiminin etkili olduğu döküm yapısındaki katılaşma şartları ile açıklanabilir [39]. 1. deneyde kullanılan MG182 telin kimyasal kompozisyonundaki Mn (%1,55): Cr %0,25): Mo (%0,25) elementlerinin karbon eşdeğerliliğini artıran yöndeki etkisi sonucu kaynak metalinde ortalama sertlik ana malzemenin sertlik değerinin 45 Vickers üzerindedir[40, 41].

Deneylerde en düşük sertlik değeri ise ITAB’dan ana malzemeye geçiş [42] kısmında oluşmuştur. TSTE 420 çeliği kullanılarak Smitweld TCS 1405 simulator’ünde ITAB’da maksimum sertliğin 780°C’de elde edildiği bilinmektedir [11, 12]. Ayrıca API-5L X65 ve

S460G2+M çeliklerinin sürtünme kaynağı çalışmasına [42] ait sertlik profilinde de en düşük sertlik değerlerinin ITAB’dan ana malzemeye geçiş bölgesinde elde edildiği görülmüştür. Kök ve kep düzleminin 2 mm kadar altından alınan sertlik ölçümlerinde ise kaynak bölgelerinde kök düzlemi altından alınan sertlik değerlerinin iç bölgelere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak 2.deneyde kapak pasosunun (Islah pasosu) alttaki pasolara uyguladığı normalizasyon etkisinin kök pasosunun bir kısmında hissedilmemesidir.

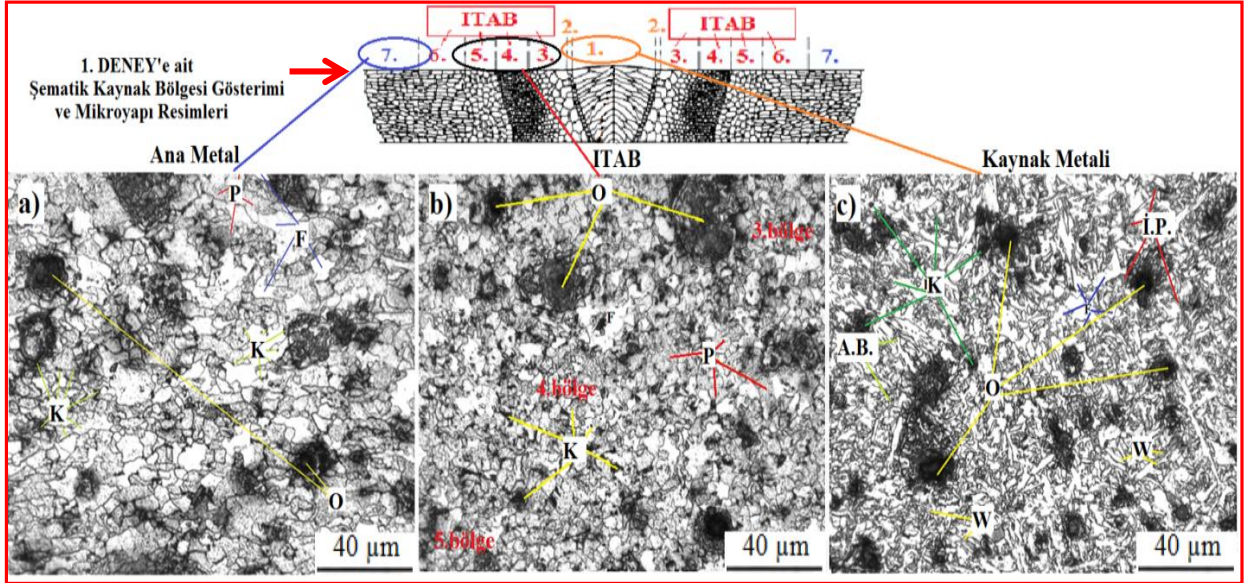
1.deneyde ıslah pasosunun olmaması ve kaba taneli östenit fazının [43] yüksek östenit sıcaklıklarından soğumasına bağlı olarak yayıncı ve yayıncısız dönüşümler [38] sonucu ince taneli çeşitli fazlara dönüşmesi ile kaynak bölgesinde sertliğin ergime sınırında yükseldikten sonra ITAB yönünde hızla azaldığı kaynak metalini bölgede ise kaynak metalinin yüksek karbon eşdeğerliliğine bağlı olarak az bir düşüşle sabit kaldığı görülmüştür [15, 38, 39].

Sonuç olarak MG182 tel ile yapılan birleştirme işleminde, FCW 140 ile yapılan birleştirme işlemine göre kaynak metalini bölgede daha fazla sertlik artışı görülmüştür.

Şekil 8-9’da deney numunelerinin kaynak bölgelerine ait ölçekli mikroyapı fotoğrafları verilmiştir. Şekil 8.a’da tanelerin ince ve homojen dağıldığı, ferrit (F) ve ağırlıklı perlitik (P) [44,45] yapılar ile yer yer tane içlerinde ve tane sınırlarında mikro alaşım elementlerine ait literatürde daha önceden yapılmış çalışmalarda karbür, nitrit ve karbonitrit (K) olduğu bilinen yapılar ile tane sınırlarında ise Mn, Al, Si elementlerine ait olduğu bilinen oksitler (O) [9] görülmektedir [2, 5, 6, 8].

Şekil 8.b’de Ferrit (F) çoğunluklu, ana malzemeden daha ince tane yapısında perlitik (P) [44, 45] yapı görülmektedir. Daha önceki çalışmalarda karşılaşılan, tane içlerini ve tane sınırlarını kaplayan iğneleme etkisi gösteren mikro alaşım elementi karbürler (K) [3] ve ısının etkisiyle büyüme fırsatı yakalamış yapıda, istenmeyen oksitler (O) [9] bu çalışmada da görülmektedir. Tanelerin resimde sol alt köşeden yani iri taneli ITAB bölgesinden (5. bölge): sağ üst köşeye yani ince taneli ITAB’a (3. bölge) [16] doğru ısı akış gradyanının tersi yönde büyüdüğü görülmektedir[2, 5, 6, 9].

Şekil 8.c’de Ferrit (F) tane sınırlarında Widmanstatten ferrit (W): ince perlit (İ.P): alt beyrit (A.B) yapısı [44] [45] görülmektedir. Östenit fazından ferrit fazına dönüşüm sonrası fazla karbürlerin (K) [9] tane sınırlarında topaklanmış halde çöktüğü görülmektedir. Literatürde tane sınırlarında oksit (O) oluşturan Al elementine ait inklüzyonların [9] yüzeye çıkamayıp tane sınırlarında çöktüğü bilinmektedir. Ferritin (F) ince perlit (İ.P.) [45] tanelerinin etrafını sararak süneklik sağladığı düşünülmektedir [2, 5, 6, 9, 16].



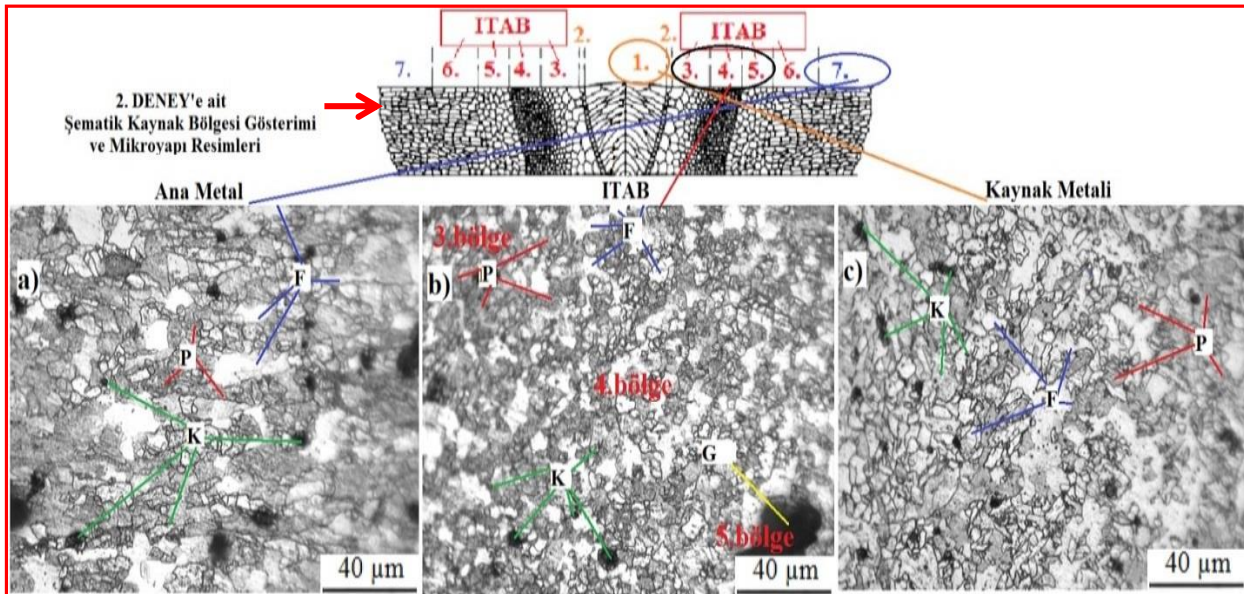
Şekil 8. Deney 1'e ait a-Ana metal, b- ITAB, c- Kaynak metali mikro yapı fotoğrafları (Micro structure photos a)Base metal, b)HAZ, c)Weld metal of experiment 1)

Şekil9.a'da ısıdan etkilenmemiş yassı tanelerin olduğu yapı içinde dağılmış mikro alaşım elementi karbürlerinin tane içlerinde ve tane sınırlarında mikron boyutunda topaklanmadan çökelediği [3], perlit (P) ve ferritten (F) [44, 45] ibaret yapı görülmektedir. Şekil 9.b'de normalizasyon ısı işlemi ekisiyle incelmış tane yapısında bulunan ITAB görülmektedir [15, 38].

Daha önceki çalışmalarda karşılaşılan tane sınırlarında bulunan iri karbür kümelenmeleri (K) bu kez tane içlerinde noktasal homojen dağılımlı karbürler (K) olarak görülmektedir [2, 5, 6, 9, 16]. 5. bölgede TS EN ISO 6520-1 standardında bir süreksizlik olarak

değerlendirilen 30 µm boyutunda gözenek (G) [9] farkedilmektedir. Şekil 9.c'de Ferritik (F) yapının ısı akış yönünün tersine (yüzeye doğru) yönlenecek uzadığı, perlitten (P) [44, 45] oluşan mikro yapı görülmektedir.

Birim uzunluğa uygulanan ısı girdisinin çoklu çizgisel paso yoluyla azaltılması ve ıslah pasosunun etkisi sonucu mikro karbürlerin östenitten ferrite dönüşüm süresince tane içinde homojen şekilde çökerek dağıldığı, bazı iri karbür çökeltilerinin (K) [6, 9] ise tane sınırlarında çözülmeden kaldığı görülmektedir [2, 5, 16, 45].



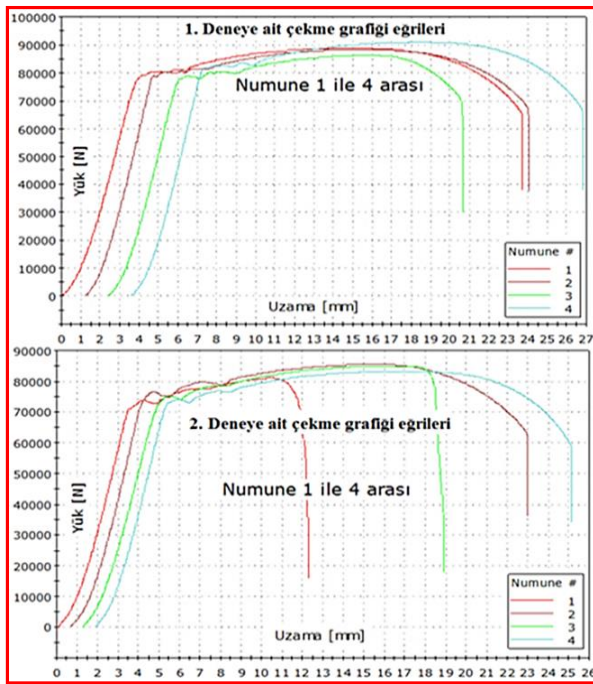
Şekil 9. Deney 2'ye ait a- Ana metal, b- ITAB, c- Kaynak metali mikro yapı fotoğrafları (Micro structure photos a)Base metal, b)HAZ, c)Weld metal of experiment 2)

Kaynaklı birleştirmelerin çekme deneyinden elde edilen sonuçların grafiği Şekil 10’da, test sonuçları ise Çizelge 5’te verilmiştir.

Çizelge 5. Çekme testi sonuçları (Tensile test results)

Deney no	Akma muk.	Çekme muk.	Uzama	Kesit Alanı	Son boy	Kopma bölgesi
	[MPa]	[MPa]	[%]	[mm ²]	mm	
1.1	514,3	578,7	21,8	153,5	109,7	Ana malzeme
1.2	510,9	570,8	20,9	154,7	108,9	
1.3	516,4	570,8	16,4	151,2	104,8	
1.4	515,6	573,4	20,4	158,5	108,4	
Ort.	514,3	573,4	19,9	155,6	109,0	
2.1	481,2	540,3	9,4	150,1	98,5	Ana malzeme
2.2	500,0	563,4	19,1	151,7	107,2	
2.3	484,9	555,9	14,9	152,8	103,4	
2.4	495,4	561,2	21,3	148,4	109,2	
Ort.	493,4	560,2	18,4	151,0	106,6	

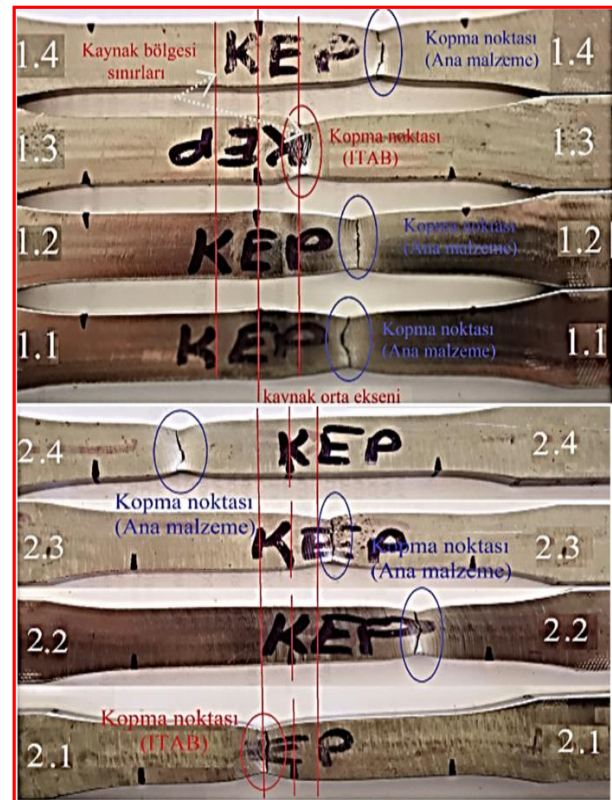
2.1 numaralı numuneden ölçülen % 9,4 süneklik değerinin “duraklama noktasına” denk gelmiş olabileceği nedeniyle ortalamaya dahil edilmemiştir.



Şekil 10. Gerilme-uzama eğrileri (Stress Elongation Curves)

Bu sonuçlar; statik zorlamalarda kaynak bölgesinin dayanımının ana metale göre daha iyi durumda olduğunu göstermektedir. Kopmanın ana malzemeden olması kaynak parametrelerinin doğru seçildiğine işaret etmektedir. Şekil 11’de numunelerin kopma bölgelerine ait detaylı fotoğraflar incelendiğinde; her iki deneyde de birer numunenin ITAB’dan koptuğu, diğer numunelerin ise ana malzemeden koptuğu gözlemlenmiştir. Kaynaklı test parçalarına ait gerçekleşen deneylerin dikişlerinde 1 kez duraklama yapıp tekrar kaynağa devam edildiğinden, 4 numuneden birinin, duraklama

1 ve 2 numaralı birleştirmelerden ayrı ayrı alınan 4 numuneye ait çekme teste sonrası görüntüleri ise Şekil 11’de verilmiştir. Ana malzemenin TS EN 10025-6+A1 standardına göre katalog değerleri incelendiğinde 420 MPa minimum akma mukavemeti, 550 MPa (480 – 620 MPa arası) çekme mukavemeti, % uzama değeri ise minimum % 19 olarak verilmektedir [26]. Şekil 11 ve Çizelge 5’ten görüleceği üzere; 1. ve 2. deneyde numunelerin çoğunlukla ana malzemeden koptuğu, kaynak metalinden herhangi bir kopmanın olmadığı tespit edilmiştir. 1. deney için yapılan çekme testlerinde; akma mukavemeti 514,3 MPa, maksimum çekme mukavemeti 573,4 MPa, yüzde uzama değeri ise % 19,9 olarak tespit edilmiştir. 2. Deneyden elde edilen sonuçlarda ise akma mukavemetinin 493,4 MPa, maksimum çekme mukavemetinin 560,2 MPa, yüzde uzama değerinin ise % 18,4 olduğu belirlenmiştir.



Şekil 11. Çekme testi numuneleri (Tensile test sample)

yapılan bu noktaya denk gelmiş olabileceği ve genelde bu tür noktalarda MAG kaynağında soğuk birleşme hatası TAB’dan kopmasına izin verilmektedir [29]. Numunelerin ana malzeme akma ve çekme mukavemetine oranla daha yüksek mukavemet değerleri olma ihtimali bulunduğundan, 1’er adet numunenin sergilemesinin sebebi ise kaynaklı bölgenin çekme testi esnasında deformasyona karşı gösterdiği direnç nedeniyledir. Kaynak bölgesinin deformasyona karşı direnç göstermesi nedeniyle kaynak işlemi mukavemeti arttırmıştır [46].

Çizelge 6'da 0°C'de uygulanan çentik darbe testi sonuçlarına göre her iki deneyden elde edilen tokluk enerjisi değerleri ana malzemenin değerlerinden (0°C'de 202 Joule) daha yüksektir.

Çizelge 6. Çentik darbe testi sonuçları (Notch impact test results)

Deney no:		1			2		
Kırılma enerjisi değerleri	Numune no:	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3
	Kaynak Metali	267	247	227	176	229	203
		Ortalama: 247			Ortalama: 203		
	Numune no:	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3
ITAB	215	246	223	234	186	210	
		Ortalama: 228			Ortalama: 210		

Çizelge 6'daki sonuçlar incelendiğinde masif tel ile yapılan deneyden elde edilen ortalama çentik - darbe enerjisi 247 Joule (Kaynak metali): 228 Joule (ITAB): özlü tel ile yapılan deneyden elde edilen çentik - darbe enerjisi ise 203 Joule (Kaynak metali): 210 Joule (ITAB) olarak ölçülmüştür.

Bu değerlerin oluşmasında yine kullanılan ilave tel türünün farkı ortaya çıkmaktadır. Masif tel ile birleştirilen 1 numaralı deneyde Mn oranının % 1,55 olması tokluk değerlerinin yükselmesine neden olmaktadır [40, 41]. Özlü tel kullanılan 2. deneyde kaynak metalinde tokluk değerinin ana malzemenin yüksek çıkması kullanılan Ni elementinin tane inceltici ve östenit stabilize edici etkisi [40, 41]. ile ıslah pasosunun alttaki pasolara uyguladığı normalizasyon ısıl işlemi sayesinde yükselmiştir [15]. Özlü tele ait kaynak metali mikroyapısında artan tane sınırı uzunluğu sayesinde ani kırılmaya karşı gösterilen direnç (çentik darbe enerjisi) yükselmiştir [11, 12, 47, 48].

Kılavuzlu bükme testlerine (eğme testi) ait sonuçlar ise Çizelge 7'de verilmektedir.

Çizelge 7. Eğme testi sonuçları (Bending test results)



Şekil 12. Eğme numuneleri (Bending test samples)

Çizelge 7'de verilen eğme testi sonuçları ile Şekil 12'de verilen eğilmiş numune görüntülerine bakıldığında kaynaklı birleştirmelerde herhangi bir hatanın olmadığı, 180° bükme işleminin kusursuz bir şekilde gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 12'de kep ve kök yüzeyleri ile kenarlarında test sonucunda herhangi bir yırtılmanın olmadığı ve birleştirmelerin iyi bir özellik sergilediği görülmüştür.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

- ✓ Yüksek akım yoğunluğuna sahip özlü tel ile yapılan birleştirmenin makroyapı fotoğrafı, düşük akım

yoğunluğuna sahip masif tel ile yapılan birleştirmenin makroyapı fotoğrafına göre daha iyi derinlemesine nüfuziyet, daha iyi yan duvar ergimesi, daha homojen ve geniş bir ITAB yapısı sergilemektedir.

- ✓ Sertlik alınan noktalar, bu noktaların makroyapıları ve ölçüm yapılan bölgelere uygulanan ısı girdileri birlikte değerlendirildiğinde; yüksek ısı girdisi uygulanan pasolarda yava soğuma oranına bağlı olarak kaba taneli yapılar oluşurken, düşük ısı girdisi uygulanan pasolarda hızlı soğuma oranına bağlı olarak ince taneli yapılar oluşmaktadır. Hızlı soğuma sonucu oluşan martenzit fazı mukavemeti artırsada tokluk ve sünekliği düşürmektedir. Bu olumsuzluk ve kaynak metali ile ITAB arasındaki yükselen sertlik farkı ıslah pasosu ile azaltılabilmektedir.
- ✓ Mikro karbürlerin östenit ve ferrit fazlarında sınırlı çözünürlüğü nedeniyle noktasal boyutta ve homojen biçimde ferrit, ince perlit fazlarında çökeltme sağlamaları özlü telle yapılan birleşmelerde mekanik özellikler açısından daha ince ve homojen bir tane yapısı oluşturmuştur. Masif telin kullanıldığı mikroyapı fotoğraflarında ise mikro karbürler daha çok aglomerasyon (fiziksel topaklanma) yaparak çökeltme gerçekleştirmiştir. Islah pasosunun olmaması nedeniyle karbürler, yeterli derecede normalizasyon görmediğinden noktasal biçimde çökelmek yerine, topaklanmış biçimde çökelmiştir.
- ✓ Her iki deneyde de ana malzemenin çekme mukavemetinden daha yüksek çekme mukavemeti elde edilmiştir. Ana malzemenin mukavemetinden daha yüksek mukavemet değerlerinin elde edilmesinde; ilave metalin (Mn ve diğer alaşım elementleri) kompozisyonunun, mikro karbürlerin homojen çökeltmesinin, ince tane yapısının v.b metalurjik özelliklerin etkisi bulunmaktadır.
- ✓ Çentik darbe testi sonuçlarında Mn kaynak metalinde yüksek tokluk sağlarken, daha ince tane yapısına sahip masif telin kullanıldığı 1. deneyin ITAB mikroyapısında da yüksek tokluk enerjisi elde edilmiştir.
- ✓ Eğme deney sonuçlarında kep ve kök yüzeylerinde herhangi bir yırtılmanın oluşmaması birleştirmelerin çatlağa neden olacak boyutta gözenek ya da herhangi bir kalıntı içermediğini göstermektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] https://www.tatasteleurope.com/static_files/Downloads/General%20Industry%20Strip/Strip%20Products/English/Tata%20Steel%20-%20YMPRESS%20S420MC%20-%20data%20sheet.pdf
- [2] Aktarer, S.M., Küçükömeroğlu, T., "The microstructure and mechanical properties of FSPed HSLA steel", *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 75(2): 55-60, (2016).

- [3] Taş, Z., “Yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çeliklerde metalürjik mukavemet artırma”, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(2): 97-101, (2012).
- [4] <http://www.e-mep.com/wp-content/uploads/2017/02/Yüksek-Mukavemetli-Düşük-Alaşımlı-Çeliklerin-Kaynagi-Ozlem-Karaman.pdf>
- [5] Kurt, H., “*Yüksek Mukavemetli Yapı Çeliklerinde Kaynaklı Bölgenin Mekanik ve Mikro yapı Özelliklerinin İncelenmesi*”, **Yüksek Lisans Tezi**, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2014).
- [6] Yalçın, M. “*İnce Taneli Yüksek Mukavemetli Yapı Çeliklerinde Kaynaklı Bölgenin Mekanik ve Mikro yapı Özelliklerinin İncelenmesi*”. **Yüksek Lisans Tezi**, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Ana Bilim Dalı, (2008).
- [7] N. Mebarki, N. Lamesle, P. Delagnes, D. Levaillant, C. Delmas, F., “Relationship Between Microstructure and Mechanical Properties Of A 5%Cr Hotwork Tool Steel”, **6th International Tooling Conference**, France, 737-754.
- [8] J.G.Silva, F., Santos, J., Gouveia, R., “Dissolution Of Grain Boundary Carbides By The Effect Of Solution Annealing Heat Treatment and Aging Treatment On Heat-Resistant Cast Steel”, *Hk30. Metals*, 7 (251): 1-12, (2017).
- [9] Kendirci, M. F., “İnce Taneli Yüksek Mukavemetli Yapı Çeliklerinde Kaynaklı Bölgelerin Isıl İşlem Mekanik ve Mikro yapı Özelliklerinin İncelenmesi”, **Yüksek Lisans Tezi**, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Ana Bilim Dalı, (2008).
- [10] Dündar, B., “Tozaltı Kaynak Yönteminde Altlık Olarak Kullanılan Kaynak Yöntemlerinden Kaynak Yeterliliklerinin ve Maliyetlerinin Karşılaştırılması”, **Yüksek Lisans Tezi**, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2010).
- [11] Dunder, M., Vuherer, T., Samardžić, I., “Weldability of Microalloyed High Strength Steels TStE 420 and S960 QL”, *Metalurgija*, 53 (3): 335-338, (2014).
- [12] Samardžić, I., Čikić, A., Dunder, M., “Accelerated Weldability Investigation Of Tste 420 Steel By Weld Thermal Cycle Simulation”, *Metalurgija*, 52 (4): 461-464, (2013).
- [13] Akın, A., “Gazaltı Kaynak Parametrelerinin Kaynak Mukavemetine Etkilerinin Araştırılması”, **Yüksek Lisans Tezi**, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2015).
- [14] Anık, S., “Kaynak Teknolojisi El Kitabı”, **İstanbul Teknik Üniversitesi**, 1983, İstanbul, (2015).
- [15] Elektronik Kitap, “Uluslararası Kaynak Mühendisliği Eğitim Notları”, **O.D.T.Ü. K.T.M.-GSI-SLV-TR**, Ankara, (2013).
- [16] Kalkan, İ., “Yüksek mukavemetli çeliklerde çok pasolu kaynağının mekanik ve mikro yapı özelliklerine etkisi”, **Yüksek Lisans Tezi**, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 2018.
- [17] <https://www.esabna.com/us/en/education/blog/advantages-and-disadvantages-of-metal-cored-wires.cfm>
- [18] Savaşkan, T., “Malzeme Bilimi ve Malzeme Muayenesi”, **Celpler Matbaacılık**, 347-350 Trabzon, (2015).
- [19] <https://www.magmaweld.com.tr/urunorlikon/cb362c17-13ae-4848-bc7e-a03a1a70f380/fcw-140>
- [20] <https://www.magmaweld.com.tr/urunorlikon/404fd18e-8fdc-477d-82b1-7910f9f86e87/mg-182>
- [21] <http://www.gedikkaynak.com.tr/urun/geka-elcor-r-81-ni-ozlu-kaynak-teli>
- [22] <https://weldingmart.com/lincoln-superarc-la-100-aws-er100s-g-er110s-g>
- [23] [https://www.lincolnelectric.com/en-us/Consumables/Pages/product.aspx?product=Products_Consumable_Flux-CoredWires-Gas-Shielded-UltraCore-UltraCore81Ni1C-H\(LincolnElectric\)](https://www.lincolnelectric.com/en-us/Consumables/Pages/product.aspx?product=Products_Consumable_Flux-CoredWires-Gas-Shielded-UltraCore-UltraCore81Ni1C-H(LincolnElectric))
- [24] <https://www.lincolnelectric.com/en-us/support/process-and-theory/Pages/shielding-gas-for-flux-cored-welding.aspx>
- [25] Komaç, E., “Teknik Eğitim El kitabı”, **Askaynak**, 6-8, Kocaeli, (2009).
- [26] TS EN 10025-6+A1, “Sıcak Haddelenmiş Yapı Çelikleri - Bölüm 6: Suverilmiş ve Temperlenmiş Durumdaki Yüksek Akma Dayanımlı Yapı Çeliklerinden İmal Edilmiş Yassı Mamullerin Teknik Teslim Şartları”, (2013).
- [27] SEW088:1993, “Weldable Fine Grained Steels; Guidelines For Processing, Particular For Fusion Welding”, (1993).
- [28] TS EN 15614-1, “Metalik Malzemeler İçin Kaynak Prosedürlerinin Şartnamesi ve Vasıflandırılması - Kaynak Prosedürü Deneyi - Bölüm 1: Çeliklerin Gaz ve Ark Kaynağı”, (2017).
- [29] TS EN 9606-1, “Kaynakçıların Yeterlilik Sınavı-Ergitme Kaynağı - Bölüm 1: Çelikler”, (2017).
- [30] TS EN 14731, “Kaynak koordinasyonu - Görevler ve sorumluluklar”, (2010).
- [31] Akkurt, A., “Su jeti ile kesme sistemleri ve uygulama alanlarının değerlendirilmesi”, *Politeknik Dergisi*, 7(2): 129-139. (2004).
- [32] TS EN 17639, “Metalik Malzemelerdeki Kaynaklarda Tahribatlı Muayene - Kaynakların Makroskopik ve Mikroskopik Muayenesi”, (2014).
- [33] TS EN 9015-1, “Metalik Malzemelerdeki Kaynaklar Üzerinde Tahribatlı Deneyler-Sertlik Deneyi-Bölüm 1: Ark Kaynaklı Birleştirmelerde Sertlik Deneyi”, (2011).
- [34] TS EN 4136, “Metalik Malzemelerin Kaynakları Üzerinde Tahribatlı Deneyler-Enine Çekme Deneyi”, (2013).
- [35] TS EN 5173:2010/A1, “Metalik Malzemelerde Kaynak Dikişleri Üzerinde Tahribatlı Muayeneler- Eğme Deneyleri”, (2012).
- [36] TS EN 9016:2012, “Metalik Malzemelerde Kaynaklar Üzerinde Tahribatlı Deneyler - Vurma Deneyleri”, (2012).
- [37] <https://nptel.ac.in/courses/112101005/modules/lec4-3/1.3.html>
- [38] D. Callister, W., G. Rethwisch, D., “Malzeme bilimi ve mühendisliği 8. basımdan çeviri”, **Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic.Ltd.Şti**, Ankara, 343-390, (2014).
- [39] Kang, B.Y., Kim, H.J., Hwang, S.K., “Effect of Mn and Ni on the Variation of the Microstructure and Mechanical Properties of Low-carbon Weld Metals”, *ISIJ International*, 40 (12): 1237-1245, (2000).
- [40] Zhang, Z., Farrar, R.A., “Influence of Mn and Ni on the Microstructure and Toughness of C-Mn-Ni Weld Metals”, *Welding Research Supplement*, 183-196, (1997).
- [41] Tüzünalp, K.K., “Yönlü Katılama” **Basılmamış Ders Notları**, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Teknoloji Fakültesi, Ankara, (2017).
- [42] Faes K., Maas F., De Waele W., De Baets P., Verstraete M., Delbaere D., Van Der Donck E., “Weldability of Micro-Alloyed High-Strength Pipeline Steels Using a New Friction Welding Variant”, **The 2nd South-East European IIW International Congress**, Sofia, Bulgaria, (2010).

- [43] <http://www.engineeringenotes.com/metallurgy/steel/austenitic-grain-size-of-steel-metallurgy/25901>
- [44] <https://docplayer.biz.tr/13903329-Mikroyapisal-goruntuleme-ve-tani.html>
- [45] Dong, H., Hao, X., Deng, D., “Effect of Welding Heat Input on Microstructure and Mechanical Properties of HSLA Steel Joint”, *Springer Science+Business Media*, 3, 138-146, (2014).
- [46] Lehto, P., Remes, H., Saukkonen, T., Hänninen, H., Romanoff, J., “Influence of grain size distribution on the Hall–Petch relationship of welded structural steel”, *Materials Science and Engineering (A)*: (592): 28–39, (2014).
- [47] Popović, O., Prokić, C., Burzić, R.M., Milutinović, Z., “The Effect of Heat Input on the Weld Metal Toughness of Surface Welded Joint”, *14th International Research/Expert Conference*, Mediterranean Cruise, 61-64, (2010).
- [48] Türker, M., “The Effect of Welding Parameters on Microstructural and Mechanical Properties of HSLA S960QL Type Steel with Submerged Arc Welding”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21 (3): 673-682, (2017).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



Fiziksel ve motor engelli çocukların öz bakım problemlerinin derin sinir ağları ile sınıflandırılması

Self-care problems classification of children with physical and motor disability by deep neural networks

Yazar(lar) (Author(s)): Abdulkadir KARACI

ORCID : 0000-0002-2430-1372

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Karacı A., “Fiziksel ve motor engelli çocukların öz bakım problemlerinin derin sinir ağları ile sınıflandırılması”, *Politeknik Dergisi*, 23(2): 333-341, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.522641

Fiziksel ve Motor Engelli Çocukların Öz Bakım Problemlerinin Derin Sinir Ağları ile Sınıflandırılması

Araştırma Makalesi / Research Article

Abdulkadir KARACI*

Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Müh. Bölümü, Kastamonu Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 05.02.2019 ; Kabul/Accepted : 19.04.2019)

ÖZ

Fiziksel ve motor engellilik bazı bireysel ana yaşam aktivitelerini büyük ölçüde sınırlayan bir bozukluktur. Bu bozukluklar dünyanın birçok ülkesinde çocukları etkilemektedir. Bunun yanı sıra fiziksel ve motor engelli bireylerin doktorlar tarafından uygun mesleki tedavilerle sınıflandırılmaları zor bir süreçtir. Çünkü değerlendirilmesi gereken birçok değişken vardır. Bu çalışmadaki amaç, fiziksel ve motor engelli çocukların öz bakım beceri problemlerini derin sinir ağlarını (DSA) kullanarak en az hata ile sınıflandırmaktır. Bu amaçla farklı parametrelere sahip DSA modelleri oluşturulmuştur. Modellerin oluşturulmasında gizli katman sayısı, gizli katmanlardaki nöron sayısı, aktivasyon fonksiyonu, optimizasyon algoritması, kayıp fonksiyonu ve epoch değeri parametreleri dikkate alınmıştır. Oluşturulan DSA modelleri SCADI (Self-Care Activities Dataset based on ICFCY) veri seti vasıtasıyla eğitilmiş ve test işlemi gerçekleştirilmiştir. Modellerin sınıflandırma performansları F-1 puanı, kesinlik (precision-P), hassasiyet (recall-R) ve doğruluk (accuracy-ACC) metrikleri kullanılarak ortaya konulmuştur. En iyi sınıflandırma performansına sahip 8 modelin ayrıntıları sunulmuştur. Elde edilen bulgulara göre en iyi sınıflandırma performansı Adadelta optimizasyon algoritmasını, Elu aktivasyon fonksiyonunu ve Categorical crossentropy kayıp fonksiyonunu kullanan DSA-1 modelinde elde edilmiştir. Bu modelin P, R, ACC ve F1 puanı değerleri 1'dir. Yani bu model fiziksel ve motor engelli çocukların öz bakım beceri problemlerini %100 doğrulukla tahmin etmektedir. Ayrıca, en iyi üç modelin (DSA-1, DSA-2 ve DSA-3) geçerliliğini artırmak için 10-fold çapraz doğrulama yöntemi ile eğitim ve test işlemi tekrar gerçekleştirilmiştir. Ortalama çapraz doğrulama accuracy değerleri sırasıyla %85.71, % 85.71 ve % 87.14 olarak hesaplanmıştır. Mesleki terapistler, geliştirilen DSA modellerini öz bakım problemlerini teşhis etmede doğrulayıcı bir araç olarak kullanılabilirler.

Anahtar Kelimeler: Makine öğrenmesi, derin sinir ağı, fiziksel ve motor engellilik, öz bakım.

Self-Care Problems Classification of Children with Physical and Motor Disability by Deep Neural Networks

ABSTRACT

Physical and motor disability is a disorder that greatly limits some of the individual main life activities. These disorders affect children in many countries of the world. In addition, it is a difficult process for physically and motorly disabled individuals to be classified by doctors with appropriate occupational treatments. Because, there are many variables that must be considered. The aim of this study is to classify the self-care skill problems of children with physical and motor disabilities by the minimal error using deep neural networks (DNN). For this purpose, DNN models with different parameters were created. The number of hidden layers, the number of neurons in the hidden layers, the activation function, the optimization algorithm, the loss function and the epoch value are taken into consideration in the creation of the models. The DSA models were trained and tested with the SCADI (Self-Care Activities Dataset based on ICFCY) data set. The classification performance of the models was demonstrated by using the F-1 score, precision (P), recall (R) and accuracy (ACC) metrics. Details of the 8 models with the best grading performance are presented. According to the findings, the best classification performance was obtained in the DSA-1 model using Adadelta optimization algorithm, Elu activation function and Categorical crossentropy loss function. The P, R, ACC and F1 scores of this model are 1. In other words, this model predicts the self-care skills problems of physical and motor disability children with 100% accuracy. In addition, in order to increase the validity of the three best models (DSA-1, DSA-2 and DSA-3), the training and testing process was performed with 10-fold cross-validation method. Mean cross validation accuracy values were calculated as 85.71%, 85.71% and 87.14% respectively. Occupational therapists can be used developed DSA models as a validating tool for diagnosing self-care problems.

Keywords: Machine learning, deep neural network, physical and motor disability, self-care.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Engellilik cinsiyete, yaşa, diğer kültürel ve sosyal faktörlere bağlı olarak doğuştan gelen rolleri

engelleyebilen veya azaltabilen bozuklukların sonucudur [1]. Bunun yanı sıra, engellilik, dünya sağlık örgütü tarafından bozukluklar, aktivite kısıtlamaları ve katılım sınırlamaları için bir terim olarak kavramsallaştırılmıştır [2]. Fiziksel engellilik bir veya daha fazla ana yaşam aktivitesini büyük ölçüde sınırlayan bir bozukluk

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : akaraci@kastamonu.edu.tr

olarak tanımlanmaktadır. Fiziksel ve motor engellilik bireysel aktiviteleri kısıtlayan bozukluklardır [1, 3]. Motor engellilik, dünyanın birçok ülkesinde çocukların büyük bir engelidir [4]. Motor engeli olan kişiler ince motor kontrolü, güç ve hareket aralığı konusunda sınırlamalar yaşarlar. Bu eksiklikler, giyinme, saç taraması ve banyo gibi günlük işleri bağımsız olarak gerçekleştirme yeteneklerini önemli ölçüde sınırlandırabilir [5].

Çocukların gerçek problemlerinin doktorlar tarafından uygun mesleki tedavi ile sınıflandırılması zor bir iştir. Çünkü değerlendirilmesi gereken birçok öznelik vardır [6]. Çocuklar ve gençler için uluslararası işlevsellik, engellilik ve sağlık sınıflandırma sistemi (International Classification of Functioning, Disability, and Health for Children and Youth (ICF-CY)) 2001 yılında dünya sağlık birliği tarafından kabul edilmiş ve yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [7, 8]. ICF-CY sisteminde öz bakım; beslenme, içme, giyinme, tuvalete gitme, yıkanma, vücut bölgeleri için bakım, sağlığına dikkat etme, güvenliğine dikkat etme gibi aktiviteleri ifade etmektedir [9].

Literatürde öz bakım problemlerini makine öğrenmesi yöntemleri ile sınıflandıran çalışmalar sınırlı sayıdadır. Zarchi ve arkadaşları [1] yapay sinir ağı (YSA) ile öz bakım problemlerini %83.1 doğruluk oranı ile sınıflandırmışlardır. Le ve Baik [10] öz bakım problemlerini aşırı gradyan artırma (extreme gradient boosting) algoritmasını kullanarak %85.4 doğruluk oranında sınıflandırmışlardır. Islam ve ark. [11] destek vektör makinesi algoritması ile öz bakım problemlerini %84.29 doğruluk oranıyla sınıflandırmışlardır. Choudhury [12] öz bakım problemlerini sınıflandırmak için farklı makine öğrenmesi yöntemleri geliştirmiş, en yüksek sınıflandırma performansını % 83.28 doğruluk oranı ile Random Forest makine öğrenmesi yöntemi ile elde etmiştir. Öznitelik seçimi yaptığında ise bu oran %84.75'e yükselmiştir. Putatunda [13] ise derin öğrenme kullanarak öz bakım problemlerini %84.29 doğruluk oranında sınıflandırmıştır. Putatunda'nın yapmış olduğu çalışma bu çalışmayla doğrudan ilişkilidir. Ancak bu çalışmanın ana problemi gerek Putatunda'nın geliştirmiş olduğu, gerekse literatürdeki diğer çalışmalarda geliştirilen modellerden daha yüksek sınıflandırma performansına sahip DSA modellerini geliştirmek ve bu modelleri önemli parametreleri ile ayrıntılı olarak ortaya koymaktır. Makine öğrenmesi yöntemlerinde öğrenme parametreleri iyi değerlendirilir ve optimum şekilde ayarlanırsa sınıflandırma ve tahmin performansı artmaktadır. Bu nedenle diğer çalışmalarda elde edilen sınıflandırma performansından daha yüksek performans sağlayan modeller elde etmek mümkündür. Böylece öz bakım problemlerinin daha az hata ile sınıflandırılması sağlanabilir.

Öz bakım problemlerinin sınıflandırılması ile ilgili olmamakla birlikte öğrenme engeli ya da güçlüğü makine öğrenmesi ile sınıflandıran bir takım çalışmalar da mevcuttur. Bu çalışmaların hiç birinde SCADI (Self-Care Activities Dataset based on ICF-CY) veri seti

kullanılmamaktadır. Wu ve ark. [14] öğrenme güçlüğü problemini belirlemek ve teşhis etmek için yapay sinir ağları ve destek vektör makinelerini kullanarak sırasıyla %65.6 ve %76 doğruluk oranıyla sınıflandırmışlardır. David ve Balakrishnan [15] ise okul çağındaki çocukların öğrenme güçlüklerini karar ağaçları ve destek vektör makinelerini kullanarak sırasıyla %97.47 ve %97.86 doğruluk oranlarında tahmin etmişlerdir. Bunun yanı sıra Muangnak ve ark. [16] öğrenme engelli çocukları naive bayes ve karar ağacı öğrenme algoritmaları ile sırasıyla %94.23 ve %96.15 doğruluk oranlarında sınıflandırmışlardır.

Derin öğrenme, makine öğrenmesi olarak adlandırılan yapay zekanın alt alanıdır [17]. Derin öğrenmeyi kullanarak derin mimarilere sahip derin sinir ağları (DSA) kurulabilir. Derin mimariden dolayı, DSA çoklu doğrusal olmayan dönüşüm ve yaklaşık karmaşık doğrusal fonksiyonlar vasıtasıyla ham veride bulunan temsili bilgileri uyarlamalı olarak küçük bir hata ile yakalayabilir [18]. Derin sinir ağlarının performansı birçok parametreye bağlıdır [17]. Bu nedenle oluşturulan DSA modelinin tüm parametrelerinin göz önünde bulundurulması modelin eğitilmesi önem arz etmektedir.

Bu çalışmada, fiziksel ve motor engelli çocukların öz bakım beceri problemleri DSA kullanılarak sınıflandırılmıştır. Zarchi ve arkadaşları [1] tarafından üretilen SCADI veri seti kullanılmıştır. Çalışmanın geriye kalan kısmı şu şekilde düzenlenmiştir. Bölüm 2'de çalışmada kullanılan veri setinin ve DSA modelinin ayrıntıları açıklanmıştır. Modelden elde edilen bulgular ve sonuçlar Bölüm 3'de irdelenmektedir. Bölüm 4'de ise çalışmadan elde edilen önemli sonuçlar özetlenmektedir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

2.1. Veri Seti (Data Set)

Bu çalışmada, fiziksel ve motor engelli çocukların öz bakım beceri problemlerini derin sinir ağı ile sınıflandırmak amacıyla Zarchi ve ark. [1] tarafından üretilen SCADI veri seti kullanılmıştır. Zarchi ve ark. [1] öz bakım aktiviteleri ile ilgili standart bir veri setinin bulunmadığını vurgulamışlar ve SCADI adını verdikleri yeni bir veri seti ortaya koymuşlardır. SCADI, fiziksel ve motor engelli çocukların öz bakım faaliyetleri ile ilgili olarak mesleki terapistler ile işbirliği içinde toplanan ve yayınlanan ilk standart veri setidir [1]. Bu veri setinden 29 aktiviteye göre fiziksel ve motor engelli çocukların öznitelikleri belirlenmiştir. Ayrıca çocukların bu 29 aktiviteyi gerçekleştirememeye yani engel durumları 7 farklı kategoride (engel yok, hafif engelli, orta engelli, tamamen engelli vb.) değerlendirilmiştir. Sonuç olarak 29 aktivitenin 7 farklı durumu göz önüne alınarak 203 farklı öznitelik ortaya çıkarılmıştır. Bu 203 farklı öznitelik 0 ve 1 şeklinde sayısal verilerden oluşmaktadır. Bu özniteliklere cinsiyet ve yaş öznitelikleri de eklenerek her çocuk için toplam 205 öznitelik oluşturulmuştur. Cinsiyet özniteliği 0 (erkek) ve 1 (kız) şeklinde kodlanmıştır. Yaş özniteliği ise [6-18] aralığındaki

sayısal verilerden oluşmaktadır. Sonuç olarak veri seti 70 çocuğa ait 205 öznitelik şeklinde sunulmuştur. Ayrıca bu 70 çocuğa ait 205 öznitelik ayrı, ayrı değerlendirilerek çocuklarda bulunan öz bakım problemleri 7 kategori halinde veri setinde belirlenmiştir. Veri setindeki bu 7 adet öz bakım problemleri kategorileri ve örnek aktiviteler Çizelge 1’de verilmektedir [1].

setinde C-1’den C-7’ye öz bakım problemlerinin bulunduğu son sütundaki değerler [0-6] kapalı aralığında kodlanmıştır. Oluşturulan DSA modeli Şekil 1’de gösterilmektedir.

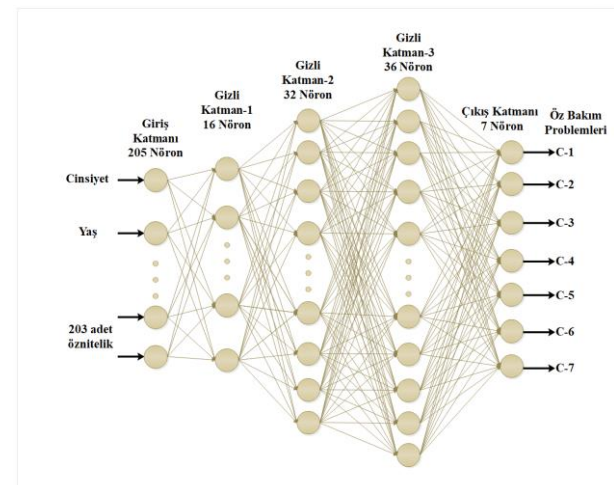
Çizelge 1. Öz bakım problemi kategorileri ve örnek aktiviteler (Self-care problem categories and sample activities)

Problem Kodu	Öz bakım problemi	Örnek aktivite
C-1	• Vücut bölgeleri için bakım problemi	• Cilt bakımı • Diş bakımı • Saç bakımı • Burun bakımı vs.
C-2	• Tuvalet problemi	• İdrarın uygun şekilde yapma • Defekasyonu uygun şekilde yapmak • İdrara çıkma ihtiyacını belirtme vs.
C-3	• Giyinme problemi	• Giysi giyme • Giysi çıkarma • Ayakkabı çıkarma vs.
C-4	• Yıkama, Vücut bölgeleri için bakım ve Giyinme problemi	• Vücut bölümlerini yıkama • Tüm vücudu yıkama • Kendi kendine kurulanma • C-1 ve C-3’teki aktiviteler
C-5	• Yıkama, Vücut bölgeleri için bakım, Tuvalet ve Giyinme problemi	• C-1, C-2, C-3 ve C-4’teki aktiviteler.
C-6	• Beslenme, İçme, Yıkama, Vücut bölgeleri için bakım, Tuvalet, Giyinme, • Sağlığına dikkat etme ve Güvenliğine dikkat etme problemi	• Yeme ihtiyacını belirtme • Uygun şekilde yemek yeme • İçme ihtiyacını belirtme • Uyuşturucu veya alkolün kötüye kullanılması riskinden kaçınma • İlaç tedavisini uygulama ve sağlık tavsiyelerini izleme
C-7	• Problem yok	

2.2. Derin Sinir Ağı Modeli (Deep Neural Network Model)

Bu çalışmada fiziksel ve motor engelli çocukların öz bakım problemlerini tahmin etmek için Python dilinin Keras Kütüphanesi kullanılarak DSA modeli oluşturulmuştur. DSA modeli oluşturulurken öncelikle gizli katmanların ve bu gizli katmanlardaki nöron sayıları belirlenmiştir.

YSA’larda gizli katmanlardaki nöronların sayısı, sınıflandırma doğruluğunda hayati bir rol oynamaktadır [1]. Benzer durum DSA’lar için de geçerlidir. Gizli katman ve katmanlardaki nöronların sayısı belirlenirken farklı modeller denenmiştir. Bu denemeler sonucunda 16, 32 ve 36 nörona sahip 3 gizli katmanlı model oluşturulmuştur. DSA modelinin giriş katmanı 205 nörondan oluşmaktadır. Bu nöronlardan ilk ikisi yaş ve cinsiyettir. Geriye kalan 203 nöron ise veri seti başlığında açıklanan fiziksel ve motor engelli çocukların öz bakım öznitelikleridir. Bunun yanı sıra DSA modelinin çıkışı 7 nörondan oluşmaktadır. Her bir nöron bir öz bakım problemini temsil etmektedir. Yani DSA çıkışı 7 öz bakım probleminden biri olmaktadır. Bunun için veri



Şekil 1. DSA modeli (DNN model)

2.2.1. DSA modellerinin eğitilmesi (Training of DNN models)

Modellerin eğitilmesinde iki farklı yöntem kullanılmıştır. Birinci yöntemde veri seti, %70 ve %30 oranlarında rastgele bölünmüştür. Verilerin % 70’i (49 veri) DSA

modelini eğitmek için kullanılırken %30'u (21 veri) modeli test etmek için kullanılmıştır. Ayrıca test işleminin geçerliliğini ve güvenilirliğini artırmak amacıyla 2-10 arasındaki değerler için veri seti k-fold yöntemi ile eşit parçalara bölünmüştür. K-fold yönteminden elde edilen test verileri ile en iyi DSA (DSA-1) modeli test edilmiştir. Yani test işlemi 54 farklı test verisiyle gerçekleştirilmiştir. İkinci yöntemde ise, birinci yöntemde elde edilen en iyi üç DSA modeli üzerinde k-fold çapraz doğrulama yöntemi ile eğitim ve test işlemi gerçekleştirilmiştir. K-fold yönteminde veri seti k eşit parçaya bölünmektedir. Bir parça test, geriye kalan k-1 parça ise eğitim için kullanılmaktadır. Bu işlem k defa yinelenmektedir [13]. K-fold çapraz doğrulama yönteminde modellerin performansını belirlemek için her yinelemede elde edilen acc değerlerinin ortalaması kullanılmıştır.

DSA modelinin eğitiminde 4 farklı parametrenin belirlenmesi önemlidir. Bu parametreler aktivasyon fonksiyonu, optimizasyon algoritması, kayıp fonksiyonu ve epoch'dur. DSA modeli muhtemel aktivasyon fonksiyonlarının, optimizasyon algoritmalarının ve kayıp fonksiyonlarının farklı eşleştirmeleri kullanılarak eğitilmiştir. Bunun yanı sıra farklı epoch değerleri denenerek en iyi sınıflandırma performansını veren parametreler tespit edilmeye çalışılmıştır.

DSA modelinin gerek oluşturulması gerekse eğitilmesinde kullanılan parametreler Çizelge 2'de gösterilmektedir.

Çizelge 2. DSA modelinin parametreleri (Parameters of the DSA model)

Parametreler	Değerler
Giriş katmanı nöron sayısı	205
Gizli katman sayısı	3
Gizli katman-1'deki nöron sayısı	16
Gizli katman-2'deki nöron sayısı	32
Gizli katman-3'deki nöron sayısı	36
Çıkış katmanındaki nöron sayısı	1
Gizli katmanların aktivasyon fonksiyonları	elu, tanh, linear, softsign, relu, softplus, sigmoid ve hard sigmoid
Çıkış katmanı aktivasyon fonksiyonu	softmax
Öğrenme Döngüsü	50, 150, 200, 300 Epochs
Kayıp Fonksiyonları	Categorical crossentropy, Mean absolute error, Mean square error
Optimizasyonlar (Öğrenme Algoritmaları)	Adam, Adadelta, Sgd, RMSprop, Adamax ve Nadam

Sinir ağlarının önemli bir bileşeni aktivasyon fonksiyonudur [19]. Aktivasyon fonksiyonu, biyolojik nöronun yanıt durumunu simüle etmek ve nöron çıkışını elde etmek için kullanılır [20]. DSA'ların çıkış katmanında softmax aktivasyon fonksiyonunu kullanmak birçok görevde etkili olmaktadır [19]. Bu çalışmada çıkış katmanı aktivasyon fonksiyonu olarak softmax kullanılmıştır. Çünkü diğer aktivasyon fonksiyonları çıkış katmanında kullanıldığında DSA sınıflandırma performansı düşük çıkmıştır. Bunun yanı sıra DSA'nın eğitimi sırasında gizli katmanlarda elu, tanh, linear, softsign, relu, softplus, sigmoid ve hard sigmoid aktivasyon fonksiyonları denenmiştir.

DSA eğitiminin temel bileşeni optimizasyon algoritmasıdır. Optimizasyon algoritması derin bir modelin milyonlarca hatta milyarlarca parametresinin nasıl güncellendiğini tanımlar [21]. Öğrenme algoritmasının seçimi aktivasyon fonksiyonunun seçiminden daha önemli olabilir [22]. Bu nedenle DSA'nın eğitiminde Adam, Adadelta, Sgd, RMSprop, Adamax ve Nadam optimizasyon algoritmaları denenmiş ve en iyi performansı veren optimizasyon algoritmalarına ait sonuçlar bir sonraki bölümde sunulmuştur.

Kayıp fonksiyonu başarılı bir şekilde tasarlanmış bir ağ modelinin başarımını belirlemektedir. Bu fonksiyonun değerinin çeşitli optimizasyon teknikleriyle 0'a yaklaşması istenmektedir [23]. DSA'nın eğitiminde farklı kayıp fonksiyonlarının kullanılması en iyi sınıflandırma performansına ulaşılması açısından önemlidir. Bu nedenle DSA eğitiminde Categorical crossentropy, Mean absolute error, Mean square error kayıp fonksiyonları kullanılmıştır.

Modellerin sınıflandırma performanslarını karşılaştırmak için F-1 puanı, precision (P), recall (sensitivity) (R) ve accuracy (ACC) metrikleri kullanılmıştır. Ancak hangi modelin daha iyi sınıflandırma performansına sahip olduğuna karar vermek için F-1 puanı öncelikli olarak göz önünde bulundurulmuştur. Çünkü precision ve recall metrikleri uyumlu değilse accuracy metriği o kadar çok anlamlı değildir [24]. Bunun yanı sıra precision ve recall sınıflandırma performansını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [25].

F-1 puanı, precision ve recall metriklerinin harmonic ortalamasıdır ve eşitlik 1'deki gibi hesaplanır. F-1 puanının 1'e yakın olması modelin sınıflandırma performansının yüksek olduğunu gösterir [24, 26, 27].

$$F = \frac{2PR}{P+R} \quad (1)$$

Recall ve Precision metrikleri bir örnekle açıklanabilir. Örneğin, gerçek verilerin 15 adeti öz bakım problemi-2'ye ait olsun. Makine öğrenmesi modeli 6 adet veriyi öz bakım problemi-2 olarak sınıflandırır ve bunlardan 4 tanesi gerçekten öz bakım problemi-2 (true positive), geriye kalanı diğer öz bakım problemlerine (false

positive) ait olursa $precision=4/6$, $recall=4/15$ olarak hesaplanabilir.

P ve R değeri eşitlik 2'deki gibi ifade edilmektedir [28]. P, pozitif belirleme ya da tahminlerin ne kadar doğru olduğunu, R ise gerçek pozitiflerin ne kadar doğru belirlendiğini ya da tahmin edildiğini ortaya koyar [29]. Yani hem P hem de R parametresinin 1'e yaklaşması modelin sınıflandırma performansını arttırdığını göstermektedir. P değerinin yüksek R değerinin düşük olması o sınıfa ait olmaması gereken (false positive) ve o sınıfa ait olması gereken tahmin sayısının (true positive) düşük olduğunu gösterir. Yani diğer sınıfların tahmini bu sınıfa karışmamıştır ancak bu sınıf için olması gereken gerçek tahmin sayısı düşüktür. Bunun tam tersi düşünüldüğünde ise diğer sınıf tahminlerinin bu sınıfı tahmin ettiği ve sınıf için olması gereken gerçek tahmin sayısının yüksek olduğu söylenebilir.

$$P = \frac{TP}{TP+FP} \quad R = \frac{TP}{TP+FN} \quad (2)$$

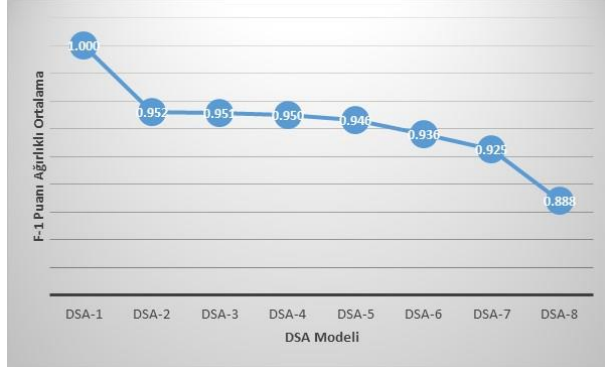
3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULT AND DISCUSSION)

Bu çalışmada, veri seti bölümünde açıklanan 205 öznitelige göre fiziksel ve motor engelli çocukların öz bakım problemlerini sınıflandırmak için farklı DSA modelleri oluşturulmuştur. Bu modellerden en iyi 8 model bu bölümde sunulmuş ve en iyi üç model ise irdelenmiştir. Farklı aktivasyon fonksiyonları, optimizasyon algoritmaları, kayıp fonksiyonları ve epoch değerleri kullanılarak eğitilen DSA modellerinin test verileri için sınıflandırma performansları Çizelge 3'de ve Şekil 2'de gösterilmektedir. Bu çizelgede modellerin genel performansını değerlendirmek amacıyla P, R ve F1 puanlarının ağırlıklı ortalamaları ve ACC değerleri verilmektedir. Şekil 2'de ise Çizelge 1'deki modellere ait en yüksek F-1 puanı ağırlıklı ortalamaları karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Çizelge 3'de de görüldüğü gibi P ve R parametrelerinin ağırlıklı ortalamaları ve ACC değerleri çok ayırt edici değildir. Modellerin genel performansını belirlemek için bu performans

Çizelge 3. DSA modellerinin parametreleri ve sınıflandırma performansları (Parameters of DNN models and classification performances)

Model Kodu	Optimizasyon Algoritması (Optimizers)	Aktivasyon Fonksiyonu (Activation)	Kayıp Fonksiyonu (Loss)	Precision(P) Ağırlıklı Ortalama	Recall (R) Ağırlıklı Ortalama	F1 Puanı Ağırlıklı Ortalama	Accuracy (ACC)	Epochs
DSA-1	Adadelta	Elu	Categorical crossentropy	1	1	1	1	300
DSA-2	RMSprop	Tanh	Mean absolute error	0.96	0.95	0.952	0.95	300
DSA-3	Adam	Linear	Categorical crossentropy	0.96	0.95	0.951	0.95	150
	RMSprop	Elu	Mean square error	0.96	0.95	0.951	0.95	50
	Adamax	Linear	Mean absolute error	0.96	0.95	0.951	0.95	300
	Adamax	Softsign	Mean absolute error	0.96	0.95	0.951	0.95	50
	Adamax	Relu	Mean square error	0.96	0.95	0.951	0.95	300
	RMSprop	Softplus	Categorical crossentropy	0.96	0.95	0.951	0.95	150
DSA-4	Adamax	Tanh	Categorical crossentropy	0.96	0.95	0.950	0.95	50
DSA-5	Adamax	Linear	Mean square error	1	0.90	0.946	0.90	50
	Adadelta	Sigmoid	Categorical crossentropy	1	0.90	0.946	0.90	150
	Adadelta	Hard Sigmoid	Categorical crossentropy	1	0.90	0.946	0.90	300
DSA-6	Adam	Softsign	Mean square error	1	0.90	0.936	0.90	50
DSA-7	Adamax	Softplus	Mean square error	0.96	0.90	0.925	0.90	200
	RMSprop	Hard Sigmoid	Mean square error	0.96	0.90	0.925	0.90	300
DSA-8	RMSprop	Sigmoid	Mean square error	0.95	0.86	0.888	0.85	200

ölçütlerinden en ayırt edicisi F1 puanıdır. Bu nedenle modellerin genelinde sınıflandırma performansını test etmek için F1 puanı kullanılmıştır. Ancak, modellerin öz bakım problemlerine göre sınıflandırma performansları ayrı, ayrı değerlendirilirken P, R, F1 puanları ve karmaşıklık matrisleri kullanılmış ve buna göre irdelenmiştir.



Şekil 2. DSA modelleri ve F1 puanı ağırlıklı ortalamaları (DNN models and F1 points weighted average)

Çizelge 3 ve Şekil 2'deki F1 puanlarının ağırlıklı ortalamasına göre en iyi sınıflandırma performansı DSA-1 modeline aittir. DSA-1 modelinin test verileri için karmaşıklık matrisi ve her sınıf için P, R, ve F1 puanı değerleri Çizelge 4'de verilmektedir.

Çizelge 4. DSA-1 modelinin test verileri için karmaşıklık matrisi ve performans metrikleri (The complexity matrix and performance metrics of the DSA-1 model for test data)

Gerçek Değerler	Tahmin Değerleri							F1 Puanı Ağırlıklı Ortalama
	Problem Kodu	C-2	C-4	C-6	C-7	P	R	
C-2	4	0	0	0	1	1	1	1
C-4	0	4	0	0	1	1	1	
C-6	0	0	8	0	1	1	1	
C-7	0	0	0	5	1	1	1	

Çizelge 4'de de görüldüğü gibi Adamax optimizasyon algoritmasını, Elu aktivasyon fonksiyonunu ve Categorical crossentropy kayıp fonksiyonunu kullanan DSA-1 modeli hatasız olarak test verilerini sınıflandırmıştır. Her bir öz bakım problemi için performans metriklerine bakıldığında bütün problemlere ait P, R ve F1 puanları 1'dir. Bu da modelin sınıflandırma performansının kusursuz olduğunu ve iyi eğitildiğini göstermektedir.

DSA-1 modeli en iyi sınıflandırma performansına sahip olduğundan dolayı bu modelin eğitim verilerini sınıflandırma performansı da önemlidir. Bu nedenle bu modele eğitim verileri giriş olarak verilmiş ve bu verileri sınıflandırma performansı Çizelge 5'de gösterilmiştir.

Çizelge 5'de de görüldüğü gibi DSA-1 modelinin eğitim verileri için sınıflandırma performansı test verilerinde olduğu gibi % 100'dür ve üst seviyededir.

Çizelge 5. DSA-1 modelinin eğitim verileri için karmaşıklık matrisi ve performans metrikleri (The complexity matrix and performance metrics of the DSA-1 model for training data)

Gerçek Değerler	Tahmin Değerleri							P	R	F1 Puanı	F1 Puanı Ağırlıklı Ortalama
	Problem Kodu	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6				
C-1	2	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
C-2	0	3	0	0	0	0	0	1	1	1	
C-3	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	
C-4	0	0	0	8	0	0	0	1	1	1	
C-5	0	0	0	0	3	0	0	1	1	1	
C-6	0	0	0	0	0	21	0	1	1	1	
C-7	0	0	0	0	0	0	11	1	1	1	

Ayrıca en iyi model olan DSA-1 modelinin performansını farklı test verileri ile doğrulamak amacıyla veri seti rastgele olarak sırasıyla [2-10] aralığında eşit parçalara bölünmüştür (K-Fold). Daha sonra her parça için model performans metrikleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre modelin sınıflandırma performansının değişmediği tespit edilmiştir (P=1, R=1, F1 puanı=1). Ayrıca DSA-1 modelinin %30'luk test veri setinde bulunmayan C-1, C-3 ve C-5 öz bakım problemlerini de doğru sınıflandırdığı tespit edilmiştir. Tüm veri setlerinden elde edilen karmaşıklık matrislerinin ve performans metriklerinin çalışma kapsamında ayrıntılı olarak verilmesi mümkün olmadığı için sadece üç parçaya bölünen (3-Fold) veri setleri için DSA-1 modelinin sınıflandırma performansı Çizelge 6'da gösterilmektedir.

Çizelge 6. DSA-1 modelinin 3-fold ile bölünen veri setleri için sınıflandırma performansı (Classification performance for data sets divided by 3-fold of the DSA-1 model)

Gerçek Değerler	Tahmin Değerleri							P	R	F1 Puanı	F1 Puanı Ağırlıklı Ortalama
	Problem Kodu	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6				
C-1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
C-2	0	2	0	0	0	0	0	1	1	1	
C-3	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	
C-4	0	0	0	4	0	0	0	1	1	1	
C-5	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	
C-6	0	0	0	0	0	10	0	1	1	1	
C-7	0	0	0	0	0	0	4	1	1	1	

Gerçek Değerler	Tahmin Değerleri							P	R	F1 Puanı	F1 Puanı Ağırlıklı Ortalama
	Problem Kodu	C-1	C-2	C-4	C-5	C-6	C-7				
C-1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
C-2	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	
C-4	0	0	4	0	0	0	0	1	1	1	
C-5	0	0	0	2	0	0	0	1	1	1	
C-6	0	0	0	0	11	0	0	1	1	1	
C-7	0	0	0	0	0	5	1	1	1	1	

Gerçek Değerler	Tahmin Değerleri							P	R	F1 Puanı	F1 Puanı Ağırlıklı Ortalama
	Problem Kodu	C-2	C-4	C-6	C-7						
C-2	4	0	0	0	1	1	1	1	1	1	
C-4	0	4	0	0	1	1	1	1	1		
C-6	0	0	8	0	1	1	1	1	1		
C-7	0	0	0	7	1	1	1	1	1		

İkinci en iyi sınıflandırma performansı DSA-2 modelinden elde edilmiştir. Bu modelde RMSprop optimizasyon algoritması, Tanh aktivasyon fonksiyonu ve Mean absolute error kayıp fonksiyonu kullanılmıştır. Bu modele ait karmaşıklık matrisi ve her sınıf için P, R, ve F1 puanı değerleri Çizelge 7’de verilmektedir.

Çizelge 7. DSA-2 modelinin test verileri için karmaşıklık matrisi ve performans metrikleri (The complexity matrix and performance metrics of the DSA-2 model for test data)

Gerçek Değerler	Tahmin Değerleri				P	R	F1 Puanı	F1 Puanı Ağırlıklı Ortalama
	Problem Kodu	C-2	C-4	C-6				
C-2	4	0	0	0	1	1	1	0.952
C-4	0	4	0	0	0.80	1	0.89	
C-6	0	0	8	0	1	1	1	
C-7	0	1	0	4	1	0.80	0.89	

Çizelge 7’de de görüldüğü gibi C-4’ün P katsayısı ve C-7’nin R katsayısı 0.80 olarak hesaplanmıştır. P ve R parametresine bağlı olan F1 puanı ise C-4 ve C-7 için 0.89 olarak hesaplanmıştır. C-4 için P katsayısının düşük olması, C-4 olarak sınıflandırılmaması gereken bazı örneklerin olduğunu göstermektedir. Ayrıca C-7 için R katsayısının düşük olması C-7 olarak sınıflandırılması gereken tüm örneklerin doğru bir şekilde sınıflandırılmadığı anlamına gelmektedir. Bu durum C-4 ve C-7’nin F1 puanlarından da görülmektedir. Doğru sınıflandırılmayan ya da sapma gösteren örneklerin sayısını belirlemek için karmaşıklık matrisine bakılmalıdır. Bu matrise göre C-7 olarak sınıflandırılması gereken bir örnek C-4 olarak sınıflandırılmıştır. Yani DSA-2 modelinde bir örnek hatalı sonuç vermiştir. Modele ait F1 puanlarının ağırlıklı ortalaması ise 0.952’dir. Bu açıdan bakıldığında bu modelin de sınıflandırma performansının yüksek olduğu söylenebilir.

Üçüncü en iyi performans ise DSA-3 modellerinde elde edilmiştir. DSA-3 modelleri optimizasyon algoritması, aktivasyon fonksiyonu ve kayıp fonksiyonu eşleşmeleri birbirinden farklı olan 8 modeli kapsamaktadır. Bu modellerin optimizasyon algoritması, aktivasyon fonksiyonu ve kayıp fonksiyonu kombinasyonları bir birinden farklı olmasına karşın sınıflandırma performansları benzerdir. Bu modellerin tümü için benzer olan karmaşıklık matrisi ve her sınıf için P, R, ve F1 puanı değerleri Çizelge 8’de verilmektedir.

Çizelge 8’e göre C-2 sınıfının R değeri 0.75, C-7 sınıfının P değeri ise 0.83 olarak hesaplanmıştır. Yani bu değerlerden de anlaşılacağı üzere diğer sınıflardan C-7’ye sapma olmuş ve C-2 için de tüm veriler doğru sınıflandırılmamıştır. Doğru sınıflandırılmayan

verilerin sayısı karmaşıklık matrisinde açıkça görülmektedir. C-2 sınıfına ait bir örnek C-7 olarak sınıflandırılmıştır. Modellerin geneline ait F-1 puanı ağırlıklı ortalamaları ise 0.951 olarak hesaplanmıştır. Bu değerlere bakıldığında DSA-3 modellerinin sınıflandırma performanslarının yeterli düzeyde olduğu söylenebilir.

Çizelge 8. DSA-3 modellerinin test verileri için karmaşıklık matrisi ve performans metrikleri (The complexity matrix and performance metrics of the DSA-3 model for test data)

Gerçek Değerler	Tahmin Değerleri				P	R	F1 Puanı	F1 Puanı Ağırlıklı Ortalama
	Problem Kodu	C-2	C-4	C-6				
C-2	3	0	0	1	1	0.75	0.86	0.951
C-4	0	4	0	0	1	1	1	
C-6	0	0	8	0	1	1	1	
C-7	0	0	0	5	0.83	1	0.91	

Bunun yanı sıra modellerin geçerliliğini artırmak için en iyi üç model üzerinde (DSA-1, DSA-2 ve DSA-3) 10-fold çapraz doğrulama yöntemi ile eğitim ve test işlemi gerçekleştirilmiştir. Ortalama çapraz doğrulama ACC değerleri sırasıyla %85.71, % 85.71 ve % 87.14 olarak hesaplanmıştır. Modellerin her fold’da elde edilen ACC değerleri Çizelge 9’da gösterilmektedir. Bu değerler Putatunda [13] tarafından SCADI veri seti üzerinde geliştirilen ve 10-fold çapraz doğrulama uygulanan derin öğrenme modelinin ortalama çapraz doğrulama ACC değerinden (%84.29) daha yüksektir. Yine, Islam ve arkadaşları [11] tarafından SCADI veri seti üzerinde yapılan ve 5-fold çapraz doğrulama uygulanan destek vektör makinesi modelinin ortalama çapraz doğrulama ACC değerinden (%84.29) daha yüksektir. Benzer şekilde, Le ve Baik [10] tarafından SCADI veri seti üzerinde aşırı gradyan artırma (extreme gradient boosting) algoritması kullanılarak geliştirilen ve %85.4 doğruluk oranında sınıflandırma performansına sahip olan modelden daha yüksek sınıflandırma performansına sahiptir. Bunun yanı sıra, Choudhury [12] tarafından SCADI veri seti üzerinde geliştirilen ve 10-fold çapraz doğrulama uygulanan Randoom Forest modelinin çapraz doğrulama ACC değerinden (%84.75) daha yüksektir. Ayrıca, bu çalışmada kullanılan veri setini ortaya koyan Zarchi ve ark. [1] geliştirdikleri YSA modelinin ortalama çapraz doğrulama ACC değerinden de (%83.1) daha yüksek bir değere sahiptir. Yani, DSA-1, DSA-2 ve DSA-3 modelleri yapılan literatür taramasına göre SCADI veri seti üzerinde yapılan diğer çalışmalara göre öz bakım problemlerini daha iyi sınıflandırmaktadır.

Çizelge 9. Modellerin 10-fold accuracy değerleri (10-fold accuracy values of models)

Model	Fold 1	Fold 2	Fold 3	Fold 4	Fold 5	Fold 6	Fold 7	Fold 8	Fold 9	Fold 10	Ortalama
DSA-1	85.71	100	100	85.71	85.71	71.43	71.43	100	85.71	71.43	85.71
DSA-2	85.71	100	100	100	85.71	71.43	71.43	100	85.71	57.14	85.71
DSA-3	85.71	100	100	100	85.71	71.43	71.43	100	85.71	71.43	87.14

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışma kapsamında geliştirilen DSA-1 modeli fiziksel ve motor engelli çocukların öz bakım problemlerini hatasız bir şekilde tahmin ederken DSA-2 ve DSA-3 modelleri çok küçük bir hata ile tahmin etmektedir. Bu nedenle geliştirilen makine öğrenmesi modellerinin öz bakım problemlerini tahmin etmede etkili olduğu söylenebilir. Gerek veri setinin %70 ve %30 bölünmesiyle elde edilen modeller gerekse 10-fold çapraz doğrulama yöntemi ile geliştirilen modeller yapılan literatür taramasına göre SCADI veri seti üzerinde yapılan diğer çalışmalara göre öz bakım problemlerini daha iyi sınıflandırmaktadır. Geliştirilen DSA modelleri mesleki terapistlerin öz bakım sorunlarını teşhis ve tedavi etmelerine yardımcı olabilir. Özellikle teşhiste doğrulayıcı bir araç olarak kullanılabilir. Fiziksel ve motor engelli çocukların öz bakım problemlerinin teşhisinde DSA'ların kullanılması etkili bir yöntemdir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Zarchi M.S., Bushehri S.M.M. F. and Dehghanizadeh M., "SCADI: A standard dataset for self-care problems classification of children with physical and motor disability", *International Journal of Medical Informatics*, 114: 81-87, (2018).
- [2] Lucas-Carrasco R., Eser E., Hao Y., McPherson K.M., Green A., Kullmann L., Group T.W.D., "The quality of care and support (QOCS) for people with disability scale: development and psychometric properties", *Res. Dev. Disabil.*, 32(3):1212-1225, (2011).
- [3] Brown R. L., Turner R. J., "Physical disability and depression: clarifying racial/ ethnic contrasts", *Journal of Aging and Health*, 22 (7): 977-1000, (2010).
- [4] Tsai C-F., Guo H-R., Tseng Y-C., Lai D-C., "Sex and geographic differences in the prevalence of reported childhood motor disability and their trends in Taiwan", *BioMed Research International*, (2018), Article ID 6754230, 7 pages, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/6754230>.
- [5] Chang Y.-J., Chen S.-F., Huang J.-D., "A Kinect-based system for physical rehabilitation: A pilot study for young adults with motor disabilities", *Research in Developmental Disabilities*, 32(6): 2566-2570, (2011).
- [6] Yeh Y.L., Hou T.H., Chang W.Y., "An intelligent model for the classification of children's occupational therapy problems", *Expert Syst. Appl.*, 39(5): 5233-5242, (2012).
- [7] Lollar D.J., Simeonsson R.J., "Diagnosis to function: classification for children and youths", *J. Dev. Behav. Pediatrics*, 26(4):323-330, (2005).
- [8] Keawutan P., Bell K. L., Oftedal S., Davies P. S. W., Ware R. S., Boyd R. N., "Relationship between habitual physical activity, motor capacity, and capability in children with cerebral palsy aged 4-5 years across all functional abilities", *Disability and Health Journal*, 11(4): 632-636, (2018). <https://doi.org/10.1016/j.dhjo.2018.03.006>.
- [9] Organization, W.H., International Classification of Functioning, Disability, and Health: Children & Youth Version: ICF-CY, World Health Organization, 2007.
- [10] Le T., Baik S. W., A robust framework for self-care problem identification for children with disability, *Symmetry*, 11(1), 1-12, (2019).
- [11] Islam B., Ashafuddula N. I., Mahmud, F., A machine learning approach to detect self-care problems of children with physical and motor disability, *21st International Conference of Computer and Information Technology (ICCIT)*, 21-23 December, (2018). doi: 10.1109/ICCITECHN.2018.8631960
- [12] Choudhury A., Classification of functioning, disability, and health: icf-cy self care (scadi dataset) using predictive analytics, *CoRR abs/1901.00756*, (2018).
- [13] Putatunda S., Care2Vec: A Deep learning approach for the classification of self-care problems in physically disabled children, *arXiv:1812.00715v1*, 1-14, (2018).
- [14] Wu T. K., Huang S.C., Meng Y.R., "Identifying and diagnosing students with learning disabilities using ANN and SVM", *International Joint Conference on Neural Networks*, IJCNN'06, IEEE, 4387-4394, (2006).
- [15] David J.M., Balakrishnan K., "Prediction of learning disabilities in school-age children using SVM and decision tree", *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, 2(2):829-835, (2011).
- [16] Muangnak N., Pukdee W., Hengsanunkun T., "Classification students with learning disabilities using Naïve Bayes Classifier and Decision Tree", *The 6th International Conference on Networked Computing and Advanced Information Management*, Seoul, 189-192, (2010).
- [17] Buduma N., Lacascio N., "Fundamentals of Deep Learning", *O'Reilly Media*, United States of America, (2017).
- [18] Jia F., Lei Y., Lin J., Zhou X., Lu N., "Deep neural networks: A promising tool for fault characteristic mining and intelligent diagnosis of rotating machinery with massive data", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 72-73:303-315, (2016). doi:10.1016/j.ymsp.2015.10.025.
- [19] Wang B., Luo X., Li Z., Zhu W., Shi Z., Osher S.J., "Deep neural nets with interpolating function as output activation", *arXiv preprint arXiv:1802.00168*, (2018)
- [20] Ding B., Qian H., Zhou J., "Activation functions and their characteristics in deep neural networks", *Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, Shenyang, 1836-1841, (2018). doi: 10.1109/CCDC.2018.8407425
- [21] An W., Wang H., Sun Q., Xu J., Dai Q., Zhang L., "A PID controller approach for stochastic optimization of deep networks", *The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 8522-8531, (2018).
- [22] Schmidhuber J., "Deep learning in neural networks: An overview", *Neural Networks*, 61:85-117, (2015).
- [23] Kızrak M. A., Bolata B., "Comprehensive survey of deep learning in crowd analysis", *International Journal of Informatics Technologies*, 11(3):263-286, (2018).
- [24] Prasetijo A. B., Isnanto R. R., Eridani D., Soetrisno Y. A. A., Arfan M., Sofwan A., "Hoax detection system on Indonesian news sites based on text classification using SVM and SGD", *4th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)*, Semarang, 45-49, (2017). doi: 10.1109/ICITACEE.2017.8257673
- [25] Fawcett T., "An Introduction to ROC analysis", *Pattern Recognition Letters*, 27(8): 861-874, (2006). doi:10.1016/j.patrec.2005.10.010.
- [26] Paix'ao W. R., Paix'ao T. M. , Costa M. C. B., Andrade J. O. , Pereira F. G., Komati K. S., "Texture classification of sea turtle shell based on color features: color

- histograms and chromaticity moments”, *International Journal of Artificial Intelligence and Applications (IJAIA)*, 9(2): 55-67, (2018). doi: 10.5121/ijaia.2018.9205
- [27] Sasaki Y., “The truth of the f-measure”, *Teach Tutor mater*, 1(5):1-5, 2007.
- [28] Davis J., Goadrich M., “The relationship between precision-recall and roc curves”, in *Proceedings of the 23rd international conference on Machine learning. ACM*, 233-240, (2006).
- [29] Eschner N., Weiser L., Häfner B., Lanza G., “Development of an acoustic process monitoring system for selective laser melting (SLM)”, *Solid Freeform Fabrication 2018: Proceedings of the 29th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference Reviewed Paper*, 2097-2117, (2018).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



Doğal ahşap taneni ile modifiye edilmiş bazı ağaç türlerinde çürümeye karşı direncin incelenmesi

Investigation on the decay of some wood type modified with natural wood tannin

Yazar(lar) (Author(s)): Gamzenur KASAP OKUT¹, Mustafa ALTINOK²

ORCID¹: 0000-0002-8441-8636

ORCID²: 0000-0002-2048-1994

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Kasap Okut G. ve Altınok M., “Doğal ahşap taneni ile modifiye edilmiş bazı ağaç türlerinde çürümeye karşı direncin incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 23(2): 343-350, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.526782

Doğal Ahşap Taneni ile Modifiye Edilmiş Bazı Ağaç Türlerinde Çürümeye Karşı Direncin İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Gamzenur KASAP OKUT, Mustafa ALTINOK*

Ağaççileri Endüstri Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 13.02.2019 ; Kabul/Accepted : 11.04.2019)

ÖZ

Bu çalışmada, doğal ahşap tanen çözeltisinin Sarıçam, kestane ve meşe türlerinde toprak altında bekletme sürecindeki çürümeye karşı etkisi incelenmiştir. Bu maksatla, TS 2472 ve TS 2479 standartları esas alınarak hazırlanan deney örnekleri, ceviz taneni çözeltisi ile 3 kat fırça, 6 kat fırça, 4 saat daldırma ve 8 saat daldırma yöntemiyle modifiye edilmiştir. Kontrol örnekleri hariç işlemsiz ve modifiye edilmiş örnekler bitkisel toprak içerisinde 1 yıl süreyle doğal yaşlandırmaya uygulanmıştır. Doğal yaşlandırmadan sonra ilgili standartlara göre örneklerin yoğunluk ve sertlikleri ölçülmüştür.

Sonuç olarak, her üç ahşap türü işlemsiz örneklerinde kontrol örneklerine göre toprak altında doğal yaşlandırmadan dolayı % 8'lik madde kaybı (yoğunluk düşüşü) ve % 30 sertlik azalması meydana gelmiştir. Ancak, modifiye edilmiş ve toprak altında doğal yaşlandırılmış örneklerde yoğunluk ve sertlik işlemsiz örnekler göre daha yüksek elde edilmiş ve doğal ceviz taneni çözeltisinin çürümeyi önlediği belirlenmiştir. Bu bağlamda en iyi sonuç ise, 8 saatlik daldırma yönteminde elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ahşap malzeme, ahşap modifikasyonu, ahşap çürümesi, koruyucu doğal tanen çözeltisi.

Investigation on the Decay of Some Wood Type Modified with Natural Wood Tannin

ABSTRACT

In this study, the effect of natural wood tannin solution against decay in Scotchpine, chestnut and oak species was investigated. For this purpose, the test specimens prepared on the basis of TS 2472 and TS 2479 standards were modified by walnut tannin solution with 3-fold brush, 6-fold brush, 4-hour immersion and 8-hour immersion method. Except for the control samples, untreated and modified samples were applied to natural aging for 1 year in vegetable soil. After natural aging, the density and Hardness of the samples were measured according to the relevant standards.

As a result, according to the control samples in all wood type untreated samples, 8% loss of Material (density decreased) and 30% Hardness decreased occurred due to natural aging under the soil. However, it was determined that natural walnut tannin solution prevented decay. In this constant, the best result was obtained in 8 hour immersion method.

Keywords: Wood material, wood modification, wood decay, protective natural tannin solution.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ağaç malzeme insan yaşamında önemli bir yere sahiptir. Kolay işlenmesi, sese karşı yalıtkan olması ve hafif olmasına rağmen direncinin yüksek olması diğer malzemelere göre estetik olması gibi birçok olumlu özellik ve avantajlarından dolayı ağaç malzemeye duyulan ihtiyaç ve kullanım alanı her geçen gün artmaktadır [1].

Ağaç malzemenin yukarıda belirtilen olumlu özelliklerinin yanı sıra organik bir malzeme olmasından kaynaklanan yanabilme özelliği, böcekler tarafından tahrip edilebilmesi, mantarlar tarafından çürütülebilmesi, havanın sıcaklık ve bağıl nemine bağlı olarak değişen denge rutubetine göre boyutlarının değişmesi ve güneş ışınlarının etkisiyle renginin solması (eskime) onun dezavantajları olarak kabul edilmektedir [2].

Dış mekânda mantarlar, böcekler, güneşin ultraviyole ışınları gibi etkilere maruz kalan ağaç malzemeyi korumak, ömrünü uzatmak ve fiziksel dayanımını artırmak önemlidir. Bu etkenlere karşı ağaç malzemeyi korumak için kullanılan en yaygın yöntemlerden birisi emprenye (modifikasyon) dir [3].

Ale'n ve ark. (2002), yaptıkları bir çalışmada, Ladin (*Picea abies* L.) odununu 2 saat ile 8 saat 180-225 °C sıcaklıklarda ısıtma işlemi (modifikasyona) tabi tutmuşlardır. Deney sonucunda, modifiye edilmiş örneklerin kimyasal incelemelerinde ısıtma süresince karbonhidratların ligninden daha fazla bozucu reaksiyonlara maruz kaldığı belirlenmiştir [4].

Krom içerikli bazı emprenye maddeleri ile ön emprenye işlemi yapılan iğne yapraklı ağaçlarda emprenye sonrası uygulanan üst yüzey işleminin dış ortam koşullarında üst yüzey işlem maddelerinin ömrünü yaklaşık 2 kattan daha fazla artırdığı bildirilmiştir [5].

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

Kayın ve kavak ağaçlarının, Protim-WR 230, Tanalith-C ve Celcure AC 500 emprenye maddeleri ile emprenye edildiği ve Desmodur-VTKA, Üre-formaldehit ve polivilasetat tutkalları ile yapıştırıldığı çalışmada, emprenye nin yoğunluğu artırdığı ve Tanalith-C emprenye maddesinin yapışma direncini en az etkilediği tespit edilmiştir [6].

TS 788-1 EN 599 esaslarına göre yapılmış emprenye işleminin, ağaç malzemedeki yapışma ve eğilme direncini düşürdüğü, yoğunluğunu artırdığı, sarıçamda sertliği düşürdüğü, kızılçamda sertliği artırdığı bildirilmiştir [7].

Zehirli emprenye maddelerinin kullanımına ilişkin devam eden baskı ve yasaklar, odun koruma endüstrisini organik ya da inorganik formülasyonlara dayalı odun koruyucu maddeleri kullanmaya ve geliştirmeye zorunlu kılmıştır. Bunların yanında son yıllarda gündeme gelen doğal koruyucu maddelerden olan bitkisel ekstraktlar, tanenler, bitkilerden elde edilen sıvı yağlar önemli bir yer tutmaya başlamıştır. Yağlar oduna su itici özellik kazandırarak hem odunun rutubetinin artmasını engellemiş hem de düşük odun rutubeti sağladığı için odunda mantar ve bakteri oluşumunu engellemiştir [8].

Birçok odun korucu madde sentetik veya inorganik olduğundan dolayı çevreye zararı büyüktür. Bu yüzden son yıllarda artan çevresel baskılar ve yaptırımlar yenilenebilir kaynaklar ile çevre dostu ve atıl hale geldiklerinde biyolojik olarak bozunabilir kimyasalların kullanılmasını zorunlu kılmıştır. Bu odun koruma maddelerinin kullanılmasıyla gerek böceğe gerekse mantara karşı oduna dayanıklılık kazandırmaktadır. Bunlar genel olarak bitkisel yağlar ve bitkisel ekstraktlardır.

Olteanu (1997) araştırmada, kestane odunu ve diğer bazı odun kabuğu karışımından elde edilen bitkisel ekstraktların düşük karışımlarında (%1 -2) dahi mantarlara karşı iyi direnç sağladığı sonucunu elde etmiştir. Ladin odunu, kestane kabuğu ve meyvesi, köknar odunu ve kabuğundan elde edilen ekstraktların da %4 ve %5 'lik karışımlarının mantarlara karşı koruyucu etki sağladığını belirtmiştir [9].

Laks (1991) çürümeye karşı ağaçlarda bulunan doğal savunma sistemlerinin ağaçlarda zarar sonucu oluşan hastalıklı bölgenin etrafında toksik bazı kimyasalların çoğaldığını belirtmiştir. Çoğu ağaç türlerinin öz odunlarında mevcut olan toksik ekstraktiflerin ve patojen saldırılara karşı fiziksel bir bariyer olan kabuktaki suberinin pasif savunma mekanizmaları olduğunu açıklamıştır [10].

Smith ve ark. (1989), yalancı akasya (*Robinia pseudoacacia*) özodun örneklerini hekzan, etil asetat, metanol ve sulu aseton içeren bir dizi çözücüyle sırasıyla ekstraksiyona tabi tutarak, normalde sağlam olan odunları kahverengi çürüklük mantarı *Gloeophyllum trabeum* etkisine hassas hale getirilmiştir. Yalancı akasyadan elde edilen ekstraktlar normalde dayanıksız olan titrek kavak (*Populus grandidentata*) odun örneklerinde çürümeye karşı yüksek seviyede bir

koruyucu etki göstermiştir. Denemelerde en fazla direnci metanol ekstraktları göstermiştir [11].

Yamamoto ve Hong (1988) Chengal odununun sıcak su ve metanol ekstraktları ile emprenye edilmiş kauçuk odunlarında ağırlık kaybı %13-18 iken kontrol örneklerindeki ağırlık kaybı %53 olmuştur. Ekstraktlarla emprenyeli kauçuk odunlarında kontrol örneklerine göre %35-40 daha az ağırlık kaybı meydana gelmiştir [12].

Tall yağı ile emprenye edilen odunun 5 yıllık arazi testleri sonrasında dayanımı CCA ya da kreozota eşdeğer bulunmuştur [13]. Bunun yanı sıra palm, fındık, mısır, soya, kanola, ayçiçeği, koko ve hindistancevizi gibi bitkisel yağların kullanıldığı ve su itici etkinliğin sağlandığı çalışmalar da rapor edilmiştir [13, 14, 15].

Bitkisel yağlar, çevreye karşı zehirli etkilerinin olmaması, dünya genelinde geniş boyutlarda üretilebilir ve kısmen ekonomik olması gibi yararlarla sahiptir [15]. Bitkisel yağların yanı sıra kullanılmış kızartmalık atık yağların emprenyesi ile oduna iyi bir su itici etkinlik özelliği kazandırıldığı ve atık yağın potansiyel bir emprenye maddesi olarak değerlendirilebileceği de belirtilmiştir [16].

Yukarıda verilen literatürde ahşap koruma ve emprenye ile ilgili çalışmalar yer almakta, ancak bu çalışmada kullanılacak doğal tanen ahşap koruyucunun çalışmalarda yaygın olarak yer almadığı görülmektedir. Bu nedenle, bu araştırmada çevre dostu doğal ahşap koruyucu tanen çözeltisinin toprak altında bekletme sürecinde ahşabın çürümeye karşı etkisi inceleme konusu seçilmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

2.1. Materyal (Material)

Ahşap malzeme: Bu araştırmada kullanılan I. Sınıf kusursuz Sarıçam, kestane ve meşe kereste Ağaççileri Sanayi Sitesinden rasgele yöntemle temin edilmiştir.

Doğal tanen çözeltisi: Türkiye' de yaygın olarak yetişen, meyvesinin yararlarından dolayı çeşitli devlet kurumlarınca daha da yaygınlaşması teşvik edilen, ceviz kabuğu ve yapraklarından ekstraksiyon yöntemi ile elde edilen, çevreye zararsız doğal koruyucu çözeltisi araştırmada modifikasyon maddesi olarak kullanılmıştır. Çözelti, üretici firmadan sıvı olarak temin edilmiştir. Ceviz kabuğu ve yaprakları bol miktarda tanen maddesi içerir. Doğal olarak tanen maddesi ihtiva eden çam, meşe, kestane ve ceviz ağacı odunları doğal ortam şartlarına diğer ağaç türlerinin odunlarından daha çok dayanabildiği bilinmektedir. Tanen maddesi, geleneksel olarak dericilikte sepi maddesi olarak da kullanılmaktadır.

Bu çözeltinin toprak içi mikroorganizmalara karşı koruyuculuğu bu araştırma kapsamında incelenmiştir.

2.2. Ölçüm ve Deneysel Örneklerinin Hazırlanması (Measurement and Preparation of Test Samples)

Araştırmada yer alan her üç ahşap türünden yoğunluk ve sertlik belirleme örnekleri: TS 2472 ve TS 2479 standartları esas alınarak, kontrol düzeyinde ve toprak altı bekletme süreci için; işlemsiz, 3 kat fırça, 6 kat fırça, 4 saat daldırma, 8 saat daldırma düzeylerinde 10' ar adet ve toplamda 360 adet olarak hazırlanmıştır [17,18]. Kontrol ve işlemsiz örnekler hariç diğer örneklere fırça ve daldırma yöntemleri ile doğal tanen çözeltisi muamele edilmiştir. Kontrol, işlemsiz ve modifiye edilmiş örnekler 20 °C ± 2 °C sıcaklık, %65 ± %5 nispi nem şartlarında ki cihazda toprak altında bekletmeden önce ve sonra iklimlendirme işlemine tutulmuştur.

2.3. İstatistiksel Değerlendirme (Statistical Evaluation)

Kontrol örnekleri ve toprak altında çürüme süreci için işlemsiz, 3 kat fırça, 6 kat fırça, 4 saat daldırma, 8 saat daldırma uygulamalı işlem görmüş (modifiye edilmiş) örneklerde sonuç değerlerine, yoğunluk ve sertlik özellikleri üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla, çoklu varyans analizi uygulanmıştır. Varyans kaynaklarının karşılıklı etkileşimlerinin $\alpha = 0,05$ 'e göre anlamlı çıkması halinde, bunlara Duncan testi uygulanmıştır.

3. BULGULAR (RESULTS)

3 ahşap türünde (Sarıçam, kestane ve meşe) ve 6 modifikasyon düzeyi (işlem çeşidi: kontrol, işlemsiz, 3 kat fırça, 6 kat fırça, 4 saat daldırma, 8 saat daldırma) formatında doğal ahşap koruyucu çözelti ile modifikasyon uygulamasının 1 yıl süreyle toprak altındaki doğal yaşlandırma sürecinde ahşap malzemenin bazı fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimi etkileme durumu incelenmiştir. Bu araştırmadaki retensiyon miktarı, yoğunluk ve sertlik özelliklerindeki değişime ait bulgular aşağıda verilmiştir.

3.1. Retensiyon Miktarı (Retention Amount)

3 ahşap türünde ve kontrol ve işlemsiz hariç 4 modifikasyon düzeyi (işlem çeşidi: 3 kat fırça uygulaması, 6 kat fırça uygulaması, 4 saat daldırma, 8

Çizelge 1. Doğal koruyucu ile modifiye edilmiş ahşap türlerinde tespit edilen retensiyon miktarları (g) (Retention amount determined by natural preservative and modified wood species)

MODİFİKASYON DÜZEYİ	ÇAM	KESTANE	MEŞE
3 kat fırça uygulaması	0,334	0,254	0,158
6 kat fırça uygulaması	0,444	0,706	0,282
4 saat daldırma uygulaması	0,349	0,477	0,212
8 saat daldırma uygulaması	0,555	0,721	0,423

saat daldırma) formatında doğal ahşap koruyucu çözelti ile modifikasyon uygulamasının sonunda deney örneklerinde tutunan doğal ahşap koruyucu miktarları Çizelge 1'de verildiği gibi tespit edilmiştir.

Çizelge 1'e göre en fazla koruyucu çözelti tutunması (retensiyonu) tüm ahşap türlerinde 8 saatlik daldırma uygulamasında, daha sonra sırasıyla 6 kat fırça, 4 saat daldırma ve en az 3 kat fırça uygulamasında tespit edilmiştir. Bu değerlere ait grafik Şekil 1' de verilmiştir.

3.2. Yoğunluk Değişimi (Density Change)

Sarıçam, kestane ve sapsız meşede doğal ahşap taneni çözeltisi ile 6 farklı işlem düzeyinde örneklerle uygulanan koruyucu modifikasyonun 1 yıllık toprak altında gerçekleştirilen doğal yaşlandırma sürecindeki yoğunluk değişimine ait değerler incelenmiştir. Bir yıl süreyle toprak altında doğal yaşlandırma sürecinde tutulmuş 5 farklı düzeydeki (kontrol örnekleri hariç) örneklerde TS 2472 standardına göre yoğunluk değerlerine uygulanan çoklu varyans analizi sonuçları Çizelge 2' de verilmiştir.

Çizelge 2'ye göre yoğunluk değişiminde tüm faktörlerin (Ahşap tür: A, Modifikasyon: B, Ahşap türü x

Çizelge 2. Doğal koruyucu ile modifiye edilmiş ahşap türlerinde tespit edilen retensiyon miktarları (g) (Retention amount determined by natural preservative and modified wood species)

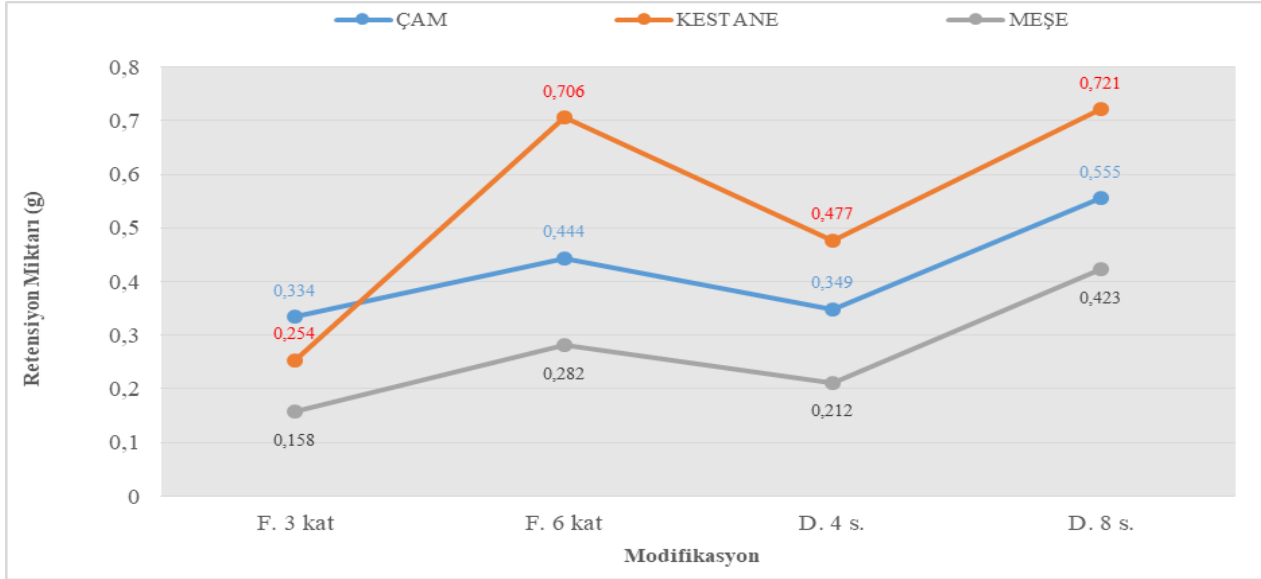
K-Değeri	Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama	F-Değeri	Prob.
1	Tekerrür	9	0,025	0,003	8,5314	0,0000
2	Faktör A	2	2,041	1,020	3162,6397	0,0000
3	Faktör B	5	0,117	0,023	72,2752	0,0000
4	AxB	10	0,018	0,002	5,6346	0,0000
5	Hata	153	0,049	0,000		
Toplam						

Çizelge 3. Ahşap türüne göre yoğunluk değerlerine ait homojenlik grupları (Homogeneity groups of density values according to wood type)

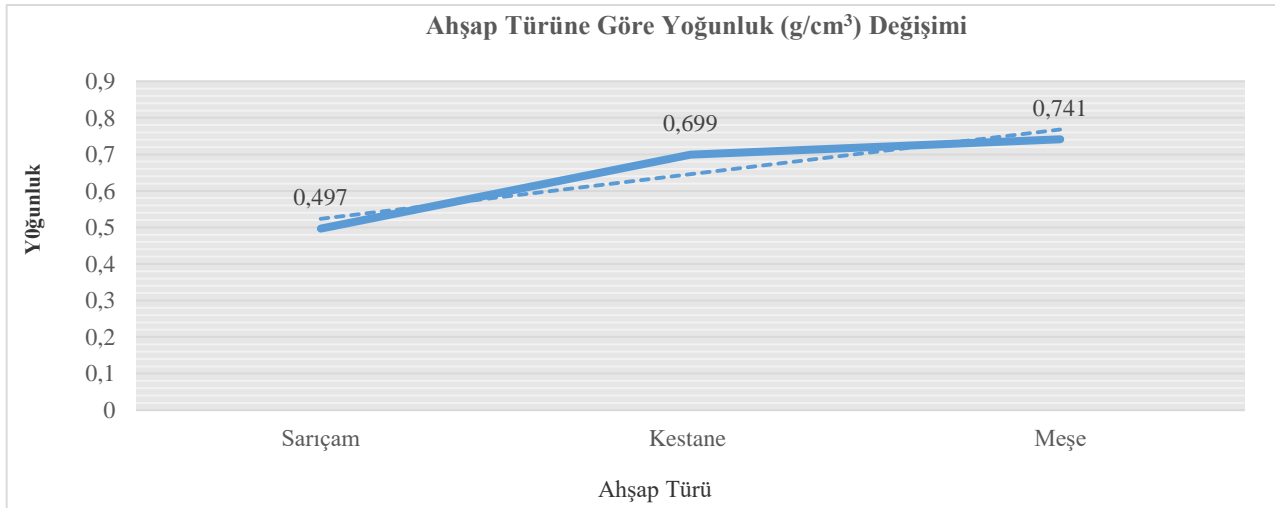
Ahşap Türü	Yoğunluk Ortalaması (g/cm ³)	Homojenlik Grubu
Sarıçam	0,497	C
Kestane	0,699	B
Meşe	0,741	A
Lsd	0,0001291	

Modifikasyon İkili Etkileşimi: AB) etkisinin anlamlı olduğu, bu faktörlerden değişimi en çok ahşap türünün, daha sonra sırasıyla modifikasyon faktörü ve ahşap türü-modifikasyon ikili etkileşimi faktörlerinin etkilediği görülmektedir. Ahşap türü düzeyinde yoğunluk değişiminin homojenlik grupları Çizelge 3' te verilmiştir.

Çizelge 3' e göre en büyük yoğunluk meşede 0,741 g/cm³, daha sonra sırasıyla kestanede 0,699 g/cm³ ve Sarıçamda 0,497 g/cm³ olarak bulunmuştur. Bunlara ait grafik Şekil 2' de verilmiştir.



Şekil 1. Doğal koruyucu ile modifiye edilmiş ahşap türlerinde retensiyon miktarları grafiği (Reprocessing amount of wood in natural preservative-modified wood type)



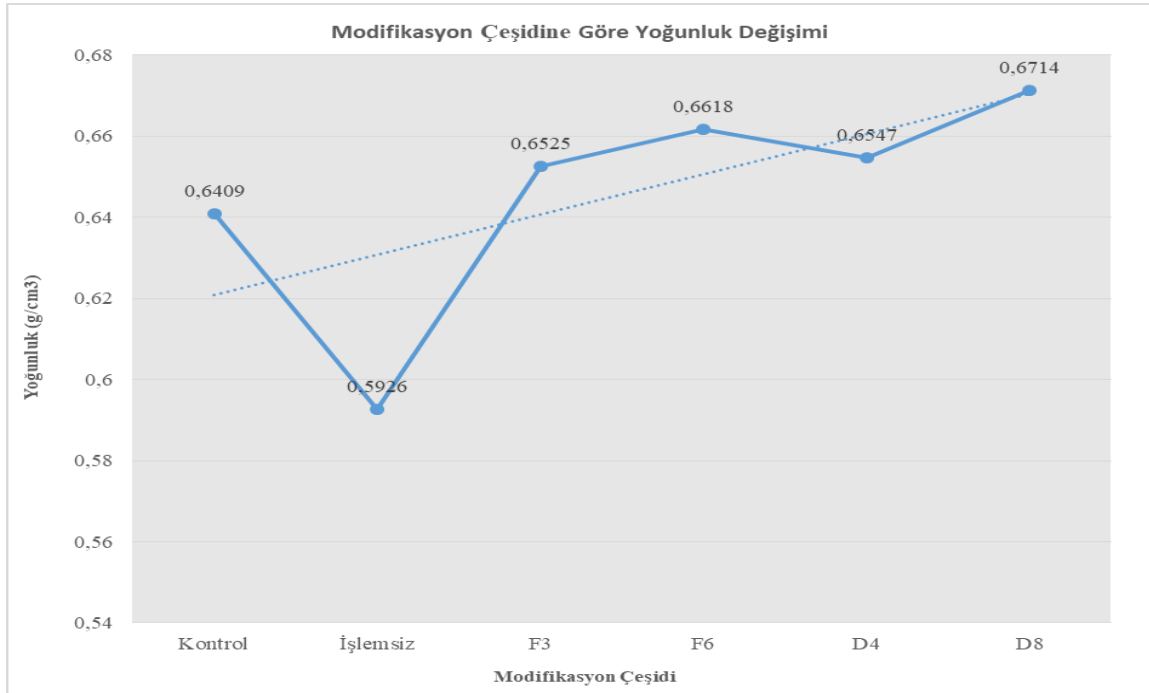
Şekil 2. Ahşap türüne göre yoğunluk değişim değerlerine ait grafik (Graph of density change values by wood type)

Çizelge 4. Modifikasyon çeşidine göre yoğunluk değerlerine ait homojenlik grupları (Homogeneity groups of density values according to the modification type)

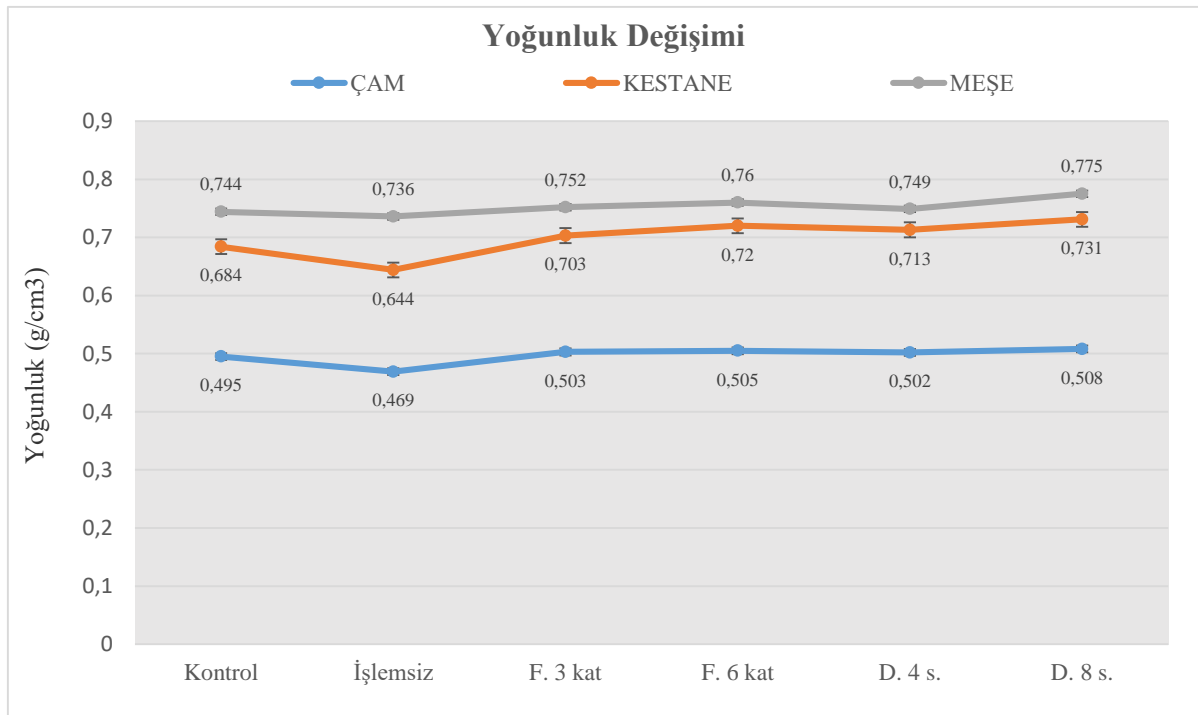
Modifikasyon çeşidi	Yoğunluk Ortalaması (g/cm ³)	Homojenlik Grubu
Kontrol	0,6409	E
İşlemsiz	0,5926	F
F3	0,6525	D
F6	0,6618	B
D4	0,6547	C
D8	0,6714	A
Lsd	0,0001826	

Çizelge 2'ye göre modifikasyon çeşidinin de yoğunluk değişimine anlamlı bir etkisinin olduğu görülmektedir. Modifikasyon çeşidi düzeyinde yoğunluk değişiminin homojenlik grupları Çizelge 4' de verilmiştir. Çizelge 4' e göre en büyük yoğunluk 8 saat daldırma düzeyinde 0,6714 g/cm³, en düşük yoğunluk işlemsiz düzeyinde 0,5926 g/cm³ olarak bulunmuştur. Kontrol düzeyindeki yoğunluk esas alındığında 1 yıl toprak altında bekletme sürecinde İşlemsiz örneklerin madde kaybına uğraması sebebiyle yoğunluğun düştüğü görülmektedir. Bunlara ait grafik Şekil 3' de verilmiştir.

Çizelge 2' ye göre ahşap türü ve modifikasyon çeşidi ikili etkileşiminin yoğunluk değişiminde anlamlı bir etkisinin olduğu görülmektedir. Ahşap türü - Modifikasyon çeşidi ikili etkileşim düzeyinde yoğunluk değişiminin homojenlik grupları Çizelge 5' de verilmiştir.



Şekil 3. Modifikasyon çeşidine göre yoğunluk değişim değerlerine ait grafik (Chart of density change values according to the modification type)



Şekil 4. Modifikasyon düzeyine göre yoğunluk değişimi grafiği (Density change graph according to the modification level)

Çizelge 5' e göre en büyük yoğunluk meşe 8 saat daldırma düzeyinde $0,775 \text{ g/cm}^3$, en düşük yoğunluk çam işlemsiz düzeyinde $0,469 \text{ g/cm}^3$ olarak bulunmuştur. Bunlara ait grafik Şekil 4' de verilmiştir. Şekil 4'e göre yoğunluk ağaç türü düzeyinde; en büyük meşede ($0,775 \text{ g/cm}^3$), sonra sırayla kestanede ($0,731 \text{ g/cm}^3$) ve çamda ($0,508 \text{ g/cm}^3$) elde edilmiştir. Bu yoğunluk değerleri toprak altında doğal yaşlanma sürecinde tutulan örneklerden elde edilen değerlerdir. Yoğunluk değişimi 1 yıllık doğal yaşlandırma sürecinde tutulmayan kontrol örneklerinin yoğunluğu esas alınarak değerlendirilmiştir. Buna göre, yaşlandırma sürecinde işlemsiz örneklerin en çok yoğunluk (madde) kaybederek değişime uğradığı tespit edilmiştir. 3-6 kat fırça ile modifikasyon uygulamalı ve 4-8 saatlik daldırma modifikasyon uygulamalı örneklerde hem yoğunluk artışı sağladığı ve hem de toprak altında 1 yıllık

Çizelge 5. Ahşap türü - Modifikasyon çeşidi ikili etkileşime göre yoğunluk değerlerine ait homojenlik grupları (Type of wood - Modification type homogeneity groups of density values according to double interaction)

Modifikasyon çeşidi	Yoğunluk Ortalaması (g/cm^3)	Homojenlik Grubu
Çam-Kontrol	0,495	J
Çam-İşlemsiz	0,469	IJ
Çam-F3	0,503	I
Çam-F6	0,505	I
Çam-D4	0,502	I
Çam-D8	0,508	I
Kestane-Kontrol	0,684	G
Kestane - İşlemsiz	0,644	HI
Kestane -F3	0,703	F
Kestane -F6	0,719	DE
Kestane -D4	0,713	DE
Kestane -D8	0,731	E
Meşe-Kontrol	0,744	D
Meşe - İşlemsiz	0,665	H
Meşe -F3	0,751	C
Meşe -F6	0,760	B
Meşe -D4	0,749	C
Meşe -D8	0,775	A
Lsd		0,013101

doğal yaşlandırma sürecinde tutulmalarına rağmen işlemsiz örnekler kadar madde kaybına uğramadıkları ve doğal tanen çözeltisinin madde kaybına (çürümeye) karşı koruyucu özelliğinin olduğu tespit edilmiştir.

3.3. Sertlik Değişimi (Hardness Change)

Doğal ahşap taneni çözeltisi ile 6 farklı işlem düzeyinde ahşap örneklerine uygulanan koruyucu modifikasyonun 1 yıllık toprak altında gerçekleştirilen doğal yaşlandırma sürecindeki sertlik değişimine ait değerler incelenmiştir. Bunlardan, bir yıl süreyle toprak altında doğal

Çizelge 6. Sertlik ortalamaları çoklu varyans analizi (Hardness average multiple variance analysis)

K-Değeri	Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama	F-Değeri	Prob.
1	Tekerrür	9	130,629	14,514	0,5076	0,0000
2	Faktör A	2	30510,143	15255,071	533,4574	0,0000
3	Faktör B	5	3808,656	761,731	26,6371	0,0723
4	AxB	10	503,486	50,349	50,3490	
5	Hata	153	4375,281	28,597	28,5970	
Toplam						

yaşlandırma sürecinde tutulmuş 5 farklı düzeydeki (kontrol örnekleri hariç) deney örneklerinin sertlik değerlerine uygulanan çoklu varyans analizi sonuçları Çizelge 6' da verilmiştir.

Çizelge 6' ya göre sertlik değişiminde ahşap türü ve modifikasyon faktörlerinin (Ahşap tür: A, Modifikasyon: B,) etkisinin anlamlı olduğu, bu faktörlerden değişimi en çok ahşap türünün, daha sonra modifikasyon faktörünün etkilediği görülmektedir.

Sertlik değişimi ahşap türü bakımından Şekil 5' de, modifikasyon bakımından Şekil 6' da verilmiştir.

Sertlik ahşap türü bakımından; en yüksek kestanede, daha sonra meşede ve en düşük çamda meydana geldiği tespit edilmiştir.

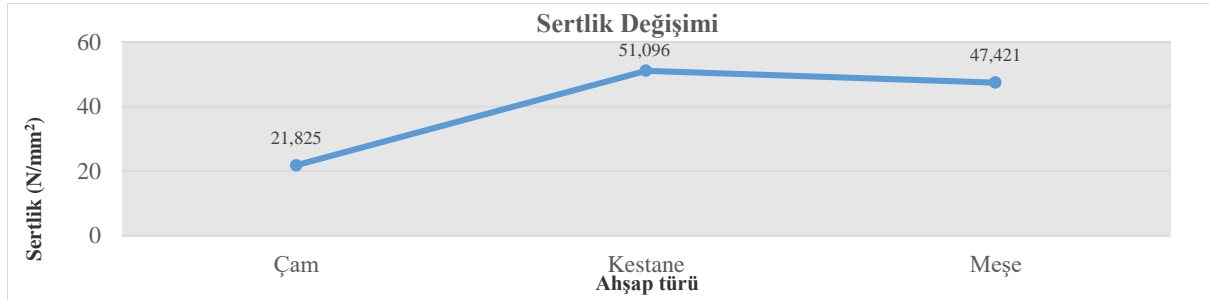
Sertlik modifikasyon bakımından; en düşük işlemsiz örneklerde toprak altında bekleme sürecinde koruyucusuz olmaları nedeniyle meydana geldiği görülmektedir. En yüksek sertlik miktarı ise; 8 saatlik daldırma ve 6 kat fırça uygulamalı örneklerde elde edilmiştir. Bu modifikasyon uygulamalarında ahşap malzemenin bünyesine daha çok koruyucu nüfuz ettiği ve toprak altında ahşabı daha iyi koruduğu tespit edilmiştir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (CONCLUSIONS AND DISCUSSION)

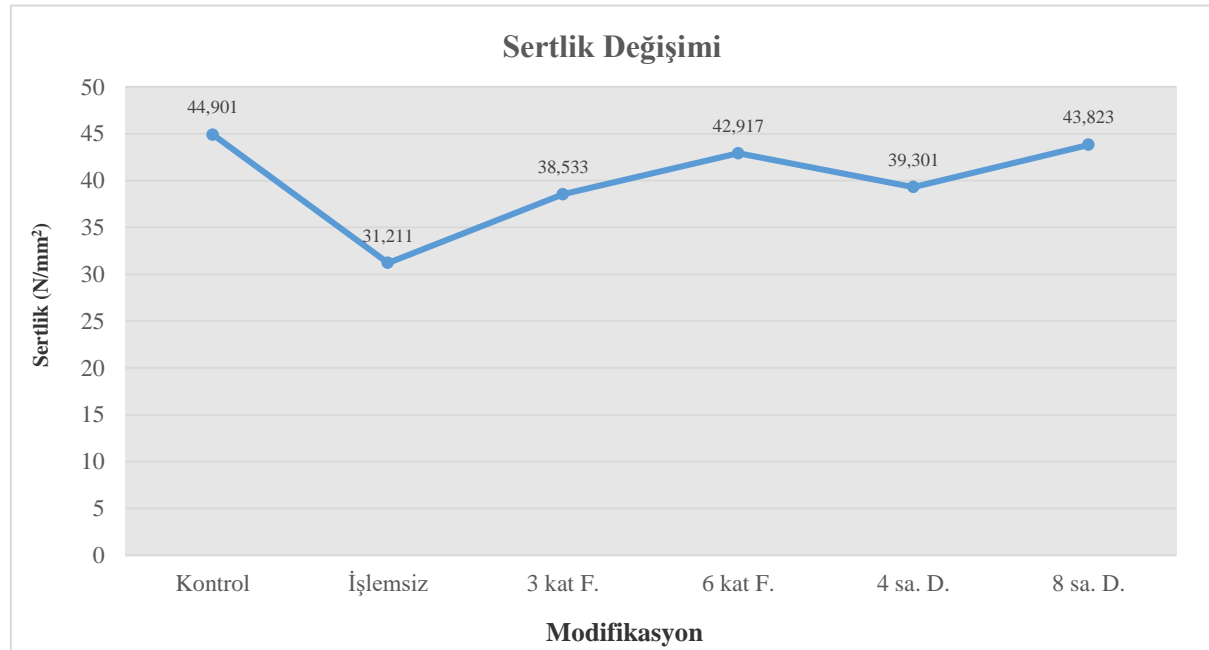
4.1. Yoğunluk (Density)

Çevreye herhangi bir olumsuz etkisi olmayan doğal ahşap taneni ile modifiye edilmiş çam, kestane ve meşe örneklerden elde edilen yoğunluk ve sertlik ile ilgili verilerden anlaşıldığına göre; genel olarak modifikasyon işleminin retensiyon olayından dolayı modifikasyon çözeltisi katı maddesi tutunma miktarı kadar yoğunluğu artırdığı tespit edilmiştir. Bu durum 6-7-12 nolu referanslar ile örtüşmektedir.

Ahşap türü bakımından kontrol örneklerinde yoğunluk çamda $0,495 \text{ g/cm}^3$, kestanede $0,684 \text{ g/cm}^3$, meşede $0,744 \text{ g/cm}^3$ elde edilmiştir. Bu değerler en yüksek modifikasyonun 8 saat daldırma yönteminde çamda $0,508 \text{ g/cm}^3$, kestanede $0,731 \text{ g/cm}^3$, meşede $0,775 \text{ g/cm}^3$ olarak gerçekleşmiştir. Buna göre çamda % 2.6, kestanede %6.8 ve meşede %4.2 oranında yoğunluk artışı meydana gelmiştir. 6 kat fırça uygulamalı modifikasyon yönteminde bu değerlere yakın yoğunluk artışı bulunmuştur. Ancak bu yöntem 8 saat daldırma yönteminden daha kolay ve maliyeti düşük olduğundan öncelikli olarak uygulanması önerilebilir.



Şekil 5. Ahşap türü düzeyi bakımından sertlik değişimi grafiği (Hardness change graph in terms of wood type level)



Şekil 6. Modifikasyon düzeyi bakımından sertlik değişimi grafiği (Graph of Hardness change in terms of modification level)

1 yıl süreyle toprak altında bekletilme sürecinde işlemsiz örneklerin madde kaybına uğrayarak kontrol örneklerine göre; çamda ve kestanede %6, meşede yaklaşık %2 oranında yoğunluklarının azaldığı görülmüştür. Bu durum 9 nolu referans ile örtüşmektedir.

Doğal tanen çözültisi ile modifiye edilmiş işlemsiz örneklerde madde kaybının ve buna bağlı olarak yoğunluk düşüşünün azaldığı belirlenmiştir. Toprak altında 1 yıl süreyle bekletme sürecinde işlemsiz örneklere göre; çamda %8.3, kestanede %13.5 ve meşede %5.3 daha yüksek oranda yoğunluk elde edilmiştir. Doğal tanen ile modifikasyon çam ve kestanede çürümeye (madde kaybına) karşı daha olumlu sonuç verirken meşe de olumlu etkinin düşük düzeyde gerçekleştiği görülmektedir. Bunun nedeni; tülmeden dolayı meşenin bünyesine az nüfuz eden çözültinin toprak altındaki madde kaybını önlemede yetersiz kalmasından kaynaklandığı söylenebilir.

4.2. Sertlik (Hardness)

Bu çalışmada ahşap türü bakımından sertlik; en yüksek kestanede 51,096 N/mm², meşede 47,421 N/mm², en düşük ise çamda 21,825 N/mm² olarak elde edilmiştir. Ahşap malzemede sertliği en çok etkileyen özelliğin yoğunluk olduğu bilinmektedir. Meşede yoğunluk

kestaneden yüksek olmasına rağmen sertliğin kestaneden düşük çıkması 1 yıllık toprak altında bekletme sürecinde meşedeki ağırlık kaybının kestaneden fazla olmasından ve tülleşme sebebiyle koruyucu çözültinin meşeye iyi nüfuz edemediğinden kaynaklandığı söylenebilir.

Modifikasyon bakımından sertlik; işlemsiz örneklerde 31,211 N/mm², kontrol örneklerinde 44,901 N/mm² olarak gerçekleşmiştir. Bu değerlere göre 1 yıllık toprak altında bekletme sürecinde işlemsiz örneklerde %30'dan fazla sertlik kaybı olduğu görülmektedir. Bu durum 7 nolu referansla örtüşmektedir.

Doğal koruyucu çözültiyle modifiye edilmiş örneklerde en yüksek sertlik 8 saat daldırma yönteminde 43,823 N/mm² olarak elde edilmiştir. Bu değer kontrol örneği sertliğine çok yakın olup 1 yıllık toprak altında bekletme sürecinde herhangi bir sertlik kaybı meydana gelmediği ve doğal tanen çözültisinin ahşabı çürümeye karşı koruduğu söylenebilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu araştırma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Merkezi tarafından desteklenmiştir. Destekleri için teşekkürler.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Özalp, M., "Su itici (Protim wr230) ve koruyucu (wolmanit-cb) emprenye maddeleri ile muamele edilmiş çam odunu örneklerinin su soğutma kulelerinde kullanımıyla fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerde meydana gelen değişimin incelenmesi" (Doktora Tezi), *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* (2003).
- [2] Kurtoğlu, A., "Ağaç Malzeme Yüze İşlemleri Genel Bilgiler", *İstanbul Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman End. Müh. Böl.*, İstanbul, 1:31-32, (2000).
- [3] Ayar, S., "Basınç Ve Bekletme Süresinin Emprenye Maddelerinin Ağaç Malzemeye Nüfuzuna Etkisinin Belirlenmesi" (Bilim Uzmanlığı Tezi) *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* (2008).
- [4] Ale'n, R., Kotilainen, R. and Zaman, A., "Thermochemical behavior of Norway spruce (Picea abies L.) at 180-225°C ", *Wood Science and Technology* 36:163-171 (2002).
- [5] Feist, W.C., "Protection of wood surfaces with chromium trioxide", *Forest Products Laboratory, Research Paper FP 339*, Madison, Wis, 19-20 (1979).
- [6] Yörür, H., "Islak mekanlarda ahşap tutkallarının yapışma mukavemetlerinin belirlenmesi", (Yüksek Lisans Tezi) *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* (2007).
- [7] Gür, İ., "Emprenye işleminin sarıçam ve kızılçamın bazı mekanik ve fiziksel özelliklerine etkilerinin belirlenmesi" (Yüksek Lisans Tezi) *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2003).
- [8] Şen S., Hafızoğlu H., Dığrak M., "Bazı Bitkisel Ekstraktların Fungisit Olarak Odun Koruyucu Etkilerinin Araştırılması", *KSÜ Fen ve Mühendislik Dergisi*, 5:1, (2002).
- [9] Olteanu M., "Research on Wood Preservation by Tanning Materials Extracted from Chestnut, Spruce and Fir Trees", *Revista Padurilor*, 112:5, (1997).
- [10] Laks PE., "Wood Preservation as Trees Do it". *Scottish - Forestry*, 454: 275-284, (1991).
- [11] Smith AL., Campbell CL., Walker DB., Hanover JW., "Extracts from Black Locust as Wood Preservatives: Extraction of Decay Resistance from Black Locust heartwood", *Holzforshung*, 43: 5: 293 – 296 (1989).
- [12] Yamamoto K., Hong LT., "Decay Resistance of Extractives from Chengal", *Journal of Tropical Forest Science*, 11: 51-55 (1988).
- [13] Jermer J, Bergman Ö, Nilsson T., "Fungus Cellar and Stake Tests with Tall Oil Derivates Progress Report After 5 Years Testing", *18. IRG Annual Meeting, Ontario, IRG - WP 3442* (1987).
- [14] Ulvcrna T., "Impregnation of Norway Spruce Picea Abies L. Karst. Wood with Hydrophobic Oil" (Ph.D Thesis) *Swedish University of Agricultural Sciences*, (2006).
- [15] Temiz A., Alfredsen G., Eikenes M., Terziev N., "Decay Resistance of Wood Treated with Boric Acid and Tall Oil Derivates", *Bioresource Technology*, 997: 2102 – 2106 (2008).
- [16] Tomak ED., "Masif Odundan Bor Bileşiklerinin Yıkınmasını Önlemede Yağlı Isıl İşlemin ve Emülsiyon Teknikleri ile Emprenye İşleminin Etkisi" (Doktora Tezi) *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* (2011).
- [17] TS 2472, "Oduna, Fiziksel ve Mekanik Deneyler İçin Birim Hacim Ağırlığı Tayini", (1976).
- [18] TS 2479, "Odunun Statik Sertliğinin Tayini", (1976).
- [19] TS EN 599-1, "Ahşap Emprenye Maddeleri", (2012).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



Analysing mechanical behaviors of carbon fiber reinforced silicone matrix composite materials after static folding

Karbon fiber takviyeli silikon matrisli kompozit malzemelerin statik katlama sonrası mekanik davranışlarının analiz edilmesi

Yazar(lar) (Author(s)): Ismail Sinan ATLI¹, Atilla EVCİN²

ORCID¹: 0000-0002-5899-4082

ORCID²: 0000-0002-0163-5097

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Atlı İ.S. and Evcin A., “Analysing mechanical behaviors of carbon fiber reinforced silicone matrix composite materials after static folding”, *Journal Of Polytechnic*, 23(2): 351-359, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.548885

Karbon Fiber Takviyeli Silikon Matrisli Kompozit Malzemelerin Statik Katlama Sonrası Mekanik Davranışlarının Analiz Edilmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

İsmail Sinan ATLI*, Atilla EVCİN

Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Türkiye
(Geliş/Received : 03.04.2019 ; Kabul/Accepted : 30.04.2019)

ÖZ

Bu makalenin konusu geleneksel malzemeler dışında bir malzeme olan karbon fiber takviyeli silikon matrisli kompozitlerin (KFTS-K) mekanik davranışları hakkında literatüre bilgi sağlamaktır. Mekanik bir yük altında, silikon matris yüksek elastik deformasyonlara izin verirken, karbon fiber takviyeside yüksek çekme gerilmelerine dayanım sağlar. KFTS-K malzemelerinin sıradışı olan bu davranışı, bize ek ağırlığa sebep olan mekanik menteşelere bağımlı olmaksızın katlanabilir malzeme dizaynı sağlar. Katlanabilir malzemeler, daha küçük hacim avantajı sağladığı için uzay yapılarında kullanılmaktadır. Bu çalışmada, KFTS-K malzemeleri piyasada bulunabilen iki farklı silikon ve düz dokumalı çift yönlü karbon fiber kumaş ile üretilmiştir. Farklı tabaka sayılarına sahip numuneler hazırlanmış ve 90° katlanarak belli süreler boyunca statik olarak katlı bırakılmıştır. Sonrasında çekme testi uygulanarak tabaka sayısının, silikon türünün ve katlı kalma sürelerinin mekanik davranışlara etkisi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Katlanabilir malzemeler, kompozit, silikon, elastik, karbon fiber.

Analysing Mechanical Behaviors of Carbon Fiber Reinforced Silicone Matrix Composite Materials after Static Folding

ABSTRACT

Subject of this paper is to provide information about mechanical behavior of a novel material to the literature: carbon fiber reinforced silicone matrix composite (CFRS-C). Under a mechanical load, silicone matrix allows large elastic deformations while carbon fiber reinforcement can bear high tensile stresses. This rare behavior of CFRS-C allows us to design foldable materials without being in a bind for mechanical hinges which bring additional weights. Foldable materials are used in space structures to gain advantage of smaller volumes. In this study, CFRS-C were manufactured with two different silicone type can be found in market and one type of plain woven carbon fiber fabric. Specimens were prepared and kept folded 90° statically in various periods of time. They were subjected to tensile testing afterwards, to investigate effect of number of layers, silicone type and duration of folding to mechanical behavior.

Keywords: Foldable materials, composite, silicone, elastic, carbon fiber.

1. INTRODUCTION

Most of the space structures which become functional on space after landing are selected from foldable materials. These materials can be folded to minimize volume and reduce transportation costs at the same time [1-5]. The structure can be achieved by selecting appropriate materials which allows high elastic deformations with small stresses [6-10]. When a soft matrix composite material bends, the stress especially in the compression side releases due to the elastic deformation capability [11]. There are various studies on these novel structures.

An example can be given from Technical University of Munich. Datashvili et. al. [12] designed triaxial carbon fiber fabric reinforced silicone matrix space antenna model and deployed it to a smaller volume as can be seen in Figure 1. They suggest that large deployable reflectors with high surface stiffness can be utilized up to about 5-8 m diameters and they introduced a new design of the technical University of Munich which is a carbon fiber reinforced silicone. This new umbrella shape reflector has a stiffness which is smaller than large deployable reflectors and bigger than the ones with metal mesh [12].

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : sinanatli@aku.edu.tr



Figure 1. Deployable antenna model developed in Technical University of Munich.[12].

Similar work was done by Composite Technology Development Incorporated (CTD, Inc.) in which reflective surface could be folded to umbrella shape as shown in Figure 2 [13]. CTD Inc. discovers mainly silicone matrix carbon fiber reinforced materials because of folding ability of this materials. These materials can be utilized in design of spacecraft structures such as solar systems, cubesat and nanosat constituents and reflector antennas [13]. Another soft-matrix related study was done on morphing aircraft structure which allows changing wing length in one direction [14]. Figure

3 shows the structure of the wing. Wing skin can extend in one direction intentionally and flight control can be made without in need of mechanical hinges by this way. [14].

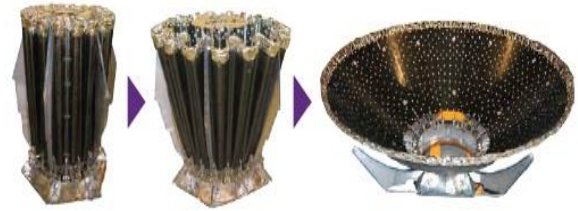


Figure 2. TEMBO deployable reflective surface designed by CTD, Inc. [13]

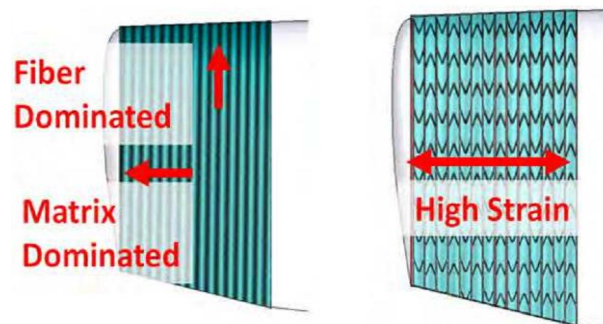


Figure 3. Morphing wing structure developed by using soft matrix. Matrix extends in one direction and fibers in that direction are in crimped structure which allows extension. [14].

One of the important problems of traditional composite materials with thermoplastic matrix is higher probability of damage within the compression side than the tension side during bending [15]. This problem occurs because breaking of fibers during microbuckling within a stiff matrix [15-19]. Altering this situation for deployable material design, many experimental and theoretical studies have been done recently as mentioned above.

Silicone matrix is presented as a solution in these studies as hyperelastic behavior of silicone elastomer allows fibers to microbuckle without or small amount of fiber damage [8-10,12,14-15,17-18]. In our experimental study, the mechanical behavior of plain woven carbon fiber reinforced silicone composite is investigated after and before static folding process. Two different types of silicone matrix were used. The effect of folded time period, type of silicone and number of composite layers were examined. In the literature, there are small numbers of studies that investigates the effect of number of layers to the mechanical behaviors after folding process. Also no studies on the effect of folding period to the plain woven carbon fiber reinforced soft polymer have been discovered.

2. EXPERIMENTAL PROCEDURE

This experimental procedure was designed to investigate effect of various numbers of layers and silicone types to the mechanical behavior of statically folded CFRS-C. Other variation in the experiments was time period of folding. Experimental procedure will be explained in 3 parts: manufacturing of specimens, static folding process and tensile testing process.

2.1 Manufacturing of Specimens

Carbon fiber fabric utilized in this experiment was 200 gr/m² plain woven Tenax-E HTA 40 3k. Before manufacturing main specimens, an initial work was done to investigate possible issues in advance. For this purpose a plate of specimen was fabricated by hand layup method. After this initial work it was seen that silicone and carbon fiber did not adhere properly. The silicone was peeled totally from the surface of carbon fabric as shown in Figure 4.a. The reason for this was connected to high viscosity of silicone resin firstly, because after peeling of cured silicone from the surface, no residual silicone was detected on or between fiber tows. Viscosity of silicone resin was reduced by adding 30% of xylene to get adequate flowability. Another specimen was produced after this modification and the result was better but not satisfactory. Figure 4-b presents the specimen produced after reducing viscosity of silicone and it can be understood from white spots highlighted with red circles that adherence was still poor. But the silicone could not be peeled and it means adherence performance was enhanced.

It was considered that another problem could be poor bonding because of epoxy sizing on fiber tows. Sizing is applied on fiber tows before putting on market as it protects fiber surface via coating and provides high bonding performance with traditional resin materials like epoxy [20]. Removing the sizing was the next step to improve adherence performance. Heat treatment of carbon fiber fabrics at 110° C for 20-90 minute in nitric acid solution is one of the ways to remove epoxy sizing [21]. So, 10% and 20% nitric acid solutions were prepared with ethanol, heated up to 110° C while carbon fiber fabrics were in them. After 60 minutes of heat

treatment, fabrics were taken out of solution and soaked into pure ethanol for removal of acidic solution. Fabrics were dried in the oven at 100°C for 24 hours. Figure 5 may give a clue that the surface of fibers processed in 20% nitric acid solution was rougher than the ones processed in 10% solution and non-modified ones. Rougher surface may result in more surface area which can be better for silicone-carbon fiber interface bonding. Although rough surface of fiber may decreased the mechanical strength of fiber itself, this situation could be altered by better bonding of fiber and silicone and improve the strength of composite material. Finally, samples manufactured with modified silicone and carbon fibers and this product was performed best in terms of bonding as illustrated on Figure 4.c.

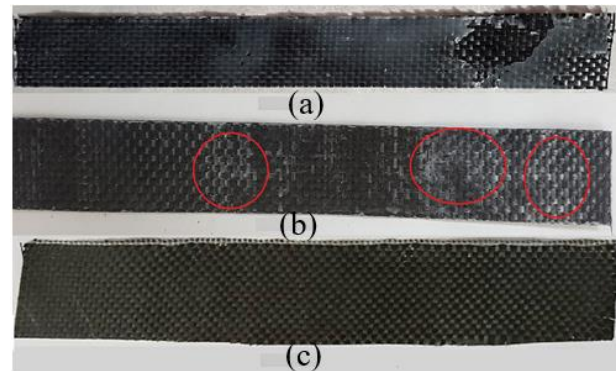


Figure 4. a) CFRS-C materials manufactured without any carbon fiber fabric surface modification and silicone viscosity modification. b) CFRS-C materials manufactured after reducing viscosity of silicone. c) CFRS-C materials manufactured after both carbon fiber fabric surface modification and silicone viscosity modification.

After discovering the adequate way to prepare samples with the help of initial works, next step was to manufacture testing specimens. Specimens were produced with two different types of transparent silicones: TSE 3488 T and RTV 830 which could be found on market. Tensile strength of RTV830 and TSE 3488T is 4.4 and 6.1 MPa and elongation percentage is 540 and 380 respectively. Number of layers of composite was decided to be one, two and four to see the effect of this variation. Four specimens were manufactured for each parameter.

CFRS-C were manufactured by hand lay up method but silicone could not be spread with brush and spatula was used instead. After hand lay up finished, plates were placed between two PVA sheets and than put between Carver Hot Press machine (Figure 6.c) blocks, which applies pressure and heat at the same time. Curing temperature of silicones are indicated by supplier so CFRS-C were cured at 150° C for 30 minutes. On the other hand, there were no information about manufacturing of CFRS-C materials with hot press machine and hence amount of pressure was not certain. The materials fabricated below 2.3 bar pressure were

extremely thick and others pressured above 2.3 bar had silicone free regions on surface.

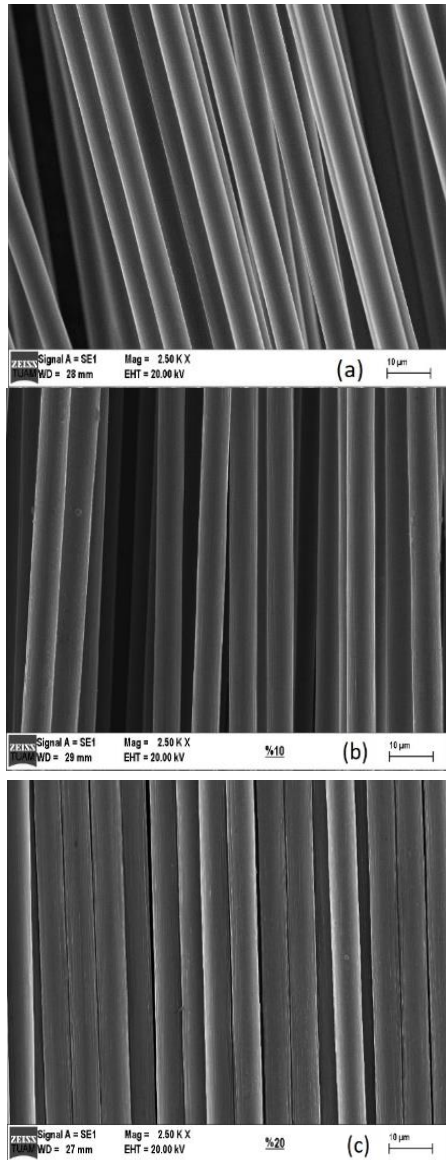


Figure 5. Carbon fiber fabric SEM images: a) Non-modified carbon fiber fabric b) carbon fiber fabric modified in 10% nitric acid solution and c) carbon fiber fabric modified in 20% solution.

CFRS-C were manufactured by hand lay up method but silicone could not be spread with brush and spatula was used instead. After hand lay up finished, plates were placed between two PVA sheets and than put between Carver Hot Press machine (Figure 6.c) blocks, which applies pressure and heat at the same time. Curing temperature of silicones are indicated by supplier so CFRS-C were cured at 150° C for 30 minutes. On the other hand, there were no information about manufacturing of CFRS-C materials with hot press machine and hence amount of pressure was not certain. The materials fabricated below 2.3 bar pressure were extremely thick and others pressured above 2.3 bar had silicone free regions on surface. According to these

outputs, the amount of pressure decided to be 2.3 bar for all manufacturing processes of this experiment. 180 x 250 mm CFRS-C plates were produced and specimens were cut by razor blade from it according to ASTM D 3039. The dimensions of specimens were 25x250 mm and thickness varied between 0.34 mm and 1.56 mm depending on the number of layers and carbon fiber-silicone volume fractions. Four samples were manufactured for same parameters. After manufacturing step was finalised, static folding step was started.



Figure 6. Manufacturing process of CFRS-C and the hot press machine utilised after hand lay up.

2.2 Static Folding Process

Target in this study is to present mechanical behavior of a foldable design. As these structures are folded on earth and sent to space, it has to be considered that they remain folded over a period of time. This part of study was arranged to explore mechanical response of CFRS-C materials shown on Figure 7.a, after remained folded on a 90° cable box, as can be seen in Figure 7.b, over 2, 8 and 12 weeks. The corner radius of cable box is 13.8 mm. Structure of layered CFRS-C is represented in Figure 8.



Figure 7. CFRS-C materials after being cut from plate: a) normal position b) Folded 90° on cable box.



Figure 8. Representation of CFRS-C layered structure

2.3 Tensile Testing Process

One, two and four layered CFRS-C prepared as reference materials to explore mechanical behaviors before folding. Samples with same specifications were prepared and remained folded for 2, 4 and 12 weeks as shown in Figure 7.b. As 50 mm of samples would be gripped inside testing jaws from each end, tent fabric was bonded to the ends with epoxy to avoid high stress on these sides and early breakage inside the jaws. Testing configuration is given in Figure 9.

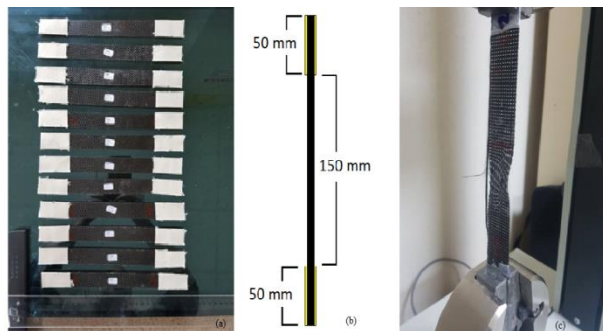


Figure 9. Demonstration of tensile test setting. a) Tent fabric application to specimen ends to prevent preliminary breakage b) Illustration of specimen dimensions and structure c) Tensile testing setup.

All samples were tested with Shimadzu AG-IJ 10 kN universal testing machine with 2 mm/min. deflection speed. Four specimens were tested for each parameter.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Tensile Testing of Reference Materials

According to the data provided from supplier, tensile strength of TSE3488T silicone is 37% higher than of RTV830 silicone's but % elongation of RTV830 silicone is higher. Tensile test results of reference CFRS-C materials are parallel to the data given that can be understood from Table 1. Table 1 also clarifies that as the number of layers increased, elongation also increased and maximum strength decreased for both carbon fiber reinforced RTV830 composite (CF-RTV830) and carbon fiber reinforced TSE3888T composite (CF-TSE3488T). Increasing number of layers may lead to increasing volume fraction of silicone which explains test results of reference specimens. It can be understood from Table 1 that, as the number of layers increase, maximum tensile strength of CFRS-C decreases but maximum elongation percentage increases. The constituent with lower tensile strength and higher elongation capability is silicone.

According to rule of mixtures shown in Equation 1 and the outcome mentioned above, tensile strength of composite may decreased by increasing volume fraction of silicone and elongation rate may do so by the same way. By that way, decreasing maximum tensile strength and increasing maximum elongation percentage by increasing number of layers can be explained by increasing volume fraction of silicone by the same way.

$$\sigma_c = \sigma_f v_f + \sigma_m v_m \quad \text{Equation 1}$$

In Equation 1, σ_c , σ_f and σ_m are tensile strength of composite material, fiber and matrix respectively where v_f is volume fraction of fiber and v_m is volume fraction of matrix.

Table 1. Test results of CFRS-C materials.

Name of Specimen	Number of Layers	Max. σ (MPa)	E (MPa)	Maks. ϵ (%)
CF-RTV830				
Ref-R1-avg.	1	335.93	18806.16	2.35
Ref-R2-avg.	2	351.21	14355.43	3.15
Ref-R4-avg.	4	265.94	7863.98	3.97
CF-TSE3488T				
Ref-T1-avg.	1	434.22	22175.01	2.25
Ref-T2-avg.	2	380.05	14344.18	3.02
Ref-T4-avg.	4	311.52	9421.95	3.4

3.2 Tensile Test Results of Statically Folded Materials

Figure 10 and Figure 11 displays tensile test graphs of statically folded materials for 2, 8 and 12 weeks for CF-RTV830 and CF-TSE3488T materials respectively. As mentioned before, volume fraction of silicone matrix increased by increasing number of layers and deformation capability of the composite increased. Micro-buckled fibers are highlighted by red circles in Figure 12. Near the folded area the stress transferred from matrix to micro-buckled fibers is less and fiber breakage is lesser and this is an advantage of being embedded in a soft matrix.. As a result of the elastic deformation capability of silicone matrix, increasing number of layers would lead to less decrease in mechanical strength, associated with folding time period. This assumption can be made for both CF-RTV830 and CF-TSE3488T which can be supported with Figure 10 and Figure 11.

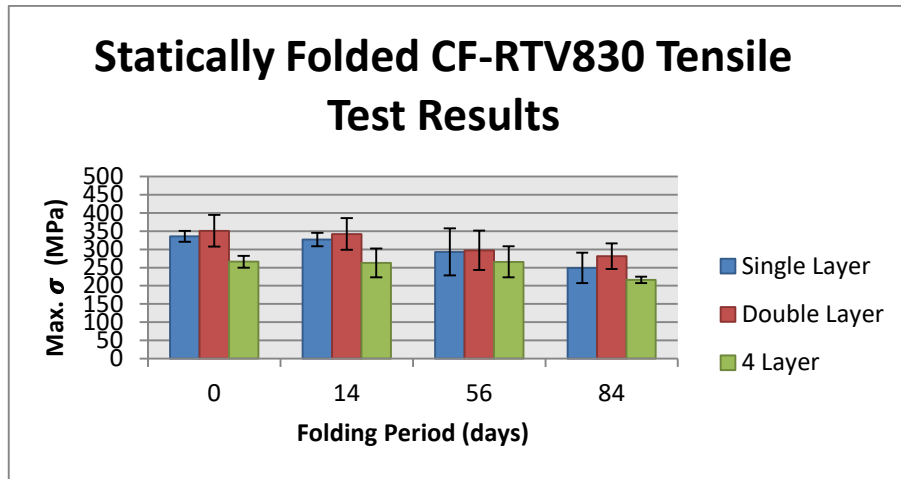


Figure 10. Mechanic response of single, double and four layers CF-RTV830 to folding time period of 14, 56 and 84 days.

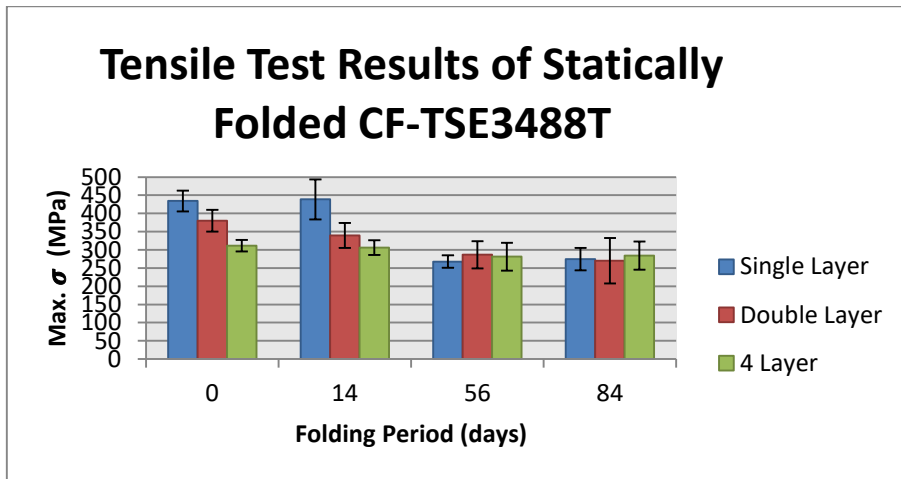


Figure 11. Mechanic response of single, double and four layers CF-TSE3488T to folding time period of 14, 56 and 84 days.

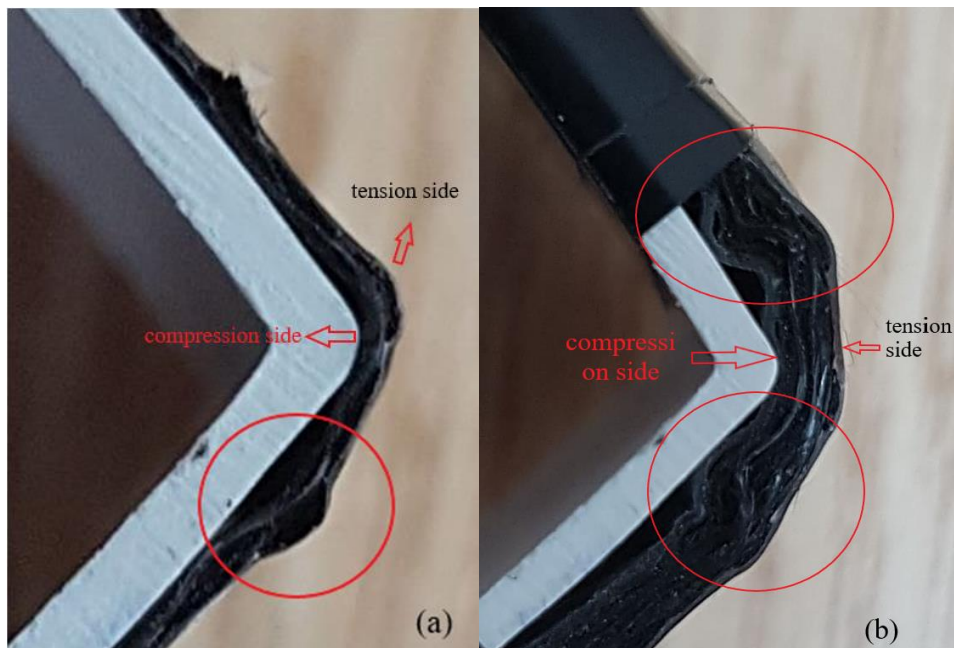


Figure 12. Micro-buckled fibers near folding region are indicated by red circles. a) Microbuckling within 2 layer composite material in folded position., b) Microbuckling within 4 layer composite material in folded position.

Table 2. Percentage of decrease in mechanical strength in relation with number of layers and folding time period.

CF-RTV830				CF-TSE3488T			
CF-RTV830				CF-TSE3488T			
Number of layers	Percentage of decrease in mechanical strength			Number of layers	Percentage of decrease in mechanical strength		
	Folded for 14 days	Folded for 56 days	Folded for 84 days		Folded for 14 days	Folded for 56 days	Folded for 84 days
Single	2.7	12.8	25.8	Single	-1.03	38	36
2	2.56	15.38	20	2	10.6	24.6	29
4	1.12	0.02	9.3	4	1.76	9.74	8.78

Table 2 exhibits percentage of decrease in mechanical strength after folding CFRS materials. When kept folded for 14 days, single layer CF-RTV830 and CF-TSE3488T, double layer CF-RTV830, 4-layer CF-RTV830 and CF-TSE3488T materials performed similar mechanical performance to equivalent reference materials. Within the materials kept folded for 56 days, 4-layer CF-RTV830 performed best and also the decrease in mechanical performance of CF-TSE3488T is less than 10%. In terms of the materials kept folded for 84 days, mechanical performance of 4-layer CF-TSE3488T and CF-RTV830 decreased less than 10%.

CFRS-C materials showed linear-elastic behavior and stress-elongation graph of CF-RTV830 is presented in Figure 13 as an example. All other specimens showed similar stress-elongation behavior.

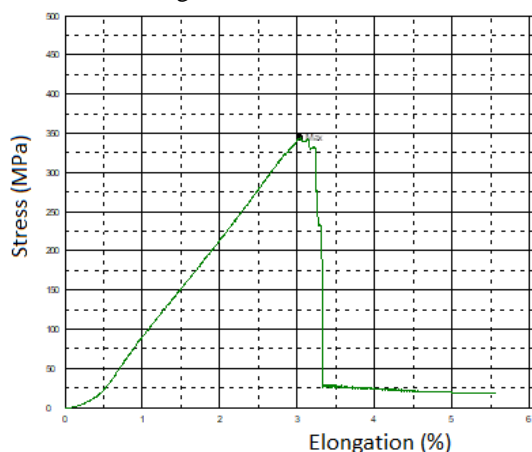


Figure 13. Stress-elongation graph of single layer reference material: CF-RTV830.

During the tensile test of single layer composites, it was seen that they were generally broken from middle section and fiber breakage was detected (Figure 14.a). Double layer composites have generally shown similar failure

behavior to single layer composites (Figure 14.b). After inspected by eyes, separated laminates and fiber breakage were detected in four layer composites and two examples were given in Figure 14.c. Detailed illustration is given in Figure 15. Second and third layers slipped between the first and fourth layers. The tabs stick to the ends with epoxy may hold first and fourth layers strongly when the jaws tighten and prevent them from slippage. But second layer and third layer were stuck to the neighboring layers via silicone. As shear force of epoxy is higher than silicone, first and fourth layers, which stuck to the fabric tent by epoxy, were held between jaws and second and third layers slipped.

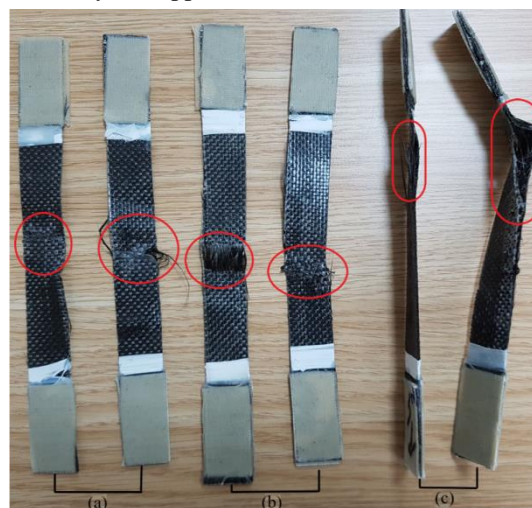


Figure 14. Tensile failure behavior of fabricated CFRS-C materials: a) Failure of single layer composites and fiber breakage indicated via red circle, b) Failure of double layer composites and fiber breakage indicated via red circle, c) Failure of four layer composites and separation of layers are shown via red circles.

Figure 14 and Figure 15 displays that no crushing inside testing jaws was faced during tensile test. Bonding tent fabric near specimen ends by epoxy can be a good solution to crushing or slipping of material between jaws. All fabricated specimens experienced final rupture, no crushing by jaws and slipping between jaws. Mejiha-Ariza and his friends [22] faced crushing of specimens problem, between hydraulic jaws. They solved crushing problem by changing hydraulic grips with mechanical ones but fiber glass tabs were split from specimen that time and only one specimen were broken [22].

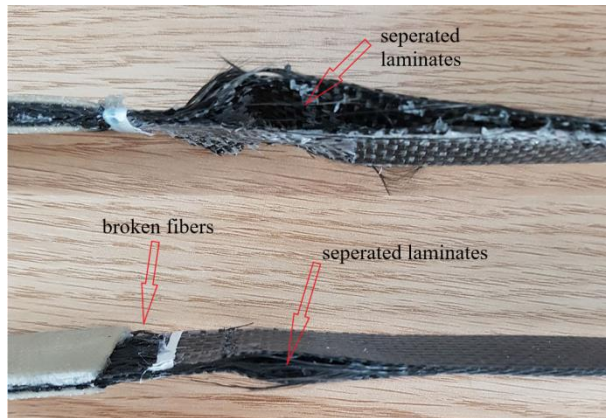


Figure 15. Detailed illustration of failure behavior of four layer composites after tensile test with two examples.

4. CONCLUSION

During fabrication processes, different challenges were faced like peeling of silicone from carbon fiber surface, silicone-free regions and poor bonding of silicone to fibers on some regions. Optimal fabricating parameters for this study can be listed as:

- Application of heat treatment to fiber fabrics at 110° C for 20-90 minute in 20 % nitric acid is a solution for poor bonding and peeling of silicone,
- Mixing silicone matrix with 30% xylene reduces the viscosity of silicone which also provides adequate bonding performance,
- When examined by eyes, silicone-free regions on specimens cured in hot-press machine under 2.3 bar pressure at 150 ° C were seem to be less compared to other trials.

Tensile testing of silicone resin composite materials was also a challenge because testing jaws generates high stress regions at specimen ends. Bonding various tab materials like fiber-glass epoxy to each end was utilized as one way of solution but shear failure of tabs occurs due to uniaxial loading [22]. In this study canvas fabrics were attached to each end with epoxy and shear failure of canvas-epoxy did not occur. Damage of test coupons generally started from middle section.

When specimens kept folded 90°, materials with higher silicone volume fraction performed less damage because micro buckle of fibers was allowed within silicone matrix which has the capability of high elastic deformation. Due

to the dominant mechanical characteristics of plain woven carbon fibers, CFRS-C materials showed linear elastic performance opposite to findings of Pellegrino and his friends [23] and similar to Maqueda and his friends [24]. The reason for this may be the different silicone matrix type and manufacturing steps.

Because of higher silicone volume fraction, tensile strength and stiffness of 4-layer CFRS-C materials decreased less after folding periods. Tensile strength of CF-RTV830 materials generally decreased less because RTV830 silicone has higher elongation rate.

In terms of the failure behaviors, fiber breakage was detected in one and two layer composite materials but separation of layers was detected in 4-layer composites by visual inspection as shown in Figure 14 and Figure 15.

FUTURE WORK

In this study, a work has been done about mechanic response of silicone-carbon fiber composite material to the static folding process. Two different types of silicones and plain woven carbon fiber fabric were utilized. In future works, specimens prepared with space qualified silicones and multiaxial fiber fabrics may be investigated and testing environment temperature may be adjusted to space environment temperature to recommend materials for direct use in space.

ACKNOWLEDGMENT

Best regards to Afyon Kocatepe University Scientific Research Projects Coordination Unit for supporting this study under the 17.FEN.BIL.70 project. Without the funding they provided, materials utilized in this project would not be easy afford.

REFERENCES

- [1] Dano M.L., Gendron G., Picard A., Mechanical Behavior of a Triaxial Woven Fabric Composite, **Mechanics of Composite Materials and Structures**, 7: 207-224, (2000).
- [2] Benarcyk B.A., Arnold S.M., "Micromechanics-Based Modeling of Woven Polymer Matrix Composites", **AIAA Journal**, 41(9): 1788-1796, (2003)
- [3] Le Page, B.H., Guild, F.J., Ogin, S.L. and Smith, P.A., "Finite Element Simulation of Woven Fabric Composites", **Composites: Part A**, 35: 861 - 872, (2004).
- [4] Hackett, R.M., "Finite Elasticity", **Hyperelasticity Primer**, Springer International Publishing, USA, (2016)
- [5] Manuel J. Garcia R., Oscar E. Ruiz S., Carlos Lopez, "Hyperelastic Material Modeling", **Technical Report**, Laboratorio CAD/CAM/CAE, Departamento de Ingenieria Mecanica, Universidad EAFIT, Medellin, (2005).
- [6] T. W. Murphey, T. Meink, and M. M. Mikulas, "Some micromechanics considerations of the folding of rigidizable composite materials" **In 42nd AIAA/ASME/**

- ASCE / AHS / ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference**, AIAA:2001-1418, (2001).
- [7] W. H. Francis, M.S. Lake, and J. Steven Mayes, "A review of classical fiber microbuckling analytical solutions for use with elastic memory composites", **In 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference**, Newport, RI, AIAA-2006:1764, (2006).
- [8] Lopez Jimenez, F., "Mechanics of thin carbon fiber composites with a silicone matrix", **Doctoral dissertation**, California Institute of Technology, (2011).
- [9] Baier, H., L. Datashvili, and J. Hoffmann. "Mechanically reconfigurable and massively shape morphing space structures." **Proceedings of the 11th European Spacecraft Structures, Materials and Mechanical Testing Conference**, (2009).
- [10] Murphey, T. W., "Large Strain Composite Materials in Deployable Space Structures" **In 17th International Conference on Composite Materials(Vol. 28)**, Edinburgh, UK: **The British Composites Soc.**, (2009)
- [11] Campbell, D., Lake, M.S. and Mallick, K., "A study of the bending mechanics of elastic memory composites." **In AIAA. 45th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. California: Palm Springs:** 1323-1331, (2004).
- [12] Datashvili, L., Baier, H., Wehrle, E., Kuhn, T., & Hoffmann, J." Large shell-membrane space reflectors" **In Proceedings of AIAA Structures, Dynamics, and Materials Conference, Honolulu, Hawaii**, (2010).
- [13] "Tembo Deployable Structures": <https://www.ctd-materials.com/engineered-materials/tembo/> (accessed July 2018).
- [14] Vocke III, R.D., Kothera, C.S., Woods, B.K., Bubert, E.A. and Wereley, N.M., "One dimensional morphing structures for advanced aircraft" **In Recent Advances in Aircraft Technology. IntechOpen**, (2012).
- [15] Guynn, E.G., Bradley, W.L. and Ochoa, O.O., "A parametric study of variables that affect fiber microbuckling initiation in composite laminates: Part 2—Experiments" **Journal of Composite Materials**, 26(11): 1617-1643, (1992).
- [16] Drapier, S., Gardin, C., Grandidier, J.C. and Potier-Ferry, M., "Structure effect and microbuckling" **Composites Science and Technology**, 56(7): 861-867, (1996).
- [17] Drapier, S., Grandidier, J.C. and Potier-Ferry, M., "A structural approach of plastic microbuckling in long fibre composites: comparison with theoretical and experimental results" **International Journal of Solids and Structures**, 38(22-23): 3877-3904, (2001).
- [18] Francis, W., Lake, M. and Mayes, J.S., "A review of classical fiber microbuckling analytical solutions for use with elastic memory composites" **In 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference 14th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 7th:**1764 , (2006).
- [19] Marissen, R., and H. R. Brouwer. "The significance of fibre microbuckling for the flexural strength of a composite" **Composites Science and Technology** 59:3 (1999): 327-330, (1999).
- [20] Composites World. "Advances in sizings and surface treatments for carbon fibers.". [compositeworld.com: https://www.compositeworld.com/articles/advances-in-sizings-and-surface-treatments-for-carbon-fibers.](https://www.compositeworld.com/articles/advances-in-sizings-and-surface-treatments-for-carbon-fibers.)" (accessed May 2018).
- [21] Wu, Zhihong, Charles U. Pittman Jr, and Steven D. Gardner. "Nitric acid oxidation of carbon fibers and the effects of subsequent treatment in refluxing aqueous NaOH." **Carbon**33, 5: 597-605, (1995).
- [22] Mejia-Ariza, J., Guidanean, K., Murphey, T. and Biskner, A., "Mechanical characterization of L'Garde elastomeric resin composite materials." **In 51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference 18th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 12th:** 2701, (2010).
- [23] Jiménez, F.L. and Pellegrino, S., "Folding of fiber composites with a hyperelastic matrix." **International Journal of Solids and Structures**, 49(3-4): 395-407, (2012).
- [24] Maqueda I, Pellegrino S, Mejia-Ariza J. "Characterization of a high strain composite material." **In 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA**, p. 1909.(2012).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



Constitutive modeling of monotonic behavior of clays: Mathematical formulation, numerical implementation and experimental verification

Killerin statik bünye davranışlarının modellenmesi: Matematiksel formülasyon, sayısal uygulama ve deneysel doğrulama

Yazar (Author): Mehmet Barış Can ÜLKER

ORCID: 0000-0001-7632-2303

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Ülker M. B. C., “Constitutive modeling of monotonic behavior of clays: Mathematical formulation, numerical implementation and experimental verification”, *Politeknik Dergisi*, 23(2): 361-369, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.516345

Killerin Statik Bünye Davranışlarının Modellenmesi: Matematiksel Formülasyon, Sayısal Uygulama ve Deneysel Doğrulama

Araştırma Makalesi / Research Article

Mehmet Barış Can ÜLKER*

Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetimi Enstitüsü, Deprem Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye
(Geliş/Received : 22.01.2019 ; Kabul/Accepted : 24.04.2019)

ÖZ

İnşaat mühendisliği sistemlerinin tasarımında temeller önemli bir yer tutar. Dış yüklemeler altında yüzeysel ve derin temellerin stabilite kaybına neden olacak durumların belirlenmesinde geoteknik incelemeler ayrıca önemlidir. Temel tabakasının kil olması durumunda, yükleme sırasında göçmeye neden olan koşullar tanımlanmalıdır. Bunu yapmanın en doğru yolu, matematiksel denklemler yardımıyla zeminin bünye davranışını teorikleştirmektir. Bu çalışmada, statik yükler altında kil zeminin bünyesel davranışı Genelleştirilmiş Plastisite Teorisi ile modellenmiştir. Sayısal formülasyon, her bir yükleme aşaması için açık integrasyon yöntemi ile çözülen temel denklemler cinsinden özetlenmiştir. Çözümün yapılabilmesi için bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Zeminde elasto-plastik matris, şekil değiştirme-gerilme ilişkisinin tersi alınarak türetilmiş, bu sayede kile ait gerilme-şekil değiştirme ilişkisi modelde herhangi bir akma veya potansiyel fonksiyon kullanmadan artımsal olarak elde edilmiştir. Sonrasında zeminde kalıcı şekil değiştirmeler hesaplanmıştır. Ardından, modeli ve bilgisayarda uygulamasını doğrulamak için bir dizi drenajlı ve drenajsız üç eksenli deformasyon kontrollü deney simüle edilmiştir. Deneyler, Genelleştirilmiş Plastisite modelinin kapasitesini belirlemek amacıyla, iyi bilinen modifiye-Cam-kili modeli ile de simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçları, modelin normal ve aşırı konsolide killerin statik davranışlarını yakalamadaki etkinliğini ve kapasitesini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Killer, bünyesel modelleme, genelleştirilmiş plastisite, statik yükleme, sayısal analiz.

Constitutive Modeling of Monotonic Behavior of Clays: Mathematical Formulation, Numerical Implementation and Experimental Verification

ABSTRACT

Foundations constitute a significant part of the design of civil engineering systems. Geotechnical considerations are particularly important in identifying the conditions leading to instability of shallow and deep foundations under various loadings. In the case the foundation layer is clay, one should identify the conditions leading to failure of clay soil upon loading. The most common way of doing so is to theorize the constitutive behavior of the soil using mathematical equations. In this study, constitutive modeling of clays under monotonic loadings is presented using the Generalized Plasticity Theory. Numerical formulation is summarized in terms of governing equations which are solved for each load step by an explicit integration method which is implemented into a computer program. Elasto-plastic constitutive matrix is derived based upon the inversion of strain-stress relationship without using a yield or a potential function in the model which is used to get the stress-strain incremental relationship. Plastic strains are then calculated using a non-associative flow rule. Subsequently, a number of drained and undrained strain-controlled triaxial tests are simulated to verify the model and its implementation. The related tests are also simulated using the well-known modified Cam Clay model to highlight the capabilities of the Generalized Plasticity model. Simulation results demonstrate the effectiveness and the capability of the model to capture static behavior of normally and overconsolidated clays.

Keywords: Clays, constitutive modeling, generalized plasticity, monotonic loading, numerical analysis.

1. INTRODUCTION

Stress-strain relationship and strength properties of soils under static loads must be known in the solution of geotechnical engineering problems. The shear behavior of natural soils under applied loads is highly dependent on the type of soil, drainage conditions and effective mean stress. In addition, the change in point-to-point relations of soil layers or also called heterogeneity and

the change in engineering properties of soil in different directions (anisotropy) necessitate laboratory tests to be carried out. This allows us to determine the shear strength properties of the soil as well as the stress-strain relationship. However, it is not easy to conduct a different experiment each time one needs to determine the engineering properties of a soil sample prior to the solution of a geotechnical engineering problem. While it is still necessary to do so, engineers find themselves in a tough spot requiring it to make yet some kind of

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : mbulker@itu.edu.tr

generalization in representing the behavior of soils under field load conditions. In this respect, firstly, the soil behavior should be modeled theoretically starting from the response under monotonic loading. Such attempts resulted in the development of various constitutive models over the last few decades. From these models, Generalized Plasticity Theory (GPT) can be considered to have the least possible complexity with most possible accuracy [1-5]. That is, the model makes predictions that require the least number of parameters to satisfy an acceptable level of accuracy. GPT not only predicts the necessary information of soil behavior sufficiently, but it does this in a simple enough manner. That is, the model presents plausible and repeatable arguments. For example, the Classical Plasticity and the Bounding Surface Plasticity, which are both the special cases of the GPT, require still many model parameters and mathematical functions to be defined. Yield and plastic potential functions are two common examples of such required mathematical relations currently used in many classical models.

One other advantage of using the GPT framework is that, it allows development of new models with different functions. This way, given the need one can always employ such functions in GPT for modeling a particular stress state or a soil test. This feature of the model makes it flexible enough to model the nonlinear static and dynamic behavior of both cohesionless and cohesive soils. Modifications and expansions made to the theory in recent years, made it more appealing to use in the numerical solution of some key problems encountered in geotechnical engineering [6].

In this study, constitutive modeling of clays under monotonic loadings is presented using the Generalized Plasticity Theory. Numerical formulation is summarized in terms of governing set of constitutive equations which are solved for each load step by an explicit integration method. General equations of the theory written in terms of stress-strain relationship, flow rule and the hardening law are presented. Plastic strains are calculated using a non-associative flow rule without referencing a yield or a potential function. Elastoplastic constitutive matrix is derived by the inversion of strain-stress relationship without using the consistency condition. Subsequently, a number of drained and undrained strain-controlled triaxial tests are simulated to verify the model and its implementation.

2. GOVERNING CONSTITUTIVE EQUATIONS

Generalized Plasticity Model (GPM) is the constitutive model formulation of the GPT framework. In this section, the main features of the model is described in terms of how the loading direction is decided, unit vector definitions are made, stress-strain relationship is derived and flow rule and the hardening law are defined.

2.1 Loading Direction

The loading and unloading steps of the model is decided in terms of associated unit vectors. The way the unit

vectors are defined is that, they are prescribed to be normal to a presumable surface that does not have to exist in the stress space which allows to draw two important conclusions. One is the clear distinction in the loading directions through:

$$d\sigma_{kl}' : n > 0 \rightarrow \text{loading} \quad (1a)$$

$$d\sigma_{kl}' : n < 0 \rightarrow \text{unloading} \quad (1b)$$

$$d\sigma_{kl}' : n = 0 \rightarrow \text{neutral loading} \quad (1c)$$

where $d\sigma_{ij}'$ is the change in effective stress and n is the unit vector along the direction of stress increment. These relations are valid only for hardening materials and should be changed [5] in the case of softening with the introduction of $d\sigma_{ij}^e$ calculated using the elastic strains. It should be noted here that throughout this paper, an effective stress notation of stresses will be followed.

The other important feature of using unit vectors is that, the entirety of the theory is now dependent highly on these unit vectors and it is indeed possible to construct a constitutive model with the arguments developed in this manner by making use of their definitions. For instance, we have the luxury of being able to write the necessary relations for both loading (L) and unloading (U) cases with the help of a continuity condition which is now solely a mathematical construct as opposed to having a physical meaning in the case of a yield surface. The strain-stress relationship is the key to start off the basic formulation of the model. We write:

$$d\varepsilon_{ij} = C_{ijkl}^L d\sigma_{kl}' \quad (2a)$$

$$d\varepsilon_{ij} = C_{ijkl}^U d\sigma_{kl}' \quad (2b)$$

Continuity between loading and unloading requires that constitutive tensors C_{ijkl}^U and C_{ijkl}^L are of the form:

$$C_{ijkl}^L = C_{ijkl}^e + \frac{1}{H_L} n_g^L \otimes n \quad (3a)$$

$$C_{ijkl}^U = C_{ijkl}^e + \frac{1}{H_U} n_g^U \otimes n \quad (3b)$$

where C_{ijkl}^e is the elastic compliance matrix and $n_g^{L/U}$ is the unit vector showing the direction of plastic straining. It can be readily shown that in neutral loading, both relations of (3) are equal and hence non-unique definitions of strain is avoided. Therefore we write:

$$d\varepsilon_{ij}^L = C_{ijkl}^e d\sigma_{kl}' \quad (4a)$$

$$d\varepsilon_{ij}^U = C_{ijkl}^e d\sigma_{kl}' \quad (4b)$$

2.2 Unit Vectors and Stress Dilatancy

As mentioned, the GPM relies on the way two unit vectors, $n_g^{L/U}$ and n , are defined. While $n_g^{L/U}$, n show the direction of plastic flow and stress increment, respectively. Depending upon whether they are chosen as

equal (associated model) or not (non-associated model), they are defined as:

$$n_v = \frac{d}{\sqrt{1+d^2}}, \quad n_s = \frac{1}{\sqrt{1+d^2}}, \quad n = (n_v, n_s) \quad (5a)$$

$$n_{gv} = \frac{d_g}{\sqrt{1+d_g^2}}, \quad n_{gs} = \frac{1}{\sqrt{1+d_g^2}}, \quad n_g = (n_{gv}, n_{gs}) \quad (5b)$$

where subscripts 'v' and 's' stand for volumetric and shear, respectively. In the above, d and d_g are dilation ratios that are functions of slopes of state lines, M and M_g , but more definitely defined as $d=d\varepsilon_v^p/d\varepsilon_s^p$ where $d\varepsilon_v^p$ is the volumetric plastic strain increment and the $d\varepsilon_s^p$ is the deviatoric plastic strain increment. As a result of tests on Bangkok clay by [7] under constant stress ratio, $\eta=q/p'$, a linear relationship (see Figure 1) is found for d as,

$$d = (1 + \mu)(M - \eta) \quad (6)$$

where μ is a constant to be determined from the best line fit of experimental data of η vs. d and M is the slope of the critical state line. In the case of non-associated plasticity, this relation becomes:

$$d_g = (1 + \mu)(M_g - \eta) \quad (7)$$

where M_g is the slope of the line for which there is no volumetric expansion (Figure 2). M and M_g are dependent on the Lode's angle, θ [8], and signifies that the GPM is in harmony with the *critical state soil mechanics*. We know that the residual state is also controlled by M_g in soils. Sign of the slopes in (6) and (7) may change depending upon the loading direction.

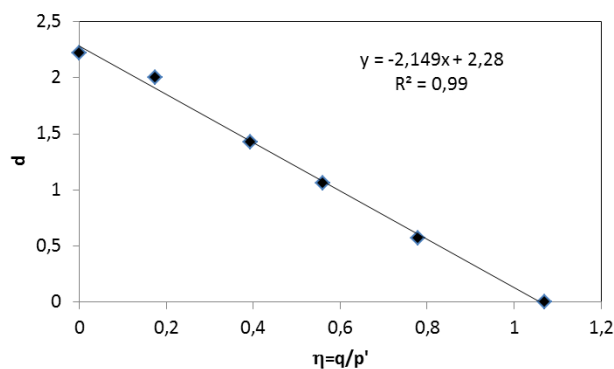


Figure 1. Dilatancy-stress ratio relationship, d - η , for Bangkok clay, (regenerated from [7])

2.3 Flow Rule

Plastic strain increments are calculated through the flow rule considering the classical plasticity. First, decomposition of strains is written as:

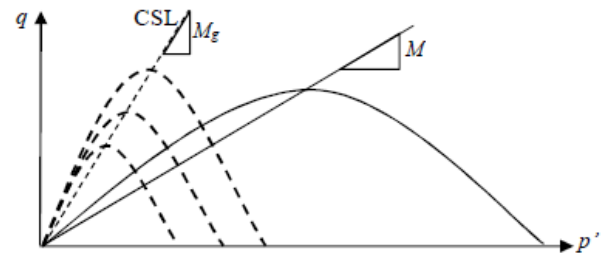


Figure 2. Yield and potential functions in soils

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p \quad (8)$$

where the elastic and plastic strains are calculated as:

$$d\varepsilon_{ij}^e = C_{ijkl}^e d\sigma_{kl} \quad (9a)$$

$$d\varepsilon_{ij}^p = \frac{1}{H_{L/U}} \left[n_g^{L/U} \otimes n \right] : d\sigma_{ij} \quad (9b)$$

where (9a) is similar to (2) and in (9b) $H_{L/U}$ is the plastic modulus. Again we notice the use of two unit vectors in defining the plastic strain.

2.4 Stress-Strain Relationship

Effective stress increments, $d\sigma_{ij}'$, are calculated through the stress-strain relationship as:

$$d\sigma_{ij}' = D_{ijkl} d\varepsilon_{kl} \quad (10)$$

where D_{ijkl} is the fourth order elasto-plastic material matrix (also called constitutive matrix) and $d\varepsilon_{kl}$ is the total strain increment. Since there is no yield surface prescribed in the model, there is no consistency condition written to enforce the stress vector to be on a yield or a similar form of surface. Owing to the need to write explicitly Eq. (10), we first rewrite (8) using (9) and (10) as:

$$d\varepsilon_{ij} = \left\{ C_{ijkl}^e + \frac{1}{H_{L/U}} \left[n_g^{L/U} \otimes n \right] \right\} : d\sigma_{kl}' \quad (11)$$

where the term in the parenthesis is the elastoplastic compliance tensor, C_{ijkl}^{ep} . Now, inverting Eq. (11) with some vector algebra we get,

$$d\varepsilon = C^e d\sigma' + \frac{n_g^{L/U} (n^T D^e d\varepsilon)}{H + n^T D^e n_g^{L/U}} \quad (12)$$

which results in the following final stress-strain relationship for both loading and unloading stages:

$$d\sigma' = \left[D^e - \frac{D^e n_g^{L/U} n^T D^e}{H_{L/U} + n^T D^e n_g^{L/U}} \right] d\varepsilon_{L/U} \quad (13)$$

Although this relation is no different than the one used in various sources derived from the classical plasticity, the fact that no yield or any other surface (say $F=0$ type) is required to derive it makes the GPT a powerful, yet a simple theory. While it is not required, GPT also allows such a $F=0$ surface to be implemented to calculate n [9-

10]. In the case of an undrained loading, pore pressure increments (dp_w) are computed in terms of the mean and deviatoric stress components ($d\sigma'_v, d\sigma'_s$) and confining stress $d\sigma'_c$ as,

$$dp_w = d\sigma'_s/3 + d\sigma'_c - d\sigma'_v \quad (14)$$

2.5 Hardening Law

2.5.1 Normally Consolidated Clays

In order for the evolution of plastic strains, hence the stress-strain relationship, hardening law must be defined. The ongoing model is of *isotropic hardening* one with a deviatoric plastic strain increment in its nature which can also be called a *deviatoric hardening model*. The plastic modulus for isotropic virgin compression paths is,

$$H_L = H_0 \sigma'_v \quad (15)$$

where $\sigma'_v = I_1'$ and $H_0 = \frac{1+e_0}{\lambda - \kappa}$ with e_0 being the initial

void ratio, λ is the slope of virgin compression curve and κ is the slope of unloading/reloading curve. If one is to follow other stress paths, this relation becomes:

$$H_L = H_0 H_\eta \sigma'_v \quad (16)$$

where

$$\begin{aligned} \eta = 0 &\longrightarrow H_\eta = 1 \\ \eta = M &\longrightarrow H_\eta = 2 \end{aligned} \quad (17)$$

A more general stress path function is provided as below to ensure that similar stress paths yield similar results,

$$H_\eta = \left(1 - \frac{\eta}{M}\right)^\alpha \frac{(1+d_0^2)}{(1+d^2)} \left| \text{sign}\left(1 - \frac{\eta}{M}\right) \right| \quad (18)$$

with $\alpha=2$ for most clay soils. In order for this plastic modulus definition to be three dimensional (3-D) so it can be used in an all purpose finite element code, M should be a function of Lode's angle such as the one below that is suitable also for a smoothed Mohr-Coulomb model;

$$M = \frac{18M_c}{18 + 3(1 - \sin 3\theta)} \quad (19)$$

M_c is the value of M in compression.

2.5.2 Over-Consolidated Clays

This much of the model is sufficient to model normally consolidated clays. For the over-consolidated soils (OC), there has to be some kind of a *memory parameter* to keep track of previous stress history. In this study, this is achieved by a *mobilized hardening modulus*, H_ζ defined as:

$$H_\zeta = \left(\frac{\zeta_{\max}}{\zeta}\right)^\gamma \quad (20)$$

where

$$\zeta = \left(1 - \frac{(1+\mu)\eta}{\mu M}\right)^{-1/\mu} \frac{\eta}{M} \sigma'_v \quad (21)$$

is the *mobilized stress function*. The plastic loading modulus, H_L , is now modified as:

$$H_L = H_0 H_\zeta (H_\eta + H_\xi) \sigma'_v \quad (22)$$

where other hardening parameters are:

$$H_\xi = \beta \exp(-\beta\xi) \quad (23)$$

where

$$\beta = \beta_0 \left(1 - \frac{\zeta}{\zeta_{\max}}\right) \quad (24)$$

and

$$d\xi = \sqrt{(d\varepsilon_s^p : d\varepsilon_s^p)} \quad (25)$$

We see that two additional fitting parameters, γ and β_0 , are needed to extend the range of application of the model, particularly to modeling OC clays.

2.6 Elastic Behavior

Since soils are effective normal stress dependent materials where their stiffness moduli changes as the depth of the soil layer increases. Therefore, their elastic moduli, namely the shear modulus, G and the bulk modulus, K , are taken as a function of mean effective stress, p' . The following elastic relations hold:

$$d\varepsilon_s^e = \frac{1}{G} d\sigma_s \quad (26a)$$

$$d\varepsilon_v^e = \frac{1}{K} d\sigma_v \quad (26b)$$

where

$$G = G_0 \left(\frac{p'}{p_0}\right) \quad (27a)$$

$$K = K_0 \left(\frac{p'}{p_0}\right) \quad (27b)$$

with p_0 being the reference pressure, G_0 the initial shear modulus and $K_0 = \frac{1+e_0}{\kappa}$ the initial bulk modulus. A

recent comprehensive study investigating the effect of nonlinear elastic behavior on the elasto-plastic response of soils is [11].

5. MODELING TRIAXIAL TESTS

In this study, the main framework of the GPM is implemented in a computer program written in MATLAB which is verified with available monotonic triaxial shear tests. In a standard triaxial compression test, Lode's angle, θ takes the following form:

$$-\frac{\pi}{6} < \theta = \frac{1}{3} \sin^{-1} \left(\frac{3\sqrt{3}J_3'}{2J_2'^{3/2}} \right) < \frac{\pi}{6} \quad (28)$$

where $J_2' = \frac{1}{2} \sigma_s' : \sigma_s'$ and $J_3' = \frac{1}{3} \text{tr}(\sigma_s'^3)$ with

$\sigma_s' = \text{dev}(\sigma') = \sigma' - \frac{1}{3} \text{tr}(\sigma')$. In triaxial stress space, we

use p' and q as stress variables with $\sigma_v' = I_1' = p'$ and $q = \sqrt{3J_2'}$. As for strains, we write,

$$d\varepsilon_v = \text{tr}(d\varepsilon) \quad (29)$$

and

$$d\varepsilon_s = \frac{2}{3} \sqrt{\left[\frac{1}{2} \text{dev}(d\varepsilon) : \text{dev}(d\varepsilon) \right]} \quad (30)$$

where

$$\text{dev}(d\varepsilon) = d\varepsilon - \frac{1}{3} d\varepsilon_v \quad (31)$$

3.1 Normally Consolidated Behavior

Prior to describing the modeling characteristics of the theory upon triaxial shear response of normally consolidated clays, it should be noted that the current formulation of the GPM is also capable of capturing the isotropic or anisotropic compression of clay soils. Such a response is modeled while the sample is still on normally consolidated line, NCL and recompression line during loading-unloading stages. An example simulation is run by [2] using a Kaolin soil with $\phi' = 23^\circ$. Slightly smaller void ratio changes are observed in their analyses as compared to the tests of [12].

There are two types of triaxial tests simulated in this section. One is the constant p' test and the other is the constant cell pressure, σ_c' test. Both of them are performed drained and undrained. In the constant p' test, following relation holds for the principal stress increments:

$$d\sigma_2' = d\sigma_3' = -d\sigma_1'/2 \quad (32)$$

In the constant σ_c' test (or constant σ_3' test) we have the following constraint conditions for the stress and strain components:

$$d\sigma_2 = d\sigma_3 = 0; d\varepsilon_2 = d\varepsilon_3 = -d\varepsilon_1/2 \quad (33)$$

These constraints must hold true throughout the analysis to be able to get accurate results. Figure 3 presents the consolidated drained (CD) triaxial test simulation done by keeping constant p' of a normally consolidated (NC) Bangkok clay in terms of stress ratio-deviatoric strain as well as stress ratio-volumetric strain behaviors. Test results of [7] are shown in markers. The model simulates

the stress-strain relationship well enough (Figure 3a) but underpredicts the volumetric strain behavior (Figure 3b).

Due to this reason, the normally consolidated behavior is also modeled using the modified Cam-Clay model (MCC) to better appreciate the differences between the two related but inherently different models. The MCC assumes that in addition to reaching the critical state for stresses, soil material needs also to be at a loose state to consider failure. Thus, at failure we have:

$$q_f = M p_f' \quad (34)$$

$$v_f = \Gamma - \lambda \ln \left(\frac{p_f'}{p_{ref}} \right) \quad (35)$$

where (p_f', q_f) are the stresses at failure and p_{ref} is the reference pressure, M is the slope of critical state line, Γ , is the specific volume at the reference pressure and v_f is the specific volume at critical state. In the MCC model the isotropic hardening is considered where the compression behavior of soil is governed by the following relationships in loading and unloading, respectively:

$$v = N - \lambda \ln \left(\frac{p'}{p_{ref}} \right) \quad (36)$$

$$v = v_s - \kappa \ln \left(\frac{p'}{p_c} \right) \quad (37)$$

where N is the specific volume at 1 atm pressure and v_s is the specific volume at the beginning of unloading. p_c is the preconsolidation pressure.

Figure 4 shows the results of constant cell pressure, σ_c' , consolidated undrained (CU) triaxial test simulation for the same NC clay. GPM results capture the deviatoric stress-strain behavior as well as the stress path very well. While the pore pressure response yields some discrepancy, the maximum pore pressure is captured by the GPM. In comparison, the MCC model predicts the pore pressures slightly better but the stress path slightly worse.

The drained test results are given in Figure 5 in terms of stress ratio-deviatoric strain behavior and stress ratio-volumetric strain relationship. CD results match better than the CU test results as it was easier to model the drained behavior of the NC Bangkok clay. As for the MCC model, volumetric strains are modeled better than they are by the GPM.

Figure 6 shows the constant cell pressure CU test [13] simulations of NC Weald clay. While the failure load is slightly underpredicted by the model, pore pressure is overpredicted, in turn. As far as the NC clay behavior, Figure 7 is the last test simulation with a constant σ_c' CD test. The simulation results capture the overall behavior very well with a remarkable match of the volumetric-strain vs. axial strain relationship (Figure 7b). Table 1 gives the model parameters used in the analyses including the overconsolidated (OC) ones.

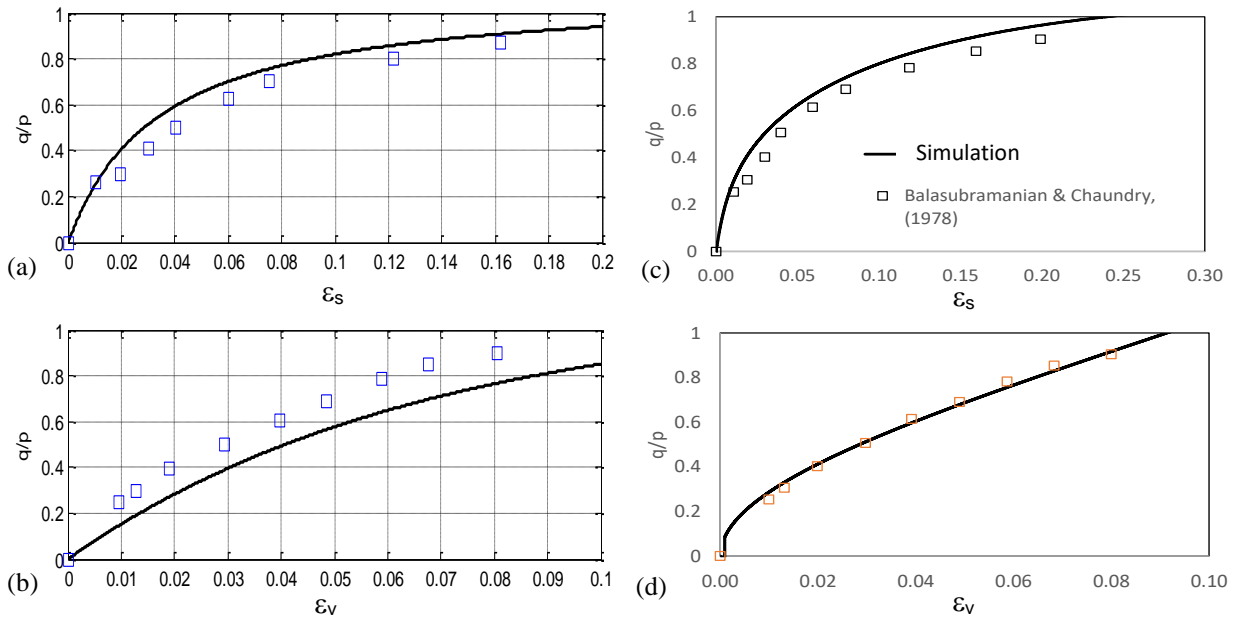


Figure 3. Constant p' CD simulation for NC Bangkok clay; stress ratio-deviatoric strain behavior and stress ratio-volumetric strain behavior; (a) and (b) GPM predictions, (c) and (d) MCC predictions

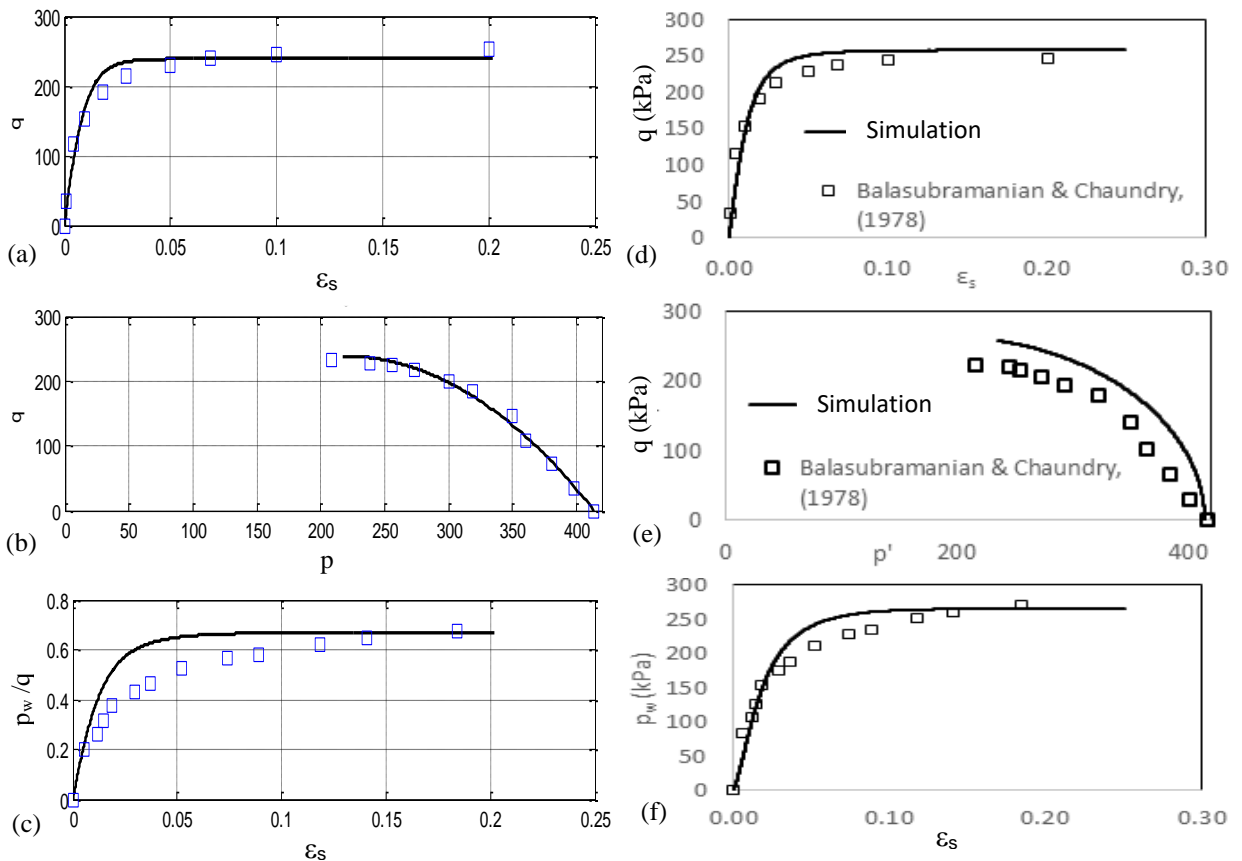


Figure 4. Constant σ_c' CU simulation for NC Bangkok clay; stress ratio-deviatoric strain behavior and stress path and pore pressure-deviatoric strain behavior; (a)-(c) GPM predictions, (d)-(f) MCC predictions

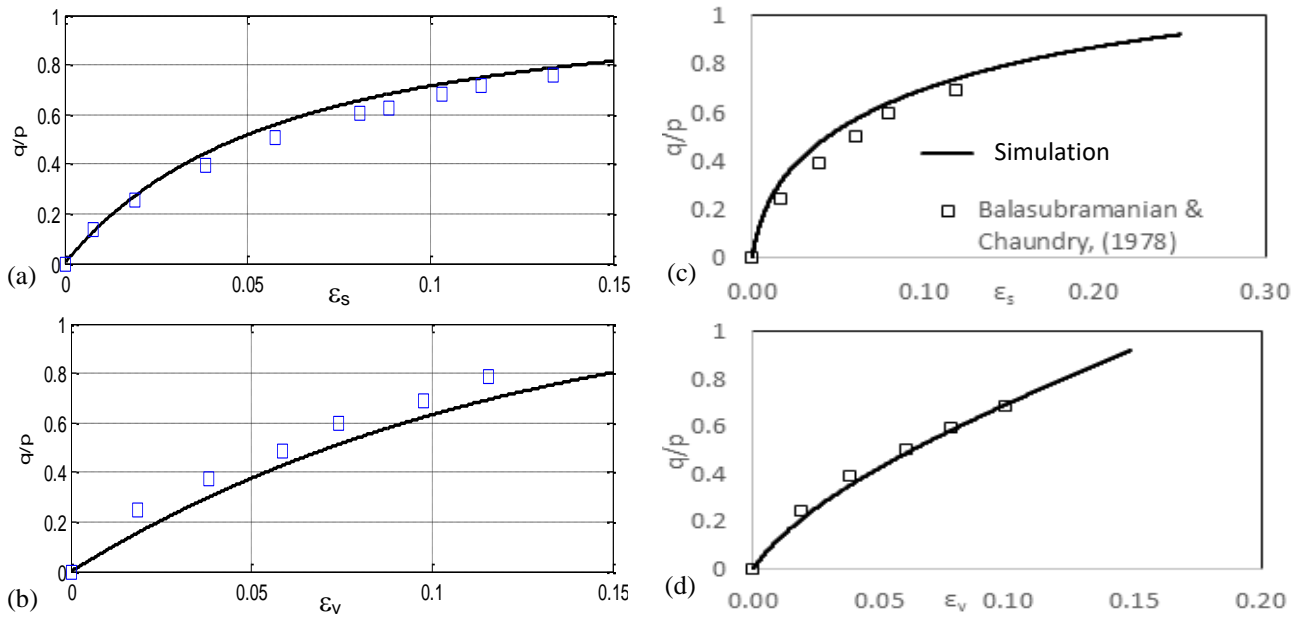


Figure 5. Constant σ'_c drained test (CD) simulation for NC Bangkok clay, Stress ratio-deviatoric strain behavior, stress ratio-volumetric strain behavior; (a)-(b) GPM predictions, (c)-(d) MCC predictions

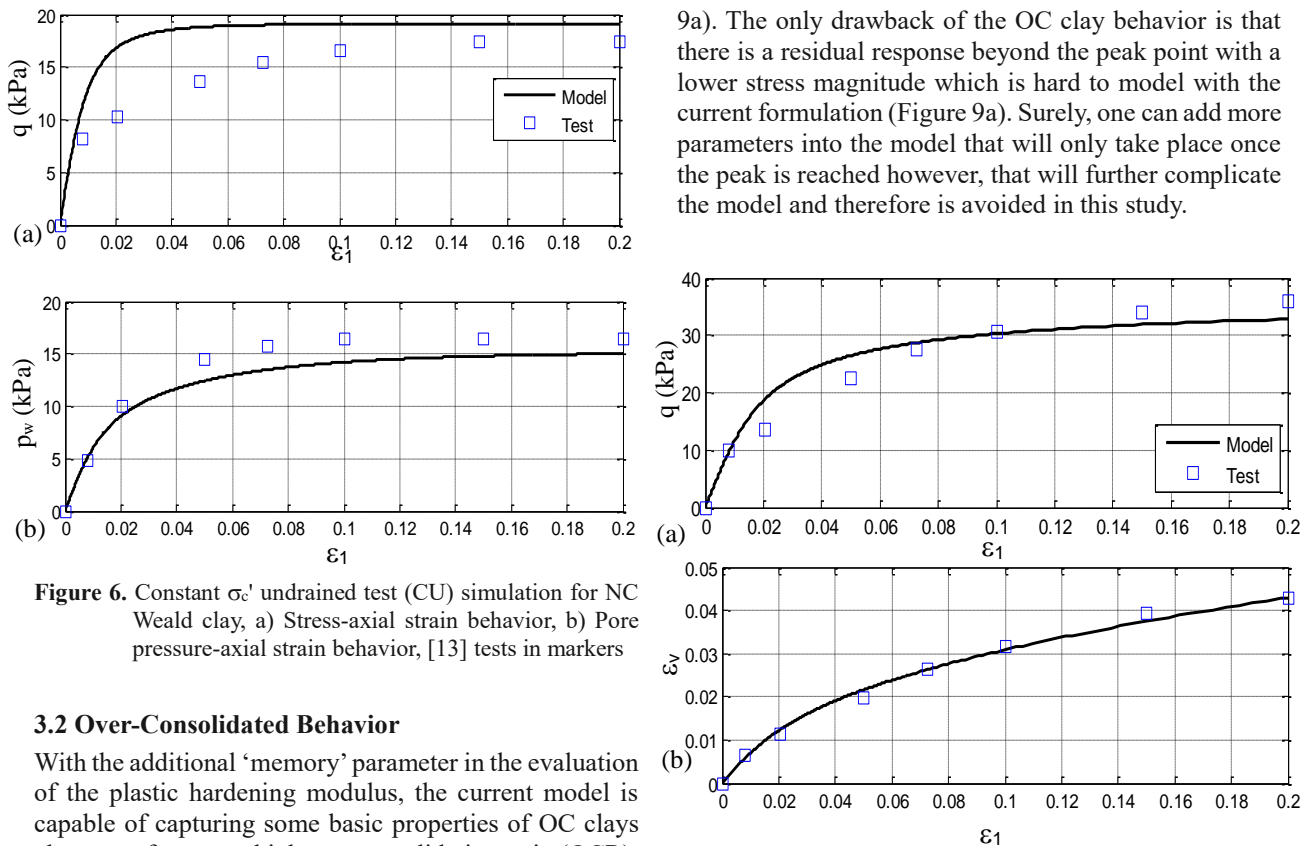


Figure 6. Constant σ'_c undrained test (CU) simulation for NC Weald clay, a) Stress-axial strain behavior, b) Pore pressure-axial strain behavior, [13] tests in markers

3.2 Over-Consolidated Behavior

With the additional ‘memory’ parameter in the evaluation of the plastic hardening modulus, the current model is capable of capturing some basic properties of OC clays also, even for a very high overconsolidation ratio (OCR). Figure 8 and 9 present such a highly OC Weald clay triaxial test results with OCR=24. Tests modeled are again the constant σ'_c undrained and drained tests. The GPM is able to simulate the sign changes in the pore pressure and volumetric strain behavior (Figure 8b, 9b) and capture the overall stress-strain response (Figure 8a,

9a). The only drawback of the OC clay behavior is that there is a residual response beyond the peak point with a lower stress magnitude which is hard to model with the current formulation (Figure 9a). Surely, one can add more parameters into the model that will only take place once the peak is reached however, that will further complicate the model and therefore is avoided in this study.

Figure 7. Constant σ'_c drained test (CD) simulation for NC Weald clay, a) Stress-axial strain behavior, b) Volumetric strain-axial strain behavior, tests of [13] in markers

Table 1. Model parameters used in triaxial test simulations

Soil Type	K_0 (kPa)	G_0 (kPa)	p_0 (kPa)	M	H_0	μ	β_0	γ	α
Bangkok Clay	12420	15000	414	1.1	6.6	2.0	-	-	0.75-0.95
Weald Clay	5281	5516	414	0.9	165	3.0	0.1	0.4	0.009-0.15

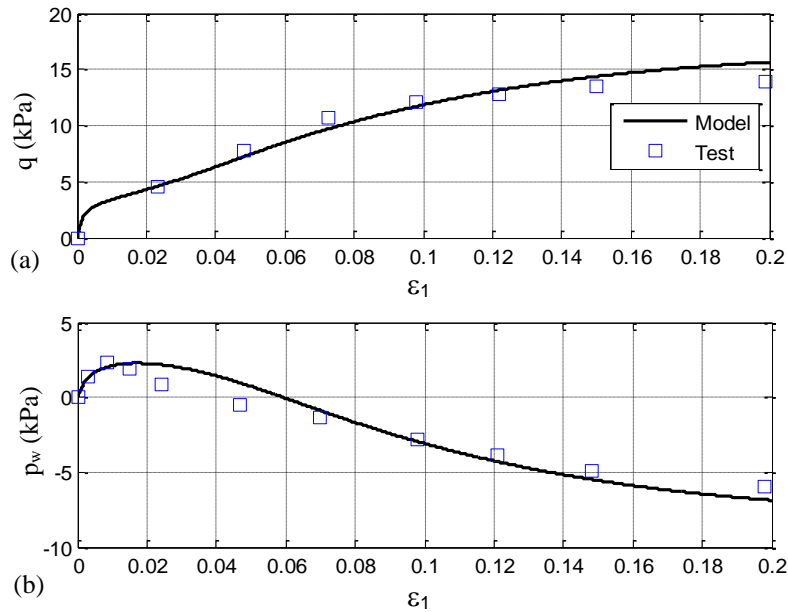


Figure 8. Constant σ'_c undrained test (CU) simulation for OC Weald clay (OCR=24), a) Stress-axial strain behavior, b) Pore pressure-axial strain behavior, tests of [13] in markers

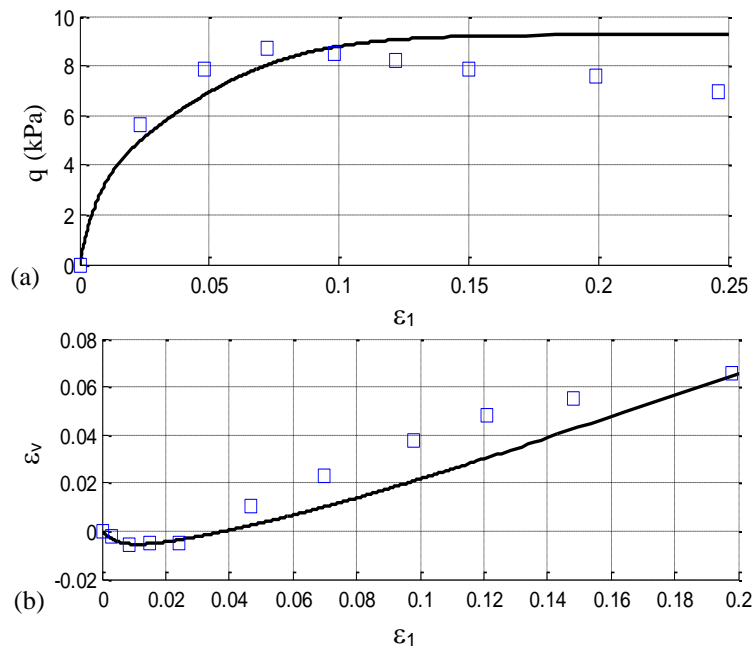


Figure 9. Constant σ'_c undrained test (CU) simulation for OC Weald clay (OCR=24), a) Stress-axial strain behavior, b) Pore pressure-axial strain behavior, tests of [13] in markers

4. CONCLUSION

Constitutive modeling of monotonic behavior of clays is presented in this study. Mathematical formulation of the Generalized Plasticity Model is given in all its aspects in terms of the constitutive relations for clays under monotonic loadings which are integrated using an explicit method. No reference to a yield or a potential surface is made in the model and thus, the flow rule and particularly the elasto-plastic constitutive matrix are derived based upon two unit vectors essentially calculated to describe the plastic flow direction as well as the loading direction. Computer implementation is followed by its experimental verification through a number of drained and undrained triaxial shear tests. At this point, the tests are also simulated using the modified Cam Clay model to make a comparison between the capabilities of the GPM and the classical MCC models. Simulation results indicate that the GPM is a simple but very effective model to capture the static behavior of normally and overconsolidated clays for various stress paths.

ACKNOWLEDGMENT

This study has been funded by the EU Marie Curie-Career Integration Grant with project acronym 'DRISCS' and project number 333831. Support of the EU is highly appreciated. The author also acknowledges the support of Mr. Mert Eyüpgiller.

REFERENCES

- [1] Zienkiewicz O.C., and Mroz Z., "Generalized plasticity formulation and applications to geomechanics", Desai C.S., Gallagher R.H., editors, *Mechanics of Engineering Materials*. Wiley; Ch. 33: 655-679, (1984).
- [2] Zienkiewicz O.C., Leung K.H., Pastor M., "Simple model for transient soil loading in earthquake analysis: I. Basic model and its application", *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, 9: 453-476, (1985).
- [3] Pastor M., Zienkiewicz O.C., Leung K.H., "Simple model for transient soil loading in earthquake analysis: II. Non-associative models for sands", *Int. J. Num. Anal. Mthd. Geomech.*, 9: 477-498, (1985).
- [4] Pastor M., Zienkiewicz O.C., "A generalized plasticity hierarchical model for sand under monotonic and cyclic loading", *Proceedings of the 2nd Int. Conf. on Num. Models in Geomech.*, 31 March-4 April; Ghent, Belgium: M. Jackson and Son Pub., 131-150, (1986).
- [5] Pastor M., Zienkiewicz O.C., Chan A.C., "Theme/feature paper: Generalized plasticity and the modeling of soil behavior", *Int. J. Numer. Anal. Mthds Geomech.*, 14: 151-190, (1990).
- [6] De Borst R. and Heeres O.M., "A unified approach to the implicit integration of standard, non-standard and viscous plasticity models", *Int. J. Numer. Anal. Mthd Geomech.*, 26: 1059-1070, (2002).
- [7] Balasubramaniam A.S., Chaudhry A.R. "Deformation and strength characteristics of soft Bangkok clay", *ASCE J. Geotech. Eng. Div.*, 104 GT9: 1153-1167, (1978).
- [8] Rahman M.S., and Ulker M.B.C., "*Modeling and Computing for Geotechnical Engineering: An Introduction*", CRC Press-Taylor & Francis, ISBN 9781498771672, Boca Raton, NJ, (2018).
- [9] Ulker M.B.C., "Constitutive modeling of static behavior of clays using the generalized plasticity theory", *Proc. 16th National Soil Mechanics and Foundation Engineering Conference*, October 13-14, Atatürk University, Erzurum, (2016).
- [10] Ulker M.B.C., "A new hardening interpolation rule for the dynamic behavior of soils using generalized plasticity framework", *Proc. of the 19th Int. Conf on Soil Mechanics and Geotech. Engg.* (ICSMGE), 17-22 Sept., Seoul, South Korea, (2017).
- [11] Tatlioglu E., Ulker M.B.C., Lav A., "Effect of mean stress dependency of elastic soil moduli on the constitutive behavior of sand through UBCSAND", *Proc. 26th European Young Geotechnical Engineers Conference*, Sept. 11-14, Graz, Austria, (2018).
- [12] Roscoe K.H., and Burland J.B. "*On the Generalized Stress-Strain Behaviour of "Wet" Clay*", in J. Heyman and F. A. Leckie (eds). *Engineering Plasticity*, Cambridge University Press, 535-610, (1968).
- [13] Henkel D.J., "The effect of overconsolidation on the behaviour of clays during shear". *Geotechnique*, VI: 139-150, (1956).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



Farklı açıklık oranlarındaki NACA-0018 rüzgâr türbini kanat modeli performansının sayısal ve deneysel incelenmesi

Numerical and experimental investigation of NACA-0018 wind turbine aerofoil model performance for different aspect ratios

Yazar(lar) (Author(s)): Himmet Erdi TANÜRÜN¹, İsmail ATA², Mehmet Emin CANLI³, Adem ACIR⁴

ORCID¹: 0000-0001-7814-7043

ORCID²: 0000-0003-0412-8397

ORCID³: 0000-0002-8745-0877

ORCID⁴: 0000-0002-9856-3623

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Tanürün H. E., Ata İ., Canlı M. E. ve Acır A., “Farklı açıklık oranlarındaki NACA-0018 rüzgâr türbini kanat modeli performansının sayısal ve deneysel incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 23(2): 371-381, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.500043

Farklı Açıklık Oranlarındaki NACA-0018 Rüzgâr Türbini Kanat Modeli Performansının Sayısal ve Deneysel İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Himmet Erdi TANÜRÜN^{1*}, İsmail ATA², Mehmet Emin CANLI³, Adem ACIR¹

¹Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

²Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uzay Müh. Bölümü, Erciyes Üniversitesi, Türkiye

³Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Müh. ABD, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 20.12.2018 ; Kabul/Accepted : 19.04.2019)

ÖZ

Rüzgâr enerjisinin yararlı enerjiye dönüştürülmesinde kullanılan rüzgâr türbinleri, farklı kanat modellerinden oluşmaktadır. Türbin performansını etkileyen en önemli etkenlerden biri kanat modeli aerodinamik performansının değişimidir. Rüzgâr türbin kanatlarında kullanılması muhtemel olan NACA-0018 kanat modelinin aerodinamik performansı bu çalışma kapsamında, sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Performans analizi için yapılan sayısal çalışmalar hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) esasına göre çalışan ANSYS Fluent™ 14,5 yazılımında SST (Shear Stress Transport) türbülans modeli altında incelenmiştir. Sayısal çalışmalarda Reynolds (Re) sayısı $5,7 \times 10^4$ kabul edilmiş, 0° den 60° ye kadar her $2,5^\circ$ lik hücum açısı için analizler tekrarlanmıştır. Deneysel çalışmalar ise açık çevrimli rüzgâr tüneline her 5° hücum açısı için 0° - 60° aralığında gerçekleştirilmiştir. Her iki çalışmada da belirlenen hücum açılarındaki kanat modelinin kaldırma katsayısı (C_L), sürüklenme katsayısı (C_D) ve aerodinamik verimlilik (C_L/C_D) değerleri bulunmuştur. Sayısal sonuçlara göre açıklık oranı-1 (AR1) kanat modelinde $32,5^\circ$ de irtifa kaybı gözlenirken, açıklık oranı-2 (AR2) kanat modelinde ise 25° de irtifa kaybı söz konusudur. AR1 ve AR2 kanat modelleri için yapılan deneysel çalışma sonuçlarına göre her iki kanadın C_L değeri, sayısal çalışmalar neticesinde elde edilen verilerden sırasıyla %0,41 ve %2,71 oranında daha olumludur. Benzer şekilde deneysel olarak elde edilen C_D değerlerinin AR1 ve AR2 kanat modeli için sayısal verilerden sırasıyla %6,35 ve %5,16 kadar daha iyi olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Sayısal çalışma sonucu AR1 ve AR2 kanat modelleri için elde edilen C_L/C_D değerleri aynı yapılar için ölçülen deneysel verilerden her bir kanat modeli için sırasıyla %3,86 ve %12,04 daha yüksektir. Hem deneysel hem de sayısal çalışma sonucunda NACA-0018 kanat modelinin iki farklı açıklık oranına sahip yapılarından AR1 yapısının aerodinamik verimi, irtifa kaybı öncesi ve sonrasında AR2 kanadına göre belirgin bir avantaja sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Rüzgâr enerjisi, rüzgâr türbini, NACA-0018 kanat modeli, en-boy oranı, aerodinamik verim.

Numerical and Experimental Investigation of NACA-0018 Wind Turbine Aerofoil Model Performance for Different Aspect Ratios

ABSTRACT

Wind turbines used in the conversion of wind energy into useful energy consist of different aerofoil models. One of the most important factors affecting turbine performance is the change in aerodynamic performance of the aerofoil model. The aerodynamic performance of the NACA-0018 aerofoil model, which is likely to be used in wind turbine blades, has been investigated numerically and experimentally. Numerical studies for performance analysis were studied using ANSYS Fluent™ 14,5 software, which is based on computational fluid dynamics (CFD), using SST (Shear Stress Transport) turbulence model. In numerical studies, Reynolds (Re) number was accepted as $5,7 \times 10^4$, and the analyses were repeated for every $2,5^\circ$ angle of attack from 0° to 60° . Experimental studies were carried out in the open loop wind tunnel between 0° - 60° for every 5° angle of attack. In both studies, the lift coefficient (C_L), drag coefficient (C_D) and aerodynamic efficiency (C_L/C_D) values of the NACA-0018 aerofoil model were determined for selected attack angles. According to the numerical results, a stall occurred at $32,5^\circ$ angle of attack for the AR1 model, while at 25° for the AR2 model. Considering with the results of experimental study for AR1 and AR2, the C_L value of both models was 0,41% and 2,71% better than the data obtained as a result of numerical studies, respectively. Similarly, it was concluded that the experimentally obtained C_D values were 6.35% and 5.16% better than the numerical data for the AR1 and AR2 models, individually. As a result of numerical study, the C_L/C_D values obtained for AR1 and AR2 were 3.86% and 12.04% higher for each aerofoil model than the experimental data for the same structures. As a consequence of both experimental and numerical study, the aerodynamic efficiency of the AR1 structure from the structures of NACA-0018 aerofoil models having two different aspect ratios had a significant advantage compared to the AR2 before and after the stall.

Keywords: Wind energy, wind turbine, NACA-0018 aerofoil model, aspect ratio, aerodynamic efficiency.

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

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Refah seviyesi artışı beraberinde enerji talebinde yükseliş meydana getirmektedir. Günümüzde enerji arzı fosil kaynaklara dayalı enerji üretim mekanizmalarıyla sağlanmaktadır. Fosil kaynakların sonlu oluşu ve çevreye zararlı salınımlarından ötürü bu kaynakların alternatifleri ve daha verimli enerji üretim yöntemlerinin bulunması zorunludur. Bu kapsamda muhtemel alternatif enerji kaynaklarının başında yenilenebilir enerji kaynakları gelmektedir. Fosil kökenli enerji kaynaklarının zararlı etkileri yenilenebilir enerji kaynakları aracılığıyla bertaraf edilmekte ve çevreye duyarlı enerji dönüşüm yöntemlerinin kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretilmesi ile yararlı hale dönüşüm gerçekleşmekte ve dönüşüm sistemlerinin yüksek dönüşüm verimine sahip olması en uygun yöntemin ve donanımın seçilmesi ile sağlanmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgâr enerjisi, rüzgâr türbinleri ile yararlı hale dönüştürülmektedir. Rüzgâr türbinlerinin bireysel kullanılması ile kırsal bölgelerde yaşayan toplumların ihtiyaçları karşılanmakta bunun yanında endüstriyel olarak kurulan ve işletimi yapılan tesisler aracılığıyla da modern toplumların elektrik tabanlı enerji ihtiyaçları karşılanmaktadır. Rüzgâr enerjisinin daha verimli ve etkin kullanılması için bölgeye özel rüzgâr türbinlerinin kullanılması ve daha verimli kanat geometrilerinin ve enerji dönüşüm sistemlerinin tasarlanması gerekmektedir [1]. Rüzgâr türbinlerinde bulunan kanat duvarlarına etkiyen kaldırma kuvveti türbin rotorunun dönmesine neden olmakta ve rotorun bağlı olduğu jeneratör grubu da elektrik üretmektedir [2]. Bu nedenle türbin kanatlarının aerodinamik performansı türbin verimini etkileyen önemli parametrelerden biridir. Türbin kanatlarının veya kanat profillerinin aerodinamik performansı üzerine farklı araştırmacılar tarafından birçok sayısal ve deneysel çalışma yapılmış ve bu çalışmalardan bazıları şu şekilde sıralanmıştır. Erişen ve Bakırcı [3], NACA-0012 ve NACA-4412 kanat profilleri üzerinde bir takım değişiklikler yaparak yeni kanat profilleri oluşturmuş ve tüm kanatların aerodinamik performansını ifade eden C_L , C_D ve C_L/C_D katsayılarını hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizi sonucunda elde etmiştir. -10 ile 10° arasındaki düşük hücum açılarında (α) gerçekleştirilen analizlerde, hücum açısı 6° olduğunda en yüksek aerodinamik verim elde edilmiştir. Düşük hücum açılarında Mach sayısının artması sürtünme kuvvetini lineer olarak yükseltirken, hücum açısının artması ile sürtünme kuvvetinde parabolik bir artış gözlenmiştir. Gugliya ve ark. [4] NACA-0012 kanat profiline sahip bir modelin hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizini ses altı akış şartları altında Spalart Allmaras türbülans modeli kullanarak 3×10^6 Re sayısı için sayısal olarak gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışma sonucunda mevcut fiziksel yapının HAD ile kabul edilebilir seviyede modellenebildiği sonucuna varılmıştır. Patel ve ark. [5] tarafından 3×10^6 Re sayısı altında, 0° ve 6° hücum açısında NACA-0012 kanat modeli aerodinamik

performansını incelemek için sayısal inceleme yapılmıştır. Sayısal çalışmada hücum açısının 0° den 6° 'ye getirilmesi durumunda sürtünme kuvvetinde meydana gelen artışın, kaldırma kuvvetine göre çok daha düşük olduğunu gözlenmiştir.

Şahin ve Acır [6], NACA-0015 rüzgâr türbini kanat profilini, düşük Re sayısında (6×10^4) 0 ile 20° hücum açılarında deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Araştırmacılar deneysel olarak elde ettikleri verileri Spalart Allmaras ve k- ϵ türbülans modeline sahip HAD analizleri ile karşılaştırmış ve elde edilen sonuçların benzer yapıda olduğunu ifade etmiştir. Chen ve ark. [7], çalışmalarında yüksek performanslı rüzgâr türbini kanat grubunun tasarımını yaparak hem serbest hem de sabit geçişli hücum açılarında kanatların sahip olduğu kaldırma/sürüklenme oranını (C_L/C_D) maksimize etmeye çalışmıştır. Bu amaçla genetik algoritma ve akış çözücü RFOIL™ yazılımını kullanarak optimize bir matematiksel model oluşturulmuştur. Elde edilen matematiksel modele göre üretilen WT kanat profili grubu imal edilerek rüzgâr türbininde hem normal hem de ağır hava şartlarında test edilmiştir. Yapılan tasarımlar ile yüksek kaldırma katsayısına ve aerodinamik verime sahip kanat grubu elde edilmiş ve tasarlanan yüksek performanslı kanat profili deneysel ve sayısal çalışma ile doğrulanmıştır. Maulana ve ark. [8], NACA-63 serisi kanat profili değişiminin Darrieus tipi dikey eksenli rüzgâr türbini (DERT) performansına etkisini üç boyutlu HAD analizi yöntemiyle incelemiştir. Yapılan çalışmada $2,5$ m/s rüzgâr hızı altında çalışan kanat yapılarından en iyi kaldırma ve sürüklenme katsayısına sahip olan -12 ile 12° arasındaki her 4° 'lik hücum açıları için sayısal olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre $2,5$ m/s rüzgâr hızında çalışabilecek Darrieus tipi DERT'de NACA-63-412 kanat profilinin kullanılması en iyi güç çıktılarının elde edilmesine imkân vermektedir. Saad ve ark. [9], yaptıkları çalışmada, rüzgâr türbinlerinde kullanılması muhtemel altı farklı kanat modeli (FX 63-137, FX 76-100, S835, S809, NACA-63415 ve NACA-63215) kullanarak 4×10^6 Re sayısı bölgesinde ve -15 ile 15° hücum açısı aralığında en iyi C_L/C_D 'ye sahip yapıyı sayısal olarak ANSYS Fluent™ ve XFOIL™ programlarıyla belirlemeye çalışmıştır. Tüm kanat profilleri için yapılan sayısal çalışma sonuçları uyumlu bulunmuştur. Ayrıca elde edilen sayısal sonuçlar FX 63-137 tipi kanat profilinin deneysel verileri ile doğrulanmıştır. Suvanjumrat [10], açık kaynak kodlu HAD analiz programı olan OpenFOAM™ kullanarak NACA-0015 kanat profili etrafındaki akışı Spalart Allmaras, Wilcox k- ω ve Menter SST k- ω modelinden oluşan üç farklı ekonomik türbülans modeli ile ayrı ayrı incelemiş ve kanat profilinin performansını ifade etmede kullanılan C_L ve C_D katsayılarını elde etmiştir. Çözümlenen sayısal sonuçlar NACA-0015 kanat profili için yapılan deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış ve yapılan karşılaştırılma neticesinde C_L ve C_D katsayıları sırasıyla %13,15 ve %22,36 kadarlık bir hata ile en iyi ifade eden türbülans modelinin Menter SST k- ω modeli olduğu sonucuna varılmıştır. Chumbre ve ark. [11], beş

farklı kanat profiline (NACA-0012, NACA-2412, NACA-6409, NACA-4412, NACA-E387) C_L ve C_D katsayılarının detaylı HAD analizlerini yapmıştır. Yapılan HAD analizleri neticesinde NACA-E387 kanat profiline yüksek kaldırma kuvveti ve düşük sürüklenme kuvveti olduğu ve böyle bir kanat profiline sahip uçak kullanıldığında yakıt sarfiyatının daha az olacağı sonucuna varılmıştır.

Tanürün ve Acır [12], kambur balina yüzgecindeki tüberkül kanat yapısının canlıya kazandırdığı manevra kabiliyetinden esinlenerek, mevcut NACA-0015 kanat profiline sinüzoidal yapı geometrisi (tüberkül) uygulayarak elde edilen tasarımların aerodinamik performanslarını sayısal olarak değerlendirmiştir. Kanat profilleri $7,2 \times 10^5$ Re sayısında, 0 ile 46° arasındaki hücum açılarında analiz edilmiştir. İrtifa kaybı sonrasında aerodinamik verimin, $0,05a0,16w$ kanat profili için düz kanat profiline kıyasla %3,81 daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Tasarlanan iyileştirmeler neticesinde standart haldeki NACA-0015 kanadına yapılan müdahale ile aerodinamik verim artışı sağlanmıştır. Xiao ve Chen [13], 50 m/s hava hızında NACA-0010-35 kanat modelinin C_L , C_D ve C_L/C_D değerleri iki boyutlu HAD analizleriyle -5 ile 19° kanat hücum açılarında sayısal olarak incelenmiştir. En yüksek aerodinamik verim 4° hücum açısında gerçekleşmiştir. Değerlendirilen kanat için irtifa kaybı 14° hücum açısında meydana gelmiş ve hücum açısının arttırılması kanat üzerinde girdap (vortex) bölgeleri oluşturmuştur. Ameer ve Boukhadia [14], farklı Re sayılarında NACA-0015 kanat modeli üzerinde sayısal analizler gerçekleştirmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde, çalışmada kullanılan 3 farklı Re sayısında da hücum açısı arttıkça C_L ve C_D değerlerinin arttığı görülmüştür. Ayrıca Re sayısının, kanat üzerindeki statik basınç dağılımına herhangi bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir.

Rao ve ark. [15], NACA-0012 kanat modeli üzerinde $0-12^\circ$ hücum açısı aralığında C_L ve C_D değerlerinin değişimini incelemek amacıyla sayısal analiz gerçekleştirmiştir. Analizlerde asimetrik kanat modellerinin C_L değerlerinin simetrik kanatlara göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Baykuş kanat yapısına sahip kanat modelinin C_L , C_D ve C_L/C_D değerlerinin değişimi 4,7-12 m/s arasındaki hava hızlarına karşılık gelen 5 farklı Re sayısında deneysel olarak Anyoji ve ark. [16] tarafından incelenmiştir. Çalışmada akış görselleştirme metodu kullanılarak kanat üst yüzeyindeki akış ayrışmaları incelenmiştir. -5 ile 20° hücum açılarında gerçekleşen deneysel sonuçlar incelendiğinde Re sayısının artışı C_L değerinin de lineer olarak artmasına neden olmuştur. Rogowski ve ark. [17], DU-91-W2-250 kanat modeli aerodinamik performansını 3×10^6 Re sayısında deneysel ve 4 farklı türbülans modelinin dikkate alındığı sayısal çalışmalarla karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Reynolds ortalamalı Navier Stokes (Reynolds averaged Navier Stokes-RANS) denklemlerine bağlı çözülen türbülans modellerinde -20 ile 20° hücum açılarında analizler yapılırken, ayrılmış eddy simülasyonu (Detached Eddy

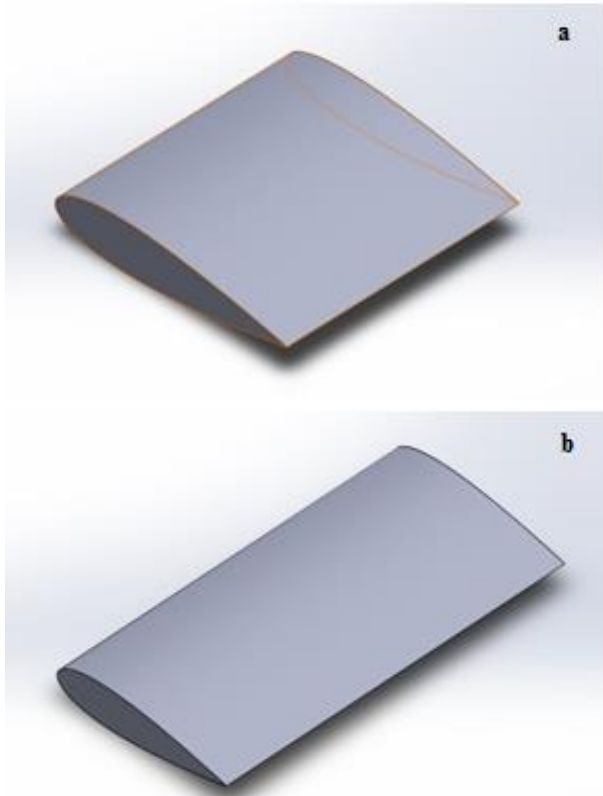
Simulation-DES) denklemlerine bağlı çalışmada sadece $7,08^\circ$ hücum açısında hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, $k-\epsilon$ SST türbülans modelinin C_D değeri deneysel çalışmaya göre 2 kat daha büyük bulunmuştur. Negatif hücum açılarında $k-\epsilon$ SST türbülans modelinde diğer türbülans modellerine göre en kötü sonuçlar hesaplanmıştır. Geçiş SST türbülans modeli laminardan türbülansa geçiş bölgesini en iyi çözümlen türbülans modeli olmuştur. Gore ve ark. [18], NACA-4412 kanat modelinin basınç dağılımını 0 ile 27° hücum açısı aralığında sayısal olarak incelemiştir. Sonuçlar yorumlandığında en yüksek C_L 'ye 25° hücum açısında ulaşılmıştır. Hücum açısı artışının neden olduğu kanadın alt ve üst yüzeyindeki basınç farkının artması C_L 'nin yükselmesiyle sonuçlanmıştır. Bedon ve ark. [19] tarafından dikey eksenli rüzgâr türbinleri arasında olan DeepWind tipi türbinde NACA-0015 ve NACA-0018 tipi kanat profiline sahip yapıların türbinden maksimum güç üretmek için ayrı ayrı veya birleştirilmiş tasarımları üzerine sayısal inceleme yapılmıştır. Çalışma sonucunda DeepWind tipi rüzgâr türbinini verimini yükseltmek için NACA-0015 ve NACA-0018 kanat profillerinin kombine edilmesiyle yeni bir yapının kullanılmasının gerektiği sonucuna varılmıştır. 5 farklı türbülans modeli (standard, RNG ve Realizable $k-\epsilon$, standard ve SST $k-\omega$) kullanılarak, dikey eksenli rüzgâr türbinlerinde (DERT) NACA-0018 kanat modelinin aerodinamik performansı sayısal olarak Hassan ve ark. [20] tarafından incelenmiş ve literatürde bulunan deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Re sayısı 300 000 ile 1 000 000 arasında ve hücum açısı 0 ile 25° aralığında kabul edilmiştir. Karşılaştırmada kullanılan deneysel verilerle en uyum içerisinde olan sayısal sonuçlara SST $k-\omega$ türbülans modeli kullanılarak erişilmiştir. DERT tasarımları için benzer bir çalışma Rogowski ve ark. [21] tarafından yapılan NACA-0018 kanat profiline sahip Darrieus tipi rüzgâr türbinin daimi ve daimi olmayan akış şartları için yapılan aerodinamik performans incelemesidir. Zamana bağlı sayısal çalışmadan, SST türbülans modeli kullanılmasıyla en iyi çözümler elde edilmiş ve deneysel sonuçlar daha doğru yorumlanmıştır.

Bu çalışmada, rüzgâr türbinlerinde kullanılması muhtemel, farklı açıklık oranlarındaki NACA-0018 kanat profiline sayısal ve deneysel olarak incelemesi yapılmıştır. Seçilen iki farklı NACA-0018 kanat profiline her ikisinde de veter uzunluğu 8 cm ve kanat uzunluğu ise 8 cm ve 16 cm olarak belirlenmiştir. Mevcut çalışmaların çoğunluğunda yüksek en-boy oranına sahip sayısal ve deneysel modeller kullanılmaktayken bu çalışmada düşük en-boy oranına sahip kanat profillerinin akış karakteristikleri ve aerodinamik performansları incelenmiştir. NACA-0018 kanat profiline aerodinamik performansını ifade eden C_L , C_D ve C_L/C_D değerleri ANSYS Fluent™ 14,5 ticari HAD programıyla analiz edilmiş ve elde edilen bulgular deneysel çalışma ile karşılaştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

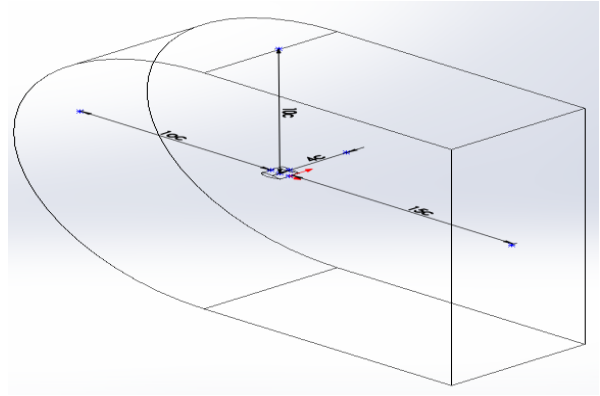
2.1 Sayısal Çalışma (Numerical Study)

NACA-0018 kanat profili ilk olarak iki farklı açıklık oranında bilgisayar destekli tasarım (BDT-CAD) programlarından olan Solidworks™ ile tasarlanmış ve elde edilen modeller Şekil 1'de gösterilmiştir. Kullanılan NACA-0018 kanat profilinin veter çizgisi alt ve üst yüzeylerin tam ortasından geçtiği yani kamburluk eğrisi bulunmadığı için simetrik kanat olarak tanımlanmıştır [22]. Her iki kanat yapısında veter uzunluğu 8 cm olarak belirlenirken, kanat açıklığı ise sırasıyla AR1 için 8 cm ve AR2 için 16 cm olarak alınmıştır.



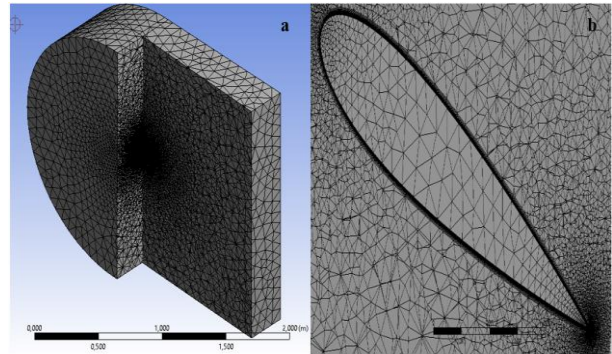
Şekil 1. a) AR1, b) AR2 kanat profilleri (AR1 and AR2 aerofoil profiles)

Kanat profillerinin alanı deneysel çalışmada kullanılan rüzgâr tüneli boyutlarıyla uyumlu olması açısından AR1 ve AR2 kanadı için sırasıyla 0,0064 m² ve 0,0128 m² olarak hesaplanmıştır. Sayısal analizlerde akışkanın belirlenen hacme başka bir ifadeyle akış hacmi içerisinde bir noktadan girmesi (inlet) ve diğer bir noktadan çıkması (outlet) için kullanılan ticari yazılımda tanımlama yapılması gerekmektedir. Şekil 2'de gösterildiği gibi giriş, çıkış ve yan yüzeylerin kanat modeline olan uzaklığı sırasıyla 10C, 15C ve 4C olarak alınarak akış hacminin boyutları literatürdeki çalışmalar dikkate alınarak belirlenmiştir.



Şekil 2. Sayısal analiz için kullanılan C tipi akış alanı boyutları (C-type flow area for numerical analysis)

Kısa ve en az ağ örgüsü (mesh) sayısı ile en ideal yapıyı elde edebilmek için C tipi akış hacmi ve ağ örgüsü olarak ise üçgen (triangular) yapı kullanılmıştır. C tipi akış hacmi, yüksek derecede kontrol ve doğruluk, daha düşük bellek tüketimi ve daha hızlı yakınsama sağlaması açısından tercih edilmiştir [23]. Akış hacmi içerisinde hava akışı her noktada aynı etkiyi göstermemektedir [6, 9]. Ağ yapısı içerisinde en fazla değişiklik kanat profili ve çevresinde meydana gelmektedir. Şekil 3a'da verilen C tipi akış alanı içerisinde bulunan kanat bölgesinde ağ örgüsü yoğunluğu Şekil 3b'de gösterildiği gibi kanada yakın bölgelerde yoğunlaştırılmış ve bu bölgelere etkiyen havanın etkilerini detaylı inceleyebilmek için bölgeye düşen ağ örgüsü sayısı artırılmıştır.



Şekil 3. a) Ağ yapısı, b) Yoğunlaştırılmış ağ bölgesi (a) Mesh structure, b) Intensified mesh zone)

Yapılan sayısal çalışmada hava olarak seçilen akışkan ideal gaz olarak kabul edilmiştir. Akış alanı viskoz, türbülanslı ve $5,7 \times 10^4$ Re sayısında enerji denklemlerinin çözüme ilave edilmemesi için sıkıştırılmaz kabul edilmiştir. Mevcut RANS hesaplaması için geçerli denklemler, süreklilik denklemi ve momentumun korunumu denklemlerinden oluşmakta ve şu şekilde ifade edilmektedir [23-27].

Süreklilik denklemi;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

Momentum denklemi;

$$\frac{\partial(\rho\vec{u})}{\partial t} + \nabla(\rho\vec{u}\vec{u}) = \nabla(\mu\nabla\vec{u}) - \nabla p + \rho\vec{g} \quad (2)$$

Burada, \vec{u} x, y ve z doğrultusundaki hız vektörünü, p basıncı, μ dinamik viskoziteyi, ρ akışkanın yoğunluğunu tanımlamaktadır. Farklı fiziksel olaylara göre geliştirilen cebirsel, tek denklemlilik, iki denklemlilik ve Reynolds gerilme modelleri bulunmaktadır [26]. Cisimler etrafındaki akışı modellemek için en yaygın kullanılan türbülans modelleri arasında Spalart Allmaras, k- ϵ , k- ω ve SST türbülans modelleri bulunmaktadır [22-28]. Tüm akışlar için belirli bir türbülans modeli belirlemek mümkün değildir.

Yapılan sayısal çalışmada ise Suvanjumrat [10] tarafından yapılan çalışma göz önüne alınarak Menter SST k- ω türbülans modeli tercih edilmiştir. Menter SST k- ω türbülans modeli, sınır tabaka problemlerinde ve duvar dibi bölgesi olarak adlandırılan kanat çevresi bölgelerinde daha hassas çözüm yapmaktadır [10]. Bunun dışında yüksek hücum açılarında kanat üst yüzeyinde oluşan türbülanslı bölgelerin daha doğru şekilde çözümlenmesine imkân sağlamaktadır [10]. Menter SST k- ω türbülans modeli, sınır tabakada içerisinde daha hassas çözüm elde etme için Wilcox k- ω modelinin yeniden değerlendirilmesi sonucu geliştirilmiştir [10]. İki denklemlilik olan Menter SST k- ω modeli aşağıdaki gibi ifade edilmiştir [10, 22-28]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U_i) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\rho k}{\omega \sigma_k} \right) \nabla k \right] + 2 \frac{\rho k}{w} S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \frac{\partial U_i}{\partial x_j} S_{ij} - \beta^* \rho k \omega \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \text{div}(\rho \omega U_i) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\rho k}{\omega \sigma_{\omega 1}} \right) \nabla \omega \right] + 2 \rho \gamma_2 S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \rho \gamma_2 \omega \frac{\partial U_i}{\partial x_j} S_{ij} - \beta_2 \rho \omega^2 + 2 \frac{\rho}{\omega \sigma_{\omega 2}} \frac{\partial k}{\partial x_k} \frac{\partial \omega}{\partial x_k} \quad (4)$$

Burada, k türbülans kinematik enerji, w türbülanslı frekans, μ dinamik viskozite, y katı duvara olan mesafe olarak tanımlanmıştır. Eşitliklerde bulunan sabitlerden olan σ_k , β^* , $\sigma_{\omega 1}$, γ_2 , β_2 ve $\sigma_{\omega 2}$ sırasıyla 1, 0,09, 2, 0,44, 0,083 ve 1,17 değerlerine sahiptir [10].

Kanat profillerinin aerodinamik performanslarının incelenmesinde kaldırma katsayısı (C_L), sürüklenme katsayısı (C_D) ve aerodinamik verim (C_L/C_D) en önemli değişkenlerdir. C_L ve C_D aşağıda verilen eşitlikler ile tanımlanmaktadır [2]:

$$C_L = \frac{F_L}{0.5 \rho U_{\infty}^2 A} \quad (5)$$

$$C_D = \frac{F_D}{0.5 \rho U_{\infty}^2 A} \quad (6)$$

Burada, U_{∞} (m/s) serbest akış hızı, A (m²) kanat genişliğinin veter uzunluğuna çarpımı ile elde edilen kanat gölgesinin karakteristik alanı, F_L (N) kanada etkiyen kaldırma kuvveti, F_D (N) kanada etkiyen sürüklenme kuvveti ve ρ (kg/m³) havanın yoğunluğu olarak ifade edilmektedir.

Sayısal analizden elde edilen sonuçların doğruluğunun tescil edilebilmesi için ağ yapısından bağımsızlığın

gösterilmesi gerekmektedir [27]. Ağ yapısından bağımsızlık çalışmasında hem AR1 hem de AR2 kanat modellerinin 20° hücum açısında, 6 farklı ağ yapısı kullanılarak sayısal olarak hesaplanan C_L ve C_D değerlerinin değişimi aşağıda verilen Çizelge 1 ve Çizelge 2'deki gibidir. Çizelge 1'de AR1 kanadında 942 864 ve Çizelge 2'de AR2 kanadında 1 052 956 mesh sayısından sonra C_L ve C_D katsayılarında %0,1'den daha küçük değişimler olduğu görülmektedir. Dolayısıyla AR1 ve AR2 kanatları için sırasıyla 942 864 ve 1 052 956 ideal ağ sayıları olarak belirlenmiştir.

Çizelge 1. 20° hücum açısında AR1 kanadının ağ yapısından bağımsızlığı (Mesh independence of AR1 aerofoil at 20° angle of attack)

Mesh Sayısı	C_L	C_D
761 329	0,728	0,161
875 431	0,738	0,209
942 864	0,741	0,223
1 017 875	0,74236	0,22478
1 187 144	0,74234	0,22477
1 428 783	0,74235	0,22479

Çizelge 2. 20° hücum açısında AR2 kanadının ağ yapısından bağımsızlığı (Mesh independence of AR2 aerofoil at 20° angle of attack)

Mesh Sayısı	C_L	C_D
774 129	0,847	0,147
878252	0,858	0,171
987100	0,869	0,189
1 052 956	0,87233	0,20285
1 214 426	0,87232	0,20384
1 702 116	0,87232	0,20384

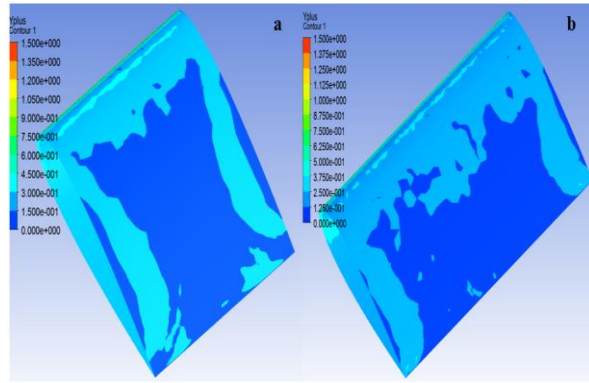
Ağ kalitesi ve doğruluğunun değerlendirilmesinde sadece C_L ve C_D değerlerinde meydana gelen değişimlerin minimuma ulaşmasının amaçlanması, elde edilen çözümün hatalı olmasına sebep olabilmektedir. ANSYS Fluent™ programı kullanılarak elde edilen ağ yapısının geçerliliği 2 farklı yöntem ile kontrol edilebilmektedir. Birincisi, her bir ağ örgüsünün geometrisine bağlı olarak, 0 ile 1 değerlerine sahip olan çarpıklık (skewness), eleman kalitesi (element quality) ve ortogonal kalite (orthogonal quality) değerleridir [25, 28]. Kaliteli bir ağ yapısı için çarpıklık değeri 0 değerine yakın olması gerekirken eleman ve ortogonal kalite

değeri 1 değerine yakın olmalıdır [25, 28]. Seçilen ağ yapısına bağlı olarak AR1 ve AR2 kanat modelleri için elde edilen çarpıklık, eleman ve ortogonal kalite değerleri Çizelge 3’de verilmiştir. Bulunan sonuçların sayısal çalışmalarda ulaşılması gereken değerlerle uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

Çizelge 3. 20° hücum açısında AR1 ve AR2 için ağ yapısı özellikleri (Mesh properties for AR1 and AR2 at 20° angle of attack)

	Eleman kalitesi (Element quality)	Ortogonal kalite (Orthogonal quality)	Çarpıklık (Skewness)
AR1	0,79	0,89	0,22
AR2	0,77	0,86	0,24

Ağ yapısının kalitesini belirleyen ikinci unsur ise kanat modelinin akış alanı içerisinde yakın bölgesindeki ağ katmanına bağlı oluşan kalite olarak tanımlanan y^+ değeridir [29]. Bu değer duvardan olan uzaklığı tanımlayan boyutsuz bir sayı olmakla birlikte literatürde iç akış için 30 ile 100 arasında ve dış akış için 0 ile 5 arasındaki olması tavsiye edilmektedir [25, 27-29]. Mevcut sayısal çalışma için oluşturulan ağ yapısının maksimum y^+ dağılımı Şekil 4’de sunulmuştur. Şekil 4 incelendiğinde her iki kanat modelinin de y^+ değeri dış akış şartlarına bağlı olarak 1,5’den küçük bulunmuş ve böylece oluşturulan ağ yapısının geçerliliği sağlanmıştır.

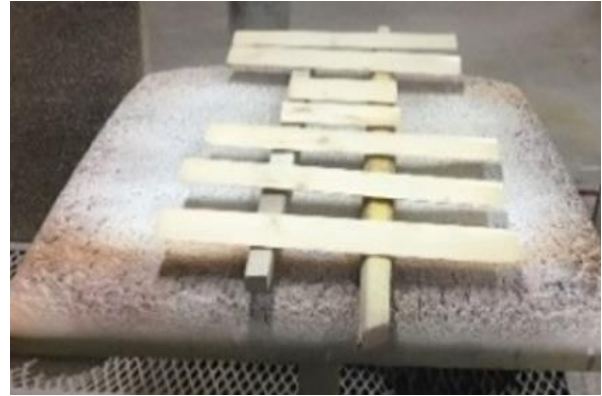


Şekil 4. Kanat yüzeyindeki y^+ dağılımı; a) AR1, b) AR2 (y^+ distribution on aerofoil surface; a) AR1, b) AR2)

2.2 Deneysel Çalışma (Experimental Study)

CAD programında çizilen NACA-0018 kanat profiline sahip model, deneysel çalışma kapsamında öncelikle ahşap türü olan ladin malzemeden uygun kalıplar kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen kanat modelleri yüzeyindeki pürüzlülüğü engellemek için zımparalama ve vernikleme işlemleri de yapılmış ve Şekil 5’deki gibi modeller elde edilmiştir. Belirlenen kanat profillerine sahip modeller rüzgâr tünellerinde test edildiklerinde, test odasının iki yan duvarı ve tavanıyla sınırlanmaktadır.

Bu durum model ile test odasının duvarları arasındaki daralan bölgelerde akışın ivmelenmesine ve model üzerindeki akış yüklerinin artmasına neden olarak blokaj etkisinin meydana gelmesine neden olmaktadır [26]. Bu etki, blokaj oranının (model iz düşüm alanı/rüzgâr tüneli test odası kesit alanı) düşük seçilmesiyle engellenmektedir [30-32]. Yapılan deneysel çalışmada NACA-0018 profiline sahip AR1 ve AR2 tipi kanat modelleri için blokaj oranı sırasıyla 0,075 ve 0,15 olarak belirlenerek blokaj etkisinin zararlı etkilerinden kaçınılmıştır.



Şekil 5. AR1 ve AR2 kanat modelleri (AR1 and AR2 aerofoil models)

Deneysel çalışmada Şekil 6’da görülen GUNT marka HM-170 tipi açık çevrimli rüzgâr tüneli kullanılmıştır. Rüzgâr tüneline hava girişi emiş yönünde ve akış hızı şalter kutusu üzerindeki fan devir ayar şalteri kullanılarak fan devrinin değiştirilmesiyle ayarlanmıştır. Kullanılan tünelin ait teknik özellikler Çizelge 4’de detaylandırılmıştır [33].



Şekil 6. Açık çevrimli rüzgâr tüneli (Open loop wind tunnel)

Çizelge 4. Kullanılan rüzgâr tünelinin teknik özellikleri [33] (Technical specifications of the used wind tunnel)

Fan motoru devir sayısı	2800 dev/dk
Test odası boyutları	292 x 292 mm ²
Akış hızı aralığı	3,1...28 m/s
Tünel ana boyutları	2850 x 750 x 1700 mm ³
Tünel kütlesi	250 kg

Deneysel, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Ankara'nın hava koşullarını dikkate alarak yoğunluk (ρ) ve dinamik viskozite (μ) değerleri sırasıyla $1,15 \text{ kg/m}^3$ ve $1,768 \text{ kg/ms}$ olarak alınmıştır. Havanın akış kanalındaki hızı GERATECH marka sıcak tel anemometresi ile ölçülmüştür. Sıcak tel anemometresi kullanılarak HM170 açık çevrimli rüzgâr tünelineki hava hızı 11 m/s hızı ayarlanmış ve deneysel çalışmadaki Re sayısı Eşitlik 3 kullanılarak $5,7 \times 10^4$ olarak hesaplanmıştır.

$$Re = \frac{\rho U_{\infty} L_c}{\mu} \quad (7)$$

Burada, L_c kanat modelinin karakteristik uzunluğu olarak ifade edilmiştir. Hava hızının ayarlanmasında sonra AR1 ve AR2 kanat modelleri rüzgâr tüneli test odasına yerleştirilerek 0 ile 60° aralığındaki hücum açılarında her 5° için kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri ölçülmüştür. Kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin ölçümü için Şekil 6'da gösterilen GUNT HM-170 marka kuvvetölçer kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan ölçüm cihazlarının belirsizlik analizinde Kline ve McClintock [34] metodundan yararlanılmıştır. Bu yöntem kullanılarak Eş. 4 ve 5'deki ifadeler kullanılarak, belirsizliği meydana getiren her bir değişkenin toplam belirsizliğe etkisi dikkate alınmıştır.

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N) \quad (8)$$

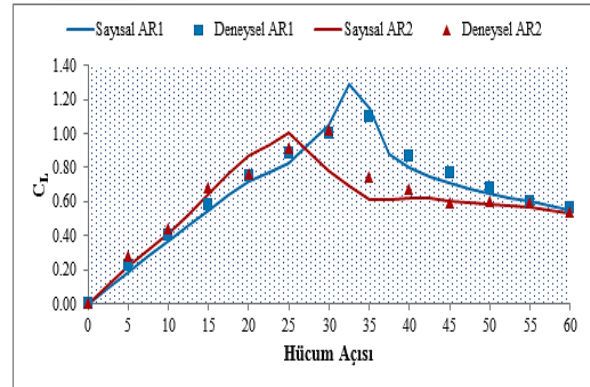
$$W_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_3} w_3\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_N} w_N\right)^2} \quad (9)$$

Kaldırma ve sürüklenme kuvveti için elde edilen ölçüm belirsizliği $\pm 0,014 \text{ N}$ ve akışkan hızı için hesaplanan ölçüm belirsizliği ise $\pm 0,10 \text{ m/s}$ 'dir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada, AR1 ve AR2 olmak üzere 2 farklı en boy oranına sahip NACA-0018 kanat modelinin deneysel ve sayısal olarak aerodinamik performansları incelenmiştir. Aerodinamik performansın temelini oluşturan C_L , C_D , C_L/C_D değerleri aşağıdaki şekillerde sırasıyla verilmiştir. Şekil 7 'de 2 farklı kanat açıklık oranında NACA-0018 kanat modelinin C_L değerleri deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılmıştır. Şekil 7 incelendiğinde, AR1 ve AR2 kanat modellerinin deneysel çalışma sonucunda irtifa kaybı açısı sırasıyla 35° ve 30° olarak belirlenirken, sayısal analizde AR1 ve AR2 kanatlarının irtifa kaybı açısı $32,5^\circ$ ve 25° olarak bulunmuştur. AR1 kanat modelinin hem sayısal olarak hem de deneysel olarak irtifa kaybı açısının AR2 kanat modeline göre büyük olması, kanat uç girdaplarının AR1 kanat yüzeyinin daha büyük bir bölümünde oluşmasından kaynaklanmaktadır. AR1 ve AR2 kanat modelinin deneysel ve sayısal sonuçlarında $2,5^\circ$ ve 5° 'lik bir fark olduğu görülmektedir. Bu durum sayısal çalışmada kanat modeli yüzeylerinin pürüzsüz olarak tanımlanması, deneysel çalışmada malzeme kaynaklı pürüzlülük meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır. 0 ile 15° arasındaki

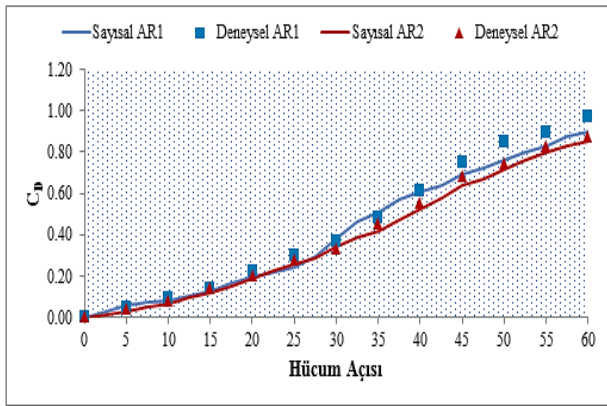
hücum açılarında AR2 kanadının deneysel ve sayısal analizlerinde C_L değerleri birbirine benzer davranış gösterirken, 15° 'den sonra irtifa kaybı açısına kadarki hücum açılarında, irtifa kaybı açılarının farklılığa bağlı olarak sayısal analizlerin C_L değerinin deneysel çalışmaya nazaran daha yüksek olduğu gözlenmektedir. AR2 kanadında irtifa kaybı açısından sonraki süreçte hem deneysel hem de sayısal analizde C_L değeri hızlı bir şekilde azalmaktadır. 40° 'den sonra AR1 kanadı için yapılan her iki çalışmada da benzer bir ivmeyle azaldığı görülmektedir. AR1 kanadı için irtifa kaybı öncesi, deneysel ve sayısal çalışmaların C_L değerleri, AR2 kanadına nazaran çok daha benzer davranış göstermektedir. AR1 kanadında irtifa kaybı açısından sonra C_L değeri ise AR2 kanadına göre daha keskin bir şekilde azalmaktadır. İrtifa kaybı öncesi AR1 kanadı için deneysel çalışma sonucunda elde edilen C_L değerinin, sayısal sonuca göre %5,19 daha yüksek olduğu görülmektedir, irtifa kaybı sonrasında bu değer %12,56 ile sayısal çalışma yönündedir. AR2 kanadında ise irtifa kaybı öncesi için deneysel bulgulardan elde edilen C_L değeri, sayısal sonuçlardan elde edilen C_L değerine göre %10,88 daha büyükken, irtifa kaybı sonrasında bu değer %1,60 ile sayısal çalışma yönünde iyileşme göstermiştir.



Şekil 7. Deneysel ve sayısal analizdeki C_L değerleri (C_L values in experimental and numerical analysis)

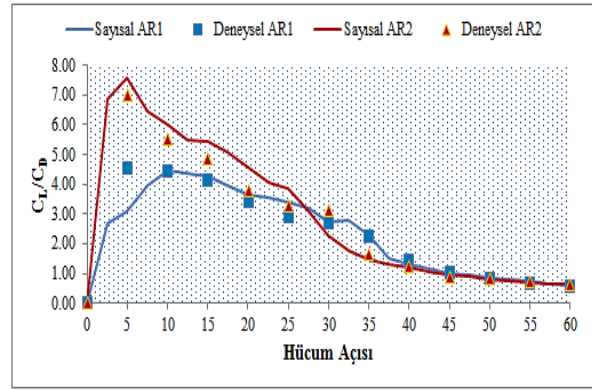
Dikkat edilecek olursa AR1 kanadının hem deneysel hem de sayısal çalışmalarında C_L karakteristik eğimi birbirine çok yakındır. AR1 kanadının deneysel ve sayısal çalışma sonucunda irtifa kaybına uğradığı hücum açıları arasındaki $2,5^\circ$ fark olmasının temel sebebi sayısal çalışmada kanat yüzeyi pürüzsüz seçilirken, deneysel çalışmada malzemenin özelliğine bağlı olarak kanat yüzünde pürüzlülük oluşmasıdır. Deneysel çalışmada kanat yüzeyinde oluşan pürüzlülük, sayısal çalışmaya göre kanat profilinin üst yüzeyinde akışın daha geç ayrılmasına ve buna bağlı olarak irtifa kaybı açısının deneysel çalışmada $2,5^\circ$ daha büyük olmasına neden olmuştur. AR2 kanadında ise deneysel ve sayısal çalışmaların irtifa kaybı açısı sırasıyla 30 ve $27,5^\circ$ hücum açısı olduğu görülmektedir. AR1 kanadında meydana gelen benzer yüzey pürüzlülüğü sebebinden dolayı AR2 kanadının deneysel ve sayısal sonuçları arasında da $2,5^\circ$ 'lik bir hücum açısı farkı meydana gelmiştir.

Şekil 8’de 2 farklı kanat açıklık oranında NACA-0018 kanat modelinin C_D değerleri deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılmıştır. 0 ile 25° arasındaki hücum açılarında AR1 ve AR2 kanatlar modelleri için yapılan deneysel ve sayısal analizlerde C_D değerleri birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Ancak 30° hücum açısından sonra AR1 kanadında irtifa kaybı başlangıcına bağlı olarak kanat üst yüzeyinde laminer ayrışma bölgeleri (LAB) oluşmaktadır. LAB oluşumunun bir sonucu olarak AR1 kanadının C_D değeri hızlı bir şekilde artmıştır. AR2 kanadında C_D değerinin sabit bir eğimle artması ise AR1 kanadındaki kadar keskin irtifa kaybı meydana gelmemesinden kaynaklanmaktadır. Bu yüzden AR2 kanadında C_D değeri 60° hücum açısına kadar sabit bir eğimle artarken, AR1 kanadında dalgalanma olmaktadır. Deneysel olarak AR2 kanadından elde edilen C_L ve C_D dağılımları boutilier [35] tarafından yapılan çalışma sonucunda elde edilen bulgularla benzerlik göstermektedir.

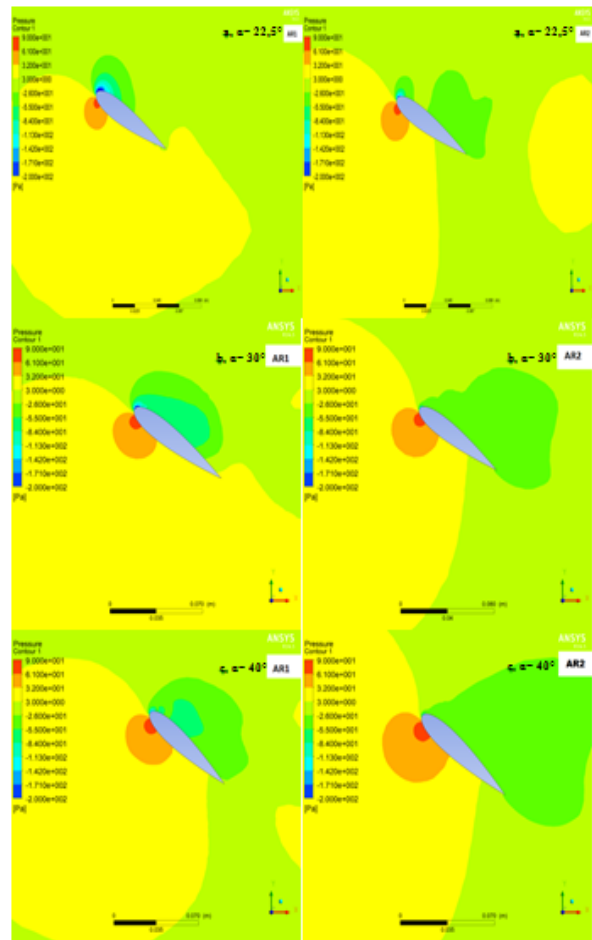


Şekil 8. Deneysel ve sayısal analizdeki C_D değerleri (C_D values in experimental and numerical analysis)

Şekil 9’da 2 farklı kanat açıklık oranında NACA-0018 kanat modelinin C_L/C_D değerleri deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılmıştır. 0 ile 5° hücum açısında AR2 kanadının deneysel ve sayısal çalışmalarından elde edilen C_L/C_D değerleri AR1 kanadına göre belirgin şekilde daha yüksektir. 5° hücum açısında AR2 kanadı için deneysel ve sayısal sonuçlarda C_L/C_D değerleri sırasıyla 7 ve 7,59 elde edilirken, AR1 kanadında deneysel ve sayısal sonuçlar sırasıyla 4,54 ve 3,11 olarak bulunmuştur. 5°’den sonra her iki kanat modelinde de C_L/C_D değerleri lineer bir ivmeyle azalmaktadır. 40° hücum açısından sonra her iki kanat modelinin deneysel ve sayısal değerleri aynı seviyeye ulaşmaktadır.

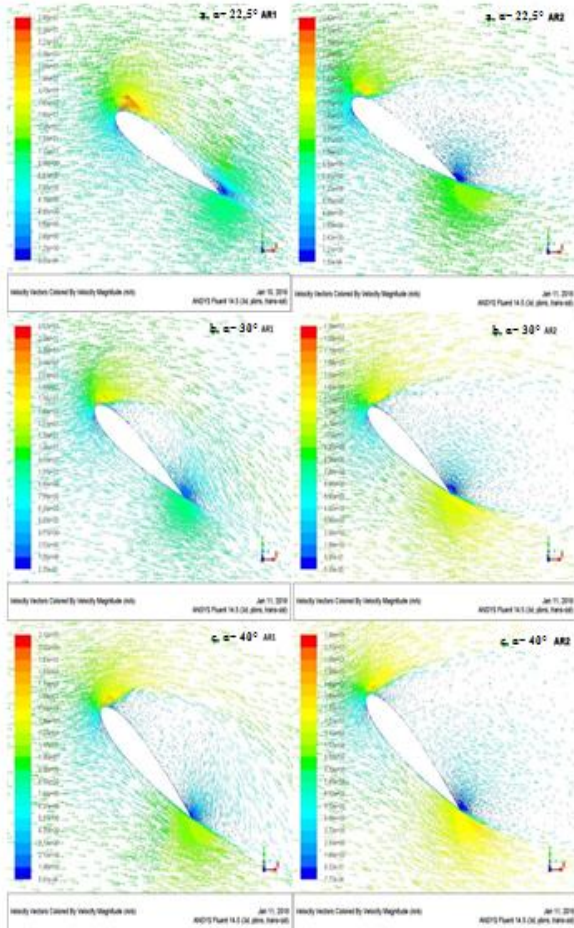


Şekil 9. Deneysel ve sayısal analizdeki C_L/C_D değerleri (C_L/C_D values in experimental and numerical analysis)



Şekil 10. AR1 ve AR2 kanat modelleri için basınç farkı; a) $\alpha=22,5^\circ$, b) $\alpha=30^\circ$, c) $\alpha=40^\circ$ (Pressure gradient for AR1 and AR2 aerofoil models; a) $\alpha=22,5^\circ$, b) $\alpha=30^\circ$, c) $\alpha=40^\circ$)

Elde edilen dağılım şekillerini daha iyi anlamak ve yorumlamak için her iki kanat modelinin irtifa kaybı öncesi ve sonrası değerlerinin $22,5^\circ$, 30° ve 40° hücum açılarındaki basınç farkları ve hız vektörleri incelenmiştir. Şekil 10'da AR1 ve AR2 kanat modellerinin $22,5^\circ$, 30° ve 40° hücum açılarındaki basınç farkları gösterilmiştir. Verilen basınç farkı şekillerinde renk göstergesindeki koyu mavi en düşük basıncı, koyu kırmızı ise en yüksek basıncı temsil etmekte ve aradaki renkler ise kademeli olarak basınç değişimlerini göstermektedir. $22,5^\circ$ hücum açısında AR1 ve AR2 kanat modellerinin alt yüzeylerinde yüksek basıncı temsil eden kırmızı renk aralığı hâkim iken kanat üst yüzeylerinde basınç dağılımlarının farklı davranış gösterdiği görülmektedir. AR2 üst yüzeyinde koyu renge sahip basınç alanları kanadın %80'lik bir bölgesinde oluşurken, AR1 kanadında bu oran %45'dir. Kanat üst yüzeylerinde oluşan bu farklılık $22,5^\circ$ hücum açısında, AR2 kanadının C_L değerinin AR1 kanadına göre daha yüksek olmasına neden olmaktadır.

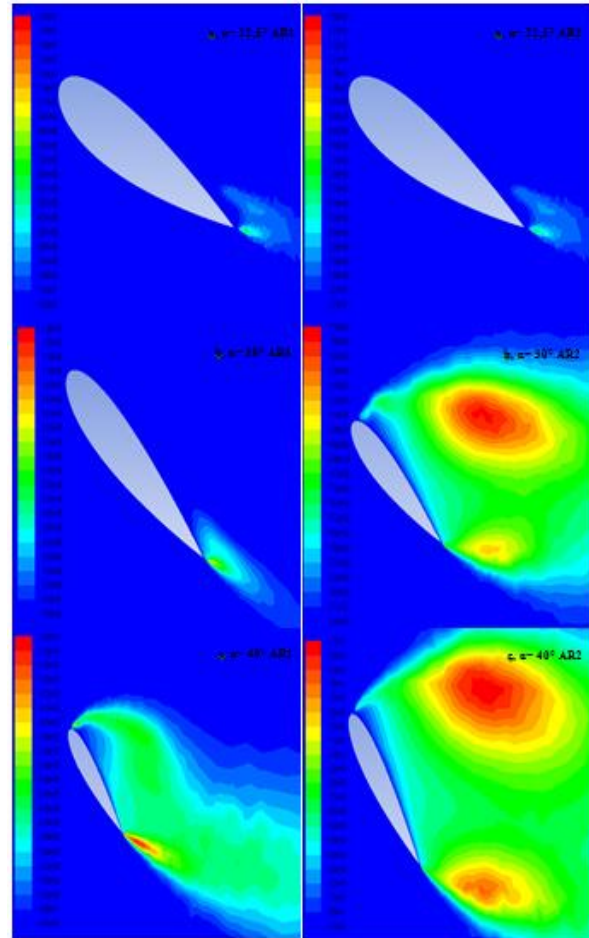


Şekil 11. AR1 ve AR2 kanat modelleri için hız vektörleri; a) $\alpha = 22,5^\circ$, b) $\alpha = 30^\circ$, c) $\alpha = 40^\circ$ (Velocity vectors for AR1 and AR2 aerofoil models; a) $\alpha = 22,5^\circ$, b) $\alpha = 30^\circ$, c) $\alpha = 40^\circ$)

30° hücum açısında her iki kanadın alt yüzeyinde, $22,5^\circ$ hücum açısında olduğu gibi yine birbirine benzer şekilde yüksek basınç alanları oluşmaktadır. AR1 kanadının üst

yüzeyinde turkuaz rengine sahip düşük basınç alanları oluşurken, AR2 kanadında ise daha yüksek basınç alanları olduğu görülmektedir. Kanat üst yüzeyinde oluşan bu durum Şekil 7'yi doğrular niteliktedir. Çünkü Şekil 7'de 30° hücum açısında AR1 kanadının sayısal analizinden elde edilen C_L değeri, AR2 kanadına göre daha yüksek bulunmuştur.

40° hücum açısında her iki kanadın alt ve üst yüzeylerinde basınç farklarının benzer olduğu görülmektedir. Ancak AR1 kanadının üst yüzeyinde %20'lik bir bölgede çok düşük alana sahip bölge, AR2 modelinde oluşmadığı için AR1'e ait C_L değerinin büyük olmasına sebep olmuştur.



Şekil 12. AR1 ve AR2 kanat modelleri için türbülans kinetik enerji değerleri; a) $\alpha = 22,5^\circ$, b) $\alpha = 30^\circ$, c) $\alpha = 40^\circ$ (Turbulence kinetic energy values for AR1 and AR2 aerofoil models; a) $\alpha = 22,5^\circ$, b) $\alpha = 30^\circ$, c) $\alpha = 40^\circ$)

Şekil 11'de AR1 ve AR2 kanat modellerinin $22,5^\circ$, 30° ve 40° hücum açılarında hız vektörleri verilmiştir. $22,5^\circ$ hücum açısında, AR1 kanadının üst yüzeyinin fırac kenarında sadece %10'luk bir akış ayrışması gerçekleşirken, AR2 kanadının üst yüzeyinde meydana gelen akış ayrışmasının %80 oranında olduğu görülmektedir. Bu durum AR2 kanadında irtifa kaybının gerçekleşmek üzere olduğunun ispatıdır. 30° hücum açısında AR1 kanadının %90'lık bir bölgesinde akış

ayrışması gerçekleşirken, AR2 kanadında ise akışın, kanadın hücum kenarından itibaren ayrıldığı görülmektedir. 30° hücum açısında gerçekleşen bu durum AR2 kanadında irtifa kaybının gerçekleştiğinin göstergesidir. 40° hücum açısında her iki kanat modelinde de irtifa kaybı gerçekleşmiştir. Ancak AR1 kanadında akış ayrışmasına bağlı olarak oluşan laminer ayrışma bölgeleri kanat yüzeyine yakın bir bölgede, AR2 kanadında laminer ayrışma bölgeleri kanat yüzeyinden uzak bir bölgede gerçekleşmektedir. Bu durum 40° hücum açısında elde edilen basınç farkları görüntüleri ile uyumludur. Çünkü AR1 kanadın üstünde oluşan düşük basınç alanı laminer ayrışma bölgelerinden kaynaklanmaktadır. Laminer akış bölgeleri, düşük basınç alanları oluşturmakta ve buna bağlı olarak C_L değerinin de büyük olmasına neden olmaktadır. Şekil 12’de AR1 ve AR2 kanat modellerinin 22,5°, 30° ve 40° hücum açılarındaki türbülans kinetik enerji değerleri gösterilmektedir. Kanat yüzeyinde LAB’ye bağlı olarak oluşan girdap bölgelerinde türbülans kinetik enerjinin yüksek olması gerekliliği literatürdeki çalışmalardan beklenmektedir. Yapılan sayısal çalışma sonucunda elde edilen Şekil 12 incelendiğinde, kanat yüzeyinde akış ayrışmalarının gerçekleştiği bölgelerde yüksek türbülans yoğunluğunun oluştuğu kanıtlanmıştır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada NACA-0018 kanat profiline sahip farklı açıklık oranlarındaki iki farklı modelin aerodinamik karakteristikleri sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda listelenmiştir:

- Yapılan sayısal çalışma sonucunda AR1 ve AR2 kanat modellerinin irtifa kaybı açıları sırasıyla 32,5° ve 25° olarak bulunurken deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar incelendiğinde ise sırasıyla 35° ve 30° olarak bulunmuştur.
- AR1 modeli için deneysel çalışma sonucu elde edilen C_L değeri, sayısal çalışma sonucu ulaşılan değerden %0,41 daha yüksek bulunmuştur. Benzer şekilde AR2 modelinin C_L değeri, deneysel çalışmada sayısal yöntemden %2,71 daha yüksek ölçülmüştür.
- AR1 modeli için deneysel çalışmada elde edilen C_D değeri, sayısal sonuca göre %6,35 ve AR2 modelinin deneysel çalışmasından elde edilen C_D değeri sayısal çalışmaya göre %5,16 kadar daha yüksek hesaplanmıştır.
- Aerodinamik verim açısından elde edilen sonuçlar incelendiğinde AR1 modeli için yapılan sayısal çalışma aynı kanat için yapılan deneysel çalışmadan %3,86 kadar daha iyi sonuç vermiştir.
- Her iki kanat modelinin sayısal çalışmaları kıyaslandığında AR1 kanadı için hesaplanan C_L ve C_D değerleri sırasıyla %9,15 ve %8,40 oranında AR2 kanadı için elde edilen değerlerden daha yüksek değerlere ulaşmıştır. C_L/C_D açısından karşılaştırıldığında ise AR2 için hesaplanan değer

AR1’den %25,99 kadar daha yüksektir. Bunun nedeni C_D değerlerinin AR2 kanadı için düşük değerlere sahip olmasıdır.

- AR1 ve AR2 modellerinin deneysel çalışmaları kıyaslandığında, AR1 için hesaplanan C_L ve C_D değerleri sırasıyla %7,07 ve %9,42 oranında AR2’den daha yüksek bulunmuştur. C_L/C_D açısından karşılaştırıldığında ise AR2 için hesaplanan değer AR1’den %15,27 kadar daha yüksektir.

SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

c	Kanat veter uzunluğu
C_L	Kaldırma katsayısı
C_D	Sürüklenme katsayısı
C_L/C_D	Aerodinamik verim
μ	Dinamik viskozite (kg/ms)
ρ	Havanın yoğunluğu (kg/m ³)
F_L	Kaldırma kuvveti (N)
F_D	Sürüklenme kuvveti (N)
L_C	Karakteristik uzunluk (m)
Re	Reynolds sayısı
W_R	Toplam belirsizlik
BDT	Bilgisayar Destekli Tasarım
CAD	Computer Aided Design
DETR	Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini
LAB	Laminer Ayrışma Bölgesi
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği
SST	Shear Stress Transport
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes
DES	Detached Eddy Simulation

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar, ANSYS Fluent™ programını kullanımına izin verdiği için Gazi Üniversitesine teşekkür eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Čarija Z., Marušić E., Novak Z. and Fućak S., “Numerical analysis of aerodynamic characteristics of a bumped leading edge turbine blade”, *Engineering Review*, 34(2): 93-101, (2014).
- [2] Düz H. ve Yıldız S., “Numerical performance analyses of different aerofoils for use in wind turbines”, *International Journal of Renewable Energy Development*, 7(2): 151-157, (2018).
- [3] Erişen A. ve Bakırcı M., “NACA 0012 ve NACA 4412 kanat kesitlerinin yeniden tasarlanarak HAD ile analiz edilmesi”, *Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 1: 50-82, (2014).
- [4] Gugliya P. S., Jaiswal Y. R., Chhajed A. B., Jain S. V. and Thakare H. R., “CFD analysis of airfoil NACA0012”, *International Journal of Modern Trends in Engineering and Research*, 2(7): 1605-1609, (2015).

- [5] Patel K. S., Patel S. B., Patel U. B. and Ahuja A. P., "CFD analysis of an aerofoil", *International Journal of Engineering Research*, 3(3): 154-158, (2014).
- [6] Şahin İ. ve Acır A. "Numerical and experimental investigations of lift and drag performances of NACA 0015 wind turbine aerofoil", *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 3(1): 22-25, (2015).
- [7] Chen J., Wang Q., Zhang S., Eecen P. and Grasso F., "A new direct design method of wind turbine aerofoils and wind tunnel experiment", *Applied Mathematical Modelling*, 40(3): 2002-2014, (2016).
- [8] Maulana M. I., Qaedy T. M. A. and Nawawi M., "Design analysis of vertical wind turbine with aerofoil variation", *Proceeding of the 4th International Conference and Exhibition on Sustainable Energy and Advanced materials (ICE-SEAM 2015)*, 1717: 1-6, (2016).
- [9] Saad M. M. M., Bin Mohd S., Zulkafli M. F. and Shibani W. M. E., "Numerical analysis for comparison of aerodynamic characteristics of six aerofoils", *AIP Conf. Proc.*, 1831(1): 20004, (2017).
- [10] Suvanjumrat C., "Comparison of turbulence models for flow past NACA0015 airfoil using OpenFOAM", *Engineering Journal*, 21(3), 207-221, (2017).
- [11] Chumbre V., Rushikesh T., Umatar S and Kerur S. M., "CFD analysis of aerofoil sections", *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5(7): 349-353, (2018).
- [12] Tanürün H. E ve Acır A., "Modifiye edilmiş NACA-0015 kanat yapısında tüberkül etkisinin sayısal analizi", *Politeknik Dergisi*, 22(1): 185-195, (2019).
- [13] Xiao S. and Chen Z., "Investigation of flow over the aerofoil NACA-10-35 with various angle of attack" *2nd International Conference on Mechanical, Material and Aerospace Engineering*, 1-10, Wuhan, China, (2018).
- [14] Ameer H. and Boukhadia K., "Numerical study of air flow over a NACA 0015 wind turbine aerofoil", *Preprints Journal*, (2018), (Baskıda).
- [15] Rao K. S., Chakravarthy M. A., Babu G. S. and Rajesh M., "Modelling and simulation of aerofoil element", *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5(2): 2056-2059, (2018).
- [16] Anyoji M., Wakui S., Hamada D. and Aono, H., "Experimental study of owl-like aerofoil aerodynamics at low Reynolds numbers", *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*, 6(3): 185-197, (2018).
- [17] Rogowski K., Hansen M. O. L., Hansen R., Piechna J. and Lichota P., "Detached eddy simulation model for the DU-91-W2-250 aerofoil", *Journal of Physics: Conference Series*, 1037(2): 1-9, (2018).
- [18] Gore K., Gote A., Govale A., Kanawade A. and Humane S., "Aerodynamic analysis of aircraft wings using CFD", *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5(6): 639-644, (2018).
- [19] Bedon G., Paulsen U. S., Madsen H. A., Belloni F., Castelli M. R. and Benini E., "Computational assessment of the DeepWind aerodynamic performance with different blade and airfoil configurations", *Applied Energy*, 185, 1100-1108, (2017).
- [20] Hassan G. E., Hassan A. and Youssef M. E., "Numerical investigation of medium range Re number aerodynamics characteristics for NACA0018 airfoil", *CFD Letters*, 6(4): 175-187, (2014).
- [21] Rogowski K., Hansen M. O. L. and Maronski R., "Steady and unsteady analysis of NACA 0018 airfoil in vertical-axis wind turbine", *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 56, 203-212, (2018).
- [22] Shukla V. and Kaviti A. K., "Performance evaluation of profile modifications on straight-bladed vertical axis wind turbine by energy and Spalart Allmaras models", *Energy*, 126, 766-795, (2017).
- [23] Sadikin A., Yunus N. A. M., Hamid S. A. A., Ismail A. E., Salleh S., Ahmad S., Rahman M. N. A., Mahzan S. and Ayop S. S., "A comparative study of turbulence models on aerodynamics characteristics of a NACA0012 airfoil", *International Journal of Integrated Engineering*, 10(1): 134-137, (2018).
- [24] Islam Md. S., Hakim S. M., Ali M. and Islam Md. Q., "Numerical investigation on boundary layer control through moving surface in NACA 0012 airfoil", 7th BSME International Conference on Thermal Engineering AIP Conference Proceedings, 1851, 20111-20117, (2017).
- [25] Ansys Fluent 2012. Shear-Stress Transport (SST) k- ω model, Ansys Fluent 12 theory guide. <http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node67.htm>.
- [26] Bakırcı M., Ceylan H. ve Yılmaz S., "NACA 23012 ve NREL S 809 kanat kesitlerinin HAD ile analizi", *Electronic Journal of Vocational Colleges*, 5(1): 52-61, (2015).
- [27] Anderson J. D., "Computational Fluid Dynamics; The Basics with Applications", *McGraw-Hill*, USA, (1995).
- [28] https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/flu_ug/flu_ug_mesh_quality.html.
- [29] Ariff M., Salim S. M. and Chea S. C., "Wall y^+ approach for dealing with turbulent flow over a surface mounted cube: Part 1-low Reynolds number", *Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*, Australia, 1-6, (2009).
- [30] Özmen Y. ve Baydar E., "15° eğimli beşik çatıya sahip iki bina modeli üzerindeki basınç dağılımlarına blokaj etkisi", *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi A-Uygulamalı Bilimler ve Mühendislik*, 17(1): 65-77, (2015).
- [31] Hanumanthu and Rao S. V. K., "CFD study of solids wind tunnel wall effects on wings characteristics", *Indian Journal of Science and Technology*, 9(45): 1-5, (2016).
- [32] Medici D., Ivanell S., Dahlberg A. J. and Alfredsson H. P., "The upstream flow a wind turbine: blockage effect", *Wind Energy*, 14(5), 691-697, (2011).
- [33] Gunt 2018. HM-170 open cycle wind turbine test equipment data sheet. https://www.gunt.de/images/datasheet/769/HM-170-Open-wind-tunnel-gunt-769-pdf_1_en-GB.pdf.
- [34] Kline S. J. and McClintock F. A., "Describing uncertainties in single sample experiments", *Mechanical Engineering*, 75, 3-8, (1953).
- [35] Boutilier M. S. H., "Experimental investigation of transition over a NACA 0018 airfoil at a low Reynolds number", Yüksek Lisans Tezi, University of Waterloo, 2011.



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



B₄C/SiC katkılı alüminyum esaslı kompozitlerin mekanik özelliklerin incelenmesi ve balistik performanslarının modellenmesi

Investigation of mechanical properties of B₄C/SiC additive aluminum based composites and modeling of their ballistic performances

Yazar(lar) (Author(s)): Muharrem PUL¹, Volkan BAYDAROĞLU²

ORCID¹: 0000-0002-0629-3516

ORCID²: 0000-0002-9792-583X

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (Tocitetothisarticle): Pul M. ve Baydaroğlu V., “B₄C/SiC katkılı alüminyum esaslı kompozitlerin mekanik özelliklerin incelenmesi ve balistik performanslarının modellenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 23(2): 383-392, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.525011

B₄C/SiC Katkılı Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Mekanik Özelliklerin İncelenmesi ve Balistik Performanslarının Modellenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Muharrem PUL^{1*}, Volkan BAYDAROĞLU²

¹Kırıkkale Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Kırıkkale Üniversitesi, Türkiye

²Fen Bilimleri Enstitüsü, Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı, Kırıkkale Üniversitesi, Türkiye
(Geliş/Received : 09.02.2019 ; Kabul/Accepted : 07.05.2019)

ÖZ

Bu çalışmada SiC (silisyum karbür) ve B₄C (bor karbür) takviyeli 7075 kalite alüminyum esaslı kompozitler, toz metalurjisi yöntemi kullanılarak, %40,%20 ve %10 takviye oranlarında üretilmiştir. İlk aşama deneylerde üretilen kompozit numunelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla yoğunluk, sertlik, çapraz kırılma ve abrasif aşınma deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları, kompozit numunelerin mikroskop görüntüleri ve mikroyapı özellikleriyle birlikte değerlendirilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında, üretimi yapılan kompozit numuneler modellenerek sonlu elemanlar methodu ile balistik performansları incelenmiştir. Balistik analizlerde %10 takviyeli kompozitler başarımlı gösteremezken artan takviye oranlarında balistik başarımlı elde edilmiştir. Numunelerin üretimi, sertlik, aşınma ve balistik analizleri beraber değerlendirildiğinde,%40 takviye oranının bu tür kompozitlerde yüksek olduğu ve mekanik özellikler açısından uygun olmadığı, %20 takviye oranının hem üretilebilirlik hem de balistik açıdan optimum sonuç olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Metal matrisli kompozit, mekanik özellik, balistik performans, sonlu elemanlar metodu.

Investigation of Mechanical Properties of B₄C / SiC Additive Aluminum Based Composites and Modeling of Their Ballistic Performances

ABSTRACT

In this study, 7075 grade aluminum-based composites reinforced with SiC (silicon carbide) and B₄C (boron carbide) were produced with powder metallurgy at 40%, 20% and 10% reinforcement ratios. The mechanical properties of the composite samples produced in the first stage experiments were investigated. For this purpose, density, hardness, cross fracture and abrasive wear tests were performed. The results of the experiments were evaluated together with the microstructure and the microscope images of the composite samples. In the second stage of the study, the composite samples were modeled and their ballistic performance was examined by the finite element method. In ballistic analysis, 10% reinforced composites could not perform, while ballistic performance was obtained in increasing reinforcement ratios. When the production, hardness, wear and ballistic analyzes of the samples were evaluated together, it was seen that the reinforcement rate of 40% was high in such composites and not suitable for mechanical properties, 20% of the reinforcement ratio was both productibility and ballistic optimum result.

Keywords: Metal matrix composite, mechanical property, ballistic performance, finite element method.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Teknolojik gelişme ile birlikte silah sistemlerinde yaşanan yenilikler ve üstün nitelikli silah üretimi bunlara karşı koyabilecek balistik özellikleri yüksek zırh sistemleri çalışmalarını yaygınlaştırmıştır. Seramik kompozit zırh teknolojisi ile monolitik zırh yapılarına göre balistik kabiliyetleri yüksek zırhlar üretilmektedir [1]. Kompozit malzemelerin özellikleri, takviye elemanı sayesinde daha da geliştirilerek, yüksek çekme mukavemeti, ergime sıcaklığı, ısıl kararlılık, kolay üretilebilirlik gibi özelliklerinin artırılması söz konusudur. Alüminyum matrisli kompozitlerin üretilmesinde B₄C, SiC, Al₂O₃, SiO₂, MgO, TiC ve TiB₂

gibi seramik esaslı farklı takviye elemanları kullanılmaktadır.

Kompozit malzeme türleri içerisinde MMK (Metal Matrisli Kompozitler) önemli bir yer oluşturmaktadır. Bu tür kompozitlerde matris malzemesi seçiminde yaygınlıkla alüminyum, magnezyum gibi metaller tercih edilmektedir. Metal matrisli kompozitlerin şekillendirilmesinde; toz metalurjisi, basınçlı döküm, vakumlu ve basınçlı infiltrasyon tekniği, sıcak ekstrüzyon gibi hem sıcak hem de soğuk şekillendirme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında toz metalurjisi kullanımı son zamanlarda büyük ivme kazanmıştır. Toz metalurjisi yöntemi, karıştırılmış metal tozlarının, oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıklarda, üretilecek parça şekli ve boyutlarına sahip kalıp içinde preslenerek şekillendirme ve ardından belirli bir

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta mpul@kku.edu.tr

sıcaklıkta sinterleme ile gerçekleştirilen bir imalat yöntemidir [2]. Literatürde yer alan ve konuyla ilgili yapılan bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Hasırcı ve Gül (2010) çalışmalarında, B₄C partkül takviyesi ile Al matrisli kompozit malzeme üretimini toz metalürjisi yöntemiyle gerçekleştirmiş olup ürettikleri numunelerin aşınma davranışlarını ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Sertlik değerlerinin B₄C parçacık ilavesi ile arttığı, %20 B₄C parçacık takviyeli kompozitin en yüksek sertlik gösterdiği, %10 B₄C parçacık takviyeli kompozitin ise en yüksek aşınma direnci gösterdiği gözlemlenmiştir [3]. Tang ve ark. (2008), Al5083 alüminyum alaşımlı B₄C partikül takviyeli kompozitlerin aşınma davranışlarını kuru kayma yöntemiyle pin-on-disk cihazıyla incelemiştir. %5 ve %10 oranında B₄C katkılı numuneleri 0,6 m/s ve 1,25 m/s aralığında değişen hızlarda 3,98 ve 6,37 MPA basınç aralıklarında aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. %10 B₄C Kompozit numunelerin aşınma oranının %5 B₄C katkılı numunelerin aşınma oranından yaklaşık %40 daha düşük olduğu gözlemlenmiştir [4]. Yumak ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada, zırh tasarımında kullanılan kompozit malzemelerin deformasyon karakteristiklerini araştırmışlardır. Sonuç olarak, zırh tasarımlarından beklenen özelliklerin hafiflik, düşük maliyet ve yüksek hareket kabiliyeti olduğunu ve bu özelliklerin hepsinin bir arada kompozit malzemeler ile sağlanabileceğini ifade etmişlerdir [5]. Savio ve ark. (2011) AA6063-T6 alaşımıyla desteklenmiş farklı kalınlıktaki bor karbür levhaların 7.62 mm'lik zırh delici ile olan balistik başarımlarını ve mermi hızının bor karbür levhaların balistik başarıma etkisini incelemiştir. Çalışma sonucunda bor karbür levha kalınlığı arttıkça merminin bor karbür içerisine girme derinliğinin azaldığı gözlemlenmiştir [6]. Jena ve ark. (2010) yüksek dayanımlı zırh çeliği ve Al-7017 alaşımının farklı kalınlık ve ısıtım koşullarında 7.62 mm'lik mermiler karşısındaki balistik başarımlarını incelemiştir. Test sonuçlarına dayanarak merminin şeklinden hedefin balistik başarımları hakkında yorum yapılabileceği, 200°C'de menevişlenmiş çeliğin en yüksek balistik başarımları sağladığı, yüksek dayanım, sertlik ve uzama sertleşmesi oranının balistik başarımları artırdığı görülmüştür [7]. Metal Matrisli Kompozitlerin aşınma davranışları konusunda yapılan çalışmalarda; farklı matris malzemeleri ve takviye elemanları kullanıldığı görülmüş olup, takviye elemanının kompozit içerisindeki dağılımı, mikroyapıya etkisi, gözeneklilik, sertlik, aşınma davranışı ve kopma dayanımı gibi mekanik özellikler üzerindeki tesiri, karıştırma zamanı ve hızının etkisi gibi konularda birçok araştırmaya yer verildiği görülmüştür [8-11].

Yapılan çalışmada, Al 7075 matris malzemeye farklı takviye oranlarında SiC ve B₄C takviyesinin kompozit yapı üzerindeki mekanik etkileri incelenmiş ve üretilen kompozit numunelerin sonlu elemanlar yöntemi ile balistik performansları analiz edilmiştir. Al 7075 esaslı kompozitler toz metalürjisi yöntemi kullanılarak, %40,

%20 ve %10 gibi takviye oranlarında üretilmiştir. Kompozitlerin üretiminde 700 MPa presleme basıncı ve 90, 120, 150 dakika olmak üzere üç farklı sinterleme süresi ve 550 °C sabit sıcaklıkta uygulanmıştır. Üretilen kompozit numuneler üzerinde, sertlik, çapraz kırılma ve abrasif aşınma deneyleri yapılarak elde edilen değerler mikroyapı görüntüleri eşliğinde değerlendirilmiştir. Üretilen numunelerin ANSYS programında sayısal modellemesi yapılmış ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak 7,62 mm çapında modellenen mermi ile 830 m/s yüksek hızda mermi-hedef balistik incelemeleri yapılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

2.1 Kompozit Numunelerin Üretimi (Production of Composite Samples)

Bu deneysel çalışmada matris elemanı olarak -74 µm tane büyüklüğünde Al7075, -44 µm tane büyüklüğünde B₄C ve -63 µm tane büyüklüğünde SiC tozları kullanılmıştır. Çizelge 1'de kullanılan deney malzemelerine ait bazı teknik özellikler verilmiştir [1].

Çizelge 1. Deney malzemelerinin teknik özellikleri
(Technical specifications of test materials)

Al 7075			
%Fe	0,50	Erime noktası °C	635
%Si	0,40		
%Cu	1,21-20,0	Sertlik (knoop)	191
%Mn	0,30		
%Mg	2,1-2,9	Yoğunluk (g/cm ³)	2,81
%Zn	5,1-6,1		
%Ti	0,20	Parçacık şekli	Yuvarlak
%Cr	0,18-0,28		
SiC			
%Si	61-66	Erime noktası °C	2730
%Al ₂ O ₃	0,7-1,2		
%Fe ₂ O ₃	0,6-1,1	Sertlik (knoop)	2480
%SiO ₂	0,02		
%P ₂ O ₅	0,07	Yoğunluk (g/cm ³)	3,21
%SO ₃	0,30		
%C	22-26	Parçacık şekli	Köşeli
B ₄ C			
%B	78,28	Erime noktası °C	2760
		Sertlik (knoop)	2750
%C	21,72	Yoğunluk (g/cm ³)	2,52
		Parçacık şekli	Köşeli

Al 7075, SiC ve B₄C tozları ile belirlenen ağırlık oranlarında toz karışımlar hazırlanmıştır. Karışımların hazırlanmasında pervaneli karıştırıcı kullanılmıştır. Her numune için 600 rpm hızda 1 h süreyle karıştırma işlemi yapılarak kompozit yapı içerisinde homojen bir dağılım elde edilmiştir. Kompozit karışımlar hidrolik preste 700 MPa basınç altında sıkıştırılmış ve 35 mm çapında 15 mm kalınlığında numuneler üretilmiştir. Üç farklı sinterleme süresi üzerinde inceleme yapılacağı için, her numuneden üç adet üretilerek toplamda 27 adet kompozit

numune elde edilmiştir. Daha sonra kompozit numuneler 550 °C'de, argon atmosferi altında, 90, 120 ve 150 min olmak üzere üç farklı sinterleme süresinde ısı işleme tabi tutulmuştur. Çizelge 2'de Kompozit numune karışım oranları ve sinterleme süreleri verilmiştir.

Çizelge 3. Kompozit numune karışım oranları (Composite sample mixing ratios)

Kompozit Numune No	Takviye Oranları (%)	Sinterleme Süreleri (min)
1	40 SiC + 60 Al7075	90, 120, 150
2	20 SiC + 80 Al7075	90, 120, 150
3	10 SiC + 90 Al7075	90, 120, 150
4	40 B ₄ C + 60 Al7075	90, 120, 150
5	20 B ₄ C + 80 Al7075	90, 120, 150
6	10 B ₄ C + 90 Al7075	90, 120, 150
7	20 SiC+20B ₄ C + 60 Al7075	90, 120, 150
8	10 SiC+10B ₄ C + 80 Al7075	90, 120, 150
9	5 SiC+5 B ₄ C + 90 Al7075	90, 120, 150

2.2. Mikroyapı İncelemesi ve Mekanik Deneyler (Microstructure Investigation and Mechanical Experiments)

Kompozit numunelere ait mikroyapıları incelemek amacıyla ilk olarak numunelerin yüzey hazırlama işlemi yapılmıştır. Bu amaçla sırasıyla 400, 800, 1200, 2400 mesh zımparalama, 3 µm parlatma ve dağlama işlemi yapılmıştır. Daha sonra hazırlanan kompozit numunelerin, *Nikon ECLIPSE MA200* model optik mikroskopta 50x ve 400x olmak üzere iki farklı büyütmeye görüntüleri çekilmiştir. Bu çalışma mekanik özelliklerin incelenmesi ve balistik analiz olmak üzere iki temel bölümden oluşmaktadır.

Çalışmanın birinci bölümünde; üretilen kompozitlerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla ilk olarak Brinell yöntemi ile sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sertlik ölçümleri EN ISO 4498 [12] ve TS EN ISO 6506-1 [13] standartlarına uygun olarak, *Qness Q250M* model sertlik ölçme cihazında yapılmıştır. Sertlik ölçümlerinde 2,5 mm çaplı bilya uç, 62,5 kg yük ve 14 saniye deney süresi uygulanmıştır. Sertlik ölçümlerinde her numune üzerinde 5 farklı noktadan ölçüm yapılarak ortalama değer hesaplanmıştır. İkinci aşamada, çapraz kırılma (üç nokta eğme) deneylerini yapmak üzere ASTM-B 528-05 [14] standardına uygun olarak, her takviye oranı için, 6,35×12,7×31,7 mm ölçülerinde numuneler hazırlanmıştır. Üçüncü ve son aşama mekanik deneyler, kompozit numunelerin aşınma davranışlarını belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri, pin-on-disk yöntemi ile 50 N yük uygulanarak yapılmıştır. Aşınma deneylerinde, 63 µm aşındırıcı tane boyutuna sahip, Al₂O₃ zımpara kullanılmıştır. Her kompozit numune, 0,5 m/s kayma hızında ve 60 s süre boyunca deneye tabi tutularak aşınma kayıpları kaydedilmiştir.

Bu deneysel çalışmanın ikinci temel bölümünde balistik analiz yapılmıştır. Bu amaçla, üretilen 9 farklı özellikte

numuneler sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Modellemede, sonlu elemanlar yöntemiyle çözüm yapan ANSYS/Explicit Dynamics (Student version) programı kullanılmıştır.

2.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Balistik Analiz (Ballistic Analysis with Finite Element Method)

Balistik analiz çalışmasında, üretilen 9 farklı özellikte numuneler sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenerek belirli uzaklıktan yüksek hızda darbeye maruz bırakılmış olup numunelerin balistik başarımları dinamik modelleme yöntemi ile incelenmiştir [1]. Sonlu elemanlar yöntemiyle çözüm yapan ANSYS / Explicit Dynamics (Student version) programı kullanılmıştır. Analizlerde numune yapısı ve mermi modellenmiştir. Çalışmanın amacı; zırh malzemesi olarak üretilen numunelerin, belirlenen özel çarpma koşullarında balistik olarak uygun olup olmadığının belirlenmesidir. Analizlerde meydana gelen deformasyonlar sonucu zırh malzemelerinin çarpışma karakteristikleri hakkında bilgi edinilmeye çalışılmıştır. Numunelerin Elastisite Modülü ve Poison Oranlarını hesaplayabilmek için Mori-Tanaka homojenleştirme yöntemlerine başvurulmuştur. Bu yöntem, homojenleştirilmek istenen malzemenin etkin malzeme özelliklerini, bileşenlerinin özellikleri cinsinden analitik ve kapalı bir formda vermektedir. Doğal olarak, farklı tip ve boyutta katkı maddeleri içeren farklı kompozit malzemelerin homojenleştirilmesi problemi için bu yöntemin her zaman uygun olduğu gibi bir genellemeye varılamasa da, parçacık tipli kompozitlerin homojenleştirilmesi probleminde kapalı ve analitik çözüm bulabilme olanağı, diğer yöntemlere kıyasla hem doğruluk hem de işlem kolaylığı açısından üstünlük sağlamaktadır [17].

Kompozit numunelerin balistik modellemesinde kullanılacak olan ANSYS analizi için yazılımın istediği 3 adet ayırt edici mekanik özellik olan; yoğunluk, elastisite modülü ve poison oranları dikkate alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Matris ve takviye elemanların hacimsel oranları toplamı 1 kabul edilmiştir.

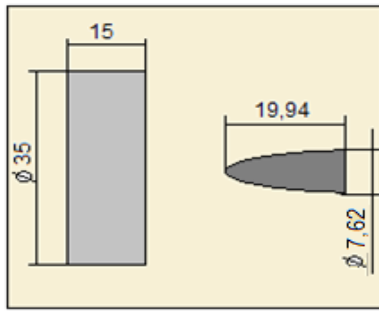
$$V_c + V_m = 1 \quad (1)$$

Burada; takviye malzemesi hacimsel oranı (V_c), Matris malzemesi hacimsel oranı (V_m) dir. Kompozit malzemelerin analizler için gerekli olan yoğunluk değerleri, Lineer Karışım kuralına göre hesaplanmıştır.

Hedef plakalar çalışmada üretilen numunelere uygun olarak 15 mm kalınlıkta ve 35 mm çapında modellenmiştir. Toplamda 10 adet balistik çarpışma analizi yapılmıştır. Bu analizlerde ilk olarak takviyesiz Al 7075 ve 9 adet numunenin balistik başarımları incelenmiştir. Analizlerin tamamı için ortak olan bazı analiz girdileri vardır. Bunların başlıcaları; meshleme, mermi hızı, mermi çekirdeğinin malzemesi, etki süresidir. Merminin oluşturduğu mekanik etki çok küçük zaman diliminde gerçekleştiğinden, balistik analizlerde mermi sıcaklığı analiz girdilerine eklenmemiş ve dikkate alınmamıştır.

Balistik analizlerde modellenen mermi, 7.62 mm çapında zırh delici mermdir. Bu merminin kullanıldığı silahlardan namlu çıkış hızı 760 m/s ile 830 m/sn aralığındadır. Maksimum deformasyonu görmek için 830000 mm/s namlu çıkış hızı tercih edilmiştir. Şekil 1'de mermi çekirdeği ve hedefe gösteren sembolik çizim ile mermiye ait teknik değerler verilmiştir.

Details of "MERMİ"		Properties	
Graphics Properties		<input type="checkbox"/> Volume	606,28 mm ³
Definition		<input type="checkbox"/> Mass	4,6987e-003 kg
<input type="checkbox"/> Suppressed	No	Centroid X	-7,2533 mm
Stiffness Behavior	Flexible	Centroid Y	-4,7719e-017 mm
Coordinate System	Default Coordinate	Centroid Z	1,0699e-016 mm
Reference Temperature	By Environment	Moment of Inertia Ip1	2,7486e-002 kg-mm ²
Reference Frame	Lagrangian	Moment of Inertia Ip2	0,11943 kg-mm ²
Material		Moment of Inertia Ip3	0,11943 kg-mm ²
Assignment	Mermi Çekirdeği	Statistics	
Nonlinear Effects	Yes	Nodes	617
Thermal Strain Effects	Yes	Elements	2461
		Mesh Metric	None

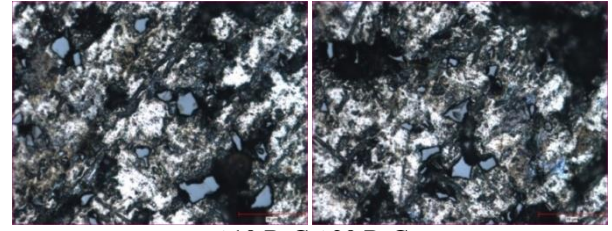
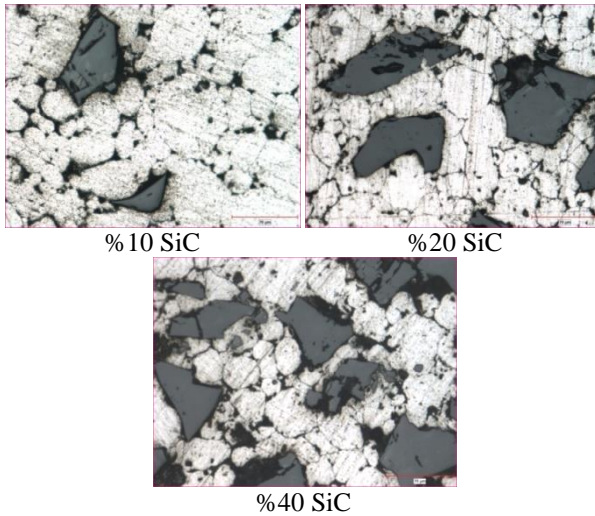


Şekil 1. Mermi çekirdeği parametreleri, mermi çekirdeği ve hedef ölçüleri (Bullet core parameters, bullet core and target dimensions) [1]

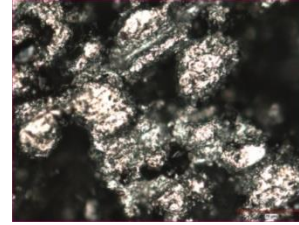
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Mikroyapıların İncelenmesi (Investigation of Microstructures)

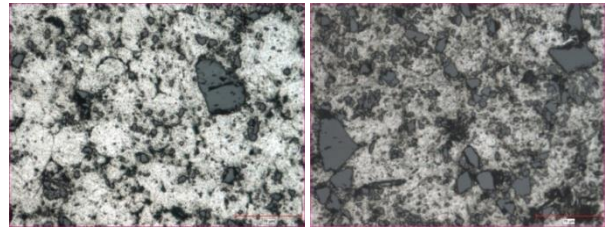
Kompozitlerin mikroyapılarını değerlendirmek amacıyla, SiC, B₄C ve SiC+B₄C takviyeli kompozitlerin, farklı takviye oranları ve ortalama değer olan 120 min sinterleme sürelerine ait 400× büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri Şekil 2'de verilmiştir.



%10 B₄C %20 B₄C

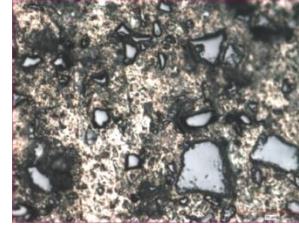


%40 B₄C



%5 SiC + %5 B₄C

%10 SiC + %10 B₄C



%20 SiC + %20 B₄C

Şekil 2. SiC, B₄C ve SiC+B₄C takviyeli kompozitlerin 400x büyütmede mikroyapı görüntüleri (Microstructure images of SiC, B₄C and SiC + B₄C reinforced composites at 400x magnification) [1]

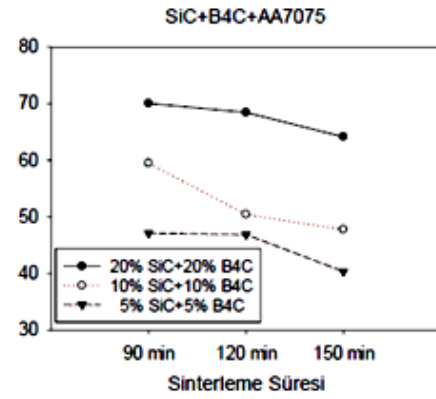
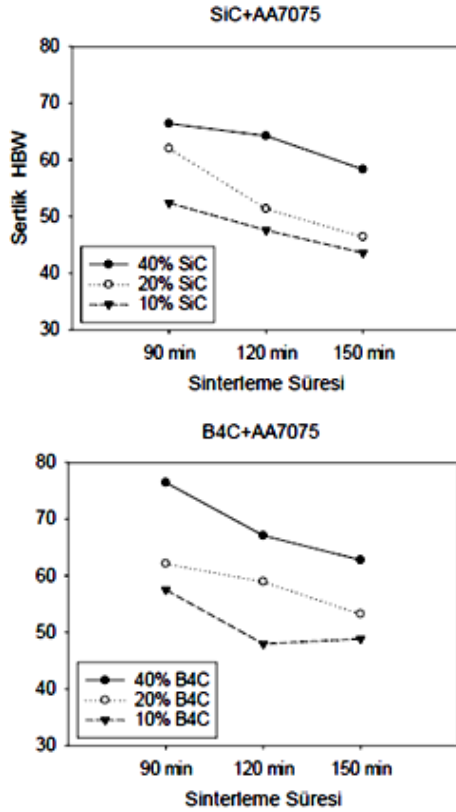
Şekil 2'deki görüntüler incelendiğinde, SiC takviye oranının artmasına bağlı olarak parçacık dağılımındaki homojenliğin artış gösterdiği söylenebilir. Ancak takviye oranının artması ile bir miktar takviye toparlanmasının meydana geldiği görülmektedir. Yine aynı şekilde kompozit yapı içerisindeki boşluk miktarı da takviye oranının artışına bağlı olarak artma göstermiştir. Literatürdeki bazı çalışmalarda benzer sonuçlar ifade edilmektedir [15, 16]. Kompozit yapı içerisindeki SiC parçacıklarının farklı boyutlarda ve genellikle keskin köşeli, Al 7075 parçacıklarının da farklı boyutlarda ve genellikle küresel bir şekle sahip olduğu görülmektedir. B₄C taneciklerinin düzensiz şekilli olduğu ve tanecikler arasında çok fazla boyut farkı olduğu mikroskop görüntülerinden anlaşılmaktadır. B₄C takviyeli kompozitlerde, SiC takviyeli kompozitlere göre daha fazla boşluklu yapı meydana gelmiştir. Özellikle %40 B₄C takviyeli numunede aşırı oranda boşluklu yapı olduğu mikroskop görüntüsündeki siyah alanlardan

anlaşılmaktadır. Şekil 2'deki, SiC+B₄C takviyeli kompozit numunelerin mikroyapı görüntülere bakıldığında ise önceki yapılan yorumlara benzer ifadeler kullanmak mümkündür.

Özellikle takviye oranındaki artışa bağlı olarak boşluk (gözenek) miktarının artması ve takviye elemanı topaklanmaları göze çarpmaktadır. Bu olumsuz sayılabilecek mikroyapılara, matris ve takviye elemanı tanecikleri arasında yeterli ıslatmanın olmamasının katkı sağladığı ve kompozit yapıyı olumsuz etkilemesinin neden olduğu söylenebilir. Sonuç olarak, bu tür parçacık takviyeli kompozitlerin üretilmesinde %40 takviye oranının yüksek kaldığı ve kompozit malzemenin istenilen mekanik özellikleri sağlamasının mümkün olamayacağı ifade edilebilir.

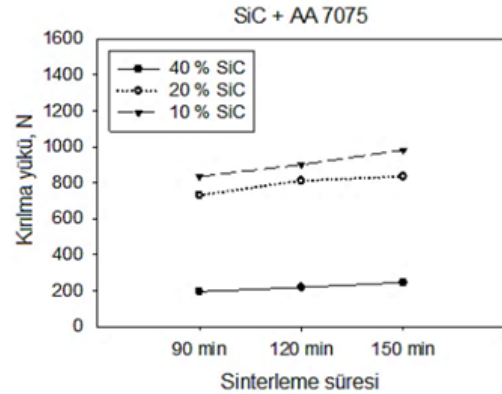
3.2. Sertliklerin Değerlendirilmesi (Evaluation of Hardnesses)

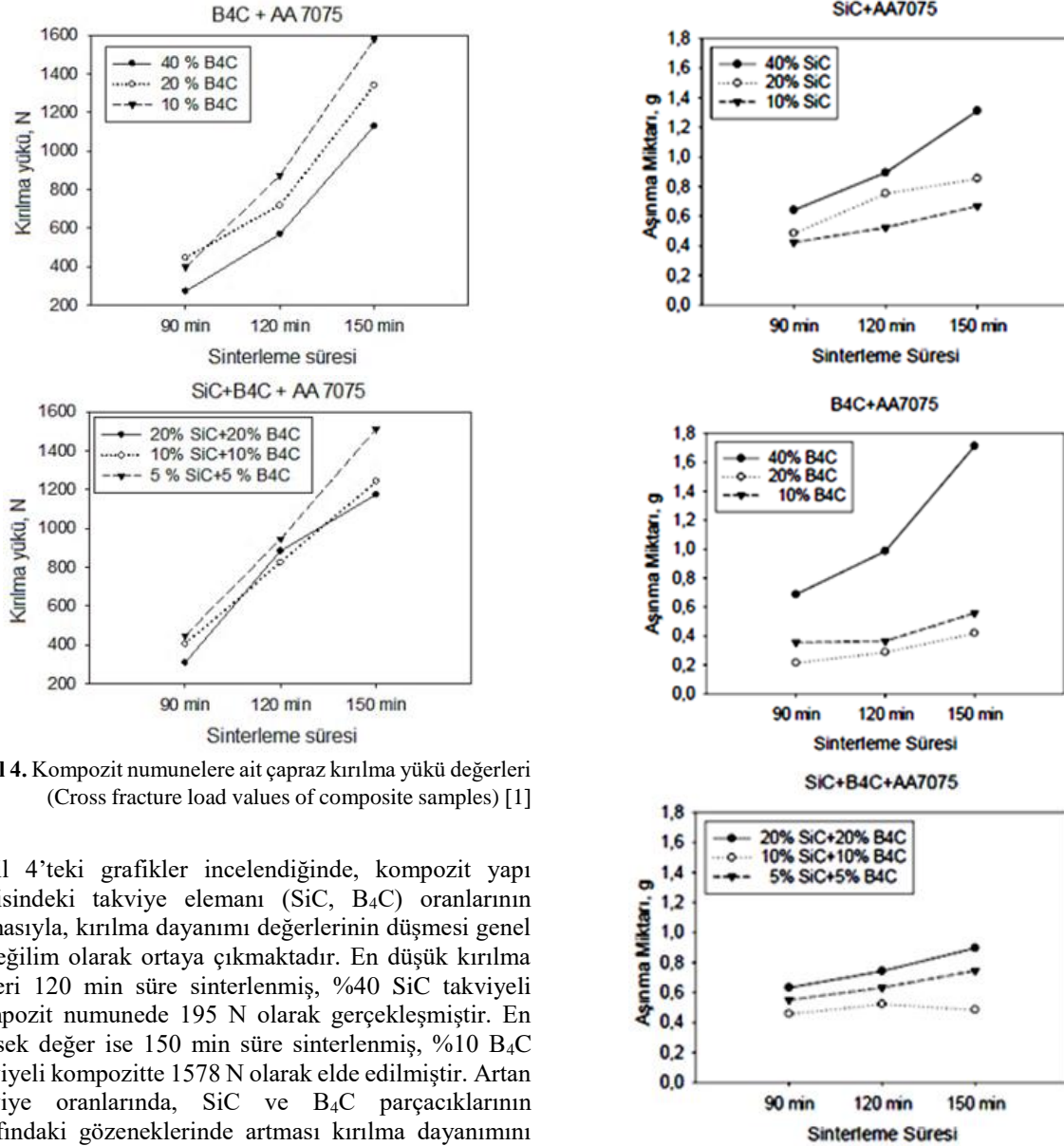
Üretimi yapılan kompozit numunelerin Brinell yöntemi kullanılarak ölçülen sertlik değerleri Şekil 3'teki grafiklerde gösterilmektedir.



Şekil 3. Kompozit numunelere ait sertlik değerleri (Hardness values of composite samples) [1]

Şekil 3'teki grafiklere bakıldığında, en yüksek sertlik değerleri, en yüksek takviye oranına sahip 90 min süre sinterlenmiş %40 takviyeli kompozit numunelerden elde edilmiştir. Bu durum literatürdeki benzer çalışmalarla aynı yöndedir. Benzer sonuçlar Özkan'ın yaptığı çalışmada [15] ve başka bazı çalışmalarda da ortaya koyulmuştur [16]. Tüm kompozit numuneler içerisinde en yüksek sertlik değeri %40 B₄C takviyeli numunede 76,44 HBW olarak ölçülmüştür. En düşük sertlik değeri ise 150 min süre sinterlenmiş %5 SiC+%5 B₄C takviyeli kompozit numunede, 40,36 HBW olarak kaydedilmiştir. B₄C parçacıklarının çok sert fazda olması sebebiyle, üretilen kompozitler içerisinde B₄C takviyeli olanlarda, SiC takviyeli kompozitlere göre daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Bu durum 7,8 ve 9 numaralı SiC+B₄C karışık takviyeli numunelerde de benzer sonuçları çıkarmıştır. Bu tür kompozit yapılarda, takviye elemanı miktarının artmasının gözenek ve boşluk oranını arttırdığı olumsuz bir durum olsa da bununla birlikte sertlik değerlerinin de artış gösterdiği ifade edilebilir.





Şekil 4. Kompozit numunelere ait çapraz kırılma yükü değerleri (Cross fracture load values of composite samples) [1]

Şekil 4'teki grafikler incelendiğinde, kompozit yapı içerisindeki takviye elemanı (SiC, B₄C) oranlarının artmasıyla, kırılma dayanımı değerlerinin düşmesi genel bir eğilim olarak ortaya çıkmaktadır. En düşük kırılma değeri 120 min süre sinterlenmiş, %40 SiC takviyeli kompozit numunede 195 N olarak gerçekleşmiştir. En yüksek değer ise 150 min süre sinterlenmiş, %10 B₄C takviyeli kompozitte 1578 N olarak elde edilmiştir. Artan takviye oranlarında, SiC ve B₄C parçacıklarının etrafındaki gözeneklerinde artması kırılma dayanımını kötü yönde etkilemektedir. Aynı şekilde artan gözeneklerin kırılma dayanımını düşürdüğü ve mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilediği ifade edilebilir. Ayrıca köşeli ve keskin yapıdaki takviye elemanı taneciklerinin kompozit yapı içerisinde çentik tesiri yaparak kırılmayı kolaylaştırdığı söylenebilir.

3.4. Aşınma Miktarlarının Değerlendirilmesi (Evaluation of Wear Amount)

Üretimi yapılan kompozit numunelerin pin-on-disk yöntemi kullanılarak belirlenen aşınma miktarı değerleri Şekil 5'teki grafiklerde gösterilmektedir.

Şekil 5. Kompozit numunelere ait aşınma miktarları (Wear amounts of composite samples) [1]

Şekil 5'deki grafiklere toplu halde bakıldığında, sinterleme süresinin artmasıyla aşınma miktarlarındaki artış göze çarpmaktadır. Bu durum tüm takviye oranları için geçerlidir. Ancak özellikle %40 B₄C takviyeli kompozit numune için en yüksek aşınma miktarı kaydedilmiştir.

SiC takviyeli kompozit numunelerde takviye oranının artmasıyla aşınma miktarı da artış göstermiştir. Bu durum sertlik ile ters orantı oluşturmaktadır. Kompozit yapı içerisinde sert takviye fazının artmasıyla sertlik değerleri de artış göstermektedir. Ancak sertliğin artması aşınma direncini azaltmıştır. Bu duruma benzer bir sonuç Hasırcı ve Gül'ün yaptığı çalışmada ifade edilmiştir [3]. B₄C takviyeli kompozit numunelerde durum daha farklı görünmektedir. En yüksek aşınma miktarı %40 takviyeli kompozitte tespit edilirken arkasından %10 takviyeli

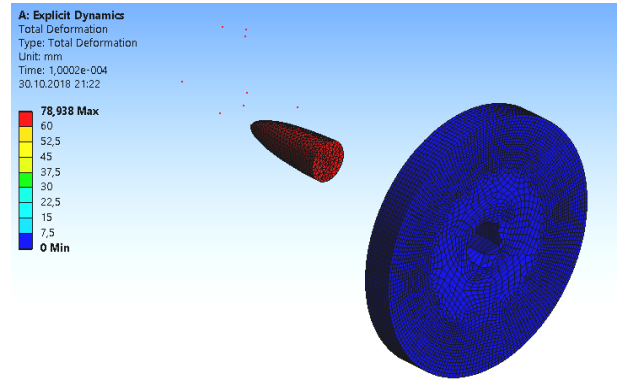
kompozit gelmiştir. En düşük aşınma miktarı ise %20 B₄C takviyeli kompozitte elde edilmiştir. Bu durum iki şekilde izah edilebilir:

Birincisi, takviye oranının %10'dan %20'e çıkmasıyla kompozit yapının sertliği artmış ve buna bağlı olarak aşınma direnci yükselmiştir. Bu durum literatürdeki bazı çalışmalarda yer almaktadır [16]. İkincisi, takviye oranını %40 çıkması sertlik değeri en yüksek noktaya çıkmış olmasına rağmen, %20 takviyeli kompozite göre daha fazla aşınma meydana gelmiştir. Bu, literatürde çok rastlanan bir sonuç değildir. Ancak %40 B₄C takviyeli kompozitin mikroyapı incelemelerinde belirtildiği gibi gözeneklilik ve boşluk oranındaki artış ve matris malzemesi Al 7075'in B₄C taneciklerini ıslatamaması sebebiyle takviye ve matris fazı arasındaki bağ çok zayıf gerçekleşmiştir. Ayrıca %40 B₄C oranının yapı içerisinde yeterince tutunmadığı ve oldukça fazla olduğu söylenebilir. Dolayısıyla aşınma deneyleri sırasında B₄C parçacıkları kompozit yapı içerisinde kolayca koparak uzaklaşmıştır. Böylece takviye elemanına göre çok yumuşak fazda olan Al 7075 matris malzemesinde aşınma kayıpları fazla meydana gelmiştir.

3.5. Balistik Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi (Evaluation of Ballistic Analysis Results)

Program analiz modüllerinden Explicit Dynamics modülü seçilmiştir. Daha sonra modellemesi yapılan numunelere ait veriler manuel olarak girilerek malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Mermi ve hedef malzeme atamaları tamamlandıktan sonra 3 boyutlu çizim programları yardımıyla oluşturulan mermi ve hedef modelleri programa import edilerek, analiz sınır şartı olarak hedef model dört kenarından sabitlenmiştir. İşlemin devamında, hedef modeli sabitlenerek çarpışma hızı değeri girilerek çözüm başlatılmıştır. Analizlerde ilk olarak modellemesi yapılan takviyesiz Al7075 malzemenin balistik başarımı incelenmiştir. Balistik analizlerde en önemli faktörün kompozit yapı içerisindeki takviye elemanı parçacıklarının miktarı olduğu göz önüne alınmıştır. Dolayısıyla üç farklı sinterleme sıcaklığında üretilen kompozit numunelerden orta sinterleme sıcaklık değeri olan, 120 min sürede sinterlenmiş kompozit numuneler dikkate alınarak 9 adet kompozit numunenin modelleme ve analizleri yapılmıştır. Hedef-mermi çarpışması sonucu meydana gelen deformasyon ve gerilme dağılımı, incelenen zırhın, belirli çarpma koşullarında korum sağladığı personel ya da teçhizatın emniyetini ne seviyede koruduğunun anlaşılabilmesi açısından önemlidir. Şekil 6'da Al 7075 numuneye ait hedef-mermi etkileşimini gösteren analiz görüntüsü verilmiştir.

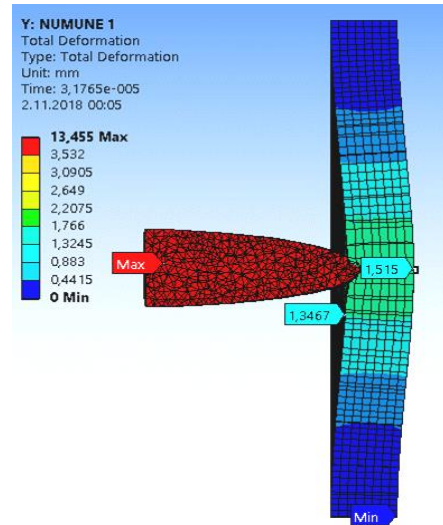
(Al7075 Numune) Hedef –Mermi



Şekil 6. Al 7075 hedef ile mermi etkileşimi (Bullet interaction with target Al 7075) [1]

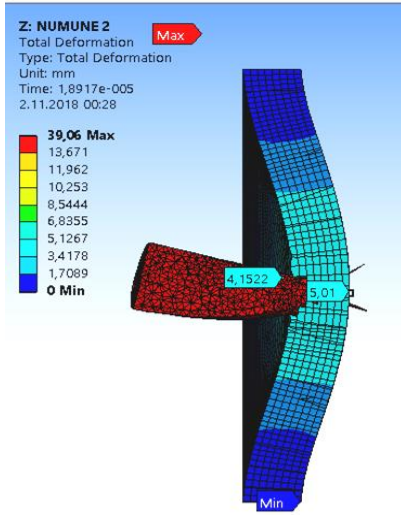
Şekil 6 incelendiğinde, takviyesiz Al 7075 hedef ve çelik mermiye ait analizde, hedefin deforme olmuş görüntüsü görülmektedir. 7,62 mm mermi çekirdeğinin Al7075 yapıyı delip geçtiği görülmektedir. Takviyesiz Al 7075 hedefin tek başına mermi karşısında balistik dayanım gösteremediği, tam bir penetrasyon (girme, nüfuziyet) gerçekleştiği görülmektedir.

(Numune-1) Hedef – Mermi



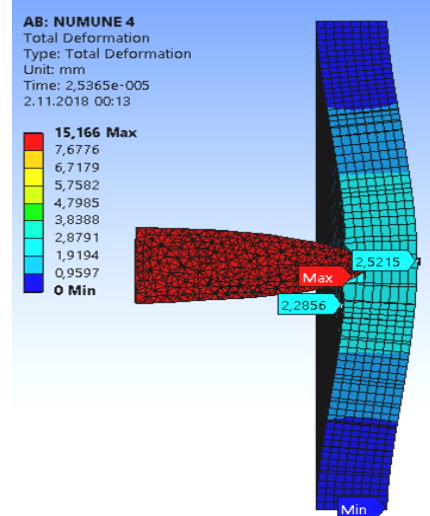
Şekil 7. %40 SiC + %60 Al7075, hedef – mermi etkileşimi (40% SiC + 60% Al7075, target - bullet interaction) [1]

(Numune-2) Hedef – Mermi



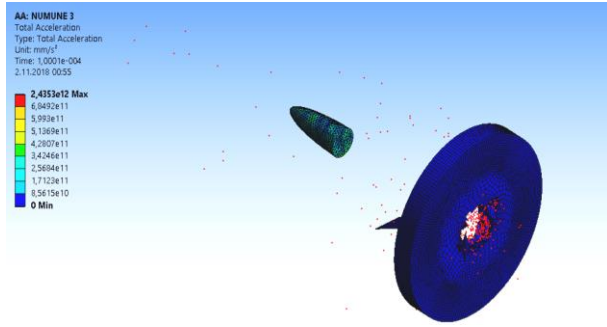
Şekil 8. % 20 SiC + % 80 Al7075, hedef – mermi etkileşimi (20% SiC + 80% Al7075, target-bullet interaction) [1]

(Numune-4) Hedef – Mermi



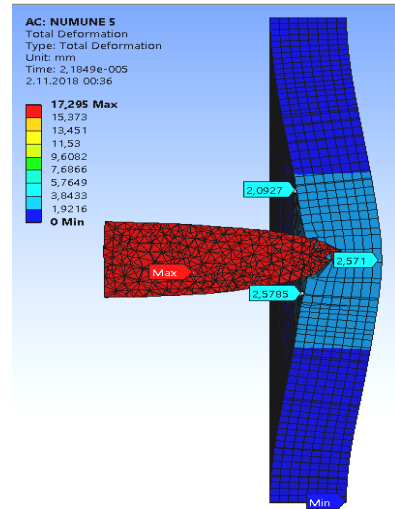
Şekil 10. %40 B₄C + %60 Al7075, hedef – mermi etkileşimi (40% B₄C + 60% Al7075, target - bullet interaction) [1]

(Numune-3) Hedef– Mermi



Şekil 9. % 10 SiC + %90 Al7075, hedef – mermi etkileşimi (10% SiC + 90% Al7075, target - bullet interaction) [1]

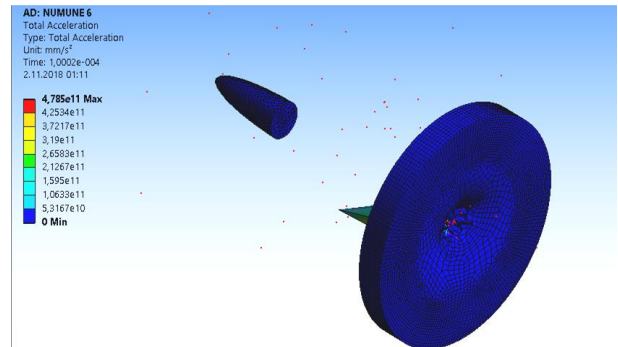
(Numune-5) Hedef– Mermi



Şekil 11. %20 B₄C + %80 Al7075, hedef – mermi etkileşimi (20% B₄C + 80% Al7075, target - bullet interaction) [1]

Şekil 7'deki deformasyonlar incelendiğinde mermi hedefe hasar vermiş ancak penetrasyon gerçekleşmemiştir. Hedefin çarpma bölgesi ve yakın bölgelerde kırılmalar ve katlanmalar görülmüş ayrıca mermi de az miktarda hasar almıştır. Mermi hedefe yaklaşık 1,5 mm nüfuz etmiştir. %40 SiC katkısı balistik başarımları sağlamıştır. Şekil 8'de hedef, merminin tam penetrasyonunu engellemiş ancak, bununla birlikte yaklaşık 5 mm civarında bir batma derinliği oluşmuştur. %20 SiC katkısı Al7075 malzemede balistik başarımları sağladığı ifade edilebilir. Şekil 9'da ise, mermi hedefi tam penetrasyona uğratmış olup delip geçmiştir. % 10 SiC katkısı balistik başarımları için etkili olmamıştır. Bu tür kompozit yapılar içerisindeki takviye parçacıklarının tam homojen olamayan dağılımı, mekanik özelliklerde olduğu gibi balistik davranışlarında da olumsuz durumlara sebep olabilmektedir.

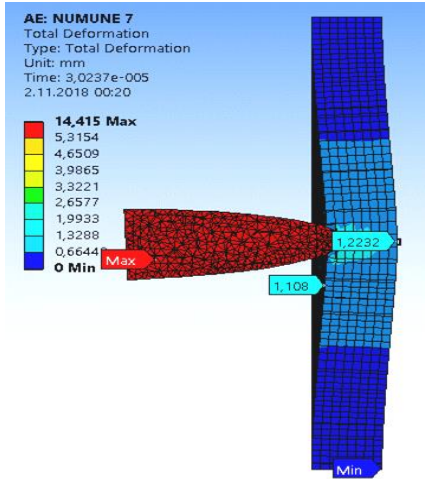
(Numune-6) Hedef – Mermi



Şekil 12. % 10 B₄C + %90 Al7075, hedef – mermi etkileşimi (10% B₄C + 90% Al7075, target - bullet interaction) [1]

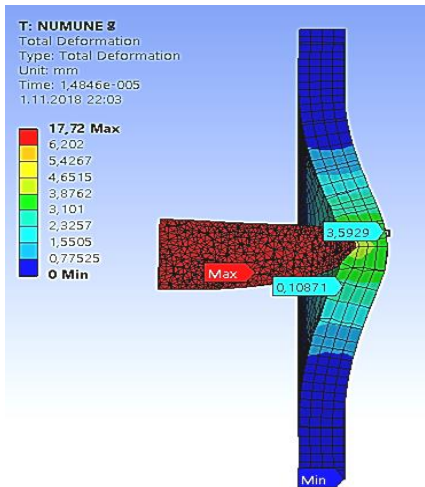
Şekil 10'daki deformasyonlar incelendiğinde mermi hedefe hasar vermiş ancak penetrasyon gerçekleşmemiştir. Hedefin çarpma bölgesi ve yakın bölgelerde kırılmalar ve katlanmalar görülmüş ayrıca mermi de az miktarda hasar almıştır. Mermi hedefe yaklaşık 2,5 mm batmıştır. %40 B₄C katkısı balistik başarımları sağlamıştır. Şekil 11'de ise hedef, merminin tam penetrasyonunu engellemiş bununla birlikte yaklaşık 2,6 mm civarında bir batma derinliği oluşmuştur. %20 B₄C katkısı Al 7075 malzemede balistik başarımları sağlamıştır. Şekil 12'ye bakıldığında, merminin hedefi tam penetrasyona uğratarak delip geçtiği görülmektedir. %10 B₄C katkısı balistik başarımları için etkili olmamıştır. Numune 1, 2, 3, 4, 5 ve 6'dan sonra yapılan balistik analizlerde Numune 7, 8 ve 9 incelenmiştir. 7, 8 ve 9 nolu kompozit numunelerdeki takviye oranları SiC ve B₄C eşit oranlarda karıştırılarak, önceki numunelerde olduğu gibi %40, %20 ve %10 takviye oranları elde edilmiştir.

(Numune-7) Hedef – Mermi



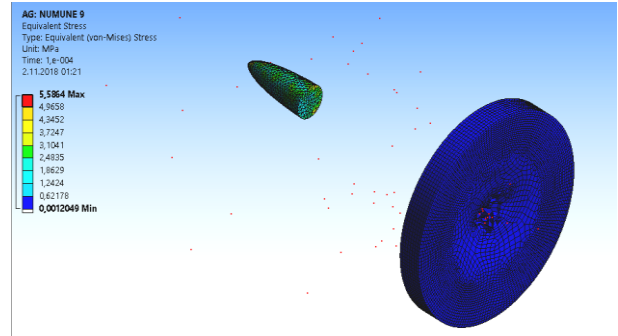
Şekil 13. %20 SiC + %20 B₄C + %60 Al7075, hedef – mermi etkileşimi (20% SiC + 20% B₄C + 60% Al7075, target - bullet interaction) [1]

(Numune-8) Hedef – Mermi



Şekil 14. %10SiC + %10 B₄C + %80 Al7075, hedef – mermi etkileşimi (10% SiC + 10% B₄C + 80% Al7075, target - bullet interaction) [1]

Numune-9 (Hedef) – Mermi



Şekil 15. %5 SiC + %5 B₄C + %90 Al7075, hedef – mermi etkileşimi (5% SiC + 5% B₄C + 90% Al7075, target - bullet interaction) [1]

Şekil 13'teki deformasyonlar incelendiğinde mermi hedefe hasar vermiş ancak penetrasyon gerçekleşmemiştir. Hedefin çarpma bölgesi ve yakın bölgelerde kırılmalar ve katlanmalar görülmüş ayrıca mermi de az miktarda hasar almıştır. Mermi hedefe yaklaşık 1,25 mm batmıştır. %20 SiC ve %20 B₄C katkısı balistik başarımları sağlamıştır. Şekil 14'te ise hedef, merminin tam penetrasyonunu engellemiş bununla birlikte yaklaşık 3,6 mm civarında bir batma derinliği oluşmuştur. Aynı şekilde %10 SiC + %10 B₄C katkısı Al 7075 malzemede balistik başarımları sağlamıştır. Şekil 15'e bakıldığında, merminin hedefi tam penetrasyona uğratarak delip geçtiği görülmektedir. Önceki %10 katkılı numunelerde olduğu gibi, %5 SiC + %5 B₄C katkılı numune de balistik başarımları için etkili olmamıştır.

Yapılan balistik analizlere bakıldığında B₄C ve SiC takviyelerinin yapının sertlik, elastisite modülü gibi mekanik özelliklerini iyileştirdiği bunun sonucu olarak artan takviye oranlarında hedeflerin balistik başarımlarının arttığı görülmüştür. Kompozitlerin üretim şartları dikkate alındığında analizlerde %40 takviye oranlarında başarımları sağlanmasına rağmen bu oranda takviyelerde homojen dağılım elde edilemediği ve neticesinde istenilen özelliklerde kompozit üretimi yapılamadığı için deneysel çalışmamızda da görüldüğü üzere %20 takviye oranları balistik başarımları ve üretilebilirlik bakımından en iyi sonuçları vermektedir. Bu takviye oranında özellikle B₄C takviyeli kompozit yapı hem toz metalürjisi ile üretim hem de balistik başarımları için zırh malzemesi olarak kullanılabilir. Her iki takviye malzemesinin birlikte kullanıldığı kompozit numunelerde ise çok farklı sonuçlar çıkmamıştır. Kompozit malzemelerin balistik davranışlarındaki ana etken, ağırlıkça katılan % takviye oranları olmuştur. Karışık takviyeli kompozit numunelerde de, %10 B₄C + %10 SiC, toplamda %20 takviyeli kompozit numune üretilebilirlik ve balistik dayanım olarak optimum orana sahip numune olarak kabul edilebilir [1]. Genel bir sonuç olarak, SiC ve B₄C takviye elemanları kullanılarak üretilen kompozitlerde hem mekanik özellikler hemde

balistik performans açısından en başarılı sonuçlar %20 takviye oranlarında elde edilmiştir.

4.SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapılan deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Kompozit yapı içerisinde takviye miktarının artmasıyla sertlik değerleri de artış göstermiştir. Ancak sinterleme süresinin artmasıyla sertlik değerleri azalmıştır.
- SiC ve B₄C takviye oranlarının artması kompozitlerin kırılma dayanımını azaltmasına karşın, sinterleme süresinin artması kompozit numunelerin kırılma dayanımlarını arttırmıştır.
- Takviye oranlarının yükselmesi ve sinterleme sürelerinin artışı, kompozitlerin aşınma davranışlarını olumsuz etkilemiştir. Takviye cinsi ve takviye oranı birlikte değerlendirildiğinde en düşük aşınma değeri, 90 dakika sinterlenmiş %20 B₄C takviyeli kompozit numunede elde edilirken, en yüksek aşınma miktarı %40 B₄C takviyeli 150 dakika sinterlenen numunede elde edilmiştir.
- Bu tür kompozitler için %40 SiC ve B₄C oranları kompozit yapı içerisinde yüksek kalmıştır. Matris ve takviye fazları arasında olması beklenen güçlü bağ yeterince oluşmamıştır.
- Sonlu elemanlar yöntemiyle ANSYS / Explicit Dynamics (Student version) programı başarılı bir şekilde kullanılarak balistik çarpma analizleri yapılmıştır.
- Balistik analizler sonucunda;%40 ve %20 takviye oranlarında balistik başarımlar elde edilmiştir. Diğer mekanik özellikler ve üretilebilirlik faktörleri ile birlikte balistik başarımlar değerlendirildiğinde %20 takviye oranında üretilen kompozitlerin tercih edilmesinin daha uygun olacağı sonucuna varılmıştır. %20 takviye oranında B₄C hem üretilebilirlik hem de balistik özellikler dolayısıyla en iyi sonucu vermiştir.
- %10 takviye oranları kompozitlerde balistik başarımlar sağlayamamıştır.
- Yapılan balistik analizlerde, her iki takviye elemanının birlikte kullanıldığı 7, 8 ve 9 numaralı kompozit numuneler, aynı oranda tek çeşit takviye elemanının kullanıldığı numuneler ile çok yakın özellikte sonuçlar sergilemiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma 2017/005 numaralı proje kapsamında Kırıkkale Üniversitesi BAP Birimi tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Baydaroğlu, V., "Balistik Malzeme Üretimine Yönelik B₄C+SiC Takviyeli Al 7075 Kompozitlerde Optimum Katkı Oranının belirlenmesi", *Yüksek Lisans Tezi*, Kırıkkale Üniversitesi, (2018).
- [2] Ayhan O., Ali Kaya G., Uğur Ç.,AlMatrisli B₄C Takviyeli Kompozitlerin Sıcak Presleme Yöntemiyle Üretimi, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4: 8-13, (2007).
- [3] Hasan H., Ferhat G.,B₄C / Al Kompozitlerin Takviye Hacim Oranına Bağlı Olarak Abrasif Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, *SDU International Technologic Science*, 2(1): 15-21, (2010).
- [4] Tang, F.,Wu, X., Ge, S., Ye, J., Zhu, H., Hagiwara, M. and Schoenung, J.M., Dry Sliding Friction and Wear Properties of B₄C Particulate Reinforced Al-5083 Matrix Composites, *Wear*, 264: 555-561, (2008).
- [5] Yumak, N. Pekbey, Y. Aslantaş K.,Zırh Tasarımında Kullanılan Kompozit Malzemelerin Deformasyon Karakteristiğinin Araştırılması, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 10(4): 1-21, (2014).
- [6] Savio, S.G. Ramanjaneyulu, K. Madhu, V. Bhat, T.B. An experimental study on ballistic performance of boron carbide tiles, *International Journal of Impact Engineering*, 38: 535-541, (2011).
- [7] Jena, P.K.,Mishra, B., Kumar, K.S., Bhat, T.B., An experimental study on the ballistic behavior of some metallic armour materials against 7.62 mm deformable projectile, *Materials and Design*, 31: 3308-3316, (2010).
- [8] Fu, H.-H. Han, K.-S.,Song, J.-I. Wear properties of Saffil/Al, Saffil/Al₂O₃/Al and Saffil/SiC/Al hybrid metal matrix composites, *Wear*, 256: 705-713, (2004).
- [9] Alpas, A.T.,Zhang, J., Effect of microstructure (particulate size and volume fraction) and counterface material on the sliding wear resistance of particulate-reinforced aluminum matrix composites, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 25: 969-983, (1994).
- [10] Sawla, S.,Das, S., Combine deffect of reinforcement and heat treatment on the two body abrasive wear of aluminum alloy and aluminum particle composites, *Wear*, 257: 555-561, (2004).
- [11] Buytoz, S. ve Eren H.,Al Metal Matris Kompozitlerin Abrasiv Aşınma Performansına Takviye Elemanlarının Etkisi, *Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi*, 19(2): 209-216, (2007).
- [12] TS EN ISO 4498, "Sinterlenmiş metal malzemeler (sert metaller hariç) Görünen sertliğin ve mikro sertliğin tayini", Ankara, (2011).
- [13] TS EN ISO 6506-1,"Metalik Malzemeler Brinell Sertlik Deneyi, Bölüm 1: Deney metodu", Ankara, (2007).
- [14] ASTM-B 528-05, "Standard Test Method for Transverse Rupture.Strength of Metal Powder Specimens", ASTM International, West Conshohocken, United States, (2008).
- [15] Özkan, S., "Alüminyum Matrisli SiC Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Alaşımlama Yöntemiyle Üretimi ve Kuru Aşınma Davranışlarının İncelenmesi", *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2007).
- [16] Kılıç, E.F., "Alüminyum Alaşımlı SiC Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretimi ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi", *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2007).
- [17] Kırış, A., "Hasarlı Malzemelerin Mikro Elastik Teorilerle Modellenmesi ve Eshelby Tensörleri", *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, (2007).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



Bir buhar kazanındaki kızdırıcı- atemperatör sisteminin mathcad yazılımı ile iteratif ısı tasarım modellemesi ve performans analizi

Iterative thermal design modelling and performance analysis of superheater-desuperheater system at a steam boiler using mathcad software

Yazar(lar) (Author(s)): Ali Can YİĞİT¹, A. İbrahim ATILGAN²

ORCID¹: 0000-0001-7247-8570

ORCID²: 0000-0002-7150-4797

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Yiğit A.C. ve Atılğan A.İ., “Bir buhar kazanındaki kızdırıcı - atemperatör sisteminin mathcad yazılımı ile iteratif ısı tasarım modellemesi ve performans analizi”, *Politeknik Dergisi*, 23(2): 393-408, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.532961

Bir Buhar Kazanındaki Kızdırıcı – Atempereatör Sisteminin Mathcad Yazılımı ile İteratif Isıl Tasarım Modellemesi ve Performans Analizi

Araştırma Makalesi / Research Article

Ali Can YİĞİT^{1*}, A. İbrahim ATILGAN²

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Ankara

²Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Ankara

(Geliş/Received : 27.02.2019 ; Kabul/Accepted : 10.05.2019)

ÖZ

Bu çalışmada, 7,5 bar(g) çalışma basıncına sahip bir buhar kazanına monte edilen bir kızdırıcı-ateperatör sisteminin iteratif ısı tasarım modeli Mathcad yazılımı ile gerçekleştirilmiş ve elde edilen bulgular performans analizi ile yorumlanmıştır. Atempereatörün sistemdeki görevi kızdırıcı çıkışı buhar sıcaklığını istenilen sıcaklığa düşürmektir. Kızdırıcı-Atempereatör ikilisine sahip kazan sistemi; %100, %80, %60, %50 ve %40 yük koşulları altında incelenen bu sistem, atemperatörsüz bir kızdırıcıya sahip kazan sistemiyle de kazan ve kızdırıcı ısı kapasitesi açısından karşılaştırılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda atemperatör eklentisinin, sistem ısı kapasitesine doğru yük şartları uygulandığında olumlu etki gösterdiği belirlenmiştir. Çalışma verilerine dayanarak, doğru yük şartları altındaki kızdırıcı-ateperatör eklentisinin yalnızca konstrüksiyon kısıtlamaları nedeniyle değil, aynı zamanda kazan verimini arttırmak amacıyla da kullanılabilceği yorumu yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Atempereatör, mathcad ısı tasarım, kızdırıcı.

Iterative Thermal Design Modelling and Performance Analysis of Superheater-Desuperheater System at a Steam Boiler Using Mathcad Software

ABSTRACT

In this paper, iterative thermal design model of a superheater-desuperheater system mounted a steam boiler working at pressure of 7.5 bar(g) was completed using Mathcad and findings were interpreted with performance analysis. Aim of the desuperheater (ateperator) in the system is to reduce steam temperature to desired values at superheater outlet. Boiler system having Superheater-desuperheater was also investigated at load cases of %100, %80, %60, %50 and %40, and then, this model was prepared with system scenario containing a superheater without desuperheater in terms of boiler and superheater heat values. As a result of the study, it was determined that desuperheater addition has a positive effect on system heat capacity under proper load cases. Based on the study results, it was commented that superheater-desuperheater addition not only can be used because of construction limitations but can be preferred in order to increase boiler efficiency as well.

Keywords: Desuperheater, mathcad thermal design, superheater.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kızdırıcılar, buhar kazanı sistemlerinde doymuş buhardan belirli sıcaklık ve basınçta kızgın buhar üretmek amacıyla kullanılırlar. Burada üretilen buhar %100 kuruluğa sahip ve içerisinde nem barındıran doymuş bir buhara göre daha az korozif özelliğe sahiptir. Konveksiyon tipte, radyant tipte ve bu iki tipin birleştirilmesinden oluşan tipte üretilen kızdırıcılar bu isimlerini ısıyı alma şekillerine göre kazanırlar. Isı geçişi direkt yanma ortamındaki alev tarafından sağlanıyorsa radyasyonla ısı transferinin varlığından söz edildiği için bu tip kızdırıcılar radyant, geçiş yanma sonucu oluşan duman gazı tarafından sağlanıyorsa konveksiyonla ısı transferi söz konusu olduğu için bu tip kızdırıcılar konveksiyon tipi kızdırıcı olarak adlandırılırlar. Bu iki

tipin seri olarak birleştirilmesi neticesinde ise radyasyon ve konveksiyon tipi kızdırıcı modeli oluşur [1].

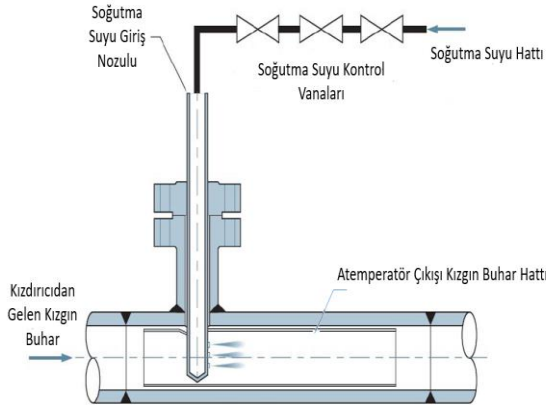
Tasarım ve yerleşim gereği kazanın konstrüksiyon sınırlamalarına bağlı olarak bu kazanlara yerleştirilen kızdırıcılar da belirli boyutlarda imal edilmek durumundadır. Bu durumlarda sisteme verilmek istenen kızgın buhar sıcaklığı sağlanamamakta ve bir geri kızdırıcıya (ateperatör) ihtiyaç duyulmaktadır. Atempereatör, bir kontrol vanası yardımıyla istenen buhar sıcaklığını elde etmek için kızgın buharın geçtiği hatta kontrol vanası ve nozullar yardımıyla soğutma suyu enjekte ederek (püskürterek) geri kızdırma yöntemi uygulayan bir sistemdir. Kim ve arkadaşları, 2017 yılında yaptıkları bir çalışmada atomizasyon işleviyle çalışan bir atemperatör kontrol vanasının nümerik analizini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada belirli giriş ve çıkış basınç ve sıcaklık girdilerine sahip ve belirli debideki kızgın buhara belirli sıcaklık ve debideki soğutma

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : alicanyigit92@gmail.com

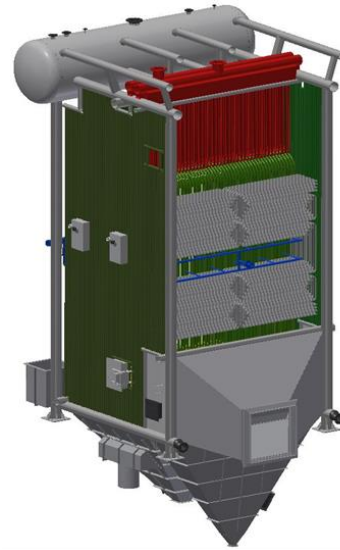
suyunun farklı basınçlar altında püskürtülmesi neticesinde elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır [2]. Karuppiah, Periasamy, Rajkumar ve Muruganand 2013 yılında yaptıkları çalışmada, bir kontrol sistemi vasıtasıyla geri-kızdırma işlemindeki sıcaklık kontrolünü incelemiştir. İncelenen sistemde atemperatöre gelen buhar sıcaklığı 440°C olarak verilmektedir. Bu çalışma ile atemperatördeki buhar sıcaklık düşümünün kontrol vanasının yardımıyla gerçekleştirilmesi sağlanmıştır [3]. Borzsony ve Sherikar, 2005 yılında yayımladıkları çalışmalarında geri-kızdırma teknolojisinin enerji sektöründeki üstünlüklerini ortaya koymuşlardır. Bu çalışmalarında atemperatörün bileşenleriyle ilgili bulguları incelerken aynı zamanda atemperatör soğutma suyunun kızgın buhar giriş sıcaklığı ve çıkış sıcaklıklarıyla olan zaman bazlı ilişkisini de ortaya koymuşlardır [4]. Bovat 2013 yılındaki çalışmasında geri kızdırma işlemi yapan bir atemperatörün su atomizasyon işleminin ANSYS Fluent yazılımı ile akış analizini gerçekleştirmiştir. Çalışmasında atemperatör sisteminin yapısal bileşenlerini detaylı şekilde incelemiş, yaklaşık 340°C kızgın buhar girişi öngörerek sistemdeki sıcaklık düşümlerini yorumlamıştır. Bovat'ın bu çalışması, atemperatörün kendi iç yapısını incelemiş olup sistemdeki basınç kayıplarını ve soğutma suyunun atomizasyon performansını dikkate almıştır [5]. Sunny ile Kumar ise 2017 yaptıkları bir çalışmada geri kızdırma sisteminde kullanılan termal boruların sıcaklık ve stres analizlerini gerçekleştirmişler ve bu analizlerinden kaynak olarak kullanılacak atemperatör sistemine giren buhar debisi, buhar sıcaklığı ve buhar basıncının zamana bağlı değişimlerini incelemiştir [6]. Ghavamian, Kouhikamali ve Hesami 2012 yılında yaptıkları çalışmada kızdırıcı çıkışındaki kızgın buhar ve bu buharın sıcaklığını azaltmak için kullanılan soğutma suyunun karışması neticesinde oluşan 2 fazlı akışın konvektif ısı transfer katsayısını CFD metoduyla incelemiş ve soğutma suyunun buharlaşması ve atemperatör içerisindeki ısı transferinin düzgün şekilde gerçekleşmesinde atemperatör nozul çapının, su debisinin ve kızgın buhar hızının önemli etkisinin olduğunu vurgulamıştır [7]. Buna benzer bir çalışma Torfeh ve Kouhikamali tarafından 2016 yılında yapılmış, benzer nümerik analizler sonucunda buhar hızının, soğutma suyu enjektör konumunun ve soğutma suyu debisinin atemperatör performansı üzerinde önemli etkisi olduğu tespit edilmiştir. Yapılan nümerik analiz sonuçları deneysel sonuçlarla %4,89 fark göstermektedir [8]. Yine Ebrahimian ve Gorji-Bandpy'nin 2008 yılında yaptıkları çalışmada sprey suyunun (soğutma suyu) kızgın buhar içerisindeki iki boyutlu akış analizi incelenmiş, bu çalışma neticesinde buhar hızı ve basıncının artışının soğutma suyundaki buharlaşmayı arttırdığı ve atemperatör performansında iyileşmeye neden olduğu ortaya konulmuştur [9]. Cho, Choi, Urano ve arkadaşları ise 2017 yayımladıkları çalışmalarında kömür yakan bir enerji santralinde atemperatörün tek boyutlu simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmalarında 800 MW kapasiteli santralin devreye alma

işlemleri esnasında atemperatör performansı entalpi dengesi üzerinden modellenmiş ve sistemde 3 kızdırıcı ile 2 atemperatör kullanılmıştır. Çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar, soğutma suyunun buharlaşma performansı ve atemperatör bileşenlerinin konumlandırılması üzerinden değerlendirilmiştir. Çalışmanın neticesinde daha kesin sonuçlara sahip bir çalışmanın çok boyutlu bir analizle mümkün olabileceği sonucuna varmışlardır [10]. Yine aynı isimler, bu yıl (2019) içerisindeki yeni çalışmalarında atemperatörün entalpi dengesini süresiz (zamana bağlı) analiz ile değerlendirmişlerdir. Bu analiz bulguları neticesinde kararsız akış modelinin kararlı akışa oranla soğutma suyu debisinin tayininde daha etkili olduğunu ve sonuç olarak soğutma suyu debisinin bu metodla kızgın buharın istenilen oranda “geri kızdırılıp kızdırılmadığı” sonucunu net şekilde tayin etmede kullanılabileceğini ortaya koymuşlardır [11]. Tüm bu kaynak çalışmalar atemperatörün kontrol sistemi ile veya iç yapısındaki değişim ve gelişimlerle ilgilenmiştir. Zima ise 2006 yılında yaptığı bir çalışma ile atemperatör ile birlikte çalışan kızdırıcının nümerik analizini gerçekleştirmiş ve çalışmasında istenilen kızgın buhar sıcaklığını elde ederken kullanılacak soğutma suyu için en uygun debi şartlarını belirlemeyi amaçlamıştır. Yine bu çalışmasında zamana bağlı durumda soğutma suyu eklentisine bağlı olarak buhar sıcaklığının değişimini ve yine zamana bağlı buhar basıncı ve buhar debisi grafiklerini ortaya koymuştur [12]. Zima'nın çalışması kızdırıcıya da içine alan bir sistem incelemesi yaptığı için amaç olarak bu çalışmaya en yakın çalışmadır. Bu çalışmada ise atemperatördeki iç kayıplar ve yapısal sorunlar ihmal edilmiş, çalışmanın ana konusu atemperatör sisteminin mevcut kazan ve bu kazana monte edilecek kızdırıcı ile birlikte Mathcad yazılımı üzerinden kararlı bir akış şartında bir ısı tasarım modelinin oluşturulması ve bu modelin termal anlamda farklı şartlar altında tüm sistemdeki isteklere cevap verecek sonuçlar sunması olarak tayin edilmiştir. Çalışmada, mevcut akışkan yatak teknolojisiyle işletilen ve 102°C sıcaklığındaki besleme suyundan doymuş buhar üreten bir su borulu buhar kazanına kızdırıcı monte edilmesi ve bu kızdırıcının konstrüksiyon kısıtlamaları sebebiyle istenilen sıcaklığın üzerinde kızgın buhar üretimi yapması durumlarında atemperatör sisteminin de hatta monte edilmesiyle oluşan durumlar değerlendirilmiştir. Şekil 1'de atemperatörün genel çalışma prensibi gösterilmiştir. Atemperatör, Şekil 2'de görüldüğü gibi soğutma suyu için gerekli debiyi kazana beslenen su hattından almaktadır. Bu nedenle, atemperatörün soğutma suyu debisi hem kazan performansı, hem kızdırıcı performansı hem de atemperatör performansını direkt olarak etkilemektedir. Kızdırıcı ve atemperatörün akış ve sıcaklık parametreleri Mathcad yazılımı kullanılarak birleştirilmiş ve iteratif bir ısı tasarım modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan model üzerinden elde edilen çıktılar kullanılarak atemperatörün farklı kazan yükleri altında mevcut sistemdeki avantajları ve dezavantajları yorumlanmıştır. Yorumlanan bu sonuçlar sistemin atemperatörsüz çalışması durumunda

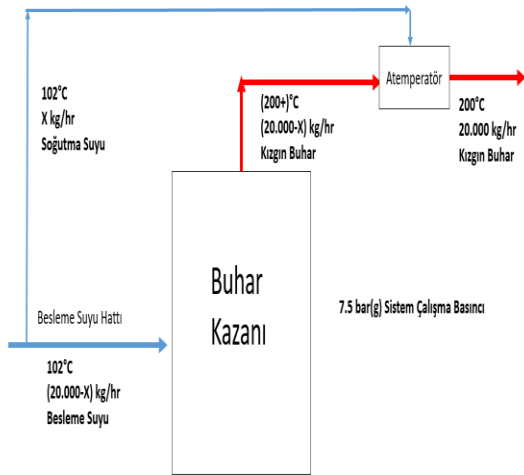
elde edilen değerlerle karşılaştırılmış ve bulgular yorumlanarak çalışma tamamlanmıştır.



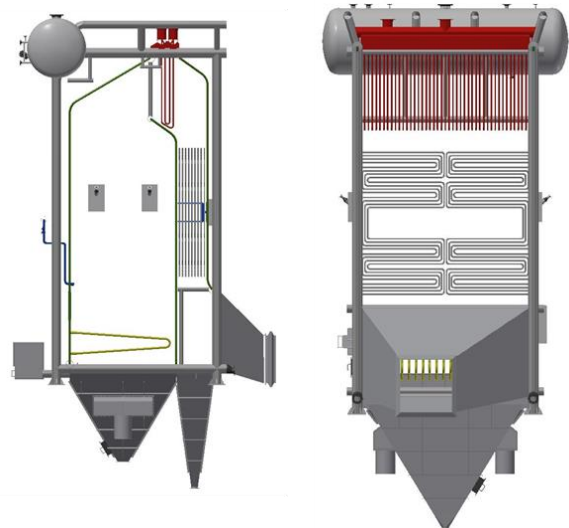
Şekil 1. Atempertör çalışma prensibi (Working principle of desuperheater) [5]



Şekil 3. Kızdırdıcının kazan içindeki yerleşimi (Superheater layout in boiler)



Şekil 2. Sistem akış şeması (System flow diagram)



Şekil 4. Kızdırdıcının kazan içindeki yerleşimi (Superheater layout in boiler)

2. SİSTEMİN SAYISAL MODELLEMESİ (NUMERICAL MODELLING OF SYSTEM)

Şekil 3 ve Şekil 4'te de görülmekte olan ve incelemesi yapılan kızdırdıcı, içinde yer aldığı kazan sistemine montajı sebebiyle belirli konstrüksiyon ölçülerine sahiptir. Modellemesi yapılmış olan kazan ve kızdırdıcı ölçüleri aşağıdaki gibidir:

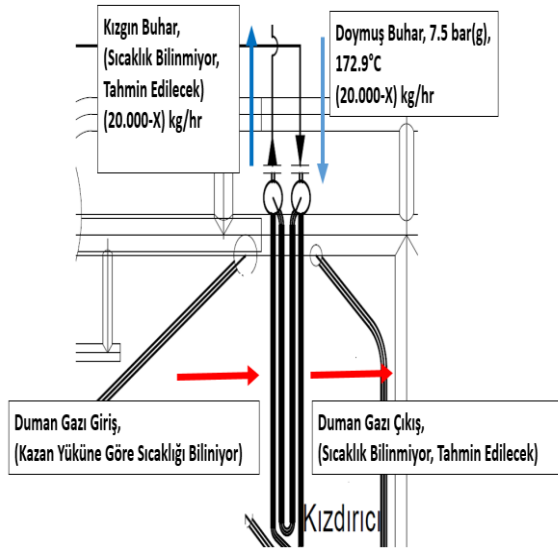
- Paralel boru adedi $n_{ps}=86$
- Dizi başına boru adedi $n_{sh}=43$
- Dizi adedi $z_{sh}=4$
- Duman gazı geçiş uzunluğu $l_{sh}=1,6$ m
- Duman gazı geçiş genişliği $b_{sh}=4,5$ m
- İki boru kesiti arasındaki yatay mesafe $t_q=100$ mm
- İki boru kesiti arasındaki düşey mesafe $t_l=130$ mm

Boru malzemesi olarak karbon çeliği malzemeden dikişsiz çelik çekme borular kullanılmış olup boru çapı $d_{sh}=42,4$ mm, et kalınlığı ise $w_{tsh}=3,20$ mm olarak seçilmiştir.

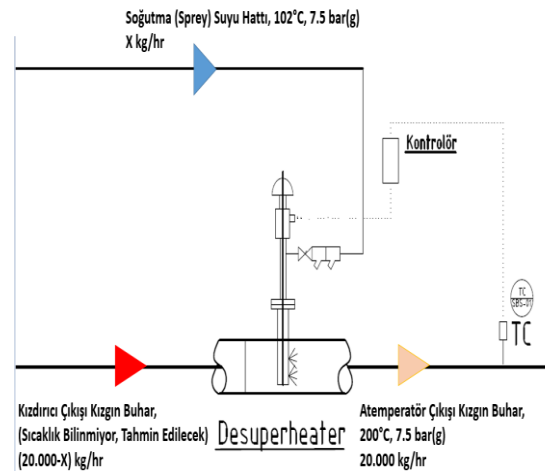
Konstrüksiyon şartları belirlendikten sonra sistemin akış modellemesi yapılır. Kazan çalışma şartları ve mevcut konstrüksiyonun getirdiği sınırlamalar sebebiyle istenilen kızgın buhar çıkış sıcaklığının elde edilemediği durumlarda atemperatör sistemi devreye girmektedir. Bu sistem, 200°C üzeri sıcaklıkları yine kazan besleme suyu tesisatından çektiği soğutma suyu hattını sahip olduğu görevlidir. Şekil 5'te kazan içine monte edilen kızdırdıcının gaz ve buhar akışı gösterilmektedir. Burada gaz giriş sıcaklığı ve doymuş buhar sıcaklığı bilinmekte olup gaz çıkış sıcaklığı, kızgın buhar sıcaklığı ve kızdırdıcı buhar debisi tahmin edilecek değerlerdir. Şekil 6'da

gösterilen atemperatör akış şemasında ise kızdırıcıdan çıkan kızgın buhar ve bu kızgın buhar ile soğutma suyunun debisi bilinmeyen değerler olup atemperatör sonrası sisteme verilecek buhar sıcaklığı ve debisi bilinen değerlerdir. İki şekilde yer alan bu iki sistem birbirine bağlı parametrelerden oluşmakta olup beraber incelenmektedir.

Bu çalışmada amaçlanan ise MathCad programı kullanılarak yapılan ısıl modelleme ile kızdırıcı tarafında bilinmeyen ve ilk olarak tahmini yapılan gaz çıkış sıcaklığı ve kızgın buhar çıkışı sıcaklığı ile atemperatör tarafındaki soğutma suyu debisinin iteratif hesaplamalar ile kesin neticesidir. Böylece tespiti yapılan bu değerler vasıtasıyla kızdırıcı kapasitesi ile kazana beslenen buhar debisi de net olarak tayin edilecek ve tasarlanan bu model, tüm sistemin verim hesaplamaları için kaynak teşkil edecektir. Sistem modellemesinde hatlardan gelen basınç kayıpları ihmal edilmiş olup akış şartları sürekli olarak düşünülmektedir.



Şekil 5. Kızdırıcı akış şeması (Flow diagram of superheater)



Şekil 6. Atempertör akış şeması (Flow diagram of esuperheater)

Isıl tasarım modellemesinde yararlanılan formüller ise aşağıdaki gibidir:

Sistem debisinin, kızdırıcı debisi (aynı zamanda kazana beslenen) ve soğutma suyu debisinin toplamı olduğu gösterilir. Kütle korunumuna göre:

$$\phi_{sys} = \phi_{sh} + \phi_{cw} \quad (1)$$

Isı transfer yüzey alanı ve serbest gaz geçiş kesit alanı formülleri ifade edilir:

$$A_{sh} = \pi \cdot di_{ash} \cdot l_{sh} \cdot n_{sh} \cdot z \quad (2)$$

$$A_{frsh} \quad (3)$$

$$= b_{sh} \cdot l_{ksh}$$

$$- n_{sh} \cdot di_{ash} \cdot l_{sh}$$

Duman gazı hızı:

$$\omega_{shg} = \phi G \frac{\left\{ \left[\frac{(vS + v_{shsa})}{2} + \Delta T_{shlog} \right] \right\}}{A_{frsh}} \quad (4)$$

Ortalama gaz ve ortalama boru film sıcaklıkları:

$$v_{shg} = \frac{(v_{shge} + v_{shga})}{2} \quad (5)$$

$$v_{shw} = \frac{(v_{shwalla} + v_{shwalle})}{2} \quad (6)$$

Duman gazı Reynolds sabiti:

$$Reshg = \frac{(\rho_{shg} \cdot \omega_{shg} \cdot di_{ash})}{\eta_{shg}} \quad (7)$$

Konvektif ısı transfer katsayısı [8]:

$$\alpha B_{sh} = 0.3 \frac{[\lambda_{shg} \cdot 1 \cdot (Reshg)^{0.6}]}{di_{ash}} \quad (8)$$

Buhar ve gaz şartlarını içeren toplam ısı transfer katsayısı:

$$HH_{sh} =$$

$$\left\{ \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha B_{sh} + Reshg} \right) + \left[\frac{1}{(sh_{fouling})} \left(\frac{1}{\left(\frac{w}{m^2 K} \right)} \right) \right] + \left[\frac{di_{ash} \cdot \ln \left(1 + \frac{2 \cdot wt_{sh}}{di_{ash}} \right)}{z \cdot sh_{material}} \right]} \right\} + \left(\frac{di_{ash}}{di_{ash} - 2 \cdot wt_{sh}} \right) \left(\frac{1}{\alpha_{shin}} \right) \left(\frac{1}{\left(\frac{w}{m^2 K} \right)} \right) \quad (9)$$

Kazan ısı kapasitesi formülü:

$$Q_{boiler} = \phi_{boiler} \cdot (h_{sha} - h_{wi}) \quad (10)$$

Kızdırıcıdaki buhar ısı kapasitesi formülü:

$$Q_{sh} = \phi_{sh} \cdot (h_{sha} - h_{she}) \quad (11)$$

Atemperatördeki enerji korunumu:

$$\phi sh * hsha + \phi cw * hcw = \phi sys * hsys \quad (12)$$

Formül 10'da yer alan kazan debisi $\phi boiler$, 11'deki kızdırıcı debisi ϕsh ile aynı değerdedir.

Su ve buharın sıcaklık-entalpi tabloları [13], gaz sıcaklıklarındaki enerji değerleri için linyit kömürünün sıcaklığa bağlı 1 Nm³ duman gazındaki ısı içeriğini gösteren grafik [14] ve gaz sıcaklığına bağlı radyasyon değer grafiği [14] Mathcad programında matris formunda tanımlanmıştır.

Aşağıda 7,5 bar(g) kızgın buhar, doymuş buhar ve sıkıştırılmış sıvı tablosu Mathcad matris formu gösterilmektedir.

$$Shsteam Temp = \begin{bmatrix} 200 \\ 250 \\ 300 \\ 350 \\ 400 \\ 450 \\ 500 \\ 550 \\ 600 \\ 650 \end{bmatrix} \text{ } ^\circ\text{C} \quad Shsteam Enth = \begin{bmatrix} 2836.88 \\ 2948.68 \\ 3055.59 \\ 3161.13 \\ 3266.75 \\ 3373.12 \\ 3480.61 \\ 3589.43 \\ 3699.72 \\ 3811.55 \end{bmatrix} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$SatSteam Temp = \begin{bmatrix} 150 \\ 155 \\ 160 \\ 165 \\ 170 \\ 175 \\ 180 \\ 185 \\ 190 \\ 195 \\ 200 \\ 205 \\ 210 \\ 215 \\ 220 \\ 225 \\ 230 \\ 235 \\ 240 \\ 245 \end{bmatrix} \text{ } ^\circ\text{C} \quad SatSteam Enth = \begin{bmatrix} 2745.9 \\ 2751.8 \\ 2757.5 \\ 2762.8 \\ 2767.9 \\ 2772.7 \\ 2777.2 \\ 2781.4 \\ 2785.3 \\ 2788.8 \\ 2792.0 \\ 2794.8 \\ 2797.3 \\ 2799.3 \\ 2801.0 \\ 2802.2 \\ 2802.9 \\ 2803.2 \\ 2803.0 \\ 2802.2 \end{bmatrix} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$SatSteam Temp = \begin{bmatrix} 100 \\ 105 \\ 110 \\ 115 \\ 120 \\ 125 \\ 130 \\ 135 \\ 140 \\ 145 \\ 150 \\ 155 \\ 160 \\ 165 \\ 170 \\ 175 \\ 180 \\ 185 \\ 190 \\ 195 \end{bmatrix} \text{ } ^\circ\text{C} \quad SatWaterEnth = \begin{bmatrix} 419.17 \\ 440.28 \\ 461.42 \\ 482.59 \\ 503.81 \\ 525.07 \\ 546.38 \\ 567.75 \\ 589.16 \\ 610.64 \\ 632.18 \\ 653.79 \\ 675.47 \\ 697.24 \\ 719.08 \\ 741.02 \\ 763.05 \\ 785.19 \\ 807.43 \\ 829.78 \end{bmatrix} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Aşağıdaki matris yapısı, linyit kömürüne ait sıcaklığa bağlı 1 Nm³ duman gazındaki ısı içerik değerlerini göstermektedir.

$$Gas Temp = \begin{bmatrix} 145 \\ 180 \\ 218 \\ 252 \\ 287 \\ 323 \\ 355 \\ 390 \\ 425 \\ 455 \\ 490 \\ 525 \\ 555 \\ 590 \\ 620 \\ 655 \\ 690 \\ 719 \\ 753 \\ 788 \\ 816 \\ 850 \\ 884 \\ 912 \\ 946 \\ 980 \end{bmatrix} \text{ } ^\circ\text{C} \quad Gas Enth = \begin{bmatrix} 200 \\ 250 \\ 300 \\ 350 \\ 400 \\ 450 \\ 500 \\ 550 \\ 600 \\ 650 \\ 700 \\ 750 \\ 800 \\ 850 \\ 900 \\ 950 \\ 1000 \\ 1050 \\ 1100 \\ 1150 \\ 1200 \\ 1250 \\ 1300 \\ 1350 \\ 1400 \\ 1450 \end{bmatrix} \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$$

Aşağıdaki matris formu ise; duman gazı sıcaklığına bağlı radyasyon değerlerini göstermektedir.

$$FlueGas Total Temp = \begin{bmatrix} 600 \\ 700 \\ 800 \\ 900 \\ 1000 \\ 1100 \\ 1200 \\ 1300 \\ 1400 \end{bmatrix} \text{ } ^\circ\text{C} \quad FlueGas Radiation = \begin{bmatrix} 2.35 \\ 4.1 \\ 6.1 \\ 8.7 \\ 13.5 \\ 14 \\ 15.5 \\ 17.5 \\ 20 \end{bmatrix} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}}$$

Detaylı anlatılacak ilk modelleme örneğinde ilk seferde tahmini yapılacak üç ana parametre duman gazı çıkışı sıcaklığı, kızgın buhar çıkış sıcaklığı ve soğutma suyu debisidir.

Tam yükte çalışan kazan sisteminde ölçülen duman gazı debisi **25100,34 m³/h**, gazın kızdırıcıya giriş sıcaklığı ise **767,41°C** olarak teyit edilmiştir. Bu ölçülen değerlere göre yapılan ilk tahminler:

Gaz Çıkış Sıcaklığı, Tshga: **750°C**

Kızdırıcı Çıkışı Kızgın Buhar Sıcaklığı, Tshsa: **250°C**

Atemperatör Soğutma Suyu Debisi, ϕcw : **500 kg/h**

Tahmini soğutma suyu debisi sistem tesisatında ana buhar debisinden ayrılan hattan geldiği için kızdırıcı buhar kapasitesi de bu değere göre tahmini bir ilk değer kazanacaktır.

$$\phi cw_0 := 500 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

$$\phi sh_0 := \phi sys - \phi cw_0 = 19500 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

Şekil 7. MathCad birinci iterasyon ekran görüntüsü (MathCad first iteration screen view)

Tahmini kızgın buhar sıcaklığı ve tahmini duman gazı giriş sıcaklığı ile değeri sabit olan doymuş buhar(kızdırıcı girişi) sıcaklık ve entalpi değerleri programa tanımlanır.

$$\begin{aligned}
 vshsa_0 &:= 250\text{ }^\circ\text{C} \\
 hshsa_0 &:= \text{linterp}(\text{ShSteamTemp}, \text{ShSteamEnth}, vshsa_0) \\
 hshsa_0 &= 2948.68 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\
 hshse &:= \text{linterp}(\text{ShSteamTemp}, \text{ShSteamEnth}, vS) \\
 hshse &= 2776.28 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\
 vshge &:= vgr2a_6 = 767.407\text{ }^\circ\text{C} \\
 hshge &:= \text{linterp}(\text{FlueTemp}, \text{FlueEnth}, vgr2a_6) \\
 hshge &= 1136.98 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}
 \end{aligned}$$

Şekil 8. MathCad birinci iterasyon ekran görüntüsü-2 (MathCad first iteration screen view-2)

Kızdıracı ısı transfer yüzey alanı ile duman gazının geçtiği serbest kesit alanın hesabı:

$$Ash_0 := \pi \cdot diash \cdot lsh \cdot nsh_0 \cdot z = 36.658 \text{ m}^2$$

Şekil 9. MathCad birinci iterasyon ekran görüntüsü-3 (MathCad first iteration screen view-3)

$$Afrsh_0 := bsh \cdot lksh - nsh_0 \cdot diash \cdot lsh = 4.725 \text{ m}^2$$

Şekil 10. MathCad birinci iterasyon ekran görüntüsü-4 (MathCad first iteration screen view-4)

Değeri bilinen gaz giriş sıcaklığı ve doymuş buhar sıcaklığı ile tahmin edilen gaz çıkış ve kızgın buhar sıcaklıkları yardımıyla logaritmik sıcaklık farkı tayini:

$$\Delta Tshlog_0 := \frac{[(vshge - vshsa_0) - (vshga_0 - vshse)]}{\ln \left[\frac{(vshge - vshsa_0)}{(vshga_0 - vshse)} \right]}$$

$$\Delta Tshlog_0 = 546.71 \text{ K}$$

Şekil 11. MathCad birinci iterasyon ekran görüntüsü-5 (MathCad first iteration screen view-5)

Duvar Sıcaklığı ile iç ortam sıcaklığı arasındaki fark 80°C kabul edilir [14] ve bu yöntemle duvar giriş-çıkış sıcaklıkları ile duvar yüzeyi-duman gazı arasındaki logaritmik sıcaklık farkı tayin edilir.

$$\Delta vshwall := 80\text{ }^\circ\text{C}$$

$$vshwalle := vS + \Delta vshwall - 273.15 \text{ K} = 252.9\text{ }^\circ\text{C}$$

$$vshwalla_0 := vshsa_0 + \Delta vshwall - 273.15 \text{ K} = 330\text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta Tshwallog_0 := \frac{[(vshge - vshwalle) - (vshga_0 - vshwalla_0)]}{\ln \left[\frac{(vshge - vshwalle)}{(vshga_0 - vshwalla_0)} \right]} = 465.656 \text{ K}$$

Şekil 12. MathCad birinci iterasyon ekran görüntüsü-6 (MathCad first iteration screen view-6)

Toplam ısı transfer katsayısı tayini için duman gazı hızı, duman gazı Reynolds sayısı, dinamik viskozitesi, yoğunluğu ve ısı iletkenlik değeri hesaplanır. Bu değerler yardımıyla konvektif ısı transfer katsayısına ulaşılır.

$$\omega shg_0 := \phi G \frac{\left[\frac{(vS + vshsa_0)}{2} + \Delta Tshlog_0 - 273.15 \text{ K} + 273.15 \text{ K} \right]}{273.15 \text{ K} \cdot Afrsh_0}$$

$$\omega shg_0 = 5.571 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$vshg_0 := \frac{(vshge + vshga_0)}{2} = 758.704\text{ }^\circ\text{C}$$

$$vshw_0 := \frac{(vshwalla_0 + vshwalle)}{2} = 291.45\text{ }^\circ\text{C}$$

$$\rho shg_0 := \text{linterp}(\text{FlueGasTemp}, \text{FlueGasDensity}, vshg_0) = 0.348 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\eta shg_0 := \text{linterp}(\text{FlueGasTemp}, \text{FlueGasViscosity}, vshg_0) = 1.697 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}}$$

$$Reshg_0 := \frac{(\rho shg_0 \cdot \omega shg_0 \cdot diash)}{\eta shg_0} = 4849.2$$

$$\lambda shg_0 := \text{linterp}(\text{FlueGasTemp}, \text{FlueGasCond}, vshg_0) = 0.069 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$\alpha Bsh_0 := 0.3 \frac{[\lambda shg_0 \cdot 1 \cdot (Reshg_0)^{0.6}]}{diash} = 79.375 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Şekil 13. MathCad birinci iterasyon ekran görüntüsü-7 (MathCad first iteration screen view-7)

İki boru arasındaki boru kesiti yatay ve düşey mesafe değerlerinin boru çapına bölümü ile kızdırıcı sınır tabaka kalınlığı tayin edilerek bu değer radyatif ısı transfer katsayısı hesaplamasında kullanılır.

$$\frac{t_{qsh}}{diash} = 2.358 \quad \frac{t_{lsh}}{diash} = 3.066 \quad \sigma_{sh} = 3.6 \quad S_{sh} := \sigma_{sh} \cdot diash = 0.153 \text{ m}$$

$$R_{shg_0} := \text{interp}\left(\text{FlueGasTotalTemp}, \text{FlueGasRadiation}, v_{shg_0} + v_{shw_0} - 273.15\text{K}\right) = 13.751 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Şekil 14. MathCad birinci iterasyon ekran görüntüsü-8 (MathCad first iteration screen view-8)

$$HH_{sh_0} := \left[\frac{1}{\alpha_{Bsh_0} + R_{shg_0}} + \left[\frac{1}{sh_{fouling}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{W}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right)} \right] + \left[\frac{diash \cdot \ln \left(1 + \frac{(2 \cdot wtsh)}{diash} \right)}{2 \cdot sh_{material}} \right] + \left(\frac{diash}{diash - 2 \cdot wtsh} \right) \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{shin_0}} \right) \cdot \frac{1}{\left(\frac{W}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right)} \right] = 43.341 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Şekil 15. MathCad birinci iterasyon ekran görüntüsü-9 (MathCad first iteration screen view-9)

Kirlilik faktörü 350 W/m²K olarak alınır. Karbon çeliği malzeme iletkenliği ise 54 W/mK olarak belirlenir [15]. İlk tahmini değerler ve bunlara bağlı bulunan değerler üzerinden toplam ısı transfer katsayısının ilk değeri belirlenir:

İç ortamdaki akışkana ve film yüzeyine verilen ısı transfer değerleri programda hesaplanır:

$$Q_{shi_0} := HH_{sh_0} \cdot \Delta T_{shlog_0} \cdot A_{sh_0} = 868.6 \text{ kW}$$

$$Q_{shw_0} := HH_{sh_0} \cdot A_{shwall} \cdot \Delta T_{shwalllog_0} = 106.99 \text{ kW}$$

$$Q_{sh_0} := Q_{shi_0} + Q_{shw_0} = 975.59 \text{ kW}$$

Şekil 16. MathCad birinci iterasyon ekran görüntüsü-10 (MathCad first iteration screen view-10)

Bulunan tahmini toplam ısı transfer değeri aynı zamanda ayrı ayrı duman gazının giriş ve çıkış ve kızgın buhar-doymuş buhar arasındaki enerji farkına eşittir. Buradan ilk yapılan tahminin üzerine yeni bir duman gazı çıkış entalpisi ve kızgın buhar çıkış entalpisi değeri tespit edilir.

$$h_{shga_0} := h_{shge} - \frac{(Q_{sh_0})}{\phi G} = 997.05 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \quad h_{shsa_0} := h_{shse} + \frac{(Q_{sh_0})}{\phi sh_0} = 2936.65 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$v_{shga_1} := \text{interp}\left(\text{FlueEnth}, \text{FlueTemp}, h_{shga_0}\right) \quad v_{shsa_1} := \text{interp}\left(\text{ShSteamEnth}, \text{ShSteamTemp}, h_{shsa_0}\right)$$

Şekil 17. MathCad birinci iterasyon ekran görüntüsü-11 (MathCad first iteration screen view-11)

Görüldüğü üzere bu hesaplamalar sonucunda yeni bir gaz ve buhar sıcaklığına ulaşılmaktadır. Sıcaklık değerlerinin fonksiyonu olarak yer alan entalpi değerleri toplam ısı transfer değeri cinsinden, bu toplam ısı transfer değeri de logaritmik sıcaklık farkı değerinden yazılarak logaritmik

sıcaklık farkı içerisindeki ilk tahmini çıkış sıcaklık değeri, yukarıda hesaplanan iteratif çıkış sıcaklığının fonksiyonu haline getirilmiştir. Bu yöntem, programın tahminleri ardışık şekilde “sıralı iterasyon” yöntemiyle gerçekleştirerek modelin kesin sonuca ulaşmasını sağlamaktadır.

$$v_{shsa_1} := \text{interp}\left(\text{ShSteamEnth}, \text{ShSteamTemp}, h_{shsa_1}\right) \rightarrow v_{shsa_1} := \text{interp}\left(\text{ShSteamEnth}, \text{ShSteamTemp}, h_{shsa_1} + \frac{HH_{sh_0} \cdot \left(\frac{(v_{shge} - v_{shsa_1}) - (v_{shga_0} - v_{shse})}{(v_{shge} - v_{shsa_1})} \right) \cdot A_{sh_0}}{\phi sh_0} \right)$$

$$v_{shga_1} := \text{interp}\left(\text{FlueEnth}, \text{FlueTemp}, h_{shga_1}\right) \rightarrow v_{shga_1} := \text{interp}\left(\text{FlueEnth}, \text{FlueTemp}, h_{shga_1} + \frac{HH_{sh_0} \cdot \left(\frac{(v_{shge} - v_{shsa_1}) - (v_{shga_0} - v_{shse})}{(v_{shge} - v_{shsa_1})} \right) \cdot A_{sh_0} + Q_{shw_0}}{\phi G} \right)$$

Şekil 18. MathCad birinci iterasyon ekran görüntüsü-12 (MathCad first iteration screen view-12)

Atemperatör modelinin kızdırıcı modeliyle entegre halde ilerlemesi amacıyla atemperatör enerji korunumu denklemi programa girilerek soğutma suyu debisi iterasyona dahil edilir.

$$\begin{aligned}
 &u_{sys} = 200 \cdot ^\circ\text{C} \\
 &h_{sys} := \text{linterp}(\text{ShSteamTemp}, \text{ShSteamEnth}, u_{sys}) \\
 &h_{sys} = 2836.88 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\
 &u_{cw} = 102 \cdot ^\circ\text{C} \\
 &h_{cw} := \text{linterp}(\text{SatWaterTemp}, \text{SatWaterEnth}, u_{cw}) \\
 &h_{cw} = 427.61 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\
 &\phi_{cw_i} := \phi_{sys} \cdot \frac{(h_{shsa} - h_{sys})}{(h_{shsa} - h_{cw})} = \dots \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \\
 &\phi_{sh_i} := \phi_{sys} - \phi_{cw_i}
 \end{aligned}$$

Şekil 19. MathCad birinci iterasyon ekran görüntüsü-13 (MathCad first iteration screen view-13)

Bu tanımlardan sonra baştaki tahmini değerlere göre "0" alt indisiyle tanımlanan değerler, 'i' alt indisiyle programa bir kez daha tanımlatılarak sıralı iterasyon modeli tamamlanır.

$$\begin{aligned}
 \omega_{shs_i} &:= \frac{\phi_{sh_i}}{n_{psh_i} \cdot \rho_{shmean_i} \left[\pi \cdot \frac{(\text{diash} - 2 \cdot \text{wtsh})^2}{4} \right]} = \dots \\
 A_{sh_i} &:= \pi \cdot \text{diash} \cdot l_{sh} \cdot n_{sh_i} \cdot z = \dots \\
 A_{frsh_i} &:= b_{sh} \cdot l_{ksh} - n_{sh_i} \cdot \text{diash} \cdot l_{sh} = \dots \\
 \omega_{shg_i} &:= \phi G \cdot \frac{\left[\frac{(u_s + u_{shsa_i})}{2} + \Delta T_{sh} \log_e - 273.15\text{K} + 273.15 \cdot \text{K} \right]}{273.15\text{K} \cdot A_{frsh_i}} = \dots
 \end{aligned}$$

Şekil 21. MathCad birinci iterasyon ekran görüntüsü-15 (MathCad first iteration screen view-15)

$$\begin{aligned}
 &\phi_{sh_i} := \phi_{sys} - \phi_{sys} \cdot \left[\begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} \text{hshse} + \frac{\left[\begin{array}{l} \text{Hsh}_0 \cdot \frac{[(u_{shge} - u_{shsa_0}) - (u_{shga_0} - u_{shse})]}{\ln \left[\frac{(u_{shge} - u_{shsa_0})}{(u_{shga_0} - u_{shse})} \right]} \cdot A_{sh_0} \end{array} \right]}{\phi_{sh_0}} \end{array} \right] - h_{sys} \\ \left[\begin{array}{l} \text{hshse} + \frac{\left[\begin{array}{l} \text{Hsh}_0 \cdot \frac{[(u_{shge} - u_{shsa_0}) - (u_{shga_0} - u_{shse})]}{\ln \left[\frac{(u_{shge} - u_{shsa_0})}{(u_{shga_0} - u_{shse})} \right]} \cdot A_{sh_0} \end{array} \right]}{\phi_{sh_0}} \end{array} \right] - h_{cw} \end{array} \right] \\
 &h_{shsa_i} := h_{shse} + \frac{(Q_{shi_i})}{\phi_{sh_i}} = \dots \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\
 &\phi_{sh_i} := \phi_{sys} - \phi_{sys} \cdot \left[\begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} \text{hshse} + \frac{\left[\begin{array}{l} \text{Hsh}_0 \cdot \frac{[(u_{shge} - u_{shsa_0}) - (u_{shga_0} - u_{shse})]}{\ln \left[\frac{(u_{shge} - u_{shsa_0})}{(u_{shga_0} - u_{shse})} \right]} \cdot A_{sh_0} \end{array} \right]}{\phi_{sh_0}} \end{array} \right] - h_{sys} \\ \left[\begin{array}{l} \text{hshse} + \frac{\left[\begin{array}{l} \text{Hsh}_0 \cdot \frac{[(u_{shge} - u_{shsa_0}) - (u_{shga_0} - u_{shse})]}{\ln \left[\frac{(u_{shge} - u_{shsa_0})}{(u_{shga_0} - u_{shse})} \right]} \cdot A_{sh_0} \end{array} \right]}{\phi_{sh_0}} \end{array} \right] - h_{cw} \end{array} \right] \\
 &\phi_{cw_i} := \phi_{sys} \cdot \frac{(h_{shsa_i} - h_{sys})}{(h_{shsa_i} - h_{cw})} = \dots \frac{\text{kg}}{\text{hr}}
 \end{aligned}$$

Şekil 20. MathCad birinci iterasyon ekran görüntüsü-14 (MathCad first iteration screen view-14)

$$Rshg_i := \text{linterp}(\text{FlueGasTotalTemp}, \text{FlueGasRadiation}, \text{ushg}_i + \text{ushw}_i - 273.15\text{K}) = \dots \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$HHsh_i := \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{\alpha Bsh_i + Rshg_i} \right) + \left[\left(\frac{1}{shfouling} \right) \cdot \left(\frac{1}{\left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right)} \right) \right] + \left[\frac{diash \cdot \ln \left[1 + \frac{(2 \cdot wtsh)}{diash} \right]}{2 \cdot shmaterial} \right] + \left(\frac{diash}{diash - 2wtsh} \right) \cdot \left(\frac{1}{\alpha shin_0} \right) \cdot \left(\frac{1}{\left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right)} \right) \right]} = \dots \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$\Delta Tshlog_{i+1} := \frac{[(ushge - ushsa_i) - (ushga_{i+1} - ushse)]}{\ln \left[\frac{(ushge - ushsa_{i+1})}{(ushga_{i+1} - ushse)} \right]}$$

$$ushwalla_{i+1} := ushsa_{i+1} + \Delta ushwall - 273.15\text{K} = \dots ^\circ\text{C}$$

$$\Delta Tshwallog_{i+1} := \frac{[(ushge - ushwalle) - (ushga_{i+1} - ushwalla_{i+1})]}{\ln \left[\frac{(ushge - ushwalle)}{(ushga_{i+1} - ushwalla_{i+1})} \right]} = \dots$$

$$Qshw_{i+1} := HHsh_i \cdot Ashwall \cdot \Delta Tshwallog_{i+1} = \dots \text{kW}$$

$$Qshi_{i+1} := HHsh_i \cdot \Delta Tshlog_{i+1} \cdot Ash_i = \dots \text{kW}$$

$$Qsh_{i+1} := Qshi_{i+1} + Qshw_{i+1} = \dots \text{kW}$$

$$hshga_{i+1} := hshge - \frac{(Qsh_{i+1})}{\phi G} = \dots$$

$$ushga_{i+2} := \text{linterp}(\text{FlueEnth}, \text{FlueTemp}, hshga_{i+1}) = \dots$$

Şekil 24. MathCad birinci iterasyon ekran görüntüsü-18 (MathCad first iteration screen view-18)

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

İterasyon modelinin doğruluğunu test etmek amacıyla matrisler halinde sonuçlar oluşturulur. Matris sonuçlarından ilk tahmin ve bu tahminlere dayalı ilk değerlerin belirli sayıda iterasyondan sonra nihai sonuca ulaştığı ve net değerlerin oluşturulduğu görülmektedir.

$$ushsa = \begin{pmatrix} 250 \\ 244.62 \\ 244.477 \\ 244.487 \\ 244.486 \\ 244.486 \\ 244.486 \end{pmatrix} \cdot ^\circ\text{C} \quad ushga = \begin{pmatrix} 750 \\ 675.053 \\ 676.656 \\ 677.989 \\ 677.259 \\ 677.211 \\ 677.213 \\ 677.213 \end{pmatrix} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$HHsh = \begin{pmatrix} 43.34 \\ 43.08 \\ 43.06 \\ 43.1 \\ 43.1 \\ 43.1 \\ 43.1 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad \phi sh = \begin{pmatrix} 19500 \\ 19157.85 \\ 19207.16 \\ 19208.2 \\ 19208.44 \\ 19208.45 \\ 19208.45 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

$$Qshi = \begin{pmatrix} 868.6 \\ 845.25 \\ 846.78 \\ 854.55 \\ 854.96 \\ 854.94 \\ 854.94 \end{pmatrix} \cdot \text{kW} \quad \Delta Tshlog = \begin{pmatrix} 546.71 \\ 512.401 \\ 509.462 \\ 513.47 \\ 513.197 \\ 513.215 \\ 513.214 \end{pmatrix} \text{K}$$

$$Q_{sh} = \begin{pmatrix} 975.595 \\ 947.171 \\ 944.575 \\ 952.292 \\ 952.793 \\ 952.77 \\ 952.772 \end{pmatrix} \cdot kW \quad \phi_{cw} = \begin{pmatrix} 500 \\ 842.15 \\ 792.841 \\ 791.801 \\ 791.555 \\ 791.555 \end{pmatrix} \cdot \frac{kg}{hr} \quad Q_{sh} = \begin{pmatrix} 727.742 \\ 740.637 \\ 601.856 \\ 682.747 \\ 690.836 \\ 690.383 \\ 690.414 \end{pmatrix} \cdot kW \quad HH_{sh} = \begin{pmatrix} 39.69 \\ 38.65 \\ 38 \\ 38.77 \\ 38.72 \\ 38.72 \end{pmatrix} \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Bu verilere göre kazan **tam yükte** yani 20000 kg/hr buhar kapasitesiyle çalışırken kızdırıcı buhar çıkış sıcaklığı 244,486°C, duman gazı çıkış sıcaklığı ise 677,213°C olmaktadır. Kızdırıcı kapasitesi ise 854,94 kW olarak hesaplanmıştır. Bu şartlar altında soğutma suyunun debisi 791,555 kg/h, kızdırıcı ve kazana giden buhar debi yükü ise 19208,45 kg/h olarak tespit edilmiştir. Isı transfer katsayısının değeri ise 43,1 W/m²K hesaplanmıştır.

$$\phi_{cw} = \begin{pmatrix} 500 \\ 677.645 \\ 519.892 \\ 516.937 \\ 516.147 \\ 516.161 \end{pmatrix} \cdot \frac{kg}{hr} \quad \phi_{sh} = \begin{pmatrix} 15500 \\ 15322.36 \\ 15480.11 \\ 15483.06 \\ 15483.85 \\ 15483.84 \\ 15483.84 \end{pmatrix} \cdot \frac{kg}{hr}$$

Kazan **%80 yükte** çalıştırılırken ölçülen gaz debisi 20080,27 Nm³/h, yanma odasından gelen gaz giriş sıcaklığı ise 718,8°C değerindedir. Bunların sonucunda bu yükte yani kazan 16000 kg/hr kapasiteye sahipken aşağıdaki sonuçlar elde edilmektedir:

Bu sonuçlara göre kızdırıcı buhar çıkış sıcaklığının 236,351°C, duman gazı çıkış sıcaklığının ise 637,09°C olduğu görülmektedir. Kızdırıcı kapasitesi ise 690,4 kW olarak hesaplanmıştır. Bu şartlar altında soğutma suyunun debisi 516,16 kg/h, kızdırıcı ve kazana giden buhar debi yükü ise 15483,84 kg/h olarak tespit edilmiştir. Toplam ısı transfer katsayısı ise 38,72 W/m²K değerindedir.

$$u_{shsa} = \begin{pmatrix} 250 \\ 238.824 \\ 236.187 \\ 236.362 \\ 236.35 \\ 236.351 \\ 236.351 \end{pmatrix} \cdot ^\circ C \quad u_{shga} = \begin{pmatrix} 750 \\ 632.679 \\ 636.509 \\ 647.575 \\ 638.003 \\ 637.046 \\ 637.099 \\ 637.096 \end{pmatrix} \cdot ^\circ C$$

Kazan **%60 yükte** çalıştırılırken ölçülen gaz debisi 15060,203 Nm³/h olup gaz giriş sıcaklığı 657,4°C değerini almaktadır. Bunların sonucunda bu kazan yükünde (12000 kg/hr) aşağıdaki sonuçlar elde edilmektedir.

$$Q_{shi} = \begin{pmatrix} 634.64 \\ 648.82 \\ 522.23 \\ 604.55 \\ 611.05 \\ 610.7 \\ 610.72 \end{pmatrix} \cdot kW \quad Q_{shw} = \begin{pmatrix} 93.104 \\ 91.816 \\ 79.623 \\ 78.194 \\ 79.784 \\ 79.685 \\ 79.691 \end{pmatrix} \cdot kW$$

$$u_{shsa} = \begin{pmatrix} 250 \\ 232.717 \\ 225.176 \\ 225.643 \\ 225.614 \\ 225.616 \\ 225.616 \end{pmatrix} \cdot ^\circ C \quad u_{shga} = \begin{pmatrix} 750 \\ 577.904 \\ 586.504 \\ 612.345 \\ 590.412 \\ 587.303 \\ 587.452 \\ 587.443 \end{pmatrix} \cdot ^\circ C$$

$$\Delta T_{shlg} = \begin{pmatrix} 521.072 \\ 469.802 \\ 407.371 \\ 476.991 \\ 472.456 \\ 472.756 \\ 472.736 \end{pmatrix} K$$

$$HH_{sh} = \begin{pmatrix} 35.46 \\ 32.92 \\ 31.01 \\ 33.15 \\ 33.03 \\ 33.04 \end{pmatrix} \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad \Delta T_{shlg} = \begin{pmatrix} 487.413 \\ 414.833 \\ 252.887 \\ 432.229 \\ 421.547 \\ 422.207 \\ 422.167 \end{pmatrix} K$$

$$Q_{shi} = \begin{pmatrix} 427.24 \\ 461.51 \\ 227.22 \\ 369.83 \\ 385.68 \\ 384.94 \\ 384.99 \end{pmatrix} \cdot kW$$

$$Q_{shw} = \begin{pmatrix} 77.489 \\ 78.727 \\ 59.214 \\ 55.622 \\ 59.475 \\ 59.264 \\ 59.277 \end{pmatrix} \cdot kW \quad Q_{sh} = \begin{pmatrix} 504.727 \\ 540.235 \\ 286.433 \\ 425.448 \\ 445.152 \\ 444.207 \\ 444.266 \end{pmatrix} \cdot kW$$

$$\phi_{cw} = \begin{pmatrix} 500 \\ 520.142 \\ 273.987 \\ 272.918 \\ 271.803 \\ 271.845 \end{pmatrix} \cdot \frac{kg}{hr} \quad \phi_{sh} = \begin{pmatrix} 11500 \\ 11479.86 \\ 11726.01 \\ 11727.08 \\ 11728.2 \\ 11728.15 \\ 11728.16 \end{pmatrix} \cdot \frac{kg}{hr}$$

Bu verilere göre kızdırıcı buhar çıkış sıcaklığı 225,616°C, duman gazı çıkış sıcaklığı ise 587,44°C değerindedir. Kızdırıcı kapasitesi ise 444,27 kW olarak hesaplanmıştır. Bu şartlar altında soğutma suyunun debisi 271,845 kg/h, kızdırıcı ve kazana giden buhar debi yükü ise 11728,16 kg/h olarak tespit edilmiştir. Toplam ısı transfer katsayısının değeri ise 33,04 W/m²K hesaplanmıştır.

Sonuçlar aynı zamanda kazan toplam ısı kapasitesi açısından da incelenmektedir. MathCad ısı tasarım modeli neticesinde, soğutma suyu için aktarılan debinin yanında ısı transferi amacıyla kazana verilecek olan buhar yükleri de hesaplanmıştır. Bu veriler neticesinde, artan soğutma yükünün kazanda yarattığı debi azalması sebebiyle buhar aktarılan enerjiye yaptığı olumsuz etki ile aynı zamanda artan kızdırıcı ısı kapasitesine bağlı olarak doğru oranda artış gösteren kızdırıcı buhar çıkış sıcaklığına yaptığı olumlu etki karşılaştırılmış ve veriler

aşağıdaki tabloda sunulmuştur. Şekil 25'te gösterilen %50 ve %40 yük sonuçlarının gösterimi modelleme yeterli örneklerle açıklandığı için matrisler halinde yapılmamış ancak aşağıdaki tabloda dolaylı yoldan bu bulgulara yer verilmiştir.

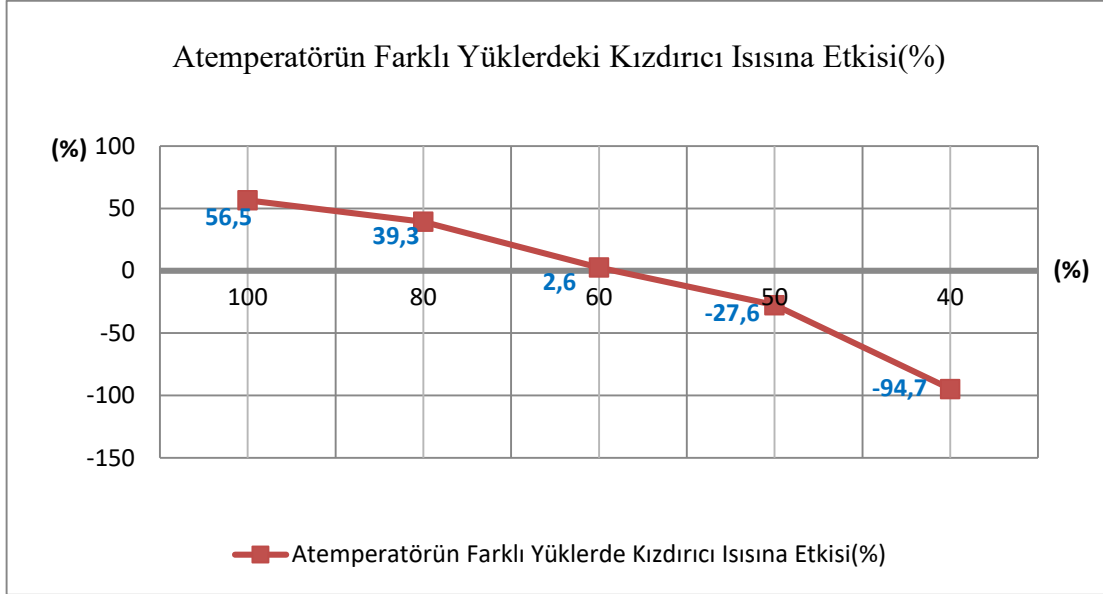
- Şekil 25'teki sonuçlar göstermektedir ki kazan %100 yük şartlarında en yüksek soğutma suyu yüküne sahip olmasına rağmen aynı zamanda en yüksek ısı kapasitesine de (16,2 MW) sahiptir. Bu durumun nedeni, bu yük şartları altında kızdırıcının en yüksek sıcaklığına (244,5°C) ve yine soğutma suyunun varlığına rağmen hala en yüksek buhar debisine sahip olmasıdır (19208,45 kg/h).
- Atempereatör sistemine ihtiyaç duyulmadığı, debi kaybının olmadığı ve kızdırıcının istenilen 200°C sıcaklık ve 20000 kg/h debide buhar ürettiği şartlar incelendiğinde soğuk akışkana aktarılan ısı, yani kazanın toplam ısı transfer kapasitesi 13,9 MW(13938,9 kW) değerindedir. Atempereatör ihtiyacı neticesinde;
- %100 yükte, 20000 kg/h kazan buhar debisinin 791,6 kg/h'lik değeri soğutma suyuna aktarılırken kazan yükünün %3,96'sının atemperatörün çalışma prensibi gereği soğutma suyu için kullanıldığı görülmektedir.
- %80 yükte, 16000 kg/h kazan işletme şartlarında, 516,2 kg/h soğutma suyu debisi kazan yükünün %3,23'ünü karşılamaktadır.
- %60 yükte, 12000 kg/h kapasiteli kazan sisteminde, 271,8 kg/h soğutma suyu %2,27 paya sahipken, %50 yük için (10000 kg/h) 171 kg/h, %40 yük için ise 84,8 kg/h soğutma suyu debisi elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre soğutma suyu debisinin %50 yükteki oranı %1,71 olurken %40 yükteki oranı ise %1,06 olmaktadır.
- Atempereatör sistemine ihtiyaç duyulmadığı ve kazanda sadece kızdırıcının çalıştığı durumda kızdırıcı kapasitesi, atemperatörlü sistemde %100, %80 ve %60 yük koşullarındakinden daha az bir değerde iken %50 ve %40 yük koşullarındakinden daha yüksek bir değer almaktadır. Bu durum Şekil 26'da görülmektedir. Kızdırıcı atemperatörsüz çalıştığı kazanda (20000 kg/h 200°C), %100 yükte ve atemperatörle çalıştığı kazana göre %56,5 daha fazla ısı kapasitesine sahipken, bu oran %80 yükte %39,3

Kazan yükü (%)	Buhar Kapasitesi (kg/h)	Soğutma Suyu (kg/h)	Soğutma Suyu Debisi/Buhar Kapasitesi (%)	Kazana Beslenen Buhar (kg/h)	Kızdırıcı Isı Transferi (MW)	Kazan Isı Transferi (MW)	Kızdırıcının Kazan Sistemindeki Enerji Payı (%)
Sadece Kızdırıcı	2000	0	0	20000	0,37	13,9	2,64
100	20000	791,6	3,96	19208	0,85	16,2	5,27
80	16000	516,2	3,23	15484	0,61	13	4,7
60	12000	271,8	2,27	11728	0,38	9,8	3,95
50	10000	171	1,71	9829	0,29	8,1	3,51
40	8000	84,8	1,06	7915	0,19	6,5	2,95

Şekil 25. Atempereatör etkisinin farklı yük koşullarındaki karşılaştırılması (Comparison of desuperheater effect under different load cases)

ve %60 yükte %2,6 olmaktadır. Şekil 26'da görüldüğü üzere kızdırıcı için atemperatörsüz (20.000 kg/h 200°C) çalışma esnasındaki ısı kapasitesi, %60'ın biraz altında bir yük kapasitesindeki atemperatörlü kazan ile eşit değerdedir.

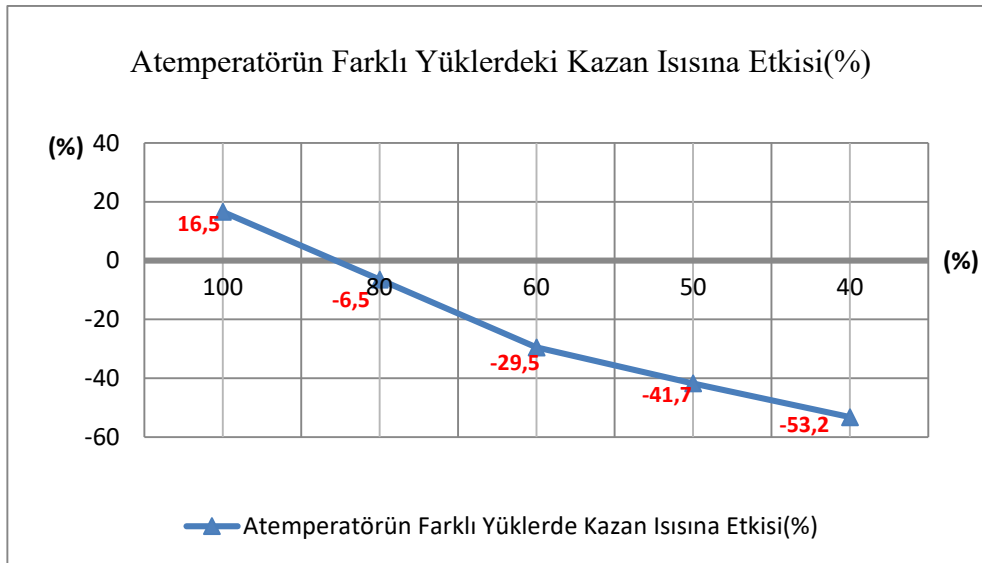
Şekil-27'de görüldüğü üzere kazan yalnızca kızdırıcıya sahip iken %100 yük şartındaki atemperatörlü bir kazana göre %16,5 oranında daha az ısı kapasitesine sahiptir. Atempertörsüz ve atemperatörlü durum karşılaştırmasında kazan ısı



Şekil 26. Atempertörün farklı yüklerde kızdırıcı ısısına etkisi (Desuperheater effect on superheater load under various load cases)

- Tüm kazan kapasitesi göz önünde bulundurulduğunda atemperatöre ihtiyaç duyulmayan sistem (20000 kg/h 20°C), incelenen koşullar arasında, %100 yük koşulları hariç diğer tüm koşullardan daha yüksek ısı transfer değerine sahiptir.

kapasiteleri %85 yük dolaylarında birbirine eşit iken daha düşük kapasiteli yüklere sahip kazan söz konusu olduğunda atemperatörlü sistem %6,5'tan %53,2'e kadar değişiklik gösteren oranlarda daha fazla ısı kapasitelerine sahiptir.



Şekil 27. Atempertörün farklı yüklerde kazan ısısına etkisi (Desuperheater effect on boiler load under various load cases)

- Kazan ve kızdırıcı ısı kapasitelerinin farklı durumlardaki karşılaştırmasından sonra, Şekil 27'de yine görülmektedir ki kızdırıcının kazan içerisindeki enerji payı atemperatörsüz sistemde %2,64 ile en düşük değerini almaktadır. Artan yüke bağlı olarak kızdırıcı ısı kapasitesinin genel ısı kapasitesi içerisindeki oranı sürekli artmaktadır. Örneğin %100 kapasiteli kazanda kızdırıcı genel ısı girdisinin %5,27'sine sahipken %40 yükte bu oran %2,99'a düşmektedir.

4.SONUÇ (CONCLUSION)

7,5 bar (g) çalışma basıncına sahip mevcut bir buhar kazanına yerleştirilecek kızdırıcının, geri kızdırıcı görevi görecek bir atemperatör ile birlikte iteratif ısıl tasarım modellemesi, Mathcad yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve farklı yükler altında sistem çıktıları oluşturulmuştur. Modelleme, bilinmeyen farklı değerlerin içinde buldukları analitik formüller yardımıyla ilk tahminlerinden başlayarak, birbirini zincir şeklinde tamamlamaları ve belirli iterasyon değerinde %100 veya %100'e yakın oranda yakınsamaları sonucunda oluşan verilerden meydana gelmektedir. Modelleme yapılırken farklı yükler altındaki kızdırıcı öncesi duman gazı debisi ve sıcaklığına ait verilere sahadaki ölçüm cihazlarından ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre karşılaştırmalı analizler gerçekleştirilmiştir.

Sonuçlarda görülen artan yük kapasitesi ile doğru orantılı olarak artış gösteren ısı transfer kapasitesi, ısı transfer katsayısı ve sıcaklık değerleri tahmin edilen bir durumdur. Bu parametreden bakıldığında, atemperatör kazan ısı girdisine artan yük ile birlikte olumlu etki yapmaktadır. Öte yandan kazan yükü arttıkça, atemperatör için kullanılan soğutma suyu debisinin kazan buhar kapasitesi içindeki oranı artmaktadır. Bu parametreden bakıldığında ise, atemperatör sebep olduğu debi kaybı nedeniyle kazan ısı girdisine olumsuz etki yapmaktadır.

Bu noktada atemperatörün toplam kazan ısısına yaptığı etkiler karşılaştırılmıştır. Bir başka ifadeyle artan soğutma yükünün toplam kazan ısısında yaptığı olumsuz etki, neden olduğu yüksek kızdırıcı çıkış sıcaklıklarının yaptığı olumlu etkiyle birlikte değerlendirilmiştir. Bunun sonucunda kazan yükündeki artışın kazan ısısında doğru orantılı bir artış meydana getirdiği belirlenmiştir. Yani, atemperatörün kızdırıcı buhar çıkış sıcaklığına yaptığı etki, debi kaybına etkisine oranla daha yüksek olduğu için atemperatör, sistemi artan yük koşullarında ısı kapasitesi açısından olumlu yönde etkilemektedir.

Sonuçlar ışığında atemperatörsüz tam yük durumu ile atemperatörlü yük durumları da karşılaştırılmıştır. Atemperatöre ihtiyaç duyulmayan yani kızdırıcıdan direkt olarak 20.000 kg/h ve 200°C buhar elde edilebilen bir sistem modelinin, kızdırıcıdaki ısı girdisi açısından atemperatörlü sistemde %50 ile %60 arasında bir kazan

yüküne denk geldiği görülmüştür. Yani, mevcut kazan içerisine atemperatöre ihtiyaç duymayan farklı bir konstrüksiyonla yerleştirilecek bir kızdırıcı, %50 yükün üzerindeki atemperatörlü bir kazana eş bir performans göstermektedir. Aynı karşılaştırma tüm kazandaki ısı girdisi açısından kıyaslandığında ise, mevcut kazan içerisinde atemperatörsüz bir konstrüksiyon düzeninde kazan yaklaşık %85 yük koşullarındaki atemperatörlü bir kazana eş performans göstermektedir.

Kızdırıcının kazan içerisindeki enerji payı değerlendirildiğinde, atemperatörlü sistemde her yük altında kızdırıcı ısısının genel kazan ısısı içerisindeki payının atemperatörsüz bir sisteme oranla daha fazla olduğu ve artan yükte birlikte bu oran sürekli olarak arttığı belirlenmiştir. Yani atemperatör bir nevi kızdırıcının kazan sistemi içindeki önemini de arttıran bir görev görmektedir.

- Tüm bu sonuçlar ışığında, özellikle de tam randımanlı bir kazanda atemperatörün ek bir montaj düzeneği gerektirmesine rağmen genel anlamda kazan kapasite ve verimine olumlu etkiler gösterdiği görülmektedir. Bu açıdan bakıldığında doğru yük şartları altında atemperatör-kızdırıcı sistemi, yalnızca konstrüksiyon kısıtlamaları nedeniyle değil sistemin verimini arttırmak amacıyla da kullanılmalıdır.
- Bundan sonraki süreçte bu çalışma kapsamında yer almayan kızdırıcı-atemperatör sisteminin montaj maliyetlerinin bu çalışmada incelenen etkilerle karşılaştırılıp ortaya amortisman hesabının da yer aldığı daha detaylı bir çalışma çıkarılması önerilmektedir.

SİMGELER VE KISALTMALAR (SYMBOLS AND ABBREVIATIONS)

Afrsh	Serbest Gaz Geçiş Kesit Alanı (m ²)
Ash	Kızdırıcı Isı Transfer Yüzey Alanı (m ²)
bsh	Duman Gazı Geçiş Genişliği (m)
diash	Kızdırıcı Boru Dış Çapı (mm)
hcw	Atemperatör 102°C 7,5bar(g) Soğutma Suyu Entalpisi (kJ/kg)
hsha	Kızdırıcı Kızgın Buhar Entalpisi (kJ/kg)
hshe	Kızdırıcı Doymuş Buhar Entalpisi (kJ/kg)

hwi	Kazana Beslenen 102°C 7,5bar(g) Su Entalpisi (kJ/kg)	$\Delta T_{shwalllog}$	Boru Film-Duman Gazı Logaritmik Sıcaklık Farkı(K)
hsys	Sisteme verilen 200°C 7,5bar(g) Kızgın Buhar Entalpisi (kJ/kg)	λ_{shg}	Duman Gazı İletkenlik Değeri (W/mK)
lsh	Duman Gazı Net Geçiş Uzunluğu (m)	ω_{shg} ϕ_{boiler}	Duman Gazı Hızı (m/s) Kazan Debisi (kg/h)
lksh	Duman Gazı Geçiş Uzunluğu (m)	ϕ_G Φ_{cw}	Duman Gazı Debisi (m ³ /h) Soğutma Suyu Debisi (kg/h)
nsh	Dizi Başına Boru Sayısı	Φ_{sh}	Kızdırıcı Debisi (kg/h)
Qshw	Boru Film Yüzeyine Aktarılan Isı Transferi (kW)	Φ_{sys}	Kazan Sistemi Buhar Kapasitesi (kg/h)
Qshi	Buhara Aktarılan Isı Transferi (kW)	ω_{shge}	Duman Gazı Kızdırıcı Giriş Sıcaklığı (°C)
Qsh	Kızdırıcı Toplam Isı Transferi (kW)	ω_{shga}	Duman Gazı Kızdırıcı Çıkış Sıcaklığı (°C)
Qboiler	Kazan Isı Transferi (kW)	ω_{shg}	Duman Gazı Kızdırıcı Ortalama Sıcaklık (°C)
Reshg	Duman Gazı Reynolds Değeri		
Rshg	Duman Gazı Radyatif Isı Transfer Katsayısı (W/m ² K)	ω_{shw}	Kızdırıcı Ortalama Film Sıcaklığı (°C)
shfouling	Kızdırıcı Boruları Kirlilik Katsayısı	$\omega_{shwalla}$	Kızdırıcı Çıkışı Boru Film Sıcaklığı (°C)
shmaterial	Kızdırıcı Boruları Malzeme İletim Katsayısı	$\omega_{shwalle}$	Kızdırıcı Girişi Boru Film Sıcaklığı (°C)
tq	İki Boru Kesiti Arasındaki Yatay Mesafe (mm)	ω_{shse}	Kızdırıcı Buhar Giriş Sıcaklığı (°C)
tl	İki Boru Kesiti Arasındaki Düşey Mesafe (mm)	ω_{shsa}	Kızdırıcı Buhar Çıkış Sıcaklığı (°C)
wtsh	Kızdırıcı Boru Et Kalınlığı (mm)	υ_S	Kazan Basıncı Doymuş Buhar Sıcaklığı (°C)
z	Boru Dizi Sayısı		
α_{shin}	Boru Yüzey-Buhar Isı Transfer Katsayısı (W/m ² K)	ρ_{shg} η_{shg}	Duman Gazı Yoğunluğu (kg/m ³) Duman Gazı Dinamik
α_{Bsh}	Duman Gazı Konvektif Isı Transfer Katsayısı (W/m ² K)		Viskozitesi (kg/ms)
ΔT_{shlog}	Buhar – Duman Gazı Logaritmik Sıcaklık Farkı (K)		

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Topal O., "Bir demir çelik fabrikasının kojenerasyonu Matlab ile modellenmesi", *Bitirme Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, (2007)
- [2] Kim J-S., Lee K-W., Kim J-E., Choi J-Y., Lee J-Y., "Numerical analysis of atomizing desuperheater control valve for power plants", *6th International Symposium on the Fusion of Science and Technologies (ISFT2017)*, Jeju, 1-4, (2017)
- [3] Karuppiah T., Periasamy A., Rajkumar P., Muruganand S., "Desuperheater temperature control system using distributed control system (DCS) ", *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 01: 587-591, (2013)
- [4] Borzsony P., Sherikar S.V., "Advances in desuperheating technology for reliable performance of combined cycle power plants (CCPP)", *Proceedings of PWR2005 ASME Power*, Chicago, 1-9, (2005)
- [5] Bovat Jr P.M., "Computational analysis of water atomization in spray desuperheaters of steam boilers", *Yüksek Lisans*, Rensselaer Polytechnic Institute, (2013)
- [6] Sunny J., Kumar G.S., "Design optimization of thermal sleeves for desuperheating applications", *International Journal For Ignited Minds*, 04: 52-60, (2017)
- [7] Kouhikamali R., Hesami H., Ghavamian A., " Convective heat transfer in a mixture of cooling water and superheated steam ", *International Journal of Thermal Sciences*, 60: 205-211, (2012)
- [8] Rahimi E., Torfeh S., Kouhikamali R., "Numerical study of counter-current desuperheaters in thermal desalination units", *Desalination*, 397: 140-150, (2016)
- [9] Ebrahimian V., Gorji-Bandpy M., "Two-dimensional modeling of water spray cooling in superheated steam", *Thermal Science*, 12: 79-88, (2008)
- [10] Cho B., Choi G., Uruno Y., Kim H., Chung J., Kim H., Lee K., "One-dimensional simulation for attemperator based on commissioning data of coal-fired steam power plant", *Applied Thermal Engineering*, 113: 508-508, (2017)
- [11] Uruno Y., Choi G., Sung M., Chung J., Kim H., Lee K., "Transient analysis of attemperator enthalpy balance based on the commissioning data of a coal-fired steam power plant", *Applied Thermal Engineering*, 150: 1141-1158, (2019)
- [12] Zima W., "Simulation of dynamics of a boiler steam superheater with an attemperator", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A Journal of Power and Energy*, 220: 793-801, (2006)
- [13] Çengel Y.A., Boles M.A., "Thermodynamics : an engineering approach", 8th Edition, *McGraw-Hill Education*, ISBN 978-0-07-339817-4, New York, (2015)
- [14] Münzinger F., "Dampfkraft", 3rd Edition, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, ISBN 978-3-642-53056-2 (eBook), Berlin, (1949)
- [15] Holman J.P., "Heat transfer", 10th Edition, *McGraw-Hill Book Co*, ISBN 978-0-07-352936-3, New York, (2010)



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



Current operational amplifier based voltage-mode MOS-C all-pass filter and its application

Akım işlemsel kuvvetlendiricisi tabanlı gerilim-modlu MOS-C tüm-geçiren süzgeç ve uygulaması

Yazar(lar) (Author(s)): Hasan ÇİÇEKLİ¹, İhsan KARACAN², Ahmet GÖKÇEN³

ORCID¹: 0000-0001-5197-7805

ORCID²: 0000-0003-0134-6479

ORCID³: 0000-0002-7569-5447

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Çiçekli H., Karacan İ. and Gökçen A., “Current operational amplifier based voltage-mode MOS-C all-pass filter and its application”, *Journal of Polytechnic*, 23(2): 409-414, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.518460

Current Operational Amplifier Based Voltage-Mode MOS-C All-Pass Filter and Its Application

Araştırma Makalesi / Research Article

Hasan ÇİÇEKLİ^{1*}, İhsan KARACAN², Ahmet GÖKÇEN³

¹Hatay Mustafa Kemal University, Institute of Natural and Applied Sciences, Department of Informatics, 31020, Antakya, Hatay, Turkey

^{2,3}İskenderun Technical University, Engineering and Natural Sciences Faculty, Computer Engineering Department, 31200, İskenderun, Hatay, Turkey

(Geliş/Received : 28.01.2019 ; Kabul/Accepted : 24.05.2019)

ABSTRACT

In this work, a novel first order voltage-mode all-pass filter employing single active element named current operational amplifier (COA), two resistors, one capacitor and its application as sinusoidal oscillator is presented. The resistors are implemented by using MOSFETs, so the resulting MOS-C circuit is suitable for integration and the central frequency of the filter is electronically tunable. Workability of the proposed filter and its application is validated by PSPICE simulation software using TSMC 0.18 micron CMOS model parameters. Simulation results are in good consistency with theoretical analysis. The proposed circuit features precise frequency tuning, operability at low voltage, low distortion and low phase error.

Keywords: All-pass filter, current operational amplifier, MOS-C, sinusoidal oscillator, voltage-mode.

Akım İşlemsel Kuvvetlendiricisi Tabanlı Gerilim-Modlu MOS-C Tüm-Geçiren Süzgeç ve Uygulaması

ÖZ

Bu çalışmada akım işlemsel kuvvetlendiricisi adlı tek aktif eleman, iki direnç ve bir kapasitör ile çalışan, gerilim-modlu, MOS-C birinci dereceden tüm-geçiren süzgeç devresi ile sinüzoidal osilatör uygulaması sunulmuştur. Devredeki dirençler MOSFET kullanarak gerçekleştirilmiş olup sonuçta elde edilen MOS-C devresi tümleşik devre tekniğine uygundur ve süzgecin merkez frekansı elektronik olarak ayarlanabilmektedir. Önerilen devrenin ve uygulamasının çalışabilirliği PSPICE benzetim yazılımı ile TSMC 0.18 mikron CMOS model parametreleri kullanarak doğrulanmıştır. Benzetim sonuçları ile teorik analiz sonuçları iyi bir uyum içerisinde. Önerilen devre hassas frekans ayarı, düşük voltajda çalışabilirlik, düşük gürültü ve düşük faz hatası gibi özelliklere sahiptir.

Anahtar Kelimeler: tüm-geçiren süzgeç, akım işlemsel kuvvetlendiricisi, MOS-C, sinüzoidal osilatör, gerilim-mod.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

All-pass (AP) filter is one of the most used filter type and it is used in various applications to perform time-alignment or time-displacement function over a desired frequency range at constant gain. It can also be considered as a phase corrector. Moreover, all-pass filters are used to be the main building blocks of high-Q band-pass filters and sinusoidal oscillators [1,2]. First order all-pass filters find wide range applications in audio and video signal processing systems where the such as current conveyor (CCII, CCIII) and its derivatives [3-6], operational trans-conductance amplifier (OTA) [7], current-feedback operational amplifier (CFOA) [8], current differencing buffered amplifier (CDBA) [9,10] and four terminal floating nullor (FTFN) [11] have been reported. The COA active element is introduced as the current-mode dual of the traditional operational amplifier (op-amp) by applying the theory of adjoint networks [12,13] with the features of current-mode low impedance

input, high impedance output and high current gain to be efficient in current mode analog electronic circuit design. However, literature survey shows that the consideration given to filter design using COA is still insufficient and only few COA based filter realizations have been reported [14-17]. The object of this study is to introduce a new first-order voltage-mode all-pass filter using single COA with MOS-C realization and its practice as sinusoidal oscillator to be used in low voltage applications as well as where electronic tunability and compatibility for integration are important design parameters. Table 1 shows a comparison of previously reported COA based all-pass filters to represent the advancements of the proposed circuit.

The outline of remaining part of this paper is composed as following: Section 2 describes the circuit definition of COA active element. Proposed circuit topology is introduced in Section 3. Circuit analysis is carried out, non-ideal effects are discussed and MOS-C implementation of the circuit is also presented in this chapter. Section 4 includes a quadrature oscillator application which is showing the usability of the

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-mail: cicekli@mku.edu.tr

proposed filter. Simulation results of both the all-pass filter and its application are given in Section 5. Tunability of the filter and quadrature oscillator is investigated in this section. Section 6 presents the outcomes of the study and briefs a conclusion.

offset current [19]. Taking into consideration that both CCII+ and CCII- can be obtained from DOCCII (dual-output CCII), then the COA can be implemented by using only DOCCII elements. This technique also enables us to implement the COA using commercially available

Table 1. Comparison of previously reported COA based all-pass filters

Ref. number	Active element number	Number of R/C	Circuit mode	Technology	Supply voltage	MOS-C realization	Measured THD	Power Consumption
[14]	1	1/1	Current	1.2 μm CMOS	±2.5 V	No	N/A	N/A
[15]	1	1/1	Current	0.35 μm CMOS	±1.5 V	No	N/A	N/A
[16]	1	2/2 (Topology 1&4) 3/1 (Topology 2&3)	Voltage	0.35 μm CMOS	±1.25 V	No	0.86 % (For input voltage of 100 mV amplitude)	2.40 mW
Proposed	1	2/1	Voltage	0.18 μm CMOS	±0.9 V	Yes	0.33 % (For input voltage of 100 mV amplitude)	1.85 mW

N/A: Not available

2. CIRCUIT DESCRIPTION OF COA (COA DEVRE AÇIKLAMASI)

The circuit schematic of COA element is as shown in Figure 1 [12].

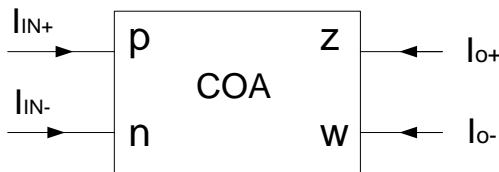


Figure 1. Circuit schematic of COA

COA's definition equation can be represented as

$$\begin{bmatrix} V_{IN+} \\ V_{IN-} \\ I_{O+} \\ I_{O-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ A & -A & 0 & 0 \\ -A & A & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{IN+} \\ I_{IN-} \\ V_{O+} \\ V_{O-} \end{bmatrix} \quad (1)$$

In Equation (1), A denotes the current gain in open-loop of COA and it approaches to infinity in ideal case. Thus, the COA employing circuits must be feedback configured that is counterpart to the op-amp. The COA's input impedance should be very low and output impedance should be very high, which are respectively equal to zero and infinite in ideal case. Through the high output impedance, COA employing circuits can be cascade connected without using additional buffers. Signal differentiation at input terminals reduce the noise and increase the dynamic range [17]. Furthermore, internally grounded inputs of COA enable MOS-C implementation of COA-based circuits [18]. In this work, the COA active element is implemented by connecting three CCII's as given in [12]. This method provides the COA to exhibit lower input resistance and smaller input

integrated circuits which can be used as current conveyor.

3. PROPOSED CIRCUIT TOPOLOGY (ÖNERİLEN DEVRE TOPOLOJİSİ)

3.1 Circuit Analysis (Devre Analizi)

The proposed circuit topology is represented in Figure 2.

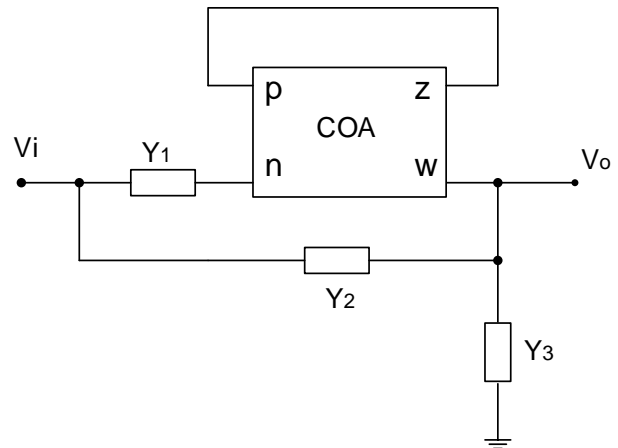


Figure 2. Proposed circuit topology

By using Equation (1) and performing circuit analysis, the transfer function can be calculated as

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{Y_2 - Y_1}{Y_2 + Y_3} \quad (2)$$

Taking the admittance combinations as $Y_1=G_1$, $Y_2=sC_2$ and $Y_3=G_3$, then the transfer function can be found as

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{sC_2 - G_1}{sC_2 + G_3} = \frac{s - \frac{1}{R_1 C_2}}{s + \frac{1}{R_3 C_2}} \quad (3)$$

The condition for the circuit to work as first-order all-pass filter, the resistors must be chosen as $R_1=R_3=R$. Taking $C_2=C$, then the transfer function become as

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{s-1/RC}{s+1/RC} \quad (4)$$

The radian frequency can be found as

$$\omega_0 = \frac{1}{RC} \quad (5)$$

Phase equation of the all-pass filter can be written as

$$\varphi = \pi - 2\tan^{-1}\omega_0RC \quad (6)$$

Equation (6) shows that the filter provides a phase shift varying from 0 to -180° . The radian frequency sensitivity over the passive component variations is calculated as

$$S_R^{\omega_0} = S_C^{\omega_0} = -1 \quad (7)$$

3.2 Non-Ideality Analysis (İdeal Olmayan Etkilerin Analizi)

The main non-ideal effects of COA element are considered as current tracking error between z and w terminals and non-zero voltage at p and n terminals. In non-ideal case the equation between z and w terminal currents can be represented by $I_z = \alpha I_w$ where α denotes the current tracking error and approaches to unity in ideal case. Input impedance of p and n terminals are considered as zero in ideal case. But in non-ideal case it can be considered that two parasitic impedances which are represented by Z_p and Z_n are connected between the ground and p and n terminals respectively. Taking into consideration these non-ideal effects of COA element, the transfer function of the circuit can be modified as follows.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{Y_2 \frac{1}{\alpha} \frac{Y_1 Y_n}{Y_1 + Y_n}}{Y_2 + Y_3} \quad (8)$$

It can be seen from Equation (8) that Z_p parasitic impedance has no effect to the transfer function. The effect of Z_n parasitic impedance can be reduced by an appropriate circuit realization of COA providing very low input impedance of n terminal. The current tracking error can be minimized by using the differential floating current source providing two balanced output currents at the output stage of COA. This issue is discussed in [13].

3.3 MOS-C Implementation of the Proposed Circuit (Önerilen Devrenin MOS-C Olarak Gerçeklenmesi)

To realize the MOS-C implementation of a circuit, the resistors must be replaced with their MOSFET conjugates which are operated in triode region with non-linearity cancellation [20]. A linear resistor can be realized by using two depletion type MOS transistors connected as shown in Figure 3.

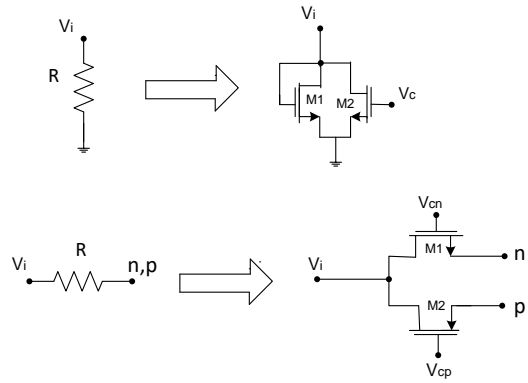


Figure 3. Linear resistor realization using MOSFETs

The resistance value can be expressed as

$$R = \frac{1}{\mu_n C_{ox} (W/L) (V_c - 2V_T)} \quad (9)$$

for the grounded resistor, and

$$R = \frac{1}{\mu_n C_{ox} (W/L) (V_{cn} - V_{cp})} \quad (10)$$

for the resistor connected to the n or p terminal of the active element. Here, W and L are the channel width and length and V_T denotes the threshold voltage of the MOSFET. μ_n is the free electron mobility in the channel and C_{ox} denotes the gate oxide capacitance per unit area.

Figure 4 shows the resulting MOS-C implementation of the proposed filter obtained by replacing the MOSFET conjugates of the resistors in the circuit.

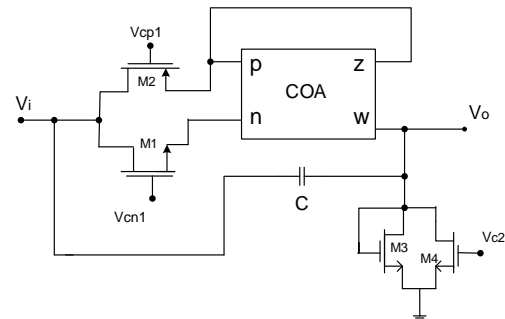


Figure 4. MOS-C implementation of the proposed filter

Through this implementation, the central frequency can be externally tuned by gate voltages of the MOS transistors.

4. OSCILLATOR APPLICATION (OSİLATÖR UYGULAMASI)

To demonstrate a utilization of the proposed filter, a sinusoidal oscillator is configured by cascade connection of all-pass filter and inverting integrator, forming closed loop with a gain equal to -1. The resulting circuit and its MOS-C implementation are given in Figure 5.

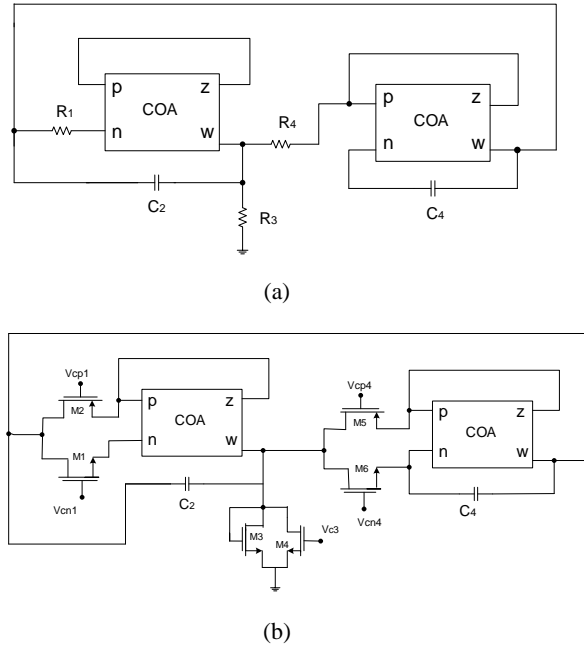


Figure 5. Sinusoidal oscillator application of the proposed filter: (a) Circuit schematic, (b) its MOS-C Implementation

Remembering that resistors has been chosen as $R_1=R_3=R$ in the all-pass circuit, oscillator's characteristic equation can be calculated as

$$s^2 C_2 C_4 R_4 + s \left(\frac{C_4 R_4}{R} - \frac{C_2}{2} \right) + \frac{1}{2R} = 0 \quad (11)$$

The oscillation condition can be found as

$$\frac{C_2}{C_4} = \frac{2R_4}{R} \quad (12)$$

The radian frequency equation is

$$\omega_{osc} = \frac{1}{\sqrt{2RR_4C_2C_4}} \quad (13)$$

The passive component sensitivities are all calculated as

$$S_R^{\omega_{osc}} = S_{R_4}^{\omega_{osc}} = S_{C_2}^{\omega_{osc}} = S_{C_4}^{\omega_{osc}} = -1/2 \quad (14)$$

5. SIMULATION RESULTS (BENZETİM SONUÇLARI)

To evaluate the performance of the proposed filter and its application as oscillator, PSPICE simulation has been carried out by using the TSMC 0.18 μm CMOS model parameters. MOS implementation of DOCCII used in simulation is shown in Figure 6. The circuit is operated by supply voltage of $\pm 0.9 \text{ V}$.

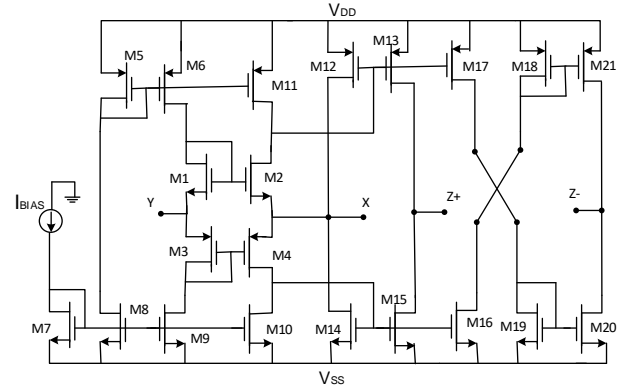


Figure 6. MOS Implementation of DOCCII [21]

Dimensions of MOSFETS used in DOCCII are given in Table 2. In simulation passive elements are taken as $R=1 \text{ k}\Omega$ and $C=100 \text{ pF}$. The dimensions of MOSFETS used to implement active resistors are taken as $W=0.76 \mu\text{m}$, $L=0.18 \mu\text{m}$ for all M1, M2, M3 and M4. Gate voltages of MOSFETS are taken as $v_{cn1} = 0.9 \text{ V}$ and $v_{cp1} = v_{c2} = 0.45 \text{ V}$ to obtain required resistor values. Using these component values, the central frequency (f_c) is calculated as 1.59 MHz while the measured value in simulation is 1.52 MHz. THD (Total harmonic distortion) of the output is measured to be 0.33 % for a sinusoidal input signal of 100 mV amplitude. Phase error is measured to be 0.92 %. Phase-gain curves of the filter are given in Figure 7.

Table 2. MOSFET dimensions

Transistor	W(μm)	L(μm)
M1,M2	8.4	0.18
M3,M4	25.2	0.18
M5-M6, M11-M13, M17-18, M21	12.6	0.18
M7-M10, M14-M16, M19-M20	4.2	0.18

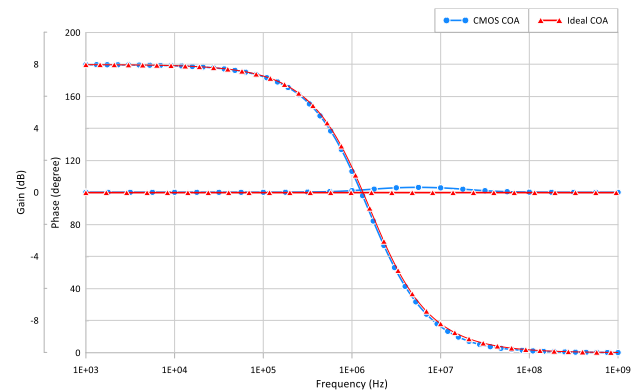


Figure 7. Phase-gain curves

Applying to the input a sinusoidal signal of amplitude 100 mV and frequency of 1.52 MHz, the filter gives time-domain response as shown in Figure 8.

Proposed filter's tunability is investigated by adjusting the MOSFET gate voltages in the range of 0.6 V - 0.9 V

for v_{cn1} and 0.3 V - 0.45 V for $v_{cp1} = v_{c2}$. Frequency tunability graphic is shown in Figure 9.

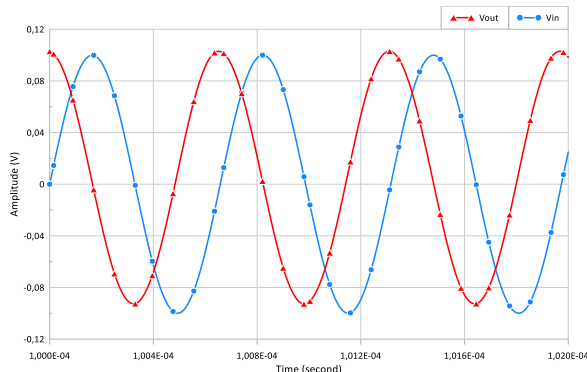


Figure 8. Time-domain response of the all-pass filter

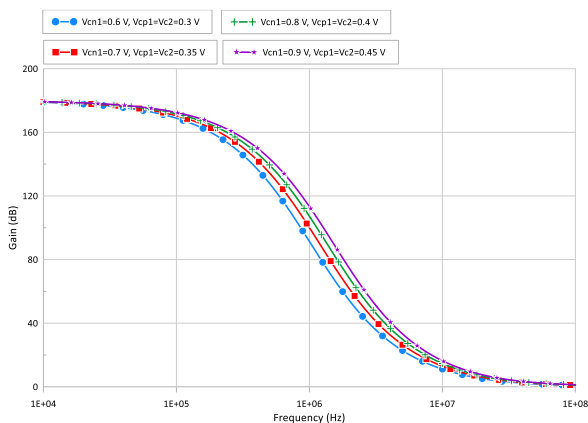


Figure 9. Frequency tuning of the all-pass filter

Another simulation has been carried out to evaluate the performance of the sinusoidal oscillator configured from the proposed filter circuit. Passive component values of the oscillator are taken as $R=R_4=500 \Omega$, $C_2=300 \text{ pF}$ and $C_4=150 \text{ pF}$. These values yield 1.06 MHz oscillation frequency while in simulation it is measured to be 1.02 MHz. THD values of the quadrature output signals are 3.4 % for V_1 (w-terminal voltage of first COA) and 1.8 % for V_2 (w-terminal voltage of second COA). Steady-state output waveform of the oscillator is shown in Figure 10.

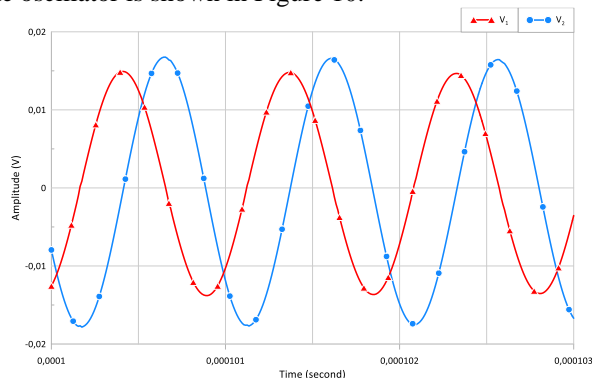


Figure 10. Steady-state output waveform of the quadrature oscillator

Frequency tunability of the oscillator is examined by adjusting the gate voltage of the NMOS transistors in the range of 0.6 V- 0.9 V and the results are illustrated in Figure 11.

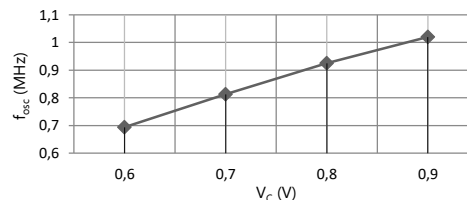


Figure 11. Frequency tuning of the quadrature oscillator

V_C denotes the gate voltages of NMOS transistors used to adjust R_1 , R_3 and R_4 .

6. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

A novel voltage-mode first-order MOS-C all-pass filter is introduced in this paper. The proposed filter topology consists of a single current operational amplifier, two resistors and a capacitor. Workability of the proposed circuit is validated by PSPICE simulation software. A tunable quadrature oscillator as an application example is also demonstrated. Remarkable features of the proposed circuit are voltage-controlled tuning, low distortion, low phase error, MOS-C implementation which is a desired feature for IC technique and suitability for low voltage applications.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Schauman R. and Valkenburg V., "Design of Analog Filters", *Oxford Univ. Press*: New York, (2001).
- [2] Toker A., Özoğuz S., Çiçekoğlu O. and Acar C., "Current-mode all-pass filters using current differencing buffered amplifier and a new high-Q bandpass filter configuration", *IEEE Circuits and Systems II; Analog and Digital Signal Processing*, 47 (2000): 949- 954, (2010).
- [3] Horng J. W., Hou C.L., Chang C.M., Lin Y.T., Shiu I.C. and Chiu W.Y., "First-order all-pass filter and sinusoidal oscillators using DDCCs", *Int. J. of Electronics*, 93: 457-466, (2006).
- [4] Minaei S. and Çiçekoğlu O., "A Resistorless realization of the firstorder all-pass filter", *Int. J. of Electronics*, 93: 177-183, (2006).
- [5] Singthong P., Siripruchyanun M. and Jaikla W., "Electronically controllable first-order current-mode all-pass filter using CCCIs and its application", *18th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems (MIXDES)*, Poland, 314-318, (2011).
- [6] Beg P., "Tunable First-Order Resistorless All-Pass Filter with Low Output Impedance", *The Scientific World Journal*, 1-6, (2014).
- [7] Keskin A.Ü., Pal K. and Hancıoğlu E., "Resistorless first-order all-pass filter with electronic tuning", *International Journal of Electronics and Communication (AEÜ)*, 62: 304- 306, (2008).

- [8] Ün F. and Kaçar F., “Voltage Type First Order All-Pass Filter Employing Fully Differential Current Feedback Operational Amplifier and Its Application”, *Journal of Science and Technology*, 2: 115-122, (2008).
- [9] Kaçar F. and Özcelep Y., “CDBA Based Voltage-Mode First-Order All-pass Filter Topologies”, *IU-Journal of Electrical & Electronics Engineering*, 11: 1327-1332, (2011).
- [10] Metin B., Çiçekoğlu O. and Pal K., “Voltage Mode All-pass Filter with a Single Current Differencing Buffered Amplifier”, *51st Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, USA, 734-737, (2008).
- [11] Çam U., Çiçekoğlu O. and Gülsoy M., “New Voltage and Current Mode First-order All-pass Filters Using Single FTFN”, *Frequenz*, 54: 177-179, (2000).
- [12] Kaulberg T., “A CMOS Current-Mode Operational Amplifier”, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 28: 849- 852, (1993).
- [13] Awad I.A. and Soliman A.M., “Current Operational Amplifier (COA): CMOS Realization and Active Compensation”, *Journal of Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 24: 141-152, (2000).
- [14] Kılınç S. and Çam U., “Current-mode first-order all-pass filter employing Single current operational amplifier”, *Journal of Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 41: 47-53. (2004).
- [15] Altun M. and Kuntman H., “Yüksek başarılı, tümüyle farksal akım Modlu işlemsel kuvvetlendirici (COA) tasarımı ve tüm geçiren süzgeç yapısında kullanımı”, *ELECO 2006: Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, Turkey, 46-49, (2006).
- [16] Çiçekli H. and Gökçen A., “Synthesis of Voltage-Mode All-pass Filter Employing Single Current Operational Amplifier”, *International Journal of Communications*, 10: 76-79, (2016).
- [17] Altun M. and Kuntman H., “A High-Drive Fully Differential Current Mode Operational Amplifier Providing High Output Impedance and Filter Application”, *ELECO 2007: The 5th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, Bursa, Turkey, 44-47, (2007).
- [18] Kılınç S., Saygıner M., Çam U. and Kuntman H., “Simple and accurate macromodel for current operational amplifier (COA)”, *ELECO 2005: The 4th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, Bursa, Turkey, 1-5, (2005).
- [19] Safari L. and Azhari S. J., “A High Performance Fully Differential Pure Current Mode Operational Amplifier and Its Applications”, *Journal of Engineering Science and Technology*, 7: 471-486, (2012).
- [20] Salama K. N. and Soliman A. M., “CMOS operational transresistance amplifier for analog signal processing”, *Microelectronics Journal*, 30: 235-245, (1999).
- [21] Minhaj N., “Dual-Output Second-Generation Current Conveyor based Voltage Mode Sinusoidal Oscillator modified for Chaos Generators”, *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 2: 315-318, (2009)



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



On the compression properties and erosion-corrosion behavior of Al 6061/15%SiC_p composite

Yazar(lar) (Author(s)): Osama M. IRFAN¹, Abdulaziz S. ALABOODI²

ORCID¹: 0000-0002-9104-1611

ORCID²: 0000-0003-0370-5324

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Irfan, O. M. And Alaboodi A. S., “On the compression properties and erosion-corrosion behavior of Al 6061/15%SiC_p composite”, *Politeknik Dergisi*, 23(2): 415-425, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.535022

On the Compression Properties and Erosion-Corrosion Behaviour of Al 6061/15%SiC_p Composite

Araştırma Makalesi / Research Article

Osama M. IRFAN^{1,2*}, Abdulaziz S. ALABOODI¹

¹Department of Mechanical Engineering, Qassim University, Buraidah, Saudi Arabia

²Beni Suef University, Beni Suef, Egypt

(Received : 04.03.2019 ; Accepted : 22.05.2019)

ABSTRACT

Aluminum alloys and composites are used in automobile and aerospace industries due to good mechanical properties, higher corrosion resistance and light weight. The compression test of materials at elevated temperature is useful to study the flow stress, workability, and the analysis of the processing conditions. In this paper, ring specimens produced from Al 6061/15%SiC_p composite were subjected to uniaxial hot compression tests to investigate the deformation behavior of the material. The tests were performed at high temperatures ranged from 300 °C to 500 °C and strain rates of 0.008 s⁻¹ to 2.7 s⁻¹. The flow stress-strain curve at different strain rates and temperatures was determined. The regression analysis was performed to predict the flow stress during the compression test. The comparison between the experimental and theoretical results was also conducted. In addition, finite element method was applied to simulate and validate the compression behavior of the composite ring. Furthermore, the erosion-corrosion tests by slurry pot method were conducted to examine the influence of SiC particles on erosion corrosion resistance of the material. The results showed that the flow stress of the Al6061/15/vol.%SiC_p composite is correlated directly with temperature and strain rate. Also, the erosion corrosion resistance increased with adding SiC particles to Al 6061 alloy.

Keywords: Al6061% SiC composite, compression test, flow stress, finite element modeling; erosion-corrosion.

1 INTRODUCTION

Aluminum-based composites have extensive applications in various industries including aerospace, automotive, and electronics due to their superior properties such as high stiffness, low density, and good wear resistance [1 and 2]. Various methods are used to produce a reinforced aluminum-based composite, such as casting processes, spray deposition and powder metallurgy techniques [3-6]. The reinforcement by alumina (Al₂O₃) and silicon carbide (SiC) affects the mechanical properties and workability of the composites [7-9]. However, the deformation of composite materials at room temperature is challenging due to reduced plasticity, high hardening rate, and less elongation; thus, investigation of the hot deformation behavior is very important [10]. The importance of bulk metal working is due to two primary reasons. First, the changes of major microstructural occur influencing the subsequent processing. Secondly, the improvement of processing techniques has highly effective on the overall manufacturing productivity[11]. Recently the hot compression test was employed in many researches. In particular, for large strains with lubrication; uniform deformation can be achieved. Moreover, the compressive state represents the conditions present in forging, extrusion and rolling process [12]. The flow stress-strain curve of plastic metals are dominated by the comparison between recovery mechanisms and strain hardening. When large deformations strains at elevated temperatures had occurred, the dynamic recrystallization and texture formation may influence the flow behavior[13]. A

smaller grain size is generally associated with greater strength, hardness, and ductility. The recrystallization is the mechanism, which results in fine grain structure in hot working. Dynamic recrystallization occurs only during hot working of metals. The process parameters that affect the recrystallization process are the temperature, strain, and strain rate [14]. Until now trial and error, techniques have been in practice for optimizing and designing the bulk metal working processes. Now they are being replaced by modeling techniques for accuracy [15]. Considerable research works have been conducted on computer modeling to characterize the deformation of material at high temperature. Yet, most of the plastic behavior relations are empirical and not based on a particular theoretical approach. However, the Holloman equation is broadly used to approximate the steel plastic behavior. It is adequately accurate to describe the stress-strain curve at low strains [16]. Recent researchers have employed an equation that relating critical strain to initial grain size and Zener-Holloman parameter to calculate the dynamic recrystallization onset. There are significant alterations in the applied expressions to determine the grain size after recrystallization and in their behavior of specific materials [16]. Some researchers have employed the proposed equations for recrystallized grain size for their model [17]. Considerable efforts were exerted previously focusing on the fabrication and deformation of aluminum-based composites but a few have studied the compression behavior of aluminum composites. For example, SiC_p reinforced Al 2080 matrix composite was fabricated by Srivatsan and Prakash by using dry blending techniques [18 and 19]. Hung et al. produced Al/SiC_p/359 composite by permanent mold casting

*Sorumlu yazar (Corresponding Author)
e-mail: osamaerfan@qec.edu.sa

technique [20]. SiC_p reinforced Al 2014 and Al 6061 composites were fabricated by Song et al. [21]. The process of vertical pressure casting [22] fabricated SiC-reinforced Al 7075 composite. Rao et al applied solidification processing by stir casting to produce Al-Zn-Mg-SiC_p composite [23]. The mechanical wear of aluminum based alloy was investigated by many researchers [24 and 25]. Suresh et al. [26] studied the wear of stir cast Al-TiB₂ composites. Umanath et al. [27] examined the mechanical wear of Al6061/SiC/Al₂O₃ composites with different reinforcement percentages. The results showed better wear resistance of 15% composites compared to 5% composites. Yet, the erosion corrosion resistance of Al 6061 alloy and Al 6061/SiC composites was not investigated.

The aim of the current paper is to produce Al 6061/15%/SiC_p composite by dry blending technique. The microstructure of both Al 6061 alloy and Al 6061/15%/SiC_p composite were investigated. Then the work focused on measuring and predicting the flow stress of ring specimens during hot deformation. A comparison between the measured and predicted results was carried out. A finite element method was applied for modeling the compression behavior of the produced composite. Moreover, the erosion corrosion behaviours of both Al 6061 alloy and Al 6061/ 15% SiC_p composite were studied to evaluate the surface properties of both materials.

2. MATERIAL and METHOD

The materials used in this work are aluminium alloy powder and silicon carbide (SiC_p) particulates that were purchased from Baoding Yuankun Machinery Manufacturing Co. Ltd, China. The aluminium powder and particulates SiC_p (15 vol. %) were mixed with 1% zinc stearate in a vacuum powder-mixing chamber. The blending of the components was done by a double cone stirrer. Then the mixture was compacted with a pressure of 170 MPa in a forming die made from steel H13. The compacts were heated to 150 °C for 2 hours and degassing was implemented by placing the compact in a vacuum chamber and heating it to 270 °C for 4 hours. The sintering process was carried out at 540 °C for 4 hours. The chemical composition of Al 6061 alloy utilized in the current study is given in Table 1. Compression ring specimens were prepared through a CNC machine under cooling condition. Using a ring specimen was to reduce the required compression stress.

Table 1. Chemical composition of AL 6061 alloy

Element	Mn	Cr	Fe	Cu	Si	Mg	Ti	Zn	Al
Wt.%	0.1	0.05	0.6	0.2	0.5	0.9	0.1	0.1	Bal

2.1 Compression Test

Sets of compression tests according to ASTM E9 at elevated temperature were performed for Al 6061/15%SiC_p composite ring specimens. A universal testing machine with a capacity of 10 Tonnes having

FIE-Unitek servo controller was used for the experiments. The shape and dimensions of the test specimens are illustrated in Fig. 1 and the setup of the compression test is shown in Fig. 2. The upper and lower surfaces of the specimens were lubricated by temperature resistance graphite lubricant to reduce the friction effect during the compression test. The deformation was carried out to a true strain ranging from 0.1 to 0.5. Then the specimens were heated in an electrical resistance split type muffle furnace. A thermocouple of 1.0 mm diameter was used to monitor the temperature. For more accuracy, a laser gun device was also used to measure the temperature. The compression tests were conducted at a temperature ranges from 300 °C to 500 °C with a step of 50 °C and strain rate ($\dot{\epsilon}$) ranges from 0.008 s⁻¹ to 2.7 s⁻¹.

The specimens were compressed to a true strain of 0.5 then quenched in cold water. The volume constancy principle was applied to calculate the true stress and true strain of the ring specimen.

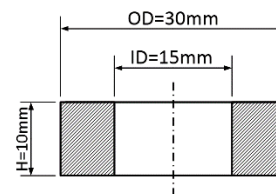


Fig. 1. Al 6061/15%SiC_p composite ring specimen

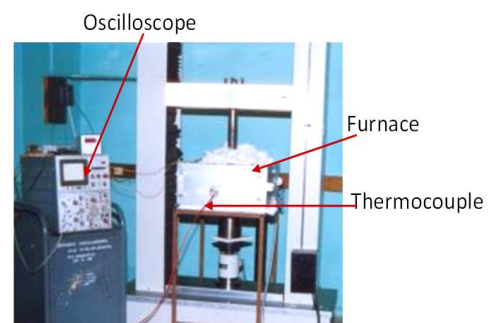


Fig. 2. Set up of the compression test

The actual area of the ring that subjected to compression stress can be obtained by the following formula:

$$A_o = \frac{\pi}{4}(OD^2 - ID^2) \quad (1)$$

Where OD and ID are outer diameter and inner diameter of ring respectively.

$$\text{Volume of the specimen} = \text{Area} \times \text{Height} \quad (2)$$

$$\text{Instantaneous height } (h_i) = h_o - \delta.h \quad (3)$$

Where h_o is initial height and $\delta.h$ is the change in height due to deformation. By using volume constancy principle,

$$A_i h_i = A_o h_o, \text{ and hence } A_i = A_o h_o/h_i \quad (4)$$

The flow stress is the resistance against deformation to the applied load. It is the instantaneous response of the material to the applied load as represented in Eq. (5) [28].

$$\sigma_T = P_i/A_i \quad (5)$$

Where σ_T is True stress, P_i is instantaneous load, and A_i is instantaneous area. True strain is the logarithmic relation of change in height to the original height. The true strain is obtained by Eq. (6) [29].

$$\text{True strain } (\epsilon) = \ln h_o/h_i \quad (6)$$

2.2 Erosion-corrosion Experiments

The slurry pot method was used for conducting the erosion corrosion tests of Al 6061 alloy and Al 6061/15%SiC_p samples in a saline water following the ASTM G119 standard. The details of test rig and samples preparation were described earlier elsewhere [30]. Samples of Al 6061 alloy and Al 6061/15%SiC_p composites were tested in two different media; namely 3.5 wt.% NaCl solution (for corrosion) and 3.5 wt.% NaCl slurry containing 20 wt.% of erosive particles (for erosion-corrosion). Silica sand with average size of 250^{±40} μm was used as erosive elements. A digital balance with a resolution of 0.1 mg was utilized to weigh the samples before and after the erosion corrosion experiments. The weight loss per unit area was computed and considered as an indication of erosion corrosion effect. The erosion corrosion behaviors of Al 6061 alloy and Al 6061/15%SiC_p were investigated at various durations and flow velocities. Three samples were tested for each condition and the average weight loss per unit area was reported. The surface degradation was examined by optical microscope and scanning electron microscope (SEM).

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Microstructure Investigation

The microstructure of Al 6061 alloy and 6061 Al/15%/SiC_p composites samples were investigated with optical microscope (Fig.3) and scanning electron microscope (SEM) (Fig.4). Before investigation, the samples were ground, polished and etched as followed: The grinding was carried out by using emery paper with the different grits of (400, 600, 800 and 1000). Polishing was implemented by using diamond paste (1μm size). Etching was done by a solution (95% H₂O + 1%HF). Then the samples were cleaned with water and alcohol. The images indicate that the reinforcement material (SiC_p) is distributed uniformly and good bonding between the Al 6061 matrix alloy and SiC particles is existing. Fig.5 presents the X-ray diffraction (XRD) analysis that showing the presence of SiC particles in the alloy matrix as small peaks. These results are in agreement with findings of previous researchers [8, 9, and 31 – 34]. After compression, the microstructures of both alloy and composite were investigated again to identify the alterations due to deformation. It was observed that at high temperature and low speed, the materials with stable structures exhibited abnormal elongation. Superplastic deformation was noticed and grain boundary sliding occurred at a rate in which the cracks can be repaired. This behaviour is similar to other

materials like brass and Mg-Li alloys [32]. It is well known that, at elevated temperatures and low strain rates, the grain boundary sliding occurs under shear stress.

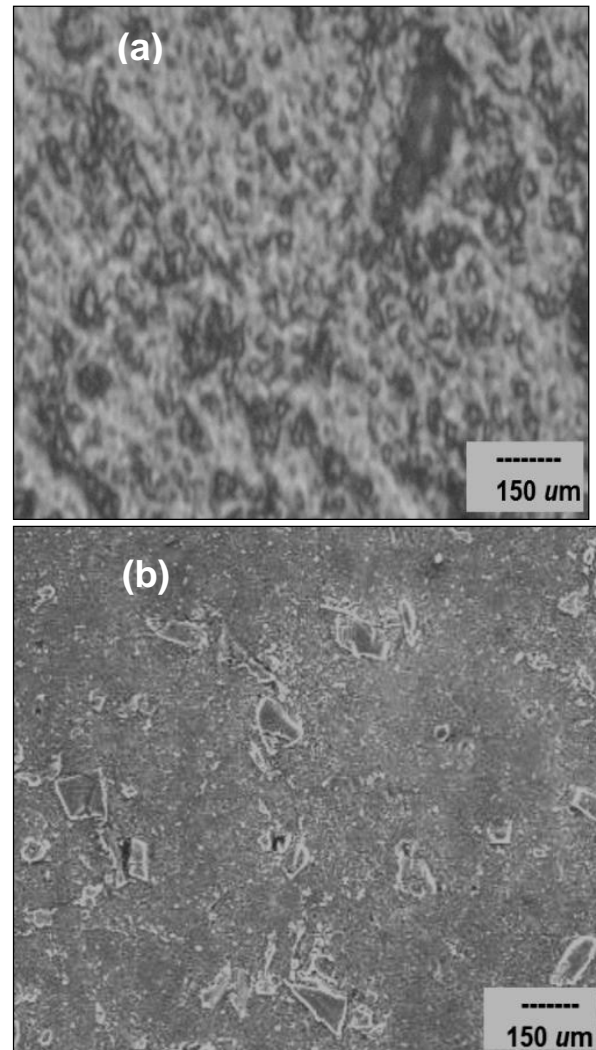
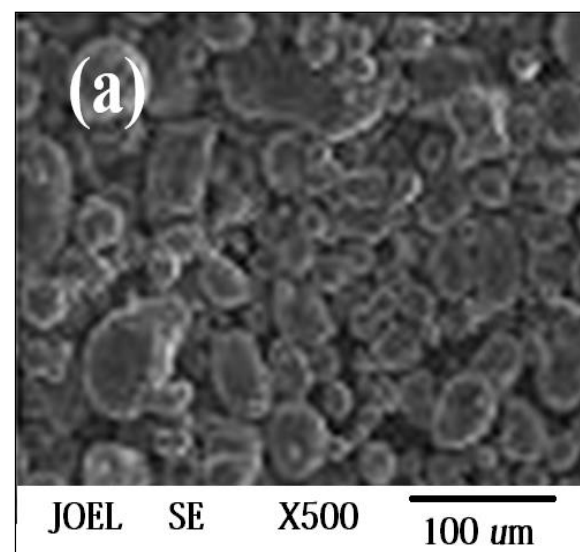


Fig. 3. Microstructure by optical microscopy
(a) Al 6061 alloy, (b) Al 6061 /15%/SiC_p Composites



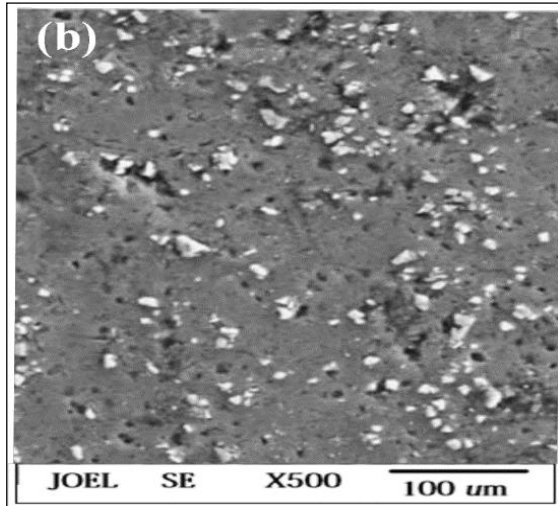


Fig. 4. Microstructure by SEM (a) Al 6061 alloy, (b) Al 6061 /15%/SiCp Composites

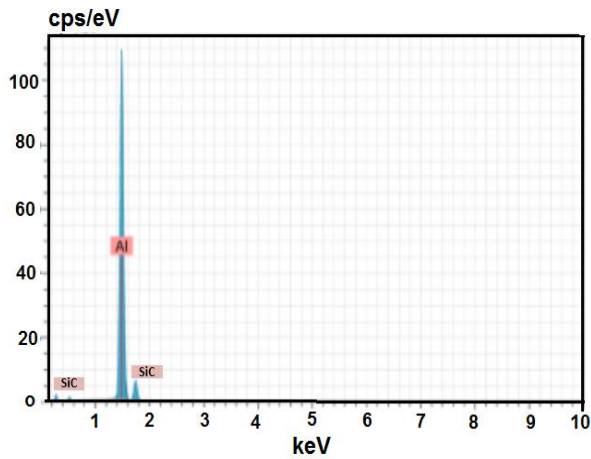


Fig.5. X-Ray diffraction (XRD) of Al 6061 /15%/SiCp Composites

Since the rate of diffusion is not rapid enough during the compression test, wedge cracks may appear at the grain boundary. The wedge cracks can be controlled or decreased by raising the strain rate or reducing the temperature. Superplastic deformation may also lead to interface cracking as shown in Fig.6.

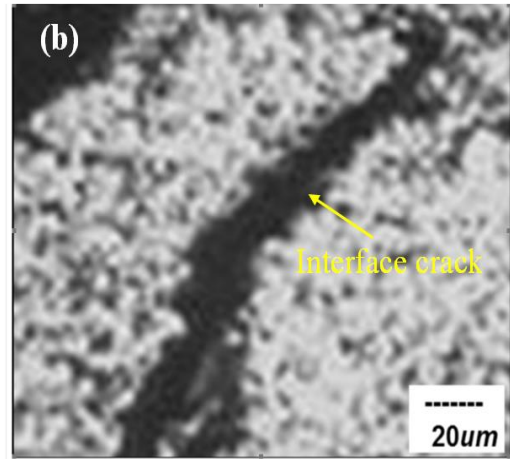
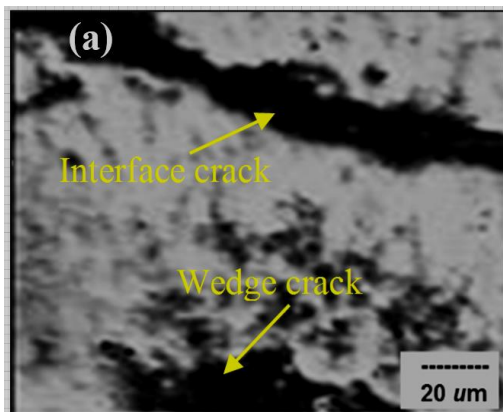


Fig. 6. Optical images of interface cracking; (a) at 300 °C and strain rate of 0.008 s⁻¹ (b) at 450 °C and strain rate 0.4 s⁻¹

3.2. Flow Stress-Strain Investigation

The flow curves (from 300 °C and 500 °C) at different strain rates for Al 6061/15/ vol. % SiC_p are shown Fig. 7 through Fig. 11. It is clear that the strain rate has a dominant effect on the flow stress. All curves reach the maximum values and achieve the condition of steady state with increase of strain rates. With lower strain rates (0.05 s⁻¹ and 0.008 s⁻¹) the maximum stress value was not achieved. The variation in the flow stress at low strain rates is not significant. This means that at higher strain rates a reduction of work hardening occurs. At relatively low temperatures of 300 °C and 350 °C, the strain hardening is high. Increasing the temperature results in decreasing the strain hardening. This explains the high strength and work hardening of the material at lower temperatures. The dislocation density resists the flow of the material and affects the strengthening mechanism. This leads to higher strain hardening. At higher temperatures (450 °C and 500 °C), the material became more ductile and has a softening behavior [33].

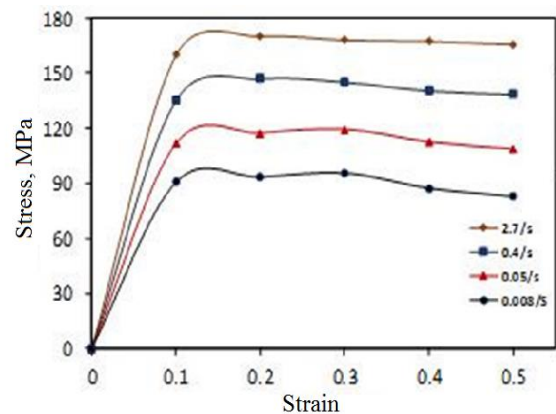


Fig. 7. Flow stress-strain of Al 6061/15/ vol. % SiC composite at 300 °C

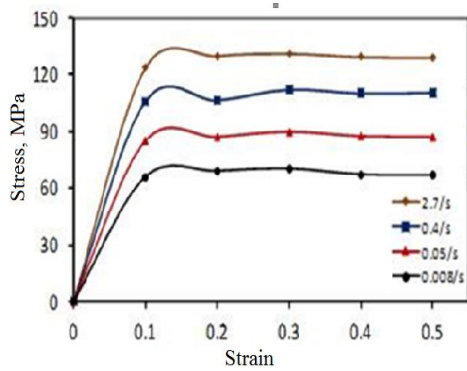


Fig. 8 Flow stress-strain of Al 6061/15/ vol. % SiC composite at 350 °C

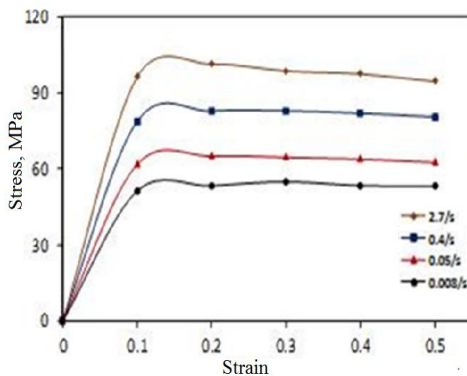


Fig. 9. Flow stress-strain of Al 6061/15/ vol. % SiC composite at 400 °C

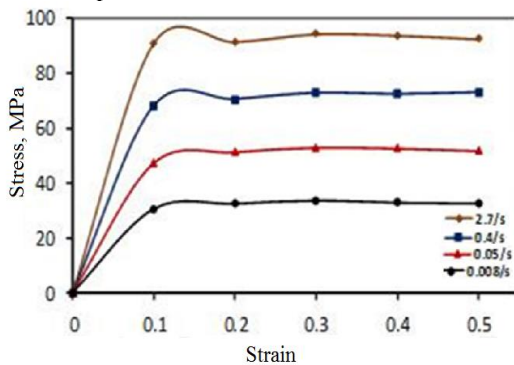


Fig. 10. Flow stress-strain of Al 6061/15/ vol. % SiC composite at 450 °C

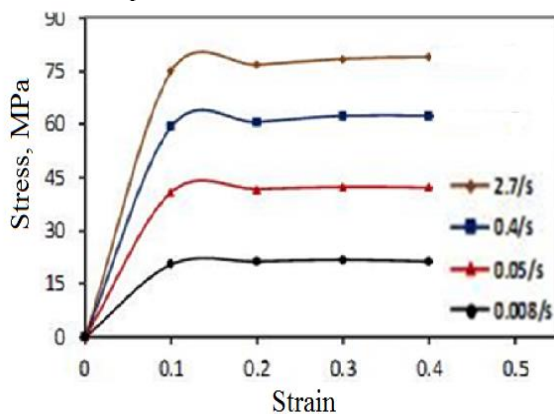


Fig.11. Flow stress-strain of Al 6061/15/ vol. % SiC composite at 500 °C

It can be concluded that the flow stress is directly dependent on the strain rate. The stress raised rapidly during the initial stage and after accomplishment of maximum stress, a monotonic decrease occurs. Moreover, at higher strain rates (0.4 s⁻¹ and 2.7 s⁻¹) the stress-strain curves reach the steady state with increasing the strain. For all cases, the increasing of temperature results in decreasing the flow stress of 6061Al/15%/SiC_p composite and extra energy was provided to the material due to higher temperatures. Therefore, dynamically recrystallized grains and dislocations were generated. Moreover, the increase of temperature decreases the adhesive strength between the SiC reinforcements and Al 6061 matrix. Thus, lower shear stress and dynamic recrystallization may reduce the flow stress at higher temperatures [35- 38].

3.3. Flow Stress Prediction

Regression method was used as an accurate statistical method for the analysis of data. In order to characterize the deformation behavior under different processing conditions in forming operation, an effective means of establishing the complicated relationship between the flow stress and the process variables may be sightseen. The regression analysis was applied to predict the flow stress of Al 6061/15%/SiC_p composite. The comparison between experimental and theoretical results was carried out. The prediction of flow stress was implemented through four steps: first; empirical model identification of the process, second: the model present parameters estimation as a function of strain, strain rate and temperature, third; flow stress prediction using empirical model, fourth; identification of mean deviation between the predicted and measured values of flow stress. Equation (7) shows the regression of the flow stress during hot deformation:

$$Z = \left(\dot{\epsilon} \right) \exp \left(\frac{Q}{RT} \right) = A [\sinh(\sigma\alpha)]^n \tag{7}$$

Where Z is Zener-Holloman parameter [16], $\dot{\epsilon}$ is strain rate s⁻¹, Q is the activation energy for deformation (KJ/mole), R is gas constant (8.314 KJ/kg.mole.k), A and α are constants related to materials, and n is the stress exponent. Activation energy (Q) is the required energy for the atoms movement that described based on dynamic precipitation at the deformation stage. It can be calculated by using equation (8),

$$Q = \frac{kR}{m} \tag{8}$$

Where k is the slope of (lnσ vs. 1/T) plots and m is the slope of (lnσ vs. lnε) plots. The values of k and m for different strains are shown in Table 3.

Table 3. Values of k and m at different strains

Strain	Slope	
	k	m
0.1	3.3	0.11
0.2	2.3	0.11
0.3	2.3	0.099
0.4	3.1	0.11
0.5	2.2	0.12

The model was modified to designate the flow stress of metals at high temperatures. Each parameter is considered as an independent variable that is a function of strain. For 6061 Al/15% SiCp, the parameters Q, A, α , and n are obtained in terms of ε at different temperatures (300, 350, 400, and 450 °C) as follows:

$$Q = \begin{cases} 124.710 + 124.71 \exp(-0.1(\varepsilon - 0.1)^2) \\ 86.971 + 86.884 \exp(-0.0279(\varepsilon - 0.2788)^2) \\ 4.557 + 3.194 \exp(3.542(\varepsilon + 0.7731)^2) \\ 117.678 + 116.619 \exp(0.889(\varepsilon - 0.3957)^2) \\ 76.819 + 75.592 \exp(1.099(\varepsilon - 0.5101)^2) \end{cases} \quad (9)$$

$$\ln A = \begin{cases} 5.015 + 2.799 \exp(0.584(\varepsilon + 2.277)^2) \\ 4.092 + 2.693 \exp(0.877(\varepsilon + 1.684)^2) \\ 4.228 + 2.994 \exp(0.747(\varepsilon + 1.738)^2) \\ 4.473 + 3.407 \exp(0.704(\varepsilon + 1.688)^2) \\ 4.400 + 3.491 \exp(1.269(\varepsilon + 0.960)^2) \end{cases} \quad (10)$$

$$\alpha = \begin{cases} -0.022 + 0.757 \exp(-1.300(\varepsilon + 1.542)^2) \\ -0.0003 + 0.0006 \exp(-0.101(\varepsilon + 0.107)^2) \\ -0.018 + 0.836 \exp(-1.279(\varepsilon + 1.43)^2) \\ -0.017 + 0.869 \exp(-1.258(\varepsilon + 1.368)^2) \\ -0.002 + 0.002 \exp(-0.104(\varepsilon + 0.101)^2) \end{cases} \quad (11)$$

$$n = \begin{cases} 5.120 + 4.053 \exp(-0.388(\varepsilon - 0.331)^2) \\ 5.255 + 3.913 \exp(-0.119(\varepsilon - 0.611)^2) \\ 5.815 + 4.135 \exp(-0.047(\varepsilon + 0.805)^2) \\ 7.195 + 1.644 \exp(0.384(\varepsilon - 1.009)^2) \\ 6.927 + 1.366 \exp(0.377(\varepsilon - 0.768)^2) \end{cases} \quad (12)$$

The flow stress can be predicted by using equations 9 through 12 for different hot deformation conditions. Therefore, the predicted and measured flow stress was compared. It was obtained that the deviation of the predicted flow stress is more and the maximum deviation using regression method was almost 26.6 %. By observing the measured and predicted flow stress for the experimental data, mean deviation of 8.1% was obtained.

3.4. Modeling of Compression Behavior by Finite Element Method (FEM)

The finite element model was developed to study numerically and validate the stresses induced in the ring specimen during hot deformation. Quarter of the ring was modeled because of the similarity with the same

dimension of ring conducted on experimental approach. The material properties were extracted from the experimental results. The friction coefficient between ring surface, upper pellet, and lower pellet was assumed to be minimum ($\mu = 0.05$). The material properties was fed from the experimental results with similarity of the dimensions of the ring. Moreover, the material properties were obtained from the experimental results. The ring modeling is presented in Fig. 12 and Fig. 13. The variations of ring deformation in experiments as well as in simulation prove that the FEM model is valid. Furthermore, the microstructure of the deformed ring (Fig. 3 and Fig. 4) indicated that no microscopic defects existed and the grains are distributed homogeneously. Therefore, the design of the ring is reasonable for experiments and simulation.

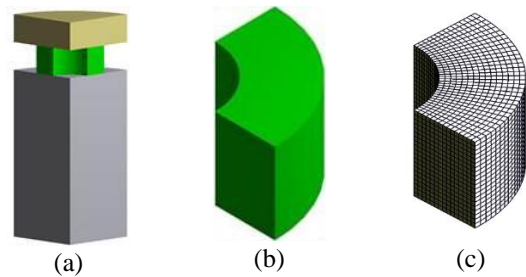


Fig. 12. (a) Ring between top and bottom pellet, (b) the quarter of ring model, (c) the mesh of quarter ring.

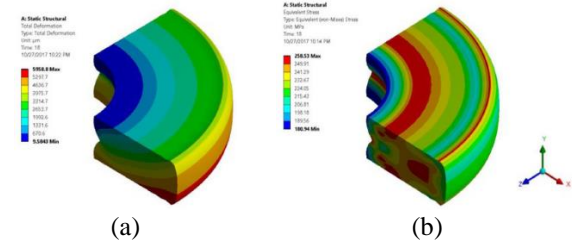


Fig. 13. (a) ring deformation distribution on -y direction (b) equivalent (von-Mises) stress distribution

3.5. Erosion Corrosion Results

3.5.1. Surface investigation

The surfaces of Al 6061 alloy and Al 6061/15%SiCp composite were investigated and compared by scanning electron microscope (SEM) to gain more understanding of the material removal mechanisms as a result of erosion corrosion. Positions near the center of the test samples were selected for observation. The micrographs of eroded corroded surfaces at different conditions are shown in Fig.14 and Fig.15. Fig.14a shows the surface of as received Al 6061 alloy before erosion corrosion experiments. Figs. 14b and 14c show the surfaces of Al 6061 alloy after corrosion and erosion-corrosion respectively. It is clear that the surface degradation due to erosion corrosion is more severe than that generated by corrosion only. More grooves and bigger pits can be seen

as a result of erosion corrosion rather than corrosion only.

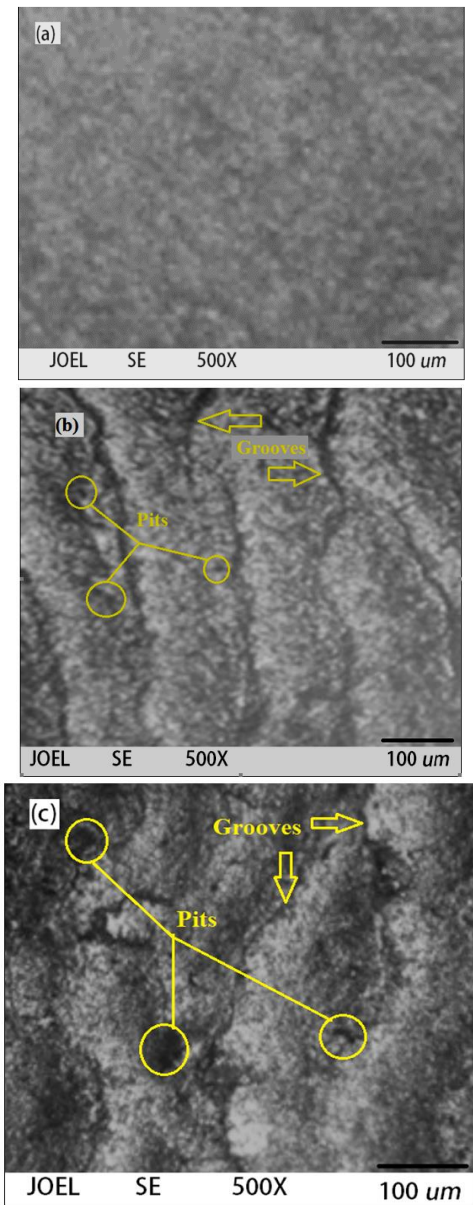


Fig. 14. Surface degradation of Al 6061 alloy (a) before erosion-corrosion, (b) after corrosion, and (c) after erosion-corrosion

Fig. 15a shows the surface of the Al6061/15%SiC_p composite before erosion corrosion tests. The effect of corrosion on the surface is revealed in Fig. 15b. Pits and grooves can be observed due to the chemical effect of saline water. Fig. 15c shows the effect of erosion corrosion where more grooves, pits, and cutting marks due to shear effect and plastic deformation can be observed. In addition, wider and deeper grooves can be seen in case of Al6061/SiC composites compared to alloy. Due to the existence of SiC particles in Al alloy, small crater and grooves can be seen (Fig. 15c).

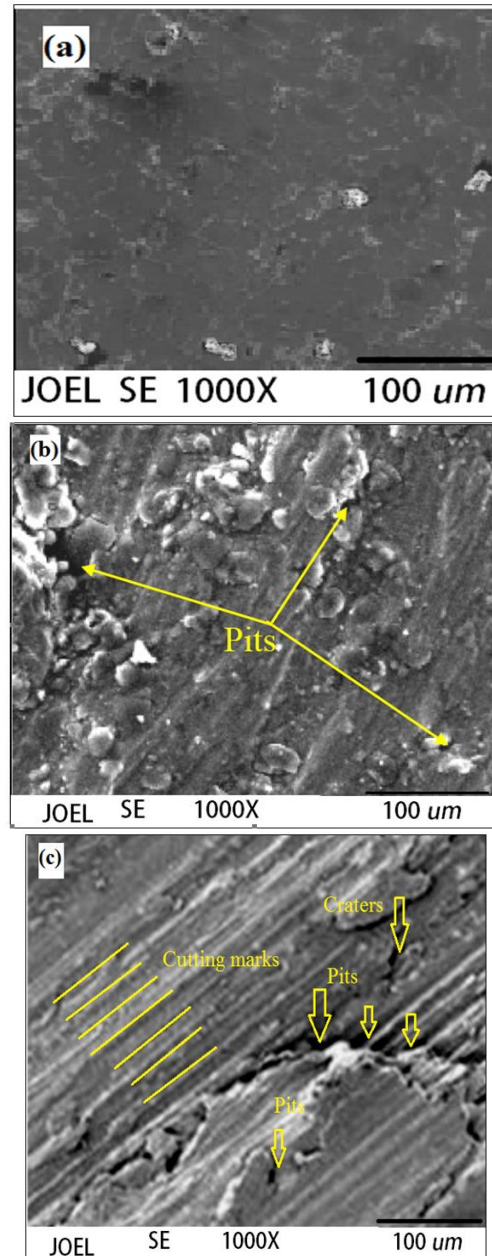


Fig. 15. Surface degradation of Al6061/15% SiC_p composite (a) before erosion-corrosion, (b) after corrosion, and (c) after erosion-corrosion

3.5.2 Influence of flow velocity on erosion-corrosion at various temperatures

The influences of flow velocity (at various temperatures) on the weight loss due to chemical corrosion and erosion corrosion for both Al6061 alloy and Al6061/15%SiC_p composite are shown in Figs. 16, 17, and 18. Generally, upon increasing the temperature from 30 to 50 and 80 °C the erosion corrosion increases. However, the erosion corrosion for Al 6061 alloy is greater than the erosion corrosion for Al6061/15%SiC_p composite under the same conditions. Fig.16 shows the effect of flow velocity on the weight loss at 30 °C. It is observed that the erosion corrosion resistance decreases with increasing the flow

velocity for both materials. For Al6061/15%SiC_p composite the weight loss due to chemical corrosion increased gradually from 9.8×10^{-6} g/mm² to 11.6×10^{-6} g/mm² (18.5%) with increasing the flow velocity from 1 m/s to 6 m/s. The weight loss due to the combined effect of erosion and corrosion increased from 12×10^{-6} g/mm² to 13.7×10^{-6} g/mm² (14.2%) for the same velocity range. The influences of flow velocity on the erosion corrosion behavior of Al6061 alloy and Al6061/15%SiC_p composite at 50 °C is revealed in Fig.17. It is noticed that the trend of weight loss with respect to the flow velocity is similar to Fig.16. However, with increasing slurry temperature, the weight loss increases for both Al6061 alloy and Al6061/15%SiC_p composite. It can be noticed that the weight loss due to chemical corrosion of Al6061/15%SiC_p composite increases from 11.2×10^{-6} g/mm² to 14.3×10^{-6} g/mm² (27.6%) with increasing the flow velocity from 1 m/s to 6 m/s. The weight loss due to the effect of erosion and corrosion increased from 12.2×10^{-6} g/mm² to 16.1×10^{-6} g/mm² (32%) for the same velocity range.

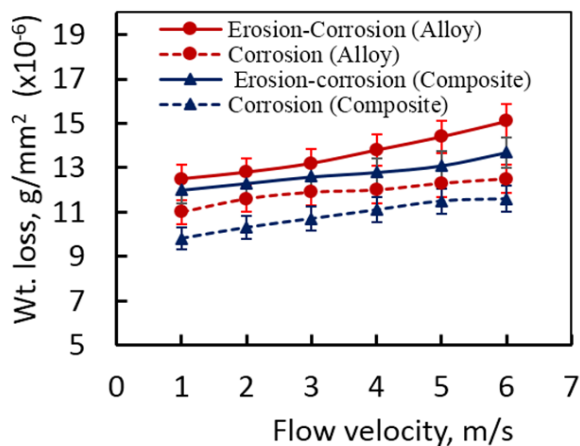


Fig. 16. Velocity effect on weight loss of Al 6061 alloy and Al6061/15%SiC/ composite. (T = 30 °C)

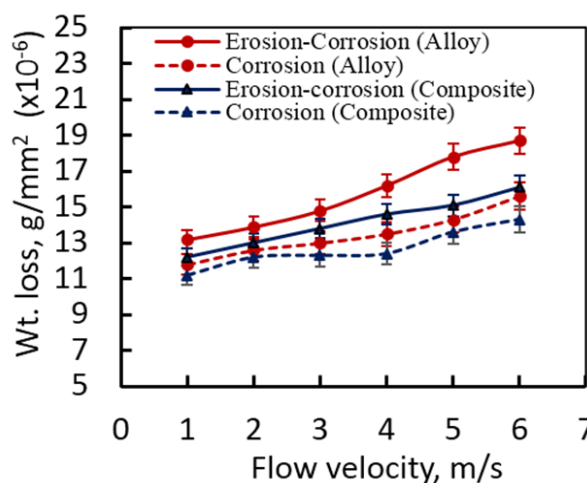


Fig. 17. Velocity effect on weight loss of Al 6061 alloy and Al6061/15%SiC/ composite. (T = 50 °C)

The influences of flow velocity on the erosion corrosion behavior of Al6061 alloy and Al6061/15%SiC_p composite at 80 °C is shown in Fig.18. It can be seen that the weight loss due to chemical corrosion of Al6061/15%SiC_p composite increases from 13.2×10^{-6} g/mm² to 17.1×10^{-6} g/mm² (29.5%) with increasing the flow velocity from 1 m/s to 6 m/s. The weight loss due to the effect of erosion and corrosion increased from 14.9×10^{-6} g/mm² to 20.1×10^{-6} g/mm² (35%) for the same velocity range. The enhancement in the erosion corrosion resistance of the Al6061/15%SiC_p composite rather than the Al6061 alloy is attributed to the high hardness of SiC particles which acts as a reinforcement and obstacle for the erosion corrosion.

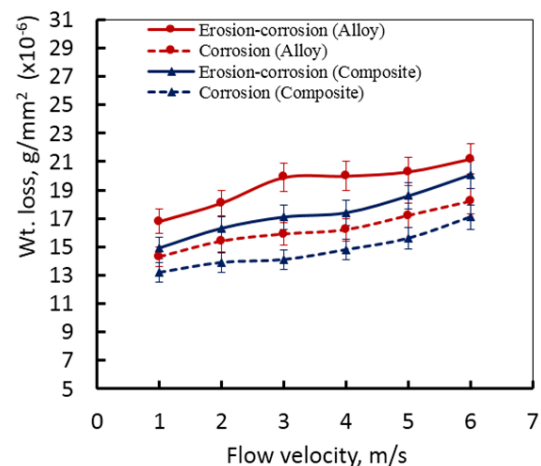


Fig. 18. Velocity effect on weight loss of Al 6061 alloy and Al6061/15%SiC/ composite. (T = 80 °C)

The micrographs in Fig. 14 and Fig.15 show the effect of SiC reinforcement on the erosion corrosion behavior of Al 6061 alloy. As discussed before the weight losses at different velocities and durations yielded to an improvement in erosion corrosion resistance of Al6061/15%SiC/ composite rather than Al6061 alloy. The micrographs (Figs 14 and 15) approve and show similar trends as presented in Fig. 16 through Fig. 18.

3.5.3 Influence of time on erosion-corrosion at various temperatures

The effect of time (at various temperatures) on the weight loss due to corrosion and erosion corrosion for both Al6061 alloy and Al6061/15%SiC_p composite are presented in Figs. 19, 20, and 21. The tests were conducted at duration range from 10 h to 60 h. The constant conditions were a velocity of 6 m/s and sand slurry in water 20 wt.%. The weight loss per unit area with respect to testing durations at 30 °C is shown in Fig. 19. The results demonstrate that the time of experiment has a considerable effect on erosion corrosion of Al 6061 alloy and Al6061/15%SiC/ composite. Fig.20 and Fig.21 show the weight loss at 50 °C and 80 °C. A noticeable weight loss due to erosion corrosion was observed for the 60 h tests. It can be concluded that the increase in hardness due to the presence of SiC particles increases the erosion corrosion resistance of both Al 6061/SiC composite. Furthermore, the high work hardening was

found to be useful for increasing the erosion corrosion resistance.

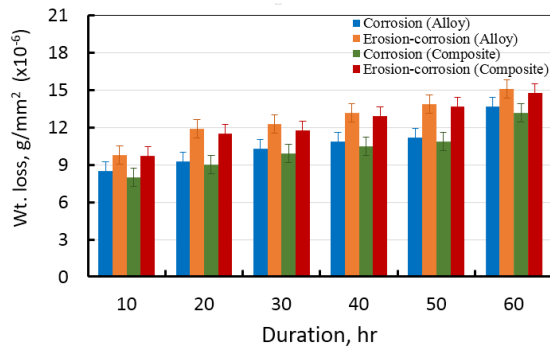


Fig. 19. Time effect on weight loss of Al 6061 alloy and Al6061/15%SiC/ composite. (T = 30 °C)

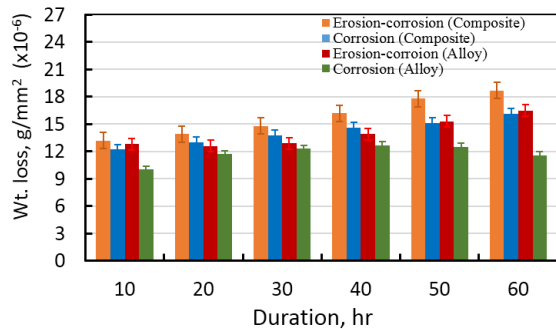


Fig. 20. Time effect on weight loss of Al 6061 alloy and Al6061/15%SiC/ composite. (T = 50 °C)

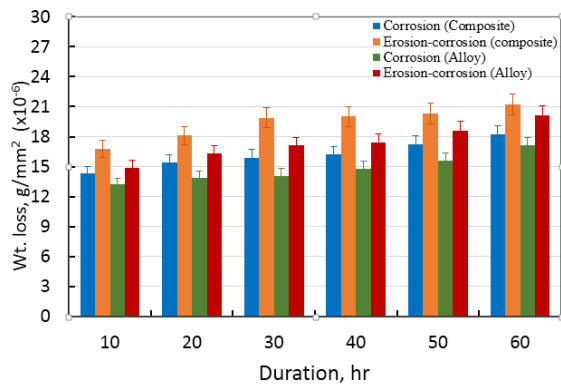


Fig. 21. Velocity effect on weight loss of Al 6061 alloy and Al6061/15%SiC/ composite.(T = 80 °C)

4. CONCLUSION

The hot deformation of the Al6061/15%SiCp composite was carried out through compression test at the temperature range (300 °C - 500 °C) and strain rates (0.008, 0.05, 0.4, and 2.7 s⁻¹). An attempt was made to develop a relationship of the true stress-true strain for the Al/15%SiCp composite at different temperatures. The erosion corrosion tests were also conducted on Al 6061/15% SiCp composite. The highlights of the study can be stated as follows:

1. For Al 6061/15% SiCp composite, the relation between flow stresses with strain rate and temperature are in direct correlation.
2. Increasing the temperature and decreasing strain rate result in reducing the flow stress of the Al 6061/15 vol.% SiCp composite.
3. The regression analysis was used successfully for modeling and comparing the measured and predicted results.
4. The regression method was demonstrated through mathematical equations. By observing the percentage deviation, the utility of the regression model was efficient.
5. The microstructure of the compressed Al 6061/15%SiCp revealed that higher strain rates and temperatures lead to interface cracking.
6. The flow velocity and time of experiments have substantial effects on the erosion corrosion of Al6061 alloy and Al6061/15%SiCp composite. However, the erosion corrosion resistance of Al6061/15%SiCp composite is more than that for Al6061 alloy. This means that the presence of SiC particles enhances the surface properties of Al6061/SiC composite.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank both Qassim university , Saudi Arabia and Beni Suef university, Egypt for supporting and facilitating the current work.

REFERENCES

- [1] Osama M. Irfan and Hanafy M. Omar, “Experimental Study and Prediction of Erosion-Corrosion of AA6066 Aluminum Using Artificial Neural Network, *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*”, 17(6): 1-14, (2017)
- [2] Xiao Pu LI., LIU Chong Y., Xiao Wei SUN., Ming Zhen MA., and Ri Ping LIU., “Hot deformation behavior and processing maps of AA6061-10 vol.% SiC composite prepared by spark plasma sintering”, *SCIENCE CHINA Technological Sciences* 59(6): 980-988, (2016).
- [3] Gopalakrishnan S. and Murugan N., “Production and wear characterization of AA 6061-matrix titanium carbide particulate reinforced composite by enhanced stir casting method”, *Compos Part B-Engineering*, 43: 302-308, (2012).
- [4] Ashwath P. and Xavier M.A., “Processing methods and property evaluation of Al2O3 and SiC reinforced metal matrix composites based on aluminium 2xxx alloys”, *J. Mater. Res.*, 31: 1201–1219, (2016).
- [5] Zhang, Q., Ma X. Y., and Wu G. H., “Interfacial microstructure of SiCp/Al composite produced by the pressureless infiltration technique”, *Ceram Int*, 39: 4893–4897, (2013).
- [6] Zhang J. T., Liu L. S., and Zhai P. C., “Effect of fabrication process on the microstructure and dynamic compressive properties of SiCp/Al composites fabricated

- by spark plasma sintering”, *Material Letters*, 62: 443–446, (2008).
- [7] Reddy P.S., Kesavan R., and Vijaya Ramnath B., “Investigation of mechanical properties of aluminum 6061-silicon carbide, boron carbide metal matrix composite”, *Silicon*, 9: 1–8, (2017).
- [8] Tengke Ye, Yuxin Xu, and Jie Ren., “Effects of SiC particle size on mechanical properties of SiC particle reinforced aluminum metal matrix composite”, *Materials Science & Engineering, A* 753: 146–155, (2019).
- [9] Kanhu Charan Nayak and Prashant P. Date., “Hot deformation flow behavior of powder metallurgy based Al-SiC and AlAl₂O₃ composite in a single step and two-step uni-axial compression”, *Materials Characterization*, 151: 563–581, (2019).
- [10] El-Sabbagh A., Soliman M., and Taha M., “Hot rolling behavior of stir-cast Al 6061 and Al 6082 alloys-SiC fine particulates reinforced composites”. *J. Mater Process Tech* 212: 497–508, (2012).
- [11] Taha M. A., El-Mahallawy N. A., and El-Sabbagh A. M., “Some Experimental Data on Workability of Aluminum-Particulate-Reinforced Metal Matrix Composites”, *J. Mater. Process. Techno* 202 (1–3): 380–385, (2008).
- [12] Zabihi, M., Toroghinejad M. R., and Shafyei A., “Application of powder metallurgy and hot rolling processes for manufacturing aluminum/ alumina composite strips”, *Mat Sci Eng A-Struct.* 560: 567–574, (2013).
- [13] Agus Pramono, Lembit Kommel, Lauri Kollo, and Renno Veinthal., “The Aluminum Based Composite Produced by Self-Propagating High Temperature Synthesis”, *Materials Science*, 22(1): 41-43, (2016).
- [14] Pitchayapillai G., Seenikannan P., and Raja K., “Chandrasekaran, K. Al6061 hybrid metal matrix composite reinforced with alumina and molybdenum disulphide”. *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2016: 6127624, (2016).
- [15] Ch Hima Gireesh, K. G. Durga Prasad, and Koona Ramji, “Experimental Investigation on Mechanical Properties of an Al6061 Hybrid Metal Matrix Composite”, *J. Compos. Sci.*, 2(49): doi:10.3390/jcs2030049, (2018).
- [16] Chang, C. I., Lee C. J., and Huang J. C., “Relationship between grain size and Zener–Holloman parameter during friction stir processing in AZ31 Mg alloys”, *Scripta Materialia* 51: 509–514, (2004).
- [17] Sellars C. M., “On physical metallurgy of thermo-mechanical processing of steels and other metals”, *Proc. of Int. Conference THERMEC*, Tokyo, 88:, 448-457, (2011).
- [18] Srivatsan T. S. and Prakash A., “The quasi-static fracture behavior of an aluminum alloy metal-matrix composite”, *Composites Science and Technology*, 53: 307–315, (1995).
- [19] Dipti Kanta Das, Purna Chandra Mishra, Saranjit Singh, and Swati Pattanaik., “Fabrication and heat treatment of ceramic reinforced aluminum matrix composites – A Review”, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering* 1:6, (2014).
- [20] Hung N. P., Boey F. Y. C., Khor K. A., Oh C. A., and Lee H. F., “Machinability of cast and powder-formed aluminum alloys reinforced with SiC particles”. *Journal of Materials Processing Technology*, 48: 291–297, (1995).
- [21] Song W. Q., Krauklis P., Mouritz A. P., and Bandyopadhyay S., “The effect of thermal ageing on the abrasive wear behavior of age hardened 2014 Al/ SiC and 6061 Al/SiC composites”, *Wear*, 185: 125–130, (1995).
- [22] Kalkanli A. and Yilmaz S., “Synthesis and characterization of aluminum alloy 7075 reinforced with silicon carbide particulates”, *Materials and Design*, 29: 775–780, (2008).
- [23] Rao R. N., Das S., Mondal D.P., and Dixit G., “Dry sliding wear behavior of cast high strength aluminum alloy (Al–Zn–Mg) and hard particle composites”, *Wear*, 267: 1688–1695, (2009).
- [24] Nagara M., Auradi V., Parashivamurthy K.I., and Kori S.A., “A Comparative Study on Wear Behavior of Al 6061-6% SiC and Al6061-6% Graphite Composites”. *J Appl Mech Eng* 5: 227. doi: 10.4172/2168-9873.1000227, (2016).
- [25] Nagara M., Attar S., Reddappa H.N., Auradi V., Kumar S., and Raghu S., “Mechanical behaviour of Al7025-B4C particulate reinforced composites”. *J. Applied Mechanical Engineering*, 4: 6, DOI: 10.4172/2168-9873.1000186, (2015).
- [26] Suresh S., Shenbaga V.M., Vettivel S.C., and Selvakumar N., “Mechanical behaviour and wear prediction of stir cast Al-TiB₂ composites using response surface methodology”, *Materials and Design*, 59: 383-396, (2014).
- [27] Umanath K., Palanikumar K., and Selvamani S.T., “Analysis of dry sliding wear behavior of Al6061-SiC-Al₂O₃ hybrid metal matrix composites”, *Composites Part-B*, 53:159-168, (2013).
- [28] Naveed M. and Khan A.R.A., “Ultimate Tensile Strength of Heat Treated Hybrid Metal Matrix Composites”, *Int. J. Sci. Res.*, 4:146–151, (2015).
- [29] Chawla K. Fibrous, Materials, 2nd ed., Cambridge University Press: Cambridge, UK, (2016).
- [30] Osama M. Irfan, Fahad A. Al-Mufadi, and F. Djamanroodi, “Surface Properties and Erosion–Corrosion Behavior of Nanostructured Pure Titanium in Simulated Body Fluid”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 49A:5695 – 5704, (2018).
- [31] Wei S. H., Liu Y. Q., Nie J. H., Zuo T. Z., Ma L., and Fan J. Z., “Hot Deformation Behavior and Processing Map of 25%SiCp/2009Al Composite”, *Materials Science Forum*, 849: 409-415, (2016).
- [32] Sivakesavam O., “Effect of Processing History and Initial Microstructure on the Hot Working of Mg, Mg–Zn–Mn, Mg–Li–Al, and Mg–Li–Al–Zr Alloys: Characterization with Processing Maps” Ph.D. Thesis, *Indian Institute of Science*, Bangalore, (1994).
- [33] Jingli Duan, Yuanbiao Tan, Liyuan Ji, Wenchang Liun, Jing wu Zhang, and Riping Liu., “Hot deformation behavior of 51.1 Zr–40.2 Ti–4.5 Al–4.2 V alloy in the single β phase field”, *Progress in Natural Science, Materials International*, 25:34–41, (2015).
- [34] Ganesan G., Raghukandan K., and Karthikeyan R., “Formability study on Al/SiC composites. *Mater Sci Forum*”, 437(438): 227–230, (2003).

- [35] Zhang, P., Li F. G., and Wan Q., "Constitutive equation and processing map for hot deformation of SiC particles reinforced metal matrix composites", *J. Mater Eng Performance*, 19: 1290–1297, (2010).
- [36] Zhang H., Lin G. Y., and Peng D. S., "Dynamic and static softening behaviors of aluminum alloys during multistage hot deformation". *J. Mater Process Tech*, 148: 245–249, (2004).
- [37] Li H. Z., Wang H. J., and Zeng M., "Forming behavior and workability of 6061/B4Cp composite during hot deformation", *Compos Sci Technology*, 71: 925–930, (2011).
- [38] Yar A. A., Montazerian M., and Abdizadeh H., "Microstructure and mechanical properties of aluminum alloy matrix composite reinforced with nano-particle MgO", *J. Alloys Compd*, 484: 400 - 404, (2009).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



Seasonal variations of impedance in the ionospheric plasma

lyonosferik plazmadaki empedansın mevsimsel değişimi

Yazar(lar) (Author(s)): İbrahim ÜNAL¹, Seçil KARATAY², Ali YEŞİL³, Aybaba HANÇERLİOĞULLARI⁴

ORCID¹: 0000-0001-8497-4459

ORCID²: 0000-0002-1942-6728

ORCID³: 0000-0003-2997-897X

ORCID⁴: 0000-0001-7008-480X

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Ünal İ., Karatay S., Yeşil A. ve Hançerlioğulları A., “Seasonal variations of impedance in the ionospheric plasma”, *Politeknik Dergisi*, 23(2): 427-433, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.514327

İyonosferik Plazmadaki Empedansın Mevsimsel Değişimi

Araştırma Makalesi / Research Article

İbrahim ÜNAL¹, Seçil KARATAY^{2*}, Ali YEŞİL³, Aybaba HANÇERLİOĞULLARI⁴

¹Eğitim Fakültesi, Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi Bölümü, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye

²Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kastamonu Üniversitesi, Kastamonu, Türkiye

³Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

⁴Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Kastamonu Üniversitesi, Kastamonu, Türkiye

(Geliş/Received : 17.01.2019 ; Kabul/Accepted : 26.05.2019)

ÖZ

İyonosfer, atmosferin 50 km ila 1000 km yükseklikleri arasında yer alan iyonlaşmış bir tabakadır. Bu tabaka, atmosferik iletkenlikte önemli bir rol oynar. İyonosfer büyük miktarda elektrik yüklü parçacıklara sahiptir ve bu nedenle radyo dalgalarının yayılımını etkiler. Bu çalışmada, iyonosferik plazmanın empedansı farklı mevsimler ve farklı jeomanyetik aktivite dönemleri için Yer'in gerçek geometrisi kullanılarak hesaplanmıştır. İyonosferik plazmanın empedansının her doğrultuda genel olarak her mevsim için büyük değerlere sahip olduğu gözlenmiştir. Empedans tensörünün diyagonal bileşenlerinin diğer bileşenlerden daha büyük olduğu bu çalışmada gözlenmiştir. Ayrıca iyonosferik plazmanın, genellikle, her yöne ve mevsimlerde zayıf iletkenliğe sahip olduğu gözlenmiştir. Empedansın, elektron yoğunluğuyla ters olarak değiştiği görülmüştür. Bu nedenle, elektron yoğunluğunda sapmalara neden olan jeomanyetik aktivitenin de empedansı azalttığı gözlenmiştir. İyonosferik plazmanın, çalışmanın yapıldığı coğrafi koordinatlarda reaktif bir karaktere sahip olduğu görülmüştür. İyonosfer, bir dielektrik yapı göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Empedans, elektromanyetik, plazma uygulamaları, iyonosfer, manyetosfer.

Seasonal Variations of Impedance in the Ionospheric Plasma

ABSTRACT

The ionosphere is an ionized layer that extends between 50 km and 1000 km altitudes in the atmosphere. It plays an important role in atmospheric electricity. The ionosphere has the number of electrically charged particles and thus, it affects the propagation of the radio waves. In this study, magnitudes of impedance for different seasons and different geomagnetic activity periods in the ionospheric plasma are calculated using the real geometry of Earth. It is observed that the impedance of the ionospheric plasma in all directions generally has high values for all seasons. The diagonal components of the tensor of the impedance are greater than the other components. It is also observed that the ionospheric plasma, generally, has weak conductivity in all directions and seasons. Impedance varies inversely with electron density. Hence, geomagnetic activity periods which lead to an increase in electron density decreases the impedance. It is observed that the ionospheric plasma has a reactive character in the geographic coordinates where the study was performed. The ionosphere displays a dielectric structure.

Keywords: Impedance, electromagnetics, plasma applications, ionosphere, magnetosphere.

1. INTRODUCTION

The ionosphere is a layer of the Earth's atmosphere extending from 50 to 1000 km and it can significantly affect the propagation of radio waves. The ionosphere may act as an efficient reflector for frequencies below 30 MHz, allowing high frequency (HF) radio communication to distances of many thousands of kilometers. Due to the dependence of radio waves behavior on their frequencies, oscillation frequency of the electron and the refractive index of the ionospheric plasma, the wave can be reflected, refracted or absorbed from the ionosphere.

In recent years, information about the state of the Earth's ionosphere has improved [1-11]. Ionospheric physics is related to plasma physics because the

ionosphere is, of course, a weak natural plasma. The ionosphere carries electric currents because winds and electric fields drive ions and electrons. The direction of the drift is at right angles to the geomagnetic field [4, 5]. The electrical conductivity tensor finds application in all areas of ionospheric electrodynamics and at all latitudes. The theory of ionospheric conductivity has been developed by many scientists and is now quite well understood, though refinements are still made from time to time [12, 13]. On the other hand, the most important parameter that determinates the electromagnetic behavior of any medium is the dielectric constant, which determines the refractive index at any frequency, the form of the polarized wave in the medium, the state of wave energy and the propagation of the wave. As known, the dielectric and permeability parameters are related to electric $(\epsilon = \epsilon_0(I + \chi))$ and magnetic

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : skaratay@kastamonu.edu.tr

($\mu = \mu_0(I + \chi_m)$) susceptibilities of the material. Since the velocity ($c = 1/\sqrt{\mu\epsilon}$) and characteristic impedance ($\eta = \sqrt{\mu/\epsilon}$) of an electromagnetic wave travelling in a plasma are dependent on the plasma's properties, the observed refractive index may be used to deduce detailed information about the properties of the ionic plasma. Because of all of these reasons, the impedance of the ionospheric plasma is a measure of its refractive index, reflection, and volume and polarization of the electromagnetic wave. Hence determination of impedance of the ionosphere is very important for figuring out the propagation of an electromagnetic wave in the ionospheric plasma. The most interesting features of the solution of electromagnetic waves for any medium are resonances and cut-offs. Resonances are characterized by the phase velocity going to zero ($v_p = \omega/k \rightarrow 0$) which is equivalent to the refraction index $n = kc/\omega$ going to infinity ($k \rightarrow \infty$). The wave energy is absorbed by ionospheric plasma at resonance points. Cut-offs are defined by the index of refraction or the wave vector going to zero ($k \rightarrow 0$). At these cut-off points, the wavelength goes to infinity and the waves are reflected. Cut-off points can be used for plasma density measurements [3-6, 9-14].

In the literature, the declination angle (D) in the geometry of the Earth's magnetic field is not considered in the calculation of the conductivities [4-15]. This angle was taken into consideration in recent years [9, 16, 17]. It is used for defining the characteristic impedance of the ionospheric plasma and in numerical calculations of the impedance. The declination angle determines the cut-off points of the wave. It also determines the direction and the polarization of the wave, depending on the medium of the ionospheric plasma [17]. We can thus determine whether the ionospheric plasma is active or reactive. The calculated impedance shows which component of the magnetic field is effective in the determination of the propagation coefficient of the electromagnetic wave [18]. In this study, the impedances are calculated using the real geometry of the Earth's magnetic field in the ionospheric plasma. Results are obtained for geomagnetically disturbed and quiet days for different seasons. The analytical calculations and the results are presented in Section 2 and 3, respectively.

2. IMPEDANCE FOR COLD PLASMA

When considering the behavior of a high frequency wave through the ionospheric plasma, taking into account that $m_e \ll m_i$, only the equation of motion for electrons should be considered [6]. Besides, if the thermal motion of particles is neglected and the cold plasma approximation is used, then the equation of motion is defined as follows [7]:

$$m_e \frac{dV_e}{dt} = -e(\mathbf{E} + \mathbf{V}_e \times \mathbf{B}) - m_e \nu_e V_e \quad (1)$$

Where m_e is the mass, V_e is the velocity and ν_e ($\nu_{ei} + \nu_{en}$) is the collision frequency of the electron. E and B are the electric and the magnetic fields, respectively. Assuming that the velocity and the fields vary as $e^{-i\omega t}$, equation (1) can be written as:

$$i\omega V_e = \frac{e}{m_e}(\mathbf{E} + \mathbf{V}_e \times \mathbf{B}) + \nu_e V_e \quad (2)$$

It is assumed that the z-axis of the coordinate system with its origin located on the ground points vertically upward. The x and y-axes represent the geographic eastward and the northward directions in the northern hemisphere. The current density is given by $\mathbf{J} = -eN_e V_e$ and the electric field and the electron velocity are $\mathbf{E} = \hat{x}E_x + \hat{y}E_y + \hat{z}E_z$ and $\mathbf{V} = \hat{x}V_x + \hat{y}V_y + \hat{z}V_z$. The Earth's magnetic field direction is $\mathbf{B} = \hat{x} B \cos I \sin D + \hat{y} B \cos I \cos D - \hat{z} B \sin I$.

According to Ohm's law ($[\mathbf{J}] = [\sigma] \cdot [\mathbf{E}]$), equation (2) is a tensor equation where the conductivity is defined as:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

The components of the conductivity tensor are given by [9]:

$$\sigma_{xx} = \sigma_1 + (\sigma_0 - \sigma_1) \cos^2 I \sin^2 D \quad (4)$$

$$\sigma_{xy} = -\sigma_2 \sin I + (\sigma_0 - \sigma_1) \cos^2 I \cos D \sin D \quad (5)$$

$$\sigma_{xz} = -\sigma_2 \cos I \cos D - (\sigma_0 - \sigma_1) \cos I \sin I \sin D \quad (6)$$

$$\sigma_{yx} = \sigma_2 \sin I + (\sigma_0 - \sigma_1) \cos^2 I \cos D \sin D \quad (7)$$

$$\sigma_{yy} = \sigma_1 + (\sigma_0 - \sigma_1) \cos^2 I \cos^2 D \quad (8)$$

$$\sigma_{yz} = \sigma_2 \cos I \sin D - (\sigma_0 - \sigma_1) \cos I \sin I \cos D \quad (9)$$

$$\sigma_{zx} = \sigma_2 \cos I \cos D - (\sigma_0 - \sigma_1) \cos I \sin I \sin D \quad (10)$$

$$\sigma_{zy} = -\sigma_2 \cos I \sin D - (\sigma_0 - \sigma_1) \cos I \sin I \cos D \quad (11)$$

$$\sigma_{zz} = \sigma_1 + (\sigma_0 - \sigma_1) \sin^2 I \quad (12)$$

Where, σ_0 is the longitudinal conductivity defined as $\left(\frac{e^2 N_e}{m_e (\nu_e - i\omega)} \right)$, σ_1 is the Pedersen conductivity defined

as $\left(\frac{e^2 N_e (v_e - i\omega)}{m_e [\omega_{ce}^2 + (v_e - i\omega)^2]} \right)$ and σ_2 is the Hall conductivity defined as $\left(\frac{e^2 N_e \omega_{ce}}{m_e [\omega_{ce}^2 + (v_e - i\omega)^2]} \right)$ [8].

In these conductivity equations, N_e is the electron density and ω_{ce} is the gyro frequency defined as $\omega_{ce} = -e B/m_e$. Note that σ is a scalar quantity and that it has an imaginary as well as a real part. The real part is usually associated with conductivity: It is the reciprocal of resistivity and thus associated with energy dissipation. The imaginary part is associated with dielectric properties of the medium and is a purely alternating current parameter (inverse of reactance) [19]. A relationship between conductivity with impedance of ionospheric plasma can be defined as follows:

$$Z = \frac{1}{\sigma_R} + i \frac{1}{\sigma_S} = R + iX \tag{13}$$

Where, σ_R is the real part of conductivity, σ_S is the imaginary part of conductivity, R is the resistivity and X is the reactance of the medium. Due to this, all the impedances of the ionospheric plasma must be a function of these conductivities. Thereby, the impedance of ionospheric plasma depends on both the real and imaginary parts of the conductivity. It can be defined as follows:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} & Z_{xz} \\ Z_{yx} & Z_{yy} & Z_{yz} \\ Z_{zx} & Z_{zy} & Z_{zz} \end{bmatrix} \tag{14}$$

When

$$\begin{aligned} A &= v_e^2 + \omega^2, \\ B &= v_e^2 + \omega^2 + \omega_{ce}^2, \\ C &= v_e^2 - \omega^2 + \omega_{ce}^2, \\ D &= v_e^2 + \omega^2 - \omega_{ce}^2, \\ E &= v_e^2 - 3\omega^2 + \omega_{ce}^2, \\ F &= 3v_e^2 - \omega^2 + \omega_{ce}^2 \end{aligned}$$

the components of this tensor is obtained depending on the dip and the declination angles as follows:

$$\begin{aligned} Z_{xx} &= \frac{m_e(E^2 v_e^2 + F^2 \omega^2)}{e^2 N_e v_e (AB + E \omega_{ce}^2 \cos^2 I \sin^2 D)} \\ &+ i \frac{m_e(E^2 v_e^2 + F^2 \omega^2)}{e^2 N_e \omega (AD + F \omega_{ce}^2 \cos^2 I \sin^2 D)} \end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned} Z_{xy} &= -\frac{m_e(E^2 v_e^2 + F^2 \omega^2)}{e^2 N_e \omega_{ce} (AC \sin I - E v_e \omega_{ce} \cos^2 I \cos D \sin D)} \\ &- i \frac{m_e(E^2 v_e^2 + F^2 \omega^2)}{e^2 N_e \omega \omega_{ce} (2A v_e \sin I - F \omega_{ce} \cos^2 I \cos D \sin D)} \end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned} Z_{xz} &= -\frac{m_e(E^2 v_e^2 + F^2 \omega^2)}{e^2 N_e \omega_{ce} (AC \cos D + E v_e \omega_{ce} \sin I \sin D) \cos I} \\ &- i \frac{m_e(E^2 v_e^2 + F^2 \omega^2)}{e^2 N_e \omega \omega_{ce} (2A v_e \cos D + F \omega_{ce} \sin I \sin D) \cos I} \end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned} Z_{yx} &= \frac{m_e(E^2 v_e^2 + F^2 \omega^2)}{e^2 N_e \omega_{ce} (AC \sin I + E v_e \omega_{ce} \cos^2 I \cos D \sin D)} \\ &+ i \frac{m_e(E^2 v_e^2 + F^2 \omega^2)}{e^2 N_e \omega \omega_{ce} (2A v_e \sin I + F \omega_{ce} \cos^2 I \cos D \sin D)} \end{aligned} \tag{18}$$

$$\begin{aligned} Z_{yy} &= \frac{m_e(E^2 v_e^2 + F^2 \omega^2)}{e^2 N_e v_e (AB + \omega_{ce}^2 \cos^2 I \cos^2 D)} \\ &+ i \frac{m_e(E^2 v_e^2 + F^2 \omega^2)}{e^2 N_e \omega (AD + F \omega_{ce}^2 \cos^2 I \cos^2 D)} \end{aligned} \tag{19}$$

$$\begin{aligned} Z_{yz} &= \frac{m_e(E^2 v_e^2 + F^2 \omega^2)}{e^2 N_e \omega_{ce} (AC \sin D - E v_e \omega_{ce} \sin I \cos D) \cos I} \\ &+ i \frac{m_e(E^2 v_e^2 + F^2 \omega^2)}{e^2 N_e \omega \omega_{ce} (2A v_e \sin D - F \omega_{ce} \sin I \cos D) \cos I} \end{aligned} \tag{20}$$

$$\begin{aligned} Z_{zx} &= \frac{m_e(E^2 v_e^2 + F^2 \omega^2)}{e^2 N_e \omega_{ce} (AC \cos D - E v_e \omega_{ce} \sin I \sin D) \cos I} \\ &+ i \frac{m_e(E^2 v_e^2 + F^2 \omega^2)}{e^2 N_e \omega \omega_{ce} (2A v_e \cos D - F \omega_{ce} \sin I \sin D) \cos I} \end{aligned} \tag{21}$$

$$\begin{aligned} Z_{zy} &= -\frac{m_e(E^2 v_e^2 + F^2 \omega^2)}{e^2 N_e \omega_{ce} (AC \sin D + E v_e \omega_{ce} \sin I \cos D) \cos I} \\ &- i \frac{m_e(E^2 v_e^2 + F^2 \omega^2)}{e^2 N_e \omega \omega_{ce} (2A v_e \sin D + F \omega_{ce} \sin I \cos D) \cos I} \end{aligned} \tag{22}$$

$$\begin{aligned} Z_{zz} &= \frac{m_e(E^2 v_e^2 + F^2 \omega^2)}{e^2 N_e v_e (AB + E \omega_{ce}^2 \sin^2 I)} \\ &+ i \frac{m_e(E^2 v_e^2 + F^2 \omega^2)}{e^2 N_e \omega (AD + F \omega_{ce}^2 \sin^2 I)} \end{aligned} \tag{23}$$

In the next section, the numerical analysis and the results are given for two equinoxes and solstices periods.

3. NUMERICAL ANALYSIS AND RESULTS

In this study, the impedances of the ionospheric plasma ($Z = R^2 + X^2$) are calculated using Equation (15)-(23) for 38.7° N and 39.2° E, I=55.6°, D=3° and 12.00 LT. Two geomagnetic activity conditions are chosen to define quiet ($0 \leq Kp \leq 2^+$) and disturbed ($Kp > 2^+$) periods for the equinoxes March and September and solstices June and December. The ionospheric parameters used for the calculation are obtained by using the IRI-95 model.

Table 1 gives the pattern that represents the values of the impedance obtained for 16 MHz for geomagnetically quiet and disturbed periods in equinoxes and solstices at $h_m F2$ where the electron density distribution has maximum values. The diagonal components Z_{xx} , Z_{yy} and Z_{zz} values are greater than the impedance values in Table 1. So these components of the impedance are considered in the numerical analysis.

Figure 1 shows the seasonal variations of impedances Z_{xx} , Z_{yy} and Z_{zz} depending on wave frequency for the quiet periods. The obtained values are magnitudes of the impedance where the real and the imaginary parts of the impedance are taken into account. These values are the mean values obtained for 120 km and 500 km in the ionospheric plasma. All three impedances in Figure 2 increase parabolically with frequency and they have maximas in September and minimas in December.

Similarly Figure 2 shows seasonal variations of impedances Z_{xx} , Z_{yy} and Z_{zz} depending on the wave frequency for the disturbed periods. Details of the calculations are the same as those for periods. Figure 3 shows the variations of the mean magnitudes of the diagonal impedances. It is seen that the graphs are almost similar. The mean impedances for quiet periods are larger during the March equinox and the June solstice. Similarly the mean values for disturbed periods are larger during the September equinox and the December solstice.

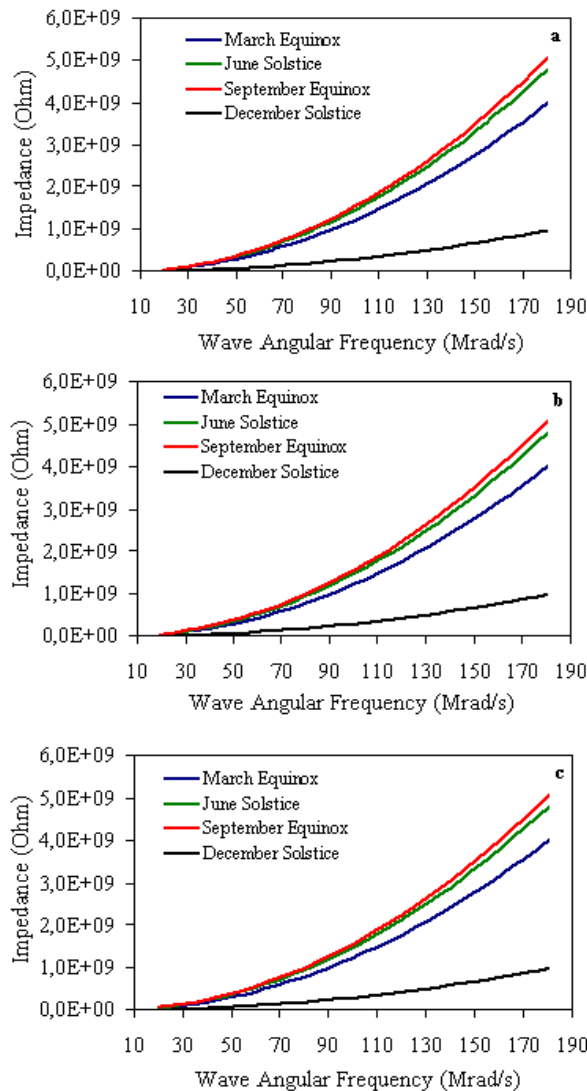


Figure 1. Seasonal variations of the average impedance of the ionospheric plasma depending on the frequency in the quiet periods ($Kp \leq 2^+$) for a) Z_{xx} b) Z_{yy} c) Z_{zz} .

Table 1. Values of the impedance calculated for 100 mrad/s (~16 mhz) in solstices and equinoxes for quiet and disturbed days periods at hmf2.

Impedances (Ohm)	Days							
	$K_p \leq 2^+$				$K_p > 2^+$			
	March Equinox	June Solstice	September Equinox	December Solstice	March Equinox	June Solstice	September Equinox	December Solstice
$Z_{xx} \times 10^9$	1.21	1.46	1.54	2.94	1.91	7.03	2.09	3.23
$Z_{xy} \times 10^7$	6.49	6.1	7.47	2.44	2.25	3.95	9.08	2.58
$Z_{xz} \times 10^7$	4.53	4.31	5.21	1.71	1.59	2.76	6.33	1.81
$Z_{yx} \times 10^7$	6.57	6.24	7.55	2.48	2.31	4.00	9.17	2.62
$Z_{yy} \times 10^9$	1.22	1.46	1.55	0.29	0.19	0.70	2.10	0.32
$Z_{yz} \times 10^6$	3.43	3.26	3.94	1.29	1.20	2.09	4.79	1.36
$Z_{zx} \times 10^7$	4.51	4.29	5.18	1.69	1.57	2.74	6.30	1.79
$Z_{zy} \times 10^6$	3.43	3.26	3.94	1.29	1.20	2.09	4.79	1.36
$Z_{zz} \times 10^9$	1.23	1.47	1.55	0.29	0.19	0.78	2.12	0.32

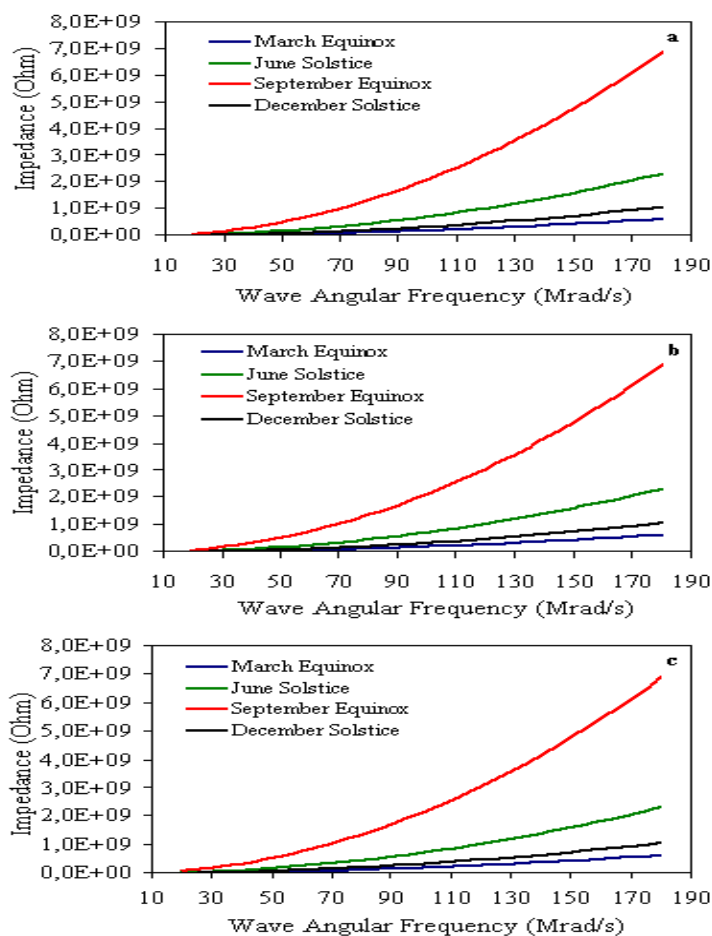


Figure 2. Seasonal variations of the average impedance of the ionospheric plasma depending on the frequency in the disturbed periods ($K_p > 2^+$) for a) Z_{xx} b) Z_{yy} c) Z_{zz} .

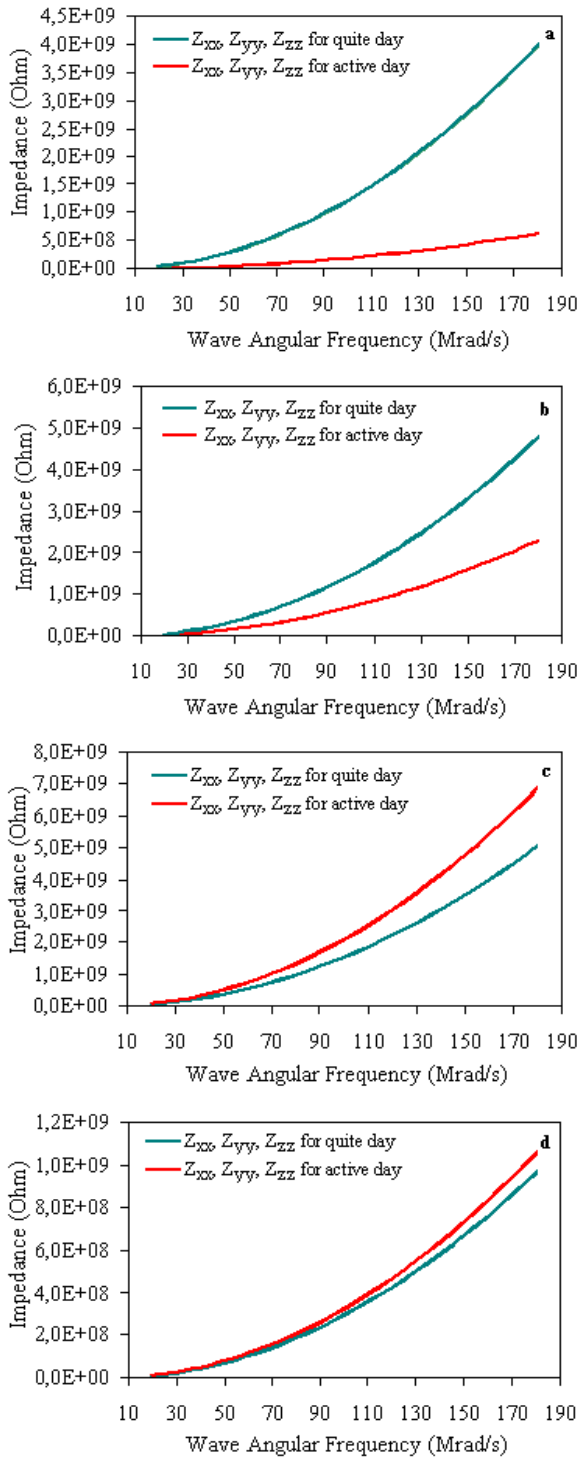


Figure 3. Variations of the average impedance of the ionospheric plasma with the wave angular frequency for quiet and disturbed days: **a)** March equinox, **b)** June solstice, **c)** September equinox, **d)** December solstice.

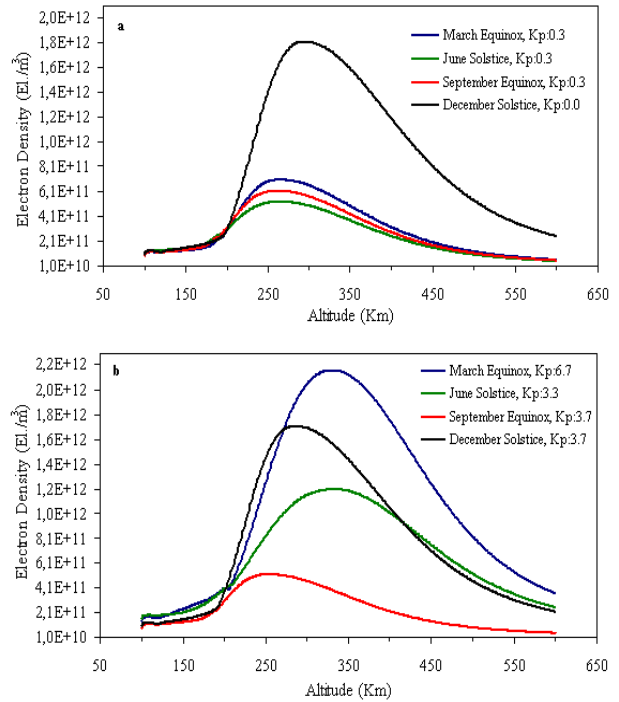


Figure 4. Altitude distribution of electron density in different seasons **a)** for quite days ($0 \leq Kp \leq 2^+$) **b)** for active days ($Kp > 2^+$).

In this work, the empedance of the ionospheric plasma are computed for December (winter solstice), March (spring equinox), June (summer solstice), September (autumn equinox) months. In the future studies, the analysis will be done over more months and seasons.

4. CONCLUSION

In this study, the mean values of magnitudes of the impedances of the ionospheric plasma are calculated for different seasons and geomagnetic activity periods. It is observed that the diagonal components of the impedance tensor are greater by 102 than the other components. Because the conductivity and dielectric constant exhibited by the medium vary depending on the angular frequency of the wave, the impedance also varies with the angular frequency. Impedance reaches its minimum values when the electron density increases. Similarly, impedance reaches its maxima when electron density is small. Thus impedance decreases as electron density increases in geomagnetically disturbed days periods during the solstices and equinoxes. It is seen that the ionospheric plasma can be characterized as reactive and the ionosphere has a structure capable of behaving as a dielectric in the chosen coordinate. The inductive property of the ionosphere is dominant under related conditions. The radial (z) component of the strength of the magnetic field is more effective for determining the propagation coefficient of the electromagnetic wave since diagonal components of the impedance are larger than the off-diagonals. The increasing of the diagonal

components depending on the declination angle can be observed from the analytic expressions.

REFERENCES

- [1] Zhang, D.Y. "New method of calculating the transmission and reflection coefficients and fields in a magnetized plasma layer", *Radio Science*, 26(6), 1415-1418, (1991).
- [2] Lundborg, B., Thide, B. "Standing wave pattern of HF radio waves in the ionospheric reflection regions 2. applications," *Radio Science*, 21: 486-500, (1986).
- [3] Ratcliffe J.A. "The Magneto-ionic Theory and Its Applications to the Ionosphere", *Cambridge University Press*, (1959).
- [4] Rishbeth, H. Garriott, O.K. "Introduction to Ionospheric Physics" *Academic Press*, (1969).
- [5] Budden, K.G. "The Propagation of Radio Waves", *Cambridge University Press*, (1988).
- [6] Aydogdu, M. Ozcan, O. "Effects of magnetic declination on refractive index and wave polarization coefficients of electromagnetic waves in mid-latitude ionosphere", *Indian Journal of Radio and Space Physics*, 25: 263-270, (1996).
- [7] Hagfors, T. "Electromagnetic wave propagation in a field-aligned-striated cold magnetoplasma with application to the ionosphere", *Journal of Atmospheric Solar-Terrestrial Physics*, 46(3): 211-216, (1984).
- [8] Al'pert Ya.L. "The direction of the group velocity of electromagnetic waves in a multicomponent magneto-active plasma in the frequency range $0 < \omega < \infty$ ", *Journal of Atmospheric Solar-Terrestrial Physics*, 42(3): 205-216, (1980).
- [9] Aydogdu, M., Yesil, A., Guzel E. "The group refractive indices of HF waves in the ionosphere and departure from the magnitude without collisions", *Journal of Atmospheric Solar-Terrestrial Physics* 66(5): 343-348, (2004).
- [10] Atac, T., Ozguc, A., Pektas, R. "The variability of foF2 in different phases of solar cycle 23", *Journal of Atmospheric Solar-Terrestrial Physics* 71(5): 583-588, (2009).
- [11] Aydogdu, M., Guzel, E., Yesil, A., Ozcan, O. Canyilmaz, M. "Comparison of the calculated absorption and the measured field strength HF waves reflected from the ionosphere", *Il Nuovo Cimento C*, 30(3): 243-253, (2007).
- [12] Inan, U.S., Inan, A.S. "Electromagnetic Waves", *Prentice Hall*, (2000).
- [13] Sturrock, P.A. "Plasma Physics", *Cambridge University Press*, (1996).
- [14] Orfanidis, S.J. "Electromagnetic Waves and Antennas", *Rutgers University Press*, (2004).
- [15] Baker, W.G. Martyn, D.F. "Electric currents in the ionosphere. I. The conductivity", *Philosophical Transactions of the Royal Society A, Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 246(913): 281-294, (1953).
- [16] Yesil, A. Unal, I. "Behaviour of Electromagnetic Waves in Different Media and Structures", *InTech*, (2011).
- [17] Aydogdu, M., Ozcan, O. "The possible effects of the magnetic declination on the wave polarization coefficients at the cutoff point", *Progress in Electromagnetics Research-PIER*, 30: 179-190, (2001).
- [18] Blioh, P.V., Nikolaenko A.P., Pilippov Yu.F. "Global'nye Èlektromagnitnye Rezonansy V Polosti Zemlâ-Ionosfera", *Naukova Dumka*, (1977).
- [19] Whitten R.C., Poppoff, I.G. "Fundamentals of Aeronomy", *John Wiley & Sons Inc.*, (1971).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



Bir döküm atölyesindeki çalışma duruşlarının dijital insan modelleme tabanlı REBA yöntemi ile ergonomik analizi

Ergonomic analysis of working postures in a foundry workshop by digital human modeling based reba method

Yazar(lar) (Author(s)): Fulya ERDEMİR¹, Cengiz ELDEM²

ORCID¹: 0000-0002-1383-6857

ORCID²: 0000-0001-6652-7452

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Erdemir F., Eldem C., “Bir döküm atölyesindeki çalışma duruşlarının dijital insan modelleme tabanlı REBA yöntemi ile ergonomik analizi”, *Politeknik Dergisi*, 23(2): 435-443, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.534877

Bir Döküm Atölyesindeki Çalışma Duruşlarının Dijital İnsan Modelleme Tabanlı REBA Yöntemi ile Ergonomik Analizi

Araştırma Makalesi / Research Article

Fulya ERDEMİR^{1*}, Cengiz ELDEM²

¹Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye

²Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye

(Geliş/Received : 03.03.2019 ; Kabul/Accepted : 27.05.2019)

ÖZ

Üretim miktarı ve üretim kalitesi çalışanların performans düzeyleri ile doğrudan ilişkilidir. Uygun olmayan çalışma ortamları ve çalışma duruşları çalışan performansında dikkate değer miktarda düşüslere sebep olmaktadır. Bununla birlikte uygun olmayan çalışma duruşları beraberlerinde kas ve iskelet sistemi rahatsızlıklarını getirmektedir. Ergonomi bilimi oluşan bu etkilerin risklerini çeşitli yöntemlerle değerlendirmekte ve çözümler sunmaktadır. Bu çalışma kapsamında CATIA V5 yazılımında bulunan Dijital İnsan Modelleme (DİM) simülasyonu kullanılarak bir döküm fabrikasındaki pota hazırlama sürecinin duruş ve pozisyon analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen duruş ve pozisyonların açı değerleri kullanılarak Hızlı Tüm Vücut Değerlendirme (REBA) metoduyla oluşabilecek kas ve iskelet sistemi rahatsızlıkları riski değerlendirilmiştir. Sonuçta gerekli iyileştirmeler yapılarak çözüm önerileri sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Ergonomi, Dijital İnsan Modelleme (DİM), REBA yöntemi, CATIA.

Ergonomic Analysis of Working Postures in a Foundry Workshop by Digital Human Modeling Based REBA Method

ABSTRACT

Production amount and production quality are directly related to employees' performance levels. Improper working environments and working postures lead to significant decreases in employee performance. At the same time improper working postures may cause musculoskeletal disorders. Ergonomics science evaluates the risks of these effects in various ways and provides solutions. In this study, the posture and position analysis of the crucible preparation process in a foundry factory was performed by using digital human modeling (DHM) and simulation in CATIA V5 software. Using the obtained posture and position angle values, the risk of musculoskeletal system disorders which can be formed by Rapid Entire Body Assessment (REBA) method was evaluated. As a result, necessary improvements were made and solution suggestions were presented.

Keywords: Ergonomics, Digital Human Modeling (DHM), REBA method, CATIA.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Teknoloji de meydana gelen gelişmeler ile birlikte iş sağlığı ve güvenliği konuları daha ayrıntılı bir biçimde ele alınmaya başlanmıştır. Dünyadaki iş gücü ve iş ile ilgili problemler incelendiğinde iş ile ilgili ölümlerde iş kazalarının yanı sıra meslek hastalıkları ile meydana gelen ölümlerin azımsanmayacak boyutlarda olduğu görülmektedir. Meslek hastalıkları 5510 sayılı Sosyal Güvenlik ve Genel Sağlık Sigortası Kanununun 14. maddesinde "Sigortalının çalıştığı işin niteliğine göre tekrarlanan bir sebeple ya da işin yürütüm şartları yüzünden uğradığı geçici veya sürekli hastalık, sakatlık veya ruhi arıza halleridir" olarak tanımlanmaktadır [1]. Neredeyse tamamı önlenilebilir meslek hastalıklarının, fiziksel, kimyasal, ve biyolojik risk etmenleri, tozlar ve

ergonomik risk etmenleri şeklinde sınıflandırmak mümkündür [2]. Ergonomik risk etmenleri; uzun çalışma süreleri, çalışma duruş bozuklukları, zorlayıcı iş akışı ve ergonomik olmayan ekipman kullanılması ile ortaya çıkmaktadır. Ergonomi bilimi, işin insanın antropometrik ölçülerine, bedensel gücüne ve kişisel özelliklerine uygun olarak tasarlanmasını ve bunların yanında kullanılan ekipmanların insan yeteneklerine uygun hale getirilmesini sağlayarak yapılan işte insanın daha verimli ve sağlıklı olmasını hedeflemektedir [3]. Vücudun, başın, gövdenin, kol ve bacakların işin özelliklerine göre konumlanması olarak tanımlanan çalışma duruşu, ergonomik açıdan ilgilenilen önemli konulardan biridir [4]. Günde 2 saatten fazla belli bir süreyle ya eğilerek çalışmak, ayaklara destek vermeden oturmak gibi uygun olmayan duruşlar, kas ve eklemlere baskı yaparak kas ve iskelet sistemini zorlar. İş yerinde görülen ergonomik rahatsızlıkların başında kas ve iskelet sistemi

*Sorumlu Yazar (Corresponding author)
e-posta : erdemirfulya@gmail.com

rahatsızlıkları gelmektedir [5]. Bu rahatsızlıklar işin fiziksel şartlarının çalışanların fiziksel şartları ile uyumlu olmadığı zamanlar ortaya çıkmaktadır. Karşılaşılan bu rahatsızlıkları önlemek ve iş yerinde verimliliği artırmak için birçok metot kullanılmaktadır. Vücudun tüm kısımlarının analiz edilmesine imkân sağlayan REBA (Rapid Entire Body Assessment) yöntemi bu metotlardan biridir. REBA yöntemi, ergonomik iş yükünün bir parçası olarak çalışma pozisyonlarıyla ilişkili risklerin ölçülmesini ve değerlendirilmesini kolaylaştırmak için kullanılan yaygın bir araçtır. İ. Şahin ve arkadaşları, çalışmalarında otomatik kollu bariyerlerin montajı esnasındaki duruş analizini CATIA Dijital İnsan Modelleme aracını kullanarak gerçekleştirmiştir. Elde edilen verileri REBA metodu ile birlikte kullanarak bariyer kasası içerisinde bulunan civataların sıkılması sırasında ergonomik riskin çok yüksek olduğu sonucuna ulaşmıştır. Montaj riskinde meydana gelen probleme çözümler önermişlerdir [6]. H. Atıcı ve arkadaşları, otomotiv sektöründe kablo üretimi yapan bir işletmede uygun olmayan çalışma pozisyonlarının iyileştirilmesi amacıyla REBA analizi gerçekleştirmişlerdir. Yapılan analiz sonucu kablo demetleme konveyör hattında çalışan bireylerin boylarının birbirlerinden farklı olduğunu fakat montaj masa yüksekliklerinin sabit olması sebebiyle işlem sırasında çalışanlarda iskelet ve kas sistemlerinde zorlanmalar meydana geldiğini gözlemlemiştir. Yapılan çalışma ile yeni bir hat tasarımı önerilerek probleme çözüm üretilmeye çalışılmıştır [7]. H. Sağıroğlu ve arkadaşları, çalışmalarında bir kompresör fabrikasında bulunan üretim hattındaki 10 adet iş istasyonunu incelemiş ve REBA yöntemi ile iş istasyonlarında ergonomik açıdan risk analizi gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda, krank sepetinin yerinin ve açısının değiştirilmesi, operatörün koltuk yüksekliğinin ayarlanması, fazla yüklerin olduğu istasyonlara taşınması amacı ile vakumlu pergel vinç alınması ve pozisyonlanabilir kaldırma aracının alınması gibi parametrelerde iyileştirme yapılarak ergonomik riskler azaltılmıştır [8]. S. Koç ve Ö. M. Testik, mobilya sektöründe yaşanan kas ve iskelet sistemi risklerini REBA, OWAS (Ovako Çalışma Duruş Değerlendirme Sistemi), QEC (Hızlı Maruziyet Değerlendirme) ve ManTRA (Elle Yapılan Görevler için Risk Değerlendirme Aracı) olmak üzere dört yöntem kullanarak analiz etmiş ve iyileştirmek için önerilerde bulunmuşur [9]. E. Atasoy Mert, tez çalışmasında PLİBEL (kas-iskelet sistemi stres faktörlerinin zararlı etkileri tanımlama yöntemi), OWAS, REBA, QEC ve ManTRA ergonomik risk yöntemlerini birbiriyle karşılaştırmış ve bir çanta imalat atölyesinde meydana gelen risklere çözüm getirmeye çalışmıştır [10]. Kütük hasadı, geleneksel ormancılık çalışmaları içerisinde en zor fiziksel iş türlerinden biri olarak kabul edilir. K. Enez ve S. S. Nalbantoğlu, Ankara ilinde ormancılıkta çalışan 58 hasat işçisinin kütük açma, kayma ve yükleme gibi farklı özelliklere sahip ormancılıkta yapılan çalışmalar sırasında gerçekleşen duruş pozisyonlarını OWAS ve REBA metotları ile değerlendirmiştir. İş aşamalarının risk kategorilerindeki farklılığı REBA'ya göre

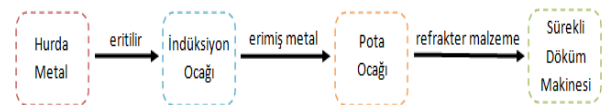
istatistiksel olarak anlamlıyken, OWAS kütük kaydına ve kaymaya göre aynı risk kategorisine girdiği görülmüştür [11].



Şekil 1. Pota ocağı (Ladle furnace) [12]

Yapılan çalışmalar incelendiğinde genel olarak REBA yönteminin diğer ergonomik analiz yöntemleri ile kıyaslandığı ve nispeten endüstriyel problemlere uygulandığı görülmektedir. Endüstriyel problemlere uygulamada CATIA V5 dijital insan modelleme aracı ile birleştirilerek yapılan çalışmaların az ve eksik olduğu sonucuna varılmıştır. Endüstriyel bir problem ele alınarak ergonomik açıdan analizi yapılmış ve probleme çözüm önerisi sunulmuştur.

Çalışma kapsamında bir metal döküm fabrikasında döküm prosesinde meydana gelen çalışma duruş problemi analiz edilmektedir. Bu bağlamda metal döküm prosesinden kısaca bahsedecek olursak, proses kalıbın hazırlanmasıyla başlamaktadır. Gerekli olan malzemenin tersi olacak biçimde şekillendirilerek hazırlanan kalıpların yapımında, refrakter malzemeler kullanılmaktadır. Refrakter malzeme, metal bir fırında eriyene kadar ısıtılmakta ve eriyen metal potalardan kalıplara dökülmektedir. Ergimiş metal oyuğun şeklini alıncaya kadar oyuğun içinde kalan metal malzemenin, kalıptan sökümü ile işlem tamamlanmaktadır [13]. Çelik, dökme demir, alüminyum gibi malzemelerden dökülerek parça üretmek için, bu metallerin eritilmesi ve önceden hazırlanan kalıplara dökülmesi gerekir. Ergitme işlemi yapabilmek için döküm ocaklarına ihtiyaç vardır. Bu ocak çeşitlerinden biri de Şekil 1 de gösterilen ergitme işleminin yapıldığı pota ocaklarıdır. Pota ocakları, içi ateşe dayanıklı tuğla ile örülmüş ve tuğla üzerleri özel harçla kaplanmış silindirik yapıdaki elemanlardır [14]. Fabrikadaki döküm sürecinde hurda metal, indüksiyon ocağında eritilip pota ocaklarına gitmektedir. Pota ocağından çıkan refrakter malzemenin sürekli döküm makinesine gitmesi ile işlem tamamlanmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. Döküm iş akış diyagramı (Casting flow-process diagram)

Erimiş metal potaya dökülmeden önce pota hazırlama sürecinden geçmektedir. Burada pota alt kısmında bulunan ve çoğunlukla Helyum soygazı kullanılarak pota içinde gaz sirkülasyonu oluşturup hem erimiş metalin karışması hem de her tarafın eşit sıcaklığa gelmesini sağlayan gaz tapası mevcuttur (Şekil 3).



Şekil 3. Gaz tapası (Gas connection)

Hazırlık aşamasında bu gaz tapasının etrafındaki refrakter malzeme kırılarak işlemin tekrarlanması sağlanmaktadır. Yapılan çalışma ile Şekil 4 de görülen işlemi gerçekleştiren işçinin duruş pozisyonunun risk değerlendirmesi ve analizi gerçekleştirilmektedir. Kas iskelet sistemi rahatsızlıklarının oluşmasında ergonomik açıdan iki etmen bulunur. Bunlardan biri işin, insana uygun olmadığı durumlardır, bir diğeri ise insanın işe uygun olmadığı durumlardır.

Çalışma kapsamında işin insana uygun olmadığı ergonomik problem ele alınmaktadır. CATIA V5 yazılımında bulunan Dijital İnsan Modelleme aracı ile çalışan elemanın duruş pozisyonu modellenmiştir. Model ile çalışma pozisyon açıları elde edilerek REBA yönteminde kullanılmıştır. Sonuç kısmında elde edilen veriler değerlendirilmiştir.

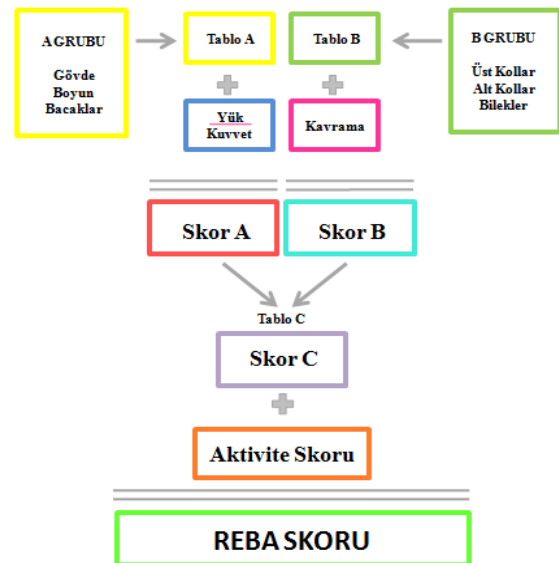


Şekil 4. Pota hazırlama işlemi (Ladle preparation)

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

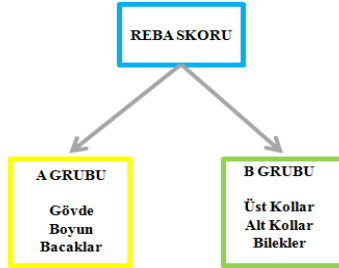
Bu çalışma kapsamında metal döküm endüstrisinde bir fabrikada karşılaşılan ergonomik bir problem ele alınmıştır. REBA yöntemi kullanılarak ergonomik riskler değerlendirilmiş ve çözüm üretilmeye çalışılmıştır. REBA yöntemi uygulanırken CATIA V5 yazılımı kullanılarak çalışma koşulları simüle edilmiş ve çalışanın duruş pozisyon açıları elde edilmiştir.

Çalışma duruşlarının analizinde REBA, RULA, OWAS, vb. yöntemler kullanılarak, yapılan işlerde meydana gelen kas ve iskelet sistemi risk değerlendirmeleri gerçekleştirilir. Bu yöntemlerin bir kısmı oldukça detaylı bir analiz imkanı sunmasına rağmen yalnızca bir veya birkaç iş kolu için uygundur [15]. Diğer bir kısmı çok fazla sayıda iş koluna uygulanabilmesine rağmen detaylı bir analiz imkanı sunmaz. Çalışma duruş analizi yapan ve bu dezavantajlara sahip olmayan REBA (Rapid Entire Body Assessment) Yöntemi, S. Hignett ve L. McAtamney tarafından 1995 yılında geliştirilmiştir [16]. Yöntem, çalışma duruşlarını sayısal olarak elde etmeyi sağlamaktadır. Çalışan vücudunu A ve B grubu olarak ikiye ayırmaktadır. Çalışan eklem hareketlerine bağlı açıları 1 ile 15 arasında sayısal verilere dönüştürerek ergonomik açıdan risk değerlendirmelerinde bulunmaktadır. Şekil 5 de şematize edilen REBA yöntemi, özellikle sağlık ve diğer hizmet sektörlerinde bulunan öngörülemez çalışma vücut duruşları tiplerine duyarlı olması amacıyla tasarlanmış bir uygulama yöntemidir [10]. REBA yöntemi, bir çalışma duruşu esnasında gövdede, boyunda, bacaklarda, üst kollarda, alt kollarda ve bileklerde ortaya çıkan fleksiyon (eklem bükme hareketi) ve ekstansiyonlara (eklem germe hareketi) bağlı çalışanın maruz kaldığı yüklerle karşılık olarak 1 ile 15 arasında değişen bir skor belirlemektedir. Bu sayede analiz edilmek istenen duruş ve hareket sayısal olarak elde edilmiş olur.



Şekil 5. REBA yöntemi akış şeması (REBA method flow chart)

Bu yöntemle göre, bir çalışma duruşunun REBA skoru belirlenirken öncelikle vücut kısımları, A ve B Grubu olmak üzere ikiye ayrılır (Şekil 6). A grubunu oluşturan uzuvlar gövde, boyun ve bacaklardır. B grubu ise üst kollar, alt kollar ve bileklerden meydana gelmektedir. REBA metoduna göre sağ ve sol uzuvlar aynı zaman için değerlendirilmektedir.



Şekil 6. REBA yöntemi skor belirleme (REBA method score determination)

Çalışan duruş pozisyonuna göre gövde, boyun ve bacakların ayrı skorları belirlenmektedir (Şekil 7). Çizelge 1'de gösterilen A tablosu yardımıyla bu skorların kombinasyonundan oluşan bir skor ile duruş açıları sayısal bir biçime dönüştürülmektedir.

Çizelge 1. REBA yöntemi A tablosu (REBA method A table)

TABLO A	Boyun												
	1				2				3				
	Bacaklar				Bacaklar				Bacaklar				
Gövde	1	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
	2	2	3	4	5	3	4	5	6	4	5	6	7
	3	2	4	5	6	4	5	6	7	5	6	7	8
	4	3	5	6	7	5	6	7	8	6	7	8	9
	5	4	6	7	8	6	7	8	9	7	8	9	9

Gövde

Hareket	Skor	Skor Değişimi
Dik	1	
0° - 20° Fleksiyon 0° - 20° Ekstansiyon	2	Yana esneme veya dönme varsa +1
20° - 60° Fleksiyon > 20° Ekstansiyon	3	
> 60° Fleksiyon	4	



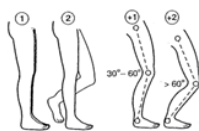
Boyun

Hareket	Skor	Skor Değişimi
0° - 20° Fleksiyon	1	
> 20° Fleksiyon Veya Ekstansiyon	2	Yana esneme veya dönme varsa +1



Bacaklar

Hareket	Skor	Skor Değişimi
Bilateral (iki taraflı) ağırlık taşıma, yürüme veya oturma	1	Diz(ler)de 30°-60° arası fleksiyon +1
Unilateral (tek taraflı) ağırlık taşıma veya sabit olmayan duruş	2	Diz(ler)de >60° fleksiyon (oturma hariç) +2



Şekil 7. A grubu skor belirleme şablonu (Group A score determination template)

A grubuna ait sayısal dönüşümler elde edildikten sonra Yük/Kuvvet skoru eklenerek bir A Skoru elde edilmektedir. Çizelge 2 ile Yük/Kuvvet tablosu sunulmuştur.

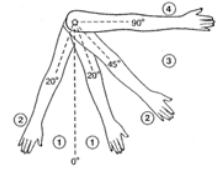
Çizelge 2. Yük/Kuvvet skoru tablosu (Load / Force score table)

Yük/Kuvvet	Skor
<5 kg	0
5-10 kg	1
> 10 kg	2
Ani ve ya hızlı kuvvet artışı	+1

A grubu sayısal değerleri elde edildikten sonra B grubunda bulunan uzuvlar değerlendirilir. Şekil 8 de gösterildiği gibi duruş pozisyonuna göre üst kol, alt kol ve bileklerin ayrı skorları belirlenmektedir.

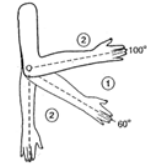
Üst Kollar

Hareket	Skor	Skor Değişimi
20° Fleksiyon - 20° Ekstansiyon	1	Kolda: - Abdüksiyon varsa - Rotasyon varsa +1
20° - 45° Fleksiyon > 20° Ekstansiyon	2	
45° - 90° Fleksiyon	3	Omuz yüklemişse +1
> 90° Fleksiyon	4	Kolun duruşunda yerakimi desteği etkisiyle -1



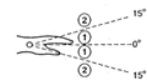
Alt Kollar

Hareket	Skor
60° - 100° Fleksiyon	1
< 60° Fleksiyon veya > 100° Fleksiyon	2



Bilekler

Hareket	Skor	Skor Değişimi
0° - 15° Fleksiyon veya Ekstansiyon	1	Bileklerde yana esneme veya dönme varsa +1
> 15° Fleksiyon veya Ekstansiyon	2	



Şekil 8. B grubu skor belirleme şablonu (Group B score determination template)

Çalışan bireyin duruş açısına ait skorlar Şekil 8 kullanılarak elde edildikten sonra Çizelge 3 kullanılarak B tablosu içerisinde incelenmektedir. Belirlenen kol ve bilek açıları skor değerleri tabloda birleştirilerek B grubu skor değerinin ilk aşaması gerçekleştirilmektedir.

Çizelge 3. REBA yöntemi B tablosu (REBA method B table)

TABLO B		Alt Kol					
		1			2		
		Bilek			Bilek		
Üst Kol	1	1	2	2	1	2	3
	2	1	2	3	2	3	4
	3	3	4	5	4	5	5
	4	4	5	5	5	6	7
	5	6	7	8	7	8	8
	6	7	8	8	8	9	9

İkinci aşama olarak Çizelge 4 de sunulan kavrama skor tablosundaki skor değeri de eklenerek B grubu skoru belirlenmektedir.

Çizelge 4. Kavrama skoru tablosu (Grip score table)

Derece	Açıklama	Skor
İyi	İyi bir tutma kolu ve orta şiddette kavrama gücü	0
Uygun	El tutuşu uygun fakat ideal değil veya vücudun başka bir bölgesi ile kavrama uygun	1
Kötü	El tutuşu uygun olmamasına rağmen mümkün	2
Uygun değil	Zor ve güvenli olmayan tutuş, tutma kolu yok Vücudun başka bir bölgesi kullanılarak tutuş uygun değil	3

Şekil 5 de sunulan REBA akış şemasına göre elde edilen A ve B skorları Çizelge 5 de gösterilen C tablosu içerisinde birleştirilmektedir. Böylece yöntemde bulunan C skoru elde edilmektedir.

Çizelge 5. REBA yöntemi C tablosu (REBA method C table)

TABLO C		B SKORU											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A SKORU	1	1	1	1	2	3	3	4	5	6	7	7	7
	2	1	2	2	3	4	4	5	6	6	7	7	8
	3	2	3	3	3	4	5	6	7	7	8	8	8
	4	3	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9
	5	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9	9
	6	6	6	6	7	8	8	9	9	10	10	10	10
	7	7	7	7	8	9	9	9	10	10	11	11	11
	8	8	8	8	9	10	10	10	10	10	11	11	11
	9	9	9	9	10	10	10	11	11	11	12	12	12
	10	10	10	10	11	11	11	11	12	12	12	12	12
	11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12
	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

Yapılan iş için uzuv açıları, yük/kuvvet oranları ve kavrama durumları çalışan birey için ayrıntılı incelenmiştir. Yapılan işin hareketli ya da sabit bir iş olduğu hakkında bilgi eksikliği mevcuttur. Elde edilen C skoruna çalışan bireyin aktivite skoru eklenerek bu eksiklik giderilmektedir (Çizelge 6).

Çizelge 6. Aktivite skoru tablosu (Activity score table)

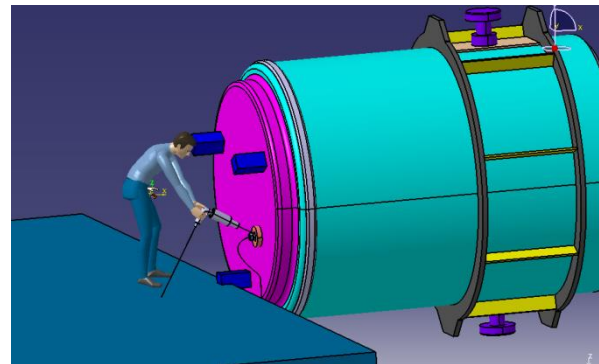
AKTİVİTE	SKOR
Bir veya daha fazla vücut bölgesi sabit (ör: 1 dakikadan uzun süre tutma)	+1
Kısa aralıklarla tekrar eden işler (ör: 1 dakikada 4'ten fazla tekrar eden iş) (yürüme hariç)	+1
Yapılan iş duruşta hızlı ve büyük değişikliğe neden oluyorsa veya sabit olmayan zeminde çalışılıyorsa	+1

C skoruna aktivite skorunun eklenmesi ile bir REBA skoru elde edilmektedir. Çizelge 7 ile gösterilen REBA risk derecelendirme tablosu kullanılarak elde edilen skor değerlendirilmektedir. REBA risk derecelendirmesi 0-4 arası olmak üzere 5 dereceden oluşmaktadır. Dereceler 1-15 sayısal değerleri ile ayrılmıştır. Elde edilen REBA skoru ile çalışma koşullarının ergonomik risk değerlendirilmesi yapılmaktadır.

Çizelge 7. REBA skoru tablosu (REBA score table)

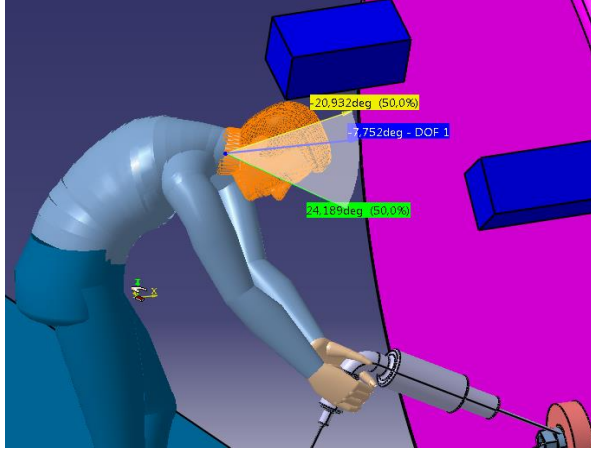
REBA Risk Derecelendirmesi			
Derece	REBA Skoru	Risk Seviyesi	Önlem
0	1	İhmal Edilebilir	Gerekli Değil
1	2-3	Düşük	Gerekli Olabilir
2	4-7	Orta	Gerekli
3	8-10	Yüksek	Kısa Zaman İçinde Gerekli
4	11-15	Çok Yüksek	Hemen Gerekli

Döküm endüstrisinde çalışmakta olan bir birey için Şekil 4 de pota hazırlama işlemi sırasında bulunduğu çalışma pozisyonu gösterilmiştir. Çalışan bu bireye ait çalışma duruşu CATIA V5 yazılımı içerisinde bulunan Dijital İnsan Modelleme aracı kullanılarak modellenmiştir. Öncelikle çalışılan ortamda bulunan pota, hitli ve platform gerçeğe uygun olarak tasarlanmıştır. Tasarımı yapılan elemanlara manken modeli de eklenerek çalışma duruşu simüle edilmiştir. Oluşturulan çalışma koşulları Şekil 9 ile sunulmuştur.



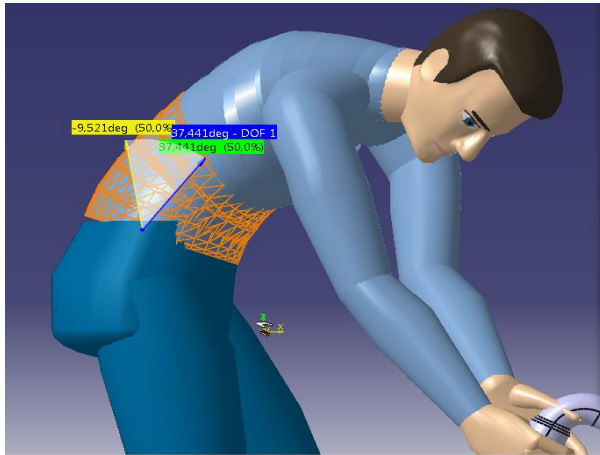
Şekil 9. CATIA V5 programında çizilen mankenin duruşu (The position of the mannequin drawn in CATIA V5 program)

Dijital insan modelleme aracı ile oluşturulan manken kullanılarak çalışan işçinin matematiksel vücut duruş değerleri belirlenmiştir. REBA yöntemine göre A ve B grubu değerleri belirlenmiştir. A grubunda bulunan boyun, gövde ve bacaklar için oluşturulan modelin fleksiyon ve ekstansiyon değerlerine göre puanlama yapılmıştır. Öncelikle Şekil 10 da görüldüğü gibi boyun için veri alınmıştır. Şekil 10 incelendiğinde boyun için yaklaşık 8° fleksiyon ve 20° rotasyon (dönme) mevcut olduğu görülmüştür. Elde edilen bu açısal değerler Şekil 7 deki REBA A skoru belirleme şablonu kullanılarak sayısal değerlere dönüştürülmüştür. Böylece boyun skoru fleksiyon ve dönme olduğu için 1+1 olacaktır.



Şekil 10. Çalışma şartlarında boyun duruş açıları
(Neck angles in working conditions)

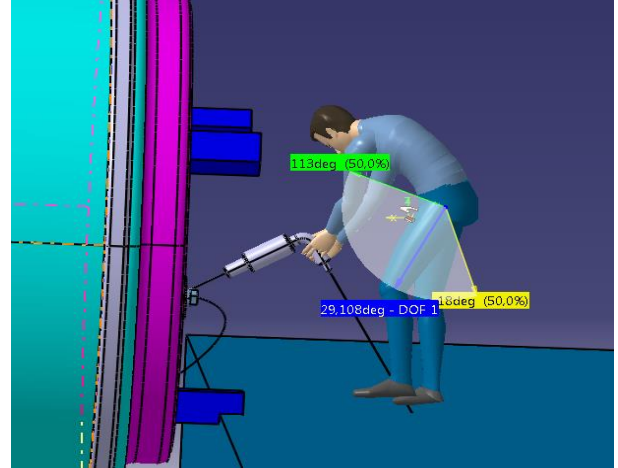
A grubundaki diğer bir eleman gövde için ise Şekil 11 de görüldüğü gibi 37° fleksiyon ve 9,5° rotasyon değerleri mevcuttur. Şekil 7 incelendiğinde fleksiyon ve dönme var olduğu için 3+1 olacak şekilde sayısal değere dönüştürülmüştür.



Şekil 11. Çalışma şartlarında gövde duruş açıları
(Body posture angles in working conditions)

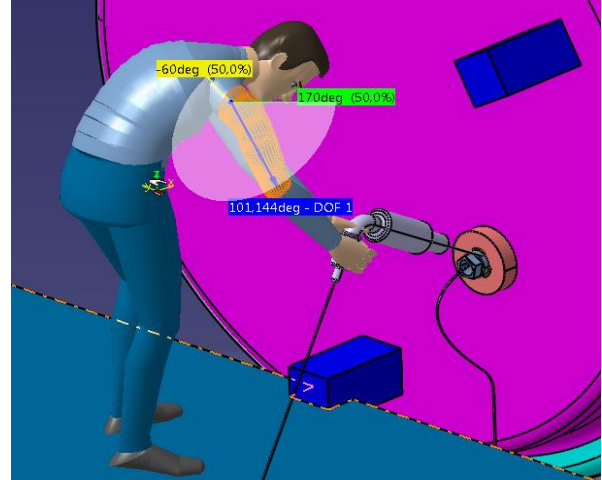
A grubundaki son eleman bacaklar için ise Şekil 12 de görüldüğü gibi 29° fleksiyon mevcuttur. Şekil 7 incelendiğinde yalnızca ağırlık taşınarak bir işlem yapılmakta olduğu için ve skoru değiştirecek herhangi bir

işlem olmadığı için 1 sayısal değerini almıştır. Elde edilen bu verilerle Çizelge 1 deki A tablosu kullanılarak Tablo A değeri 5 olarak elde edilmiştir. Yapılan iş 5-10kg aralığındadır. Bu sebeple Yük/ Kuvvet oranı skor tablosunda yapılan iş için 1 sayısal değeri seçilmiştir. Hitliden dolayı ani ve hızlı kuvvet artışı meydana geldiği için +1 puan daha eklenerek A skoru 7 olarak elde edilmiştir. B grubunda bulunan üst kollar, alt kollar ve bilekler için oluşturulan modelin fleksiyon ve ekstansiyon değerlerine göre puanlama yapılmıştır.



Şekil 12. Çalışma şartlarında bacak duruş açıları
(Leg posture angles in working conditions)

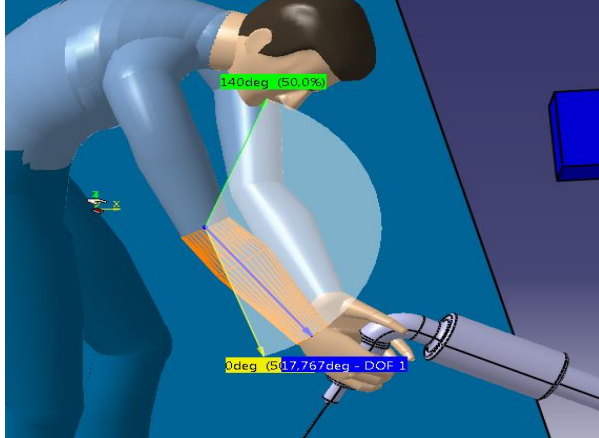
Öncelikle Şekil 13 de görüldüğü gibi üst kol için veri alınmış ve 101° fleksiyon , 170° rotasyon olduğu görülmüştür. Şekil 8 incelendiğinde fleksiyon ve rotasyon var olduğu için üst kol skoru 4+1 olacaktır.



Şekil 13. Çalışma şartlarında üst kol duruş açıları
(Upper arm posture angles in working conditions)

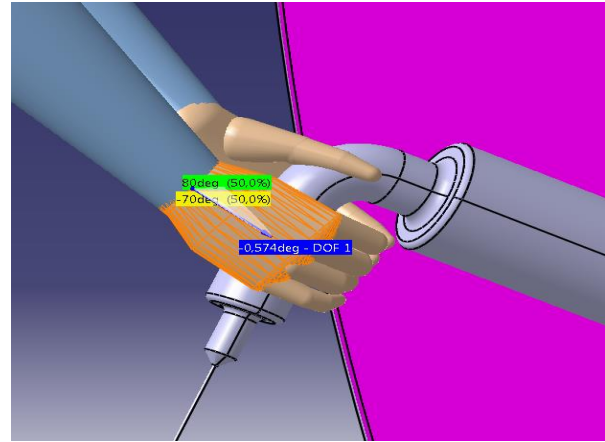
B grubundaki diğer bir eleman olan alt kollar için ise Şekil 14 de görüldüğü gibi 17° fleksiyon mevcuttur. Şekil 8 bulunan REBA B skoru belirleme şablonu kullanılarak alt kol sayısal değerinin 2 olduğu belirlenmiştir. B grubundaki son eleman bilekler için ise Şekil 15 de görüldüğü gibi 0,5° fleksiyon olduğu görülmüştür. Şekil 8

de bulunan şablon tekrar incelendiğinde 0,5° fleksiyon değerinin 1 sayısal değerine karşılık geldiği belirlenmiştir. Elde edilen bu üç değer kullanılarak Çizelge 3 de bulunan B tablosunda birleştirilmiştir. Tablo B değeri için 5 olarak elde edilmiştir. Yapılan iş için el tutuşu uygun değildir. Çizelge 4 incelendiğinde kötü dereceli bir kavrama olmasından kaynaklı kavrama skoru 2 olarak belirlenmiştir. Verilen bu 2 puan daha ekleyerek B skoru 7 elde edilmiştir.



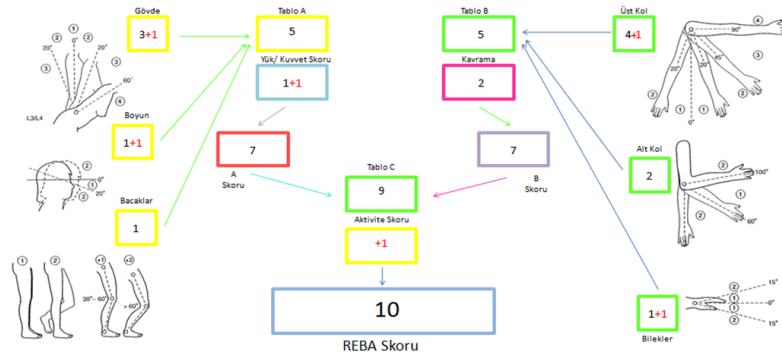
Şekil 14. Çalışma şartlarında alt kol duruş açıları
(Lower arm posture angles in working conditions)

Bulunan A ve B skorları Çizelge 5 de bulunan C tablosunda birleştirilmiştir. Birleştirme sonucu C skoru 9 olarak elde edilmiştir. REBA yönteminin son adımı olan aktivite skoru da eklenerek işlem tamamlanmıştır.



Şekil 15. Çalışma şartlarında bilek duruş açıları
(Wrist posture angles in working conditions)

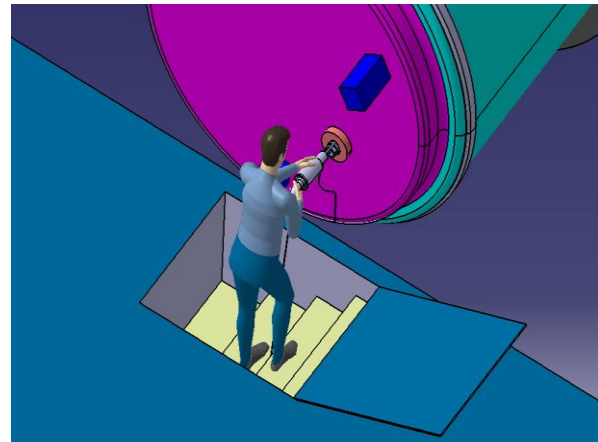
Yapılan iş potanın gelmesiyle başlayan hazırlık evresinde gerçekleştiği için +1 de aktivite skoru eklenmiştir. Böylece sonuç olarak REBA skoru 10 olarak elde edilmiştir (Şekil 16).



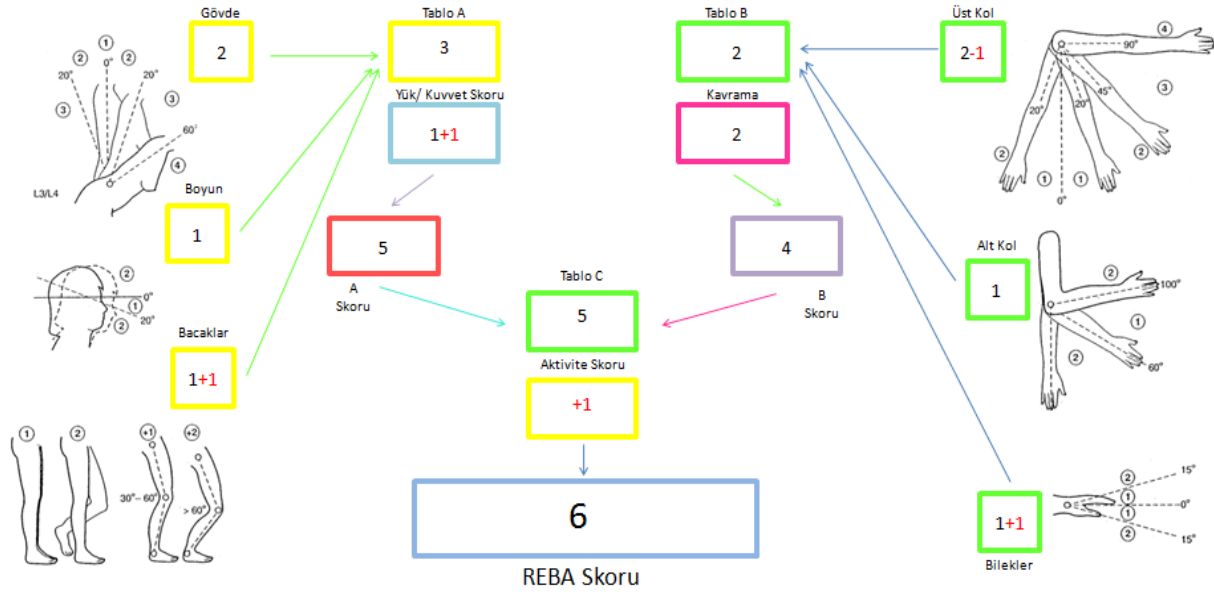
Şekil 16. REBA skorunun elde edilmesi (Obtaining the REBA score)

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada, döküm endüstrisinde bulunan bir fabrikadaki pota hazırlama aşaması CATIA dijital insan modelleme aracı kullanılarak simüle edilmiştir. REBA yöntemi ile çalışma duruşları için ergonomik analiz gerçekleştirilmiştir. REBA skoru 10 olarak elde edilmiştir. Çizelge 7 incelendiğinde, bu çalışma şartlarında yüksek risk seviyesinde bir çalışma duruşu olduğu sonucuna varılmıştır. Kısa süre içerisinde önlem alınması gerekmektedir. Bu sebeple çalışma koşulları ele alındığında maliyet ve zaman açısından platform üzerinde yapılan değişiklikler ile oluşan risk durumunun düzeltilebileceği sonucuna varılmıştır. Fabrika imkanları da göz önünde bulundurularak Şekil 17 de gösterildiği gibi tasarım işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 17. Tasarımı yenilenen platform (Newly designed platform)



Şekil 18. İyileştirilmiş REBA Skorunun elde edilmesi (Obtaining an improved REBA Score)

Platform üzerinde yapılan değişiklik ile çalışan bireyin duruşu tekrar simüle edilmiştir. Elde edilen REBA skoru Şekil 18 ile gösterilmiştir. Platform üzerinde yapılan değişiklik ile gövde, boyun ve kollara gelen açılar değiştirilerek oluşturulan A ve B skorları azaltılmıştır. Elde edilen yeni değerler kullanılarak Çizelge 5 de birleştirilmiş ve yeni C skoru elde edilmiştir. Aktivite skoru eklenmesi ile yeni REBA skoru elde edilmiştir. REBA skoru 10 değerinden 6 değerine düşürülmüştür. Böylece REBA risk derecelendirmesinde (Çizelge 7) yüksek risk seviyesinde bulunan çalışma duruşu orta seviyeye düşürülmüştür.

Bu çalışmada endüstride bulunan bir döküm fabrikasındaki gerçek bir problem ergonomik açıdan analiz edilerek iyileştirilmiştir. Ergonomik analiz yöntemleri arasında bulunan REBA metodunun uygulanması için CATIA yazılımındaki dijital insan modelleme aracı kullanılarak çalışma duruşları simüle edilmiştir. REBA metodu için kullanılan yazılım aracı ile yöntem hızlı bir şekilde uygulanmış ve sonuçlar elde edilmiştir. Tasarım değişiklikleri yapıldığında var olan koşullar içerisinde en uygun tasarım çözümü seçilerek oluşan ergonomik riskler azaltılmıştır. Çalışma ile endüstride bulunan gerçek bir probleme teorik bir yöntem ile çözüm üretilmiştir. Yapılan işlemler tasarlanan çözümlerin sonuçlarını simüle etmek için CATIA yazılımı kullanarak zaman ve maliyetten kazanılmıştır. Kullanılan metod ve yapılan işlemler ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Sosyal Sigortalar Ve Genel Sağlık Sigortası Kanunu (2006), T. C. Resmi Gazete, 5510, 31 Mayıs 2006.
- [2] Ocaktan, M. E. (2014). *Meslek Hastalıklarının Nedenleri*, [Power Point slaytı]. 20 Nisan 2019 tarihinde <http://personeldb.ankara.edu.tr/files/2012/11/MESLE>

[K-HASTALIKLARININ-SEBEPLER% C4% B0.pptx](#) adresinden erişildi.

- [3] Online: <https://www.isgnedir.com/ergonomi-nedir/> [Erişildi: 10 Mayıs 2018].
- [4] Enez K., ve Nalbantoğlu S. S., "Reba Yönteminin Ormancılık Faaliyetleri Açısından Değerlendirilmesi", *Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 3(3), ÖS:Ergonomi2015: 127-131, (2015).
- [5] Akay D., Dağdeviren M., ve Kurt M., "Çalışma Duruşlarının Ergonomik Analizi" *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 18(3): 73-84, (2003).
- [6] Şahin İ., Eldem C., Kalyon S. A., ve Gökçe H., "Dijital İnsan Modelleme Tabanlı Ergonomik Analiz: Otomatik Kollu Bariyer Örneği", *International Congress on New Trends in Science, Engineering and Technology (ICONTRENDS)*, Barcelona / SPAIN, 27-29, (2017).
- [7] Atıcı H., Gönen D., ve Oral A., "Çalışanlarda Zorlanmaya Neden Olan Duruşların Reba Yöntemi İle Ergonomik Analizi", *Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 3: 239-244, (2015).
- [8] Sağıroğlu H., Coşkun M. B., ve Erginel N., "Reba İle Bir Üretim Hatındaki İş İstasyonlarının Ergonomik Risk Analizi", *Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 3: 339-345, (2015).
- [9] Koç S., ve Testik Ö., M., "Mobilya Sektöründe Yaşanan Kas-İskelet Sistemi Risklerinin Farklı Değerlendirme Metodları İle İncelenmesi Ve Minimizasyonu", *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 27(2): 2-27, (2016).
- [10] Atasoy Mert E., "Ergonomik Risk Değerlendirme Yöntemlerinin Karşılaştırılması Ve Bir Çanta İmalat Atölyesinde Uygulanması", İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi, Ankara, (2014).
- [11] Enez K., ve Nalbantoğlu S. S., "Comparison of ergonomic risk assessment outputs from OWAS and

- REBA in forestry timber harvesting”, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 70: 51–57, (2019).
- [12] Online: <http://www.cefip.com.tr/tr/urun.php?id=6&gid=103&uid=475> . [Erişildi: 24 Mayıs 2018]
- [13] Aran İ., (2007). *Döküm Teknolojisi ve İmal Usulleri Ders Notları*, [PDF]. 20 Temmuz 2018, www2.isikun.edu.tr/personel/ahmet.aran/dokum.pdf adresinden erişildi.
- [14] MEGEP, POTA OCAĞI 521MMI065, Ankara, (2011).
- [15] Kara Y., Atasagun Y., ve Peker A., ”Montaj Hatlarında Çalışma Duruşlarının Reba Yöntemi İle Analizi Ve Ergonomik Risk Değerlendirmesi, [PDF]. 13 Mayıs 2018, <http://app.csgb.gov.tr/isggm/oshaturkey/sunumlar/102.pdf> adresinden erişildi.
- [16] Hignett S., and McAtamney L., ”Rapid Entire Body Assessment (REBA). *Applied Ergonom.*, 31: 201-205, (2000).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



Analysis, test and management of the meta-heuristic searching process: an experimental study on SOS

Meta-sezgisel arama sürecinin analiz, test ve yönetimi: SOS üzerine deneysel bir çalışma

Yazar(lar) (Author(s)): Hamdi Tolga KAHRAMAN¹, Sefa ARAS², Yusuf SÖNMEZ³, Uğur GÜVENÇ⁴, Eyüp GEDİKLİ⁵

ORCID¹: 0000-0001-9985-6324

ORCID²: 0000-0002-4043-3754

ORCID³: 0000-0002-9775-9835

ORCID⁴: 0000-0002-5193-7990

ORCID⁵: 0000-0002-7212-5457

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Kahraman H. T., Aras S., Sönmez Y., Güvenç U. ve Gedikli E., “Meta-sezgisel arama sürecinin analiz, test ve yönetimi: sos üzerine deneysel bir çalışma”, *Politeknik Dergisi*, 23(2): 445-455, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.548717

Meta-Sezgisel Arama Sürecinin Analiz, Test ve Yönetimi: SOS Üzerine Deneysel Bir Çalışma

Araştırma Makalesi / Research Article

Hamdi Tolga KAHRAMAN¹, Sefa ARAS¹, Yusuf SÖNMEZ^{2*}, Uğur GÜVENÇ³, Eyüp GEDİKLİ¹

¹Teknoloji Fakültesi, Yazılım Müh. Bölümü, Trabzon Karadeniz Teknik Üniversitesi, Türkiye

²Gazi Meslek Yüksek Okulu, Elektrik Tek. Bölümü, Ankara Gazi Üniversitesi, Türkiye

³Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Düzce Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 03.04.2019 ; Kabul/Accepted : 22.05.2019)

ÖZ

Bir arama sürecinde, yerel minimum tuzağına düşmek ya da küresel minimum noktasını atlamak tıpkı yapay zeka yöntemlerinde olduğu gibi meta-sezgisel algoritmaların en büyük sorunlarından biridir. Bu çalışmada, bu sorunların nedenleri araştırılmış ve yeni çözüm yöntemleri geliştirilmiştir. Bu amaçla, meta-sezgisel algoritmaları test ve analiz etmek için yeni bir çerçeve geliştirilmiştir. Ayrıca yeni ve güçlü bir meta-sezgisel yöntem olan Simbiyotik Organizmalar Arama (SOS) Algoritması için analiz ve test çalışmaları yapılmıştır. Çalışmanın amaçlarından biri, simbiyotik operatörlerin doğal ekosistem taklit başarısını ölçmektir. Böylece, arama sürecindeki problemler keşfedilmiş ve geliştirilen test ve analiz yönteminin bir örneği olarak operatörlerin tasarım hataları ortaya çıkmıştır. Dahası, kesin bir komşuluk arayışını gerçekleştirme ve yerel minimumdan kurtulma yolları (çeşitliliği arttırmak) araştırılmıştır. Araştırma sürecindeki operatörlerin performansını arttıran önemli bilgiler deneysel çalışmalarla sağlanmıştır. Ayrıca, bu çalışmada geliştirilen ve sunulan yeni deneysel test yöntemlerinin, tasarım ve test için meta-sezgisel algoritma çalışmalarına katkıda bulunması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Simbiyotik organizmalar arama, test problemi, algoritma analizi, komşuluk araması, çeşitlilik.

Analysis, Test and Management of the Meta-Heuristic Searching Process: An Experimental Study on SOS

ABSTRACT

In a search process, getting trapped in a local minimum or jumping the global minimum problems are also one of the biggest problems of meta-heuristic algorithms as in artificial intelligence methods. In this paper, causes of these problems are investigated and novel solution methods are developed. For this purpose, a novel framework has been developed to test and analyze the meta-heuristic algorithms. Additionally, analysis and test studies have been carried out for Symbiotic Organisms Search (SOS) Algorithm. The aim of the study is to measure the mimicking a natural ecosystem success of symbiotic operators. Thus, problems in the search process have been discovered and operators' design mistakes have been revealed as a case study of the developed testing and analyzing method. Moreover, ways of realizing a precise neighborhood search (intensification) and getting rid of the local minimum (increasing diversification) have been explored. Important information that enhances the performance of operators in the search process has been achieved through experimental studies. Additionally, it is expected that the new experimental test methods developed and presented in this paper contributes to meta-heuristic algorithms studies for designing and testing.

Keywords: Symbiotic organisms search, benchmark problem, algorithm analyze, intensification, diversification.

1. INTRODUCTION

The term meta-heuristic is used for artificial intelligence (AI) methods, which search the best solution among all possible candidates. The major handicap of these algorithms, they do not guarantee that the best solution is also the global optima. Two most important concepts are intensification and diversification in meta-heuristics [1-2]. Numerous meta-heuristics have been developed for solving combinatorial and numeric optimization problems. These can be sorted depending on the historical development as; genetic algorithm (GA, 1970s and 1980s) [3, 4], ant colony optimization (ACO, 1992) [5-7], particle swarm optimization (PSO) [8,9], Cuckoo Optimization Algorithm (COA) [10], artificial bee

colony (ABC) [11,12], gravitational search algorithm [13,14], teaching learning-based optimization (TLBO) [15], symbiotic search algorithm (SOS) [16,17], criss cross search particle swarm optimizer (CSPSO) [18], modified ant colony optimization (ACO) [19], Hybrid Evolutionary Immune Algorithm [20], ant colony optimization for continuous functions by using novel pheromone updating [21], backtracking search optimization algorithm for numerical optimization problems [22], Dynamic Virtual Bats Algorithm [23], Weighted Superposition Attraction (WSA) [24], the multi-objective vortex search algorithm [25], a multi-objective artificial algae algorithm [26], a hybrid firefly and PSO algorithm [27], OnLine Learning Algorithm using Worst-Violators (OLLAWV) [28] and queuing search algorithm [29] are the important heuristic algorithms which have developed from past to present.

*Sorumlu yazar (Corresponding Author)
e-posta : ysonmez@gazi.edu.tr

Measuring the effects of parameters on search performance is another research topic [30]. Moreover, a detailed review study, which is presented on an extensive survey of work concerning parameter control in evolutionary algorithms topic by Karafotias et al [31] can be investigated. In the Large-Scale Global Optimization problems, heuristic algorithms should have effective and efficient search strategies. Trunfia et al. [30], in the solution of high-dimensional optimization problems, investigates the impact of populations dimension and subcomponents dimensionality on performance of a cooperative co-evolutionary optimizer.

The biggest problem encountered in the testing process of meta-heuristic algorithms is to get caught in a local optimum trap [32]. Search process of the global minimum in solution space results in failure, in this situation. The search process of heuristic algorithms should be analyzed to identify the problem source. The search process of the algorithm can be managed to solve the problem. Making a manageable search process is a challenge task [30]. This case explains that why so much work has been done on heuristic algorithms. An important factor in the success of meta-heuristics is to perform parallel search. These population or colony-based algorithms scan the search/problem space with solution candidates more than one. In this process, there are three main issues that affect the search success of meta-heuristic algorithms. First of all, local minimum traps encountered in the search process. One of the basic reasons for trapping in local minimum is not to ensure diversification effectively. The algorithm should not stick in local minimum for a successful search. It is essential to ensure significant diversity among alternative candidates. A successful diversity operation depends on how the algorithm creates new solution candidates. Sun et al. [32] have benefited from genetic algorithm operators to solve the “premature convergence” and “computationally expensive” problems of Gravitational Search Algorithm. Similarly, the PSO [8] algorithm converges to the local minimum in solution of multi-modal problems. Meng et al. [18] have developed operator “vertical crossover” to increase swarm diversity in Crisscross Search PSO (CPSO). Basic questions to be answered are to analyze a meta-heuristic search method for diversification: (i) Which operators provide the diversity? (ii) Can diversity be achieved successfully? (iii) How can diversity be managed? Answers of these question related to diversity will be investigated as “local minima (lm)” in “case 1, 2 and 3” in “Experimental Studies” section. The second issue is that meta-heuristic algorithms should perform the neighborhood search successfully. The success criterion in this respect is the degree of convergence to the optimum point in search space of the algorithm. Meng et al. [18] have developed the operator “horizontal crossover” to improve the global convergence ability in CPSO algorithm. In order to analyze a meta-heuristic algorithm for intensification or global convergence ability, basic questions to be answered are: (i) Which operators perform the

intensification? (ii) Intensification can be successfully achieved while diversification is being performed? (iii) How can intensification be managed? The other reason for trapping in local minimum is not to ensure intensification effectively. This characteristic will be investigated as “neighborhood search (ns)” in “Experimental Studies” section. The last issue is that meta-heuristic algorithms should scan a multi-dimensional search space quickly [30] and find optimum solutions in a short computation time. The two properties mentioned above are a measure of the robustness of the algorithm. Novel algorithms have to prove that they produce faster and/or more effective results than before depending on these criteria [16, 17, 31]. Benchmark problems are used as a general approach in performance tests of meta-heuristics. The success of algorithm is measured by degree of global solution convergence and discovering time for an acceptable answer (finding the global optima in a finite time interval) [33]. The last issue is that meta-heuristic algorithms should scan a multi-dimensional search space quickly [30] and find optimum solutions in a short computation time [34]. This characteristic will be investigated as “execution time (et)” in “Experimental Studies” section.

In this paper test and analysis of a meta-heuristic search algorithm for three basic issue (lm, ns, et) explained above. A framework has been designed for this purpose and various methods have been developed for analyze process. Moreover, in this paper, parameter control and its effects on lm, ns and et have been investigated. As a meta-heuristic search method, Symbiotic Organisms Search (SOS) algorithm is preferred. The data required for the analysis has been obtained from experimental studies. The searches have been realized on the operators of SOS that constitute the search process. In experimental studies, make search symbiotic operators (mutualism, commensalism and parasitism) individually and together. That is, experimental results for 7 different operator combinations (all possible test cases) have been analyzed. In order to investigate effects of SOS operators and benefit factors (BF1 and BF2) on intensification and diversification, 26 benchmark problems at different levels of complexity have been used. According to experimental results, function and ability of SOS operators have been uncovered in terms of lm, ns and et. Other sections of this paper is composed as follow. In Section 2, detailed information of SOS is explained. Experiments are given detailed in Section 3. At last, in Section 4, conclusions have been given, at last.

2. SOS ALGORITHM

SOS is a novel and strong searching algorithm [16]. It performs a simulation of the process of symbiosis between organisms. SOS algorithm makes the discovery of a huge number of solution candidates in the search area. Solution candidates are called organisms in the SOS algorithm. A community of organisms is called as ecosystem. The interactions between organisms reveal

the success of SOS algorithm. Scientists have identified the interaction of organisms in nature in three categories. These are mutualism, commensalism and parasitism. To model these interactions among the organisms, three operators are defined in SOS. The mutualism operator provides mutual utilization between the two species. The commensalism operator simulates a symbiotic relationship, while one organism profit from a relationship with another organism, the other organism neither profit nor is damaged. Parasitism operator simulates an interaction among two species of organisms. SOS algorithm consists of five steps. Organisms are created in the first step. An organism corresponds to a solution nominee for a problem. Ecosystem is initialized with creating a set of organisms in the second step. In the third step, fitness values of all organisms are evaluated. The best organism is chosen based on fitness values of organisms in ecosystem. Ecosystem life cycle starts at the next stage. Mutualism (M), commensalism (C) and parasitism (P) (symbiosis relationship) are applied between organisms in the fourth step. When life cycle of ecosystem is finalized the best organism corresponds to optimum solution. The main feature that distinguishes the SOS from other search methods is symbiotic relationships. These relationships are actuated by operators M, C, P. Experimental study is carried out through these three operators.

3. EXPERIMENTAL STUDY

In the preparation phase of the experimental work, mathematical expressions and working principles of SOS operators are examined. In the SOS algorithm, the search process is done by the operators M, C and P. These operators are applied independently and in sequence to all organisms in the ecosystem. The operating principle of SOS operators is given below.

- i. Mutualism operator (M):
 - a. A randomly selected organism is defined as X_j , where $X_j \neq X_i$.
 - b. Mutual relationship vector (MV) and benefit factors (BF1, BF2) are determined.

$$MV = (X_i + X_j) / 2 \quad (1)$$
 - c. X_i and X_j organisms are modified by using Eq. 2 and Eq. 3:

$$X_{i\text{new}} = X_i + \text{rand}(0, 1) * (X_{\text{best}} - MV * BF1) \quad (2)$$

$$X_{j\text{new}} = X_j + \text{rand}(0, 1) * (X_{\text{best}} - MV * BF2) \quad (3)$$
 - d. Fitness values of $X_{i\text{new}}$ and $X_{j\text{new}}$ are calculated. If the modified organisms are more suitable than the previous modifications are adopted. Otherwise previous organisms are kept.
- ii. Commensalism phase (C):
 - a. An X_j organism is selected randomly, where $X_j \neq X_i$.
 - b. Organism X_i is modified by using as follow.

$$X_{i\text{new}} = X_i + \text{rand}(-1, 1) * (X_{\text{best}} - X_j) \quad (4)$$

- c. Fitness of the $X_{i\text{new}}$ is computed. If the modified organism is more suitable, new organism is accepted instead of X_i . Otherwise, the modification is rejected and previous organism X_i is kept.
- iii. Parasitism phase (P):
 - a. An X_j organism is selected randomly, where $X_j \neq X_i$.
 - b. A Parasite Vector (PV) is created from X_i
 - c. X_i 's fitness is computed. If the fitness value of PV is more suitable than X_j , X_j is replaced with PV. Otherwise, do not make replacement operation and keep X_j delete Parasite_Vector.

In the subsection below, the application phase of the experimental work is explained. At this stage, experimental work is introduced and the algorithms are analyzed by evaluating the data obtained from these studies.

3.1. Definition of Experimental Work

In experimental studies, answers to the following questions are sought: in order to make a deep analysis of the SOS algorithm on escape from local minima (lm) and neighbour hood search (ns) issues.

3.2. Setup for Experimental Work

Experimental studies have been conducted on 26 benchmark problems. These benchmark problems are the same as those reported in studies that represent SOS [16]. The organisms number of the ecosystem is determined as 50 and the number of epochs are 100 thousand. Each experimental study has been run for 100 times to increase validation of the test results, and average and best values have been recorded. For this purpose, the pseudo-code of test process for operators is given in Algorithm 1. Test cases of operators can be summarized as follows:

Algorithm 1. Pseudo-code for test procedure

- 1: select a case study (case 1, 2 or 3)
- 2: initialization (*select a benchmark problem*)
- 3: repeat (*100000 times*)
 - (i) choose symbiotic relationship(s)
- 4: until: termination criterion (epoch number and/or fitness value) is met
- 5: stop the searching process and save the experimental results (best organism X_{best} and the mean and the average fitness values in all of the ecosystems)

Operators shown as choose symbiotic relationship are: M, C and P. In the test process, each operator performed the search process separately and in double combinations. In this way, selected operators create 7 different test cases (M, C, P, MC, MP, CP, MCP). Here, MCP is the original SOS algorithm.

Case-1 (Analyzing of operator combinations): The operator combinations M, C, P, MC, MP, CP, MCP have been implemented on benchmarks and results have been compared with each other. As a result of these comparisons The effects of the symbiotic operators' co-operation or independent work on the search process have been investigated. The information of all the test studies and the results obtained has been recorded. By analyzing the recorded results, important information about operators' functions and works have been discovered. In this respect, important information about "lm", ns" and "et", which are the research topics of the article, has been reached.

Case-2 (Analyzing of parameter effects): Eqs. 1, 2 and 3 are used when constructing a new organism with the M operator in the SOS algorithm. BF1 and BF2 are benefit factors. Cheng and Prayogo [16] randomly select the benefit factor of M operator as 1 or 2 in the SOS algorithm. However, how the change of the benefit factor affects the search process is a matter to be investigated. In the experimental study, it has been aimed to find optimum value for the benefit factor. The effect on problem solving has been investigated by assigning random values to the benefit factor at the determined intervals. Ten different test cases have been created as (0-0.5), (0.5-1), (1-1.5), (1.5-2), (0-1), (0.5-1.5), (1-2), (0-2) and 1, and also by including the state of the original SOS

information shows that the neighborhood search in the SOS algorithm is carried out through organisms located around X_{best} . So the subject that needs to be investigated is: How much change is taking place after any organism has been exposed to the operators M, C, P? How this organism is positioned according to X_{best} or How far is it to X_{best} ? While the increase in the amount of distance increases the diversity (lm), decrease in distance increases the intensification (ns).

In order to realize Case-3, distances between organisms must be measured. To accomplish this, let's first look at how an organization is represented. In the SOS algorithm, an ecosystem consists of organisms. Each organism corresponds to a solution candidate for problem. Suppose a problem consists of n-parameters and the optimum value of these parameters is sought. In such a problem, the parameters are represented by a vector $\langle p1, p2, p3, \dots, pn \rangle$. The solution candidates set (ecosystem) to be created to find optimum values of these parameters represented by E. In this case, each organism (solution candidate) in E set consists of a vector representing the optimum parameter values for the problem. Within this vector, there will also be a parameter that represents the fitness value of each organism f for the problem. According to this information, an E consisting of m organisms can be described as follow:

$$EU: d[X_{best}, X_{(M,C,P)}] = \sqrt{(X_{best[1]} - X_{(M,C,P)[1]})^2 + (X_{best[2]} - X_{(M,C,P)[2]})^2 + \dots + (X_{best[n]} - X_{(M,C,P)[n]})^2} \quad 6$$

algorithm. Experimental studies have been carried out by applying SOS algorithm with 10 different test cases for all benchmark problems. Depending on the results obtained, the effect of the benefit factor (BF) on solving the problem has been examined. Thus, the optimum value of the benefit factor has been investigated. The effects of "BF1" and "BF2" on "lm", "ns" and "et" have been also examined.

Case-3 (Analysis of solution candidates): In this case, effects of the solution candidates / organisms produced by the operators M, C and P on lm (intensification) and ns (diversification) have been investigated. The X_{best} organism that is the best organism for the problem of the SOS has been used to carry out this research. In other words, X_{best} represents the current minimum point (for minimization problems) in the SOS algorithm. As in other meta-heuristics, the SOS also realizes neighborhood search (current) by searching around best solution candidate (X_{best}). For example, in the Artificial Bee Colony algorithm [16], the neighborhood search is performed by using the environment size parameter. Depending on the environmental size parameter, the new solution candidate makes a neighborhood search around the best solution candidate (elite bee). Similarly, the [4] neighborhood search in the Genetic Algorithm is performed with the help of the crossover operator. The crossover is carried out with child individuals placed around the parental individual in the population. All this

$$E_{[m,n]} \equiv \begin{bmatrix} e_{p[1,1]} & \dots & e_{p[1,n]} & f_{[1]} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \\ e_{p[m,1]} & \dots & e_{p[m,n]} & f_{[m]} \end{bmatrix} \quad 5$$

The X_{best} organism is the organism having the best fitness value (f) in the ecosystem given in Eq. 5. As given in Algorithm 1, after X_{best} is determined in SOS algorithm, M, C and P operators are applied to this organism, respectively. In order to perform Case-3, the operators M, C, and P must be applied without changing X_{best} . Thus, the effects of these operators on the same X_{best} can be examined in the most accurate way. So now, the thing is to be done is to measure how much the organisms resemble the X_{best} organism after the interaction process of M, C, and P. As a measure of similarity, vector distance information has been used. The measurement procedure can be determined as given in Eq. 6 below by taking into account the Euclidian distance (EU) between the organism, which is derived from the interaction process, and the X_{best} .

Eq. 6 shows the obtaining of the distance vector between the two organisms. Accordingly, this distance vector is three dimensions. These can be represented as given in Eq. 7.

$$d[X_{best} X_{M,C,P}] \equiv \begin{bmatrix} d_M \\ d_C \\ d_P \end{bmatrix} \quad 7$$

Based on the values of the distances given in Eq. 7, it reveals that which one of organisms X_M, X_C, X_P is closest to X_{best} . Thus, after the X_{best} has been exposed to the operators M, C, and P, It reveals that which operator has undertaken the task of searching for a neighbor. It is discovered also that which operator creates organisms (which increases diversity) that are the farthest from X_{best} . Concepts and research topics of experimental study have been described in detail in Cases-1, 2 and 3, and experimental studies have been carried out based on these research topics. In the next subsection, the results obtained from experimental studies are examined in detail.

3.3. Experimental Results

Results obtained from experiments carried out according to Case-1, 2 and 3, which are explained above, are given.

3.3.1. Results of case 1: analysis of operator combinations

In this experimental study, it has been aimed to investigate the effect of operators in finding the best solution of SOS algorithm according to the conditions defined in Case-1. In other words, the functions of the operators in terms of lm (diversification) and ns (intensification) and the performances of the operators in terms of et have been revealed. First, the effect of symbiotic operators on finding the global minimum (7 different combinations / test cases) has been examined. Average and best fitness values have been measured for each combination of operators and for all benchmarks. Only the number of iterations has been selected as the criterion for termination for Case-1 experimental studies to discover search success of each operator. Each operator (test case) has been run 100 times and average fitness and the best fitness values have been recorded. The results obtained for 26 different benchmark problems and 7 different SOS combinations are given in Table 1.

MCP (SOS): MCP is the operator used in the original SOS algorithm. As given in Table 1, the original SOS algorithm did not find the global min value at 8 out of 26 benchmark problems. This situation shows that the

original SOS algorithm has problems in lm and ns. The original SOS combination (M, C, P) showed a better search performance than the others except MC, when compared to other test cases / combinations. However, it should be noted that in the two benchmark problems (numbers 9 and 23) the MC test case yields better results than the original MCP. This proves that the P operator has a disruptive effect.

M: When compared with MCP, the search process for 6 benchmark problems (1, 20, 21, 22, 24, 26) has failed. Care must be taken that M operator cannot find a global minimum when working alone. This indicates that the M operator gets trapped to the local minimum. That is, the M operator performs the ns process but cannot escape from the local minimum because it lives the lm problem. M operator cannot achieve diversification while satisfactorily performing intensification. As can be seen in Table 1, this problem has removed with MC. It can be easily seen that the operator C allows escaping from the local minimum, when it is included in the search process. In other words, C operator partially solves the lm problem by making large jumps (splashes) in search space.

C: It has performed unsuccessfully alone. The results given in Table 1 should be considered together with the work process of C operator and M operator (see Eqs. 1, 2 and 3). The mimicry proportion of an organism exposed to the C operator (see Eq. 4) to the X_{best} organism is less than the organism exposed to the M operator (see Eqs. 1, 2 and 3). In other words, the C operator does not bring the organisms in the ecosystem close to X_{best} as the M operator. This explains why the C operator is not as effective as the M operator in ns duties. In Fig. 7, the distances between the organisms exposed to the operators M, C and P and the X_{best} organism are given. All this information also explains how the C operator gets rid of the local minimum traps. Because getting trapped in a local minimum is caused by making a close call to the best solution candidate. The C operator can make large and random search in the solution space compared to the M operator. One reason for this is the effect that is created by the operator rand (-1,1) given in Eq. 4. This operator can reduce the effect of X_{best} to zero in the creation of the new organism (completely destroy). However, C operator is more effective than M in lm tasks. This

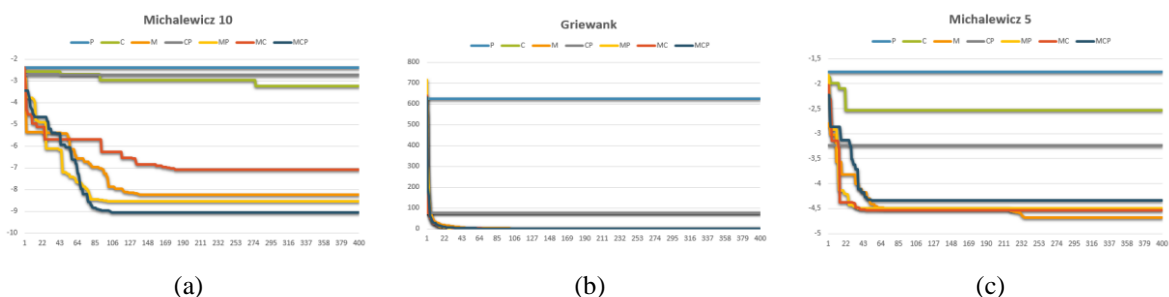


Fig. 1. Variation of fitness values produced by the operator combinations for three different benchmark problems

Table 1. The result obtained by applying 7 test cases (MCP, M, C, P, MC, MP, CP) to 26 benchmark problems

Algorithm / Function	Global Min	SOS (MCP)		M		C		P		MC		MP		CP	
		Mean	Best	Mean	Best	Mean	Best	Mean	Best	Mean	Best	Mean	Best	Mean	Best
Beale	0	0	0	0,03810	0	0,00148	1,23E-05	0,44334	0,02199	0	0	0	0	0,00194	1E-05
Easom	-1	-0,99	-1	-1	-1	-0,2160	-0,9992	-0,0003	-0,0334	-1	-1	-1	-1	-0,1881	-0,9998
Matyas	0	0	0	7,6E-189	1,1E-195	9,5E-05	0	0,20803	0,00225	0	0	5E-127	7,1E-135	0	0
Bohachevsky1	0	0	0	0	0	5,32774	0	331,162	0,55412	0	0	0	0	24,8360	0
Bohachevsky2	0	0	0	0	0	13,8529	0	371,557	0,78026	0	0	0	0	0,06376	0
Bohachevsky3	0	0	0	0	0	0,03683	0	362,038	4,16026	0	0	0	0	0	0
Booth	0	0	0	0	0	0,07600	0,00033	8,04570	0,19231	0	0	0	0	0,06459	8,4E-05
Michalewicz2	-1,8013	-1,8013	-1,8013	-1,8013	-1,8013	-1,3732	-1,7972	-1,1413	-1,7951	-1,8013	-1,8013	-1,8013	-1,8013	-1,3693	-1,7927
Michalewicz5	-4,6876	-4,5010	-4,6876	-4,4911	-4,6876	-2,52271	-3,13146	-2,0079	-3,01954	-4,45805	-4,68766	-4,45697	-4,68766	-2,4519	-3,3190
Michalewicz10	-9,6601	-8,1378	-9,4131	-8,07331	-9,38186	-3,41808	-4,01192	-3,08595	-4,505	-8,06859	-9,27263	-7,96508	-9,32461	-3,3657	-4,5444
Schaffer	0	0	0	1,25E-14	0	0,00079	0	0,30981	0,04507	0	0	6,75E-08	0	0,00556	0
S.H.C.B.	-1,0316	-1,0316	-1,0316	-1,0316	-1,0316	-1,0315	-1,0316	0,0677	-0,9713	-1,0316	-1,0316	-1,0316	-1,0316	-1,0005	-1,0316
Shubert	-186,73	-186,62	-186,73	-186,73	-186,73	-159,71	-186,71	-181,52	-186,72	-186,73	-186,73	-186,68	-186,73	-186,43	-186,73
Colville	0	5,7E-05	9,1E-07	2,76E-06	3,28E-09	39,4743	1,23202	3030,02	16,3341	1,18E-05	5,84E-08	0,00011	3,44E-08	39,8829	1,56494
Zakharov	0	0	0	2,69E-98	2,1E-102	0	0	712,442	48,7634	0	0	7,54E-65	9,7E-68	2,13741	0
Step	0	0,02309	6,4E-07	0,00033	1,1E-07	9,32940	7,5	172,390	118,525	0,01434	3,11E-06	0,00308	5,16E-08	14,0811	7,5
Sphere	0	0	0	3,8E-134	1,1E-136	1999,56	0	64621,2	43821,4	0	0	2,51E-88	2,54E-90	1241,07	0
SumSquares	0	0	0	3,9E-135	3,9E-138	207,848	0	9357,76	5933,91	0	0	5,47E-89	9,65E-92	302,495	0
Quartic	0	0,03856	0,00086	0,03107	0,00017	0,03403	0,00046	443,024	222,634	0,03817	0,00018	0,03151	0,00047	0,03777	0,00090
Schwefel 1.2	0	0	0	2,26E-44	8,25E-50	691,701	0	106360	48834,1	0	0	8,29E-29	3,71E-32	1133,26	0
Schwefel 2.2	0	0	0	1,98E-68	7,48E-70	1,21905	0	115,388	96,1462	0	0	2,62E-45	3,41E-46	5,57258	0
RosenBrock	0	0,40003	1,8E-08	2,57E-08	4,67E-11	5,03885	2	66788,7	142,572	0,34	1,72E-09	6,78E-07	3,42E-09	2	2
Dixon-Price	0	0,80035	0,00012	0,10586	2,08E-06	18591,1	464	1686738	994061	0,86549	5,55E-05	0,47819	1,96E-05	39367,3	464
Rastrigin	0	0	0	0	0	9,20769	0	432,482	358,666	0	0	0	0	12,7528	0
Griewank	0	1,02102	1,00003	1,00248	1,00001	80,9720	76	596,158	373,607	1,04747	1,00000	1,00572	1,00000	80,3316	76
Ackley	0	0,08628	0,08628	0,08628	0,08628	0,08628	0,08628	20,5341	20,1546	0,08628	0,08628	0,08628	0,08628	0,08628	0,08628

indicates that the operator C can be used to solve the Im problem.

P: It has performed unsuccessfully alone. It has also no positive effect in other combinations. It is obvious that there is a problem in the design of this operator. One of the organisms exposed to the operator P must benefit. It is clear from Table 1 and Fig. 1 that such a situation does not take place.

MC: It is the most successful test case. Compared to M operator, it escapes from local minimum traps (operator C is the way to escape from a local minimum trap). Therefore, it partially removes the Im problem. In addition, when t is compared to the operator C, it performs the neighborhood search more successfully.

MP: When compared with the simple M operator and the MCP, the search process seems to have failed due to the disruptive effect of the P operator. The validity of these evaluations can be easily understand from Table 1 and Fig. 1.

CP: It is understood that it could not make a neighborhood search and that the global minimum points have been missed. It should be noted that operator M has the function of searching neighborhood. Therefore, it is understandable that the failure of the ns process when the operator M is not used.

3.3.2. Results of case 3: analysis of solution candidates

In this subsection, the effects of the solution candidates (organisms) produced by the operators M, C and P in terms of Im (diversification) and ns (intensification) have

been experimentally revealed. In order to perform the experimental study, the relationship between the solution candidates (new organisms) produced by the operators and the X_{best} organism has been investigated. In the experimental study, Griewank Function has been chosen as the test problem. Mathematical expression of this benchmark can be given as follow.

$$f(x) = \sum_{i=1}^d \frac{x_i^2}{4000} - \prod_{i=1}^d \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1 \quad 8$$

As can be observed from Fig. 2, Griewank has a large number of local minimum points. In addition, this benchmark problem makes the solution difficult because the local minimum points are close to each other. Hence, this benchmark problem allows the heuristic algorithms to be tested effectively in terms of ns and lm.

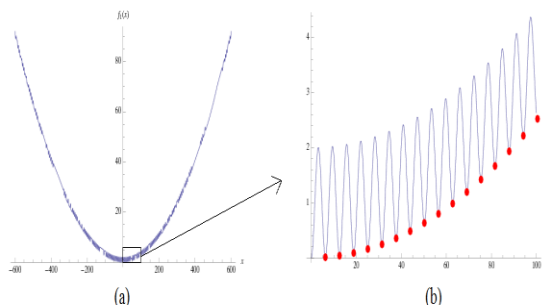


Fig. 2. Curve of Griewank Function (a) and an image of a range of values taken over this curve (b)

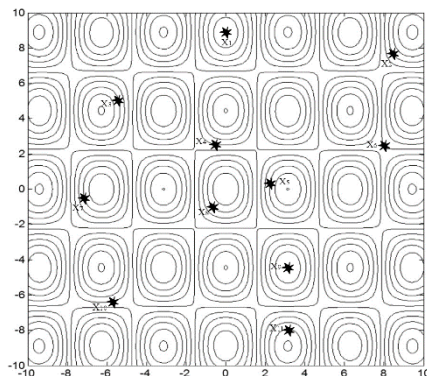


Fig. 3. Distribution of organisms in solution space

The global minimum point of the Griewank benchmark problem given in Fig. 3 is the solution where X_i values are 0. Let's examine the performance of the SOS algorithm operators (M, C, P) in terms of lm and ns on this benchmark problem. First, the number of ecosystem size / organisms should be determined. In the experimental study, the relationship between these organisms and X_{best} will be examined. The ecosystem size has been determined as 11 in the experiment. Organisms in ecosystem size have been created randomly. The search space for the problem has been bounded in the range [-10, 10].

Random distributions of organisms in search space have been plotted on a contour plots chart (please see Fig. 3). In the counter plots graphic, the increase in the number of rings means that the value of fitness increases. In cost problems, the smallest fitness value is the global minimum. The cavity point of the rings indicate the regional minimum points. While the one having the smallest value of these points is the global minimum point, others are local minimums. The global minimum of the Griewank benchmark problem in two-dimensional space solution of (0, 0). Cavities other than this cavity correspond to local minimum points. As can be seen in Fig. 3, the closest organisms to the global minimum are X_4 , X_5 and X_8 . The closest of them will be the X_{best} organism. In the following subsections, the X_{best} organism is determined first. Then, it is examined how close the other organisms exposed to the operators M, C, P are to X_{best} and how different from are they from X_{best} . Mathematical calculations has been given to illustrate the movement limits of organisms exposed to operators. These calculations have been carried out by putting limit values and random values in the Eqs. belonging to the operators. Thus, the effect of each operator has been revealed both with experimental results and with mathematical results. In addition, the values obtained from experiments or mathematical calculations have been shown on the graph. Thus, organism movements can be monitored easily.

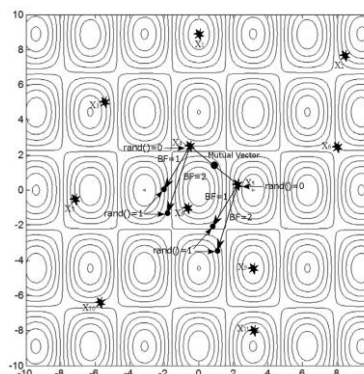


Fig. 4. Effect of Mutualism operator on X_4 and X_5 organisms

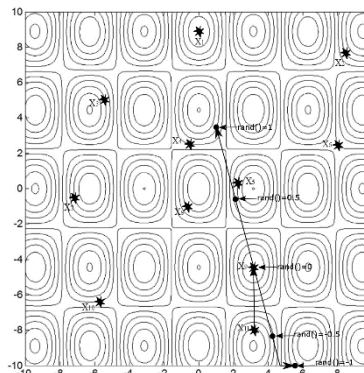


Fig. 5. Effect of Commensalism operator on X_9

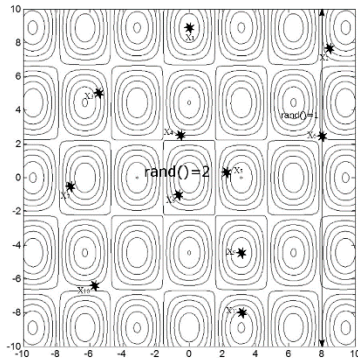


Fig. 6. Effect of Parasitism Operator on X₆ Organism

The effect of the Mutualism operator on organisms (X₄ and X₅) according to the obtained values is given in Fig. 4. The number generated randomly by the Rand variant expresses the size / distance of the movement of the organism. If Rand produces 0, the organism remains in the same position, but if rand produces 1, the organism will go to the farthest position where it can go. For numbers generated between 0 and 1, the movement distance will be directly proportional to this number. In the condition of BF coefficient is 1 or 2, the movement direction of the organism is defined. In all cases, however, the organisms move to the X₈ direction, that is X_{best}. This proves that the Mutualism operator makes a neighborhood search. In other words, M operator carries out its duty.

The effect of the Commensalism operator on organism X₉ is shown in Fig. 5. The random number generated by the Rand variant expresses the movement magnitude and direction of the organism. If the Rand variant produces positive, the direction is parallel to the line drawn from X₁₁ organism to X₈ (X_{best}) organism. But, if the Rand produces negative, the direction is parallel to the line drawn from X₈ organism to X₁₁ organism. The magnitude of the Rand variant is proportional to the magnitude of the motion. The organism does not always move in the X₈ direction. The X₉ organism is at the local minimum. It escapes from this point with the commensalism operator as can be seen from Fig. 5.

Fig. 6 shows how the parasitism operator affects the X₆ organism. The number produced by the Rand variable indicates the area of motion. If Rand variant produces 1, then the organism can move in a one dimensional space; if Rand produces 2, it can move in a two-dimensional space. Here the solution space is two-dimensional, so it shows that the rand variant produces 2 and can go anywhere in the solution space. With Parasitism operator effect, if a better organism is obtained from the X₆ organism than the X₃ organism, this organism replaces him by killing the X₃ organism. Parasitism operator was created to provide diversity. However, it has been determined with experimental studies that the parasitism operator does not function. In the previous experiment, the effects of M, C, P operators on the Griewank benchmark problem have been investigated. With this investigation, it has been determined that the Mutualism operator makes a neighborhood search, the Commensalism operator provides the diversity / escaping from local minimum traps and the Parasitism operator doesn't perform its functions.

This experiment has been applied by extending to other benchmark problems. Thus, the organizational effects of M, C, P operators on all benchmark problems have been investigated experimentally. The distances given in Eq. 7 have been calculated for this process. In this experiment, it is desired how much operators approach organisms to X_{best}. Operators have been tested on 25 benchmark problems. Because 1 benchmark problem produced very high values, it caused an incomprehensible graphic. So it has not been included in the test process. The distances in the experiment have been calculated as given in Eq. 6. For definitions related to this experiment, see back to Case-3 in section “3.2 Experimental set-ups”.

The results obtained from this experiment are given in Fig. 7. The X_{best} organism is represented on the 0-axis. It can be clearly seen from Fig. 7, it is clear that the organism, which research the organism closest to the X_{best}, is created by the Mutualism operator in all of the benchmark problems. In other words, the organism exposed to the M operator makes searching in the neighborhood of the X_{best} organism. This is evidence supporting the M operator makes neighborhood search.

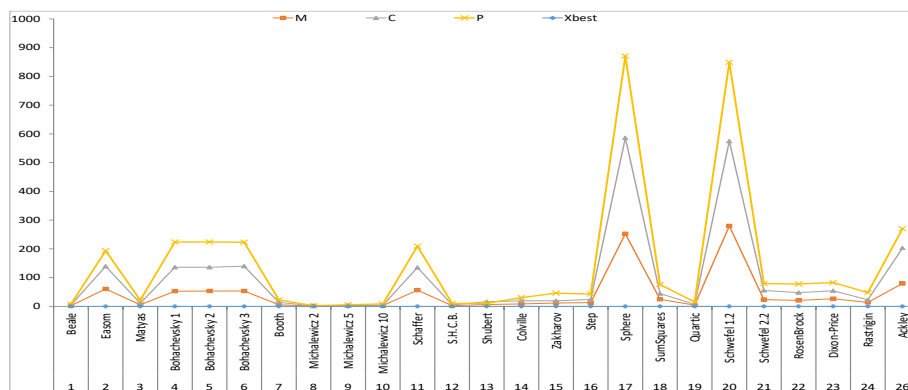


Fig 7. Distances of solution candidates produced by M, C, P operators to X_{best}

The parasitism operator creates organisms that are not similar to the X_{best} organism. This is evidence that Parasitism's operator aims to provide diversity.

4. CONCLUSIONS AND DISCUSSIONS

In this paper, several experimental methods and approaches have been developed to design, test and manage meta-heuristic algorithms. The developed methods have been successfully applied on the SOS algorithm. Thus, important information about the four research questions for the SOS algorithm has been obtained. Discussions and conclusions on the mentioned research topics are given below.

One of the important results obtained from the experimental work is the discovery that the P operator does not fulfill the aimed function. Namely, the Parasitism is based on the fact that one of the organisms is damaged while the other benefits. However, in the experimental studies, none of the organisms exposed to P-operator have benefited. This is clearly shown in Table 1 or in Fig. 1. As a result, SOS algorithm cannot imitate nature in terms of P operator. Therefore, the P-operator needs to be redesigned in accordance with its function in the nature.

Another important result obtained in the article study is the discovery of the functions of the M and C -operators. When Table 1, Figs. 4 and 7 are examined, it is understood that M operator makes a neighborhood search. It is believed that making the neighborhood search more precise (fine tuning) is possible by increasing BF1 and BF2 coefficients given in Eqs. 2 and 3. This feature shows that the neighborhood search in the SOS algorithm can be partially managed through benefit factors. Besides, the biggest disadvantage of M is that it cannot escape from the local minimum. The C-operator is able to get rid of the local minimum traps because it searches with big jumps when he was working alone. However, when C-operator works alone, it also jumps the global minimum. In addition, when used in conjunction with operator M, in many problems (see Table 1), it ensures escaping from local minimums and finding optimum values. Finally, things to do for operators M and C are:

- i) It must be ensured that M realizes the neighborhood search with an adaptive strategy. M should be able to a precise local (neighborhood) search with a small step, when necessary. Self-renewing operators are needed just as viruses gain resistance against antibiotics. In order to achieve this, an approach can be developed that changes the BF coefficients depending on the fitness value of the organisms during the search process. It should be paid attention that M's task is to perform "ns" in a controlled way.
- ii) The operator C should be able to escape the local minimum traps, but not jump the global solution. Current state of the operator C is static. That is, it does not have any parameters that allow it to control the search process in terms of lm and ns. Making this

static structure dynamic will contribute to the manageability of the process. A control parameter can be added to the operator C given in Eq. 4 for this purpose. The amount of jump can be changed via this control parameter. Changing this coefficient dynamically with an adaptive strategy can also contribute to the manageability of the search process.

- iii) The operator P must be reconstructed. In other words, the operator P must be redesigned in a way that to produce a damaged and a beneficial organism in accordance with the function of nature. It is essential that one of the solution candidates produced by the operator P must be absolutely more successful. This is a requirement of the situation in the nature because the main task of the operator P is to ensure diversity in the ecosystem. It should be possible to produce successful new organisms naturally while providing diversity.

The three items mentioned above briefly show that the SOS algorithm is not flexible in terms of design and coding. This situation restricts the manageability of the search process, especially in terms of -lm and -ns. In many other heuristic algorithms, it can be seen that neighborhood search and getting rid of local minima have been made manageable. For example, a number of crossover methods have been developed for GA [4]. The crossover operator can apply these methods using the user-defined strategies. In this way, searches can be made in the neighborhood of parental individuals. So it is possible to say that neighborhood search in GA is a manageable process in this way. In addition, the crossover rate similarly provides manageability to process in terms of ns. In addition to that, it can be said that the manageability of the process is also available in terms of lm, in GA. Therefore, a user-defined mutation coefficient is used in GA. Similarly, in the ABC [11] algorithm, neighborhood searches are performed through scout bees sent to the elite bee environment. In the ABC algorithm, environmental size is the value that makes the neighborhood search manageable. By changing this value, the user gains control chance in terms of ns. The management of the lm process in the ABC algorithm is partly user-controlled. The lm process in the ABC is carried out by onlooker bees. The user can only change the number of onlooker bees in this process. Namely, it is not possible to talk about a dynamic strategy. In spite of all these, the SOS gives better results than GA and ABC. Main reason of this is that optimum values of the user-defined control parameters in the GA and ABC algorithms are unknown. Additionally, optimum values of control parameters may vary within the search process. This change can only be achieved by making the parameter values dynamic. This requires the search process to be managed with an adaptive strategy. The values given to these user-defined parameters are extremely effective in the success of the search process. Thus, ensuring manageability of an algorithm with a static approach may not always produce good results. The level of expertise of users is highly effective in

describing control parameters values. Perhaps the most important factor in the success of the SOS algorithm or in producing stable results is that it is not user manageable. In addition to this, the success of the bacteria in the nature and its benefits on the SOS algorithm should not be forgotten. As a result, the successful design of the M and C operators, in part, enables the SOS to find optimal solutions. In future studies, it is expected that the SOS algorithm can provide more optimal solutions with (i) designing operators M and C with optimum coefficients (ii) making the solution candidates produced by these operators manageable automatically with dynamic and adaptive strategies (iii) designing in a way that will allow the intervention of expert designers when necessary.

REFERENCES

- [1] Blum C. and Roli A., "Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison", *ACM Computing Surveys*, 35(3): 268-308, (2003).
- [2] Yang X.S., *Scholarpedia*, 6(8):1147, (2011).
- [3] Lin, A., Sun, W., Yu, H., Wu, G., & Tang, H., "Global genetic learning particle swarm optimization with diversity enhancement by ring topology", *Swarm and evolutionary computation*, 44: 571-583, (2019).
- [4] Ali, A. F., Tawhid, M. A., "A hybrid particle swarm optimization and genetic algorithm with population partitioning for large scale optimization problems", *Ain Shams Engineering Journal*, 8(2): 191-206, (2017).
- [5] Dorigo M., "Optimization, Learning and Natural Algorithms", PhD thesis, Politecnico di Milano, (1992).
- [6] Chen, Z., Zhou, S., & Luo, J., "A robust ant colony optimization for continuous functions", *Expert Systems with Applications*, 81: 309-320, (2017).
- [7] Dorigo M. and Stützle T., "Ant Colony optimization", *MA: MIT Press*, Cambridge, (2004).
- [8] Jana, B., Mitra, S., & Acharyya, S., "Repository and Mutation based Particle Swarm Optimization (RMPSO): A new PSO variant applied to reconstruction of Gene Regulatory Network", *Applied Soft Computing*, 74: 330-355, (2019).
- [9] Mason, K., Duggan, J., & Howley, E., "A meta optimisation analysis of particle swarm optimisation velocity update equations for watershed management learning", *Applied Soft Computing*, 62: 148-161, (2018).
- [10] Rajabioun R., "Cuckoo Optimization Algorithm", *Applied Soft Computing*, 11:5508-5518, (2011).
- [11] Harfouchi, F., Habbi, H., Ozturk, C., & Karaboga, D., "Modified multiple search cooperative foraging strategy for improved artificial bee colony optimization with robustness analysis", *Soft Computing*, 1-24, (2017).
- [12] Karaboga, D., Kaya, E., "An adaptive and hybrid artificial bee colony algorithm (aABC) for ANFIS training", *Applied Soft Computing*, 49: 423-436, (2016).
- [13] Sun, G., Ma, P., Ren, J., Zhang, A., & Jia, X., "A stability constrained adaptive alpha for gravitational search algorithm", *Knowledge-Based Systems*, 139: 200-213, (2018).
- [14] Kahraman H. T., Sagirolu S., and Colak I., "The development of intuitive knowledge classifier and the modeling of domain dependent data", *Knowledge Based Systems*, 37: 283-295, (2013).
- [15] Rao R.V., Savsani V.J, and Vakharia D.P., "Teaching-learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems", *Computer-Aided Design*, 43: 303-315, (2011).
- [16] Cheng M.Y., and Prayogo D., "Symbiotic Organisms Search: A new metaheuristic optimization algorithm", *Computers and Structures*, 139: 98-112, (2014).
- [17] Trana D.H., Cheng M.Y., and Prayogo D., "A novel Multiple Objective Symbiotic Organisms Search (MOSOS) for time-cost-labor utilization tradeoff problem", *Knowledge-Based Systems*, 94: 132-145, (2016).
- [18] Meng A., Li, Z., Yin, H., Chen, S., and Guo, Z., "Accelerating particle swarm optimization using crisscross search", *Information Sciences*, 329: 52-72, (2016).
- [19] Wang Z., Xing H., Li T., Yang Y., Qu R., and Pan, Y., "A Modified Ant Colony Optimization Algorithm for Network Coding Resource Minimization", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 20(3): 325-342, (2016).
- [20] Lin Q., Chen J., Zhan Z.H., Chen W.N., Coello C.A.C., Yin Y., Lin C.M., and Zhang J., "A Hybrid Evolutionary Immune Algorithm for Multiobjective Optimization Problems", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 20(5): 711-729, (2016).
- [21] Seçkiner S.U., Eroğlu Y., Emrullah M., and Dereli T., "Ant colony optimization for continuous functions by using novel pheromone updating", *Applied Mathematics and Computation*, 219(9): 4163-4175, (2013).
- [22] Civicioglu P., "Backtracking search optimization algorithm for numerical optimization problems", *Applied Mathematics and Computation*, 219(15): 8121-8144, (2013).
- [23] Topal A. O., and Altun O., "A novel meta-heuristic algorithm: Dynamic Virtual Bats Algorithm", *Information Sciences*, 354: 222-235, (2016).
- [24] Baykasoğlu A., and Akpınar Ş., "Weighted Superposition Attraction (WSA): A swarm intelligence algorithm for

- optimization problems–Part 1: Unconstrained optimization”, *Applied Soft Computing*, 56: 520-540, (2017).
- [25] Özkış A., and Babalık A., “A novel metaheuristic for multi-objective optimization problems: The multi-objective vortex search algorithm”, *Information Sciences*, 402: 124-148, (2017).
- [26] Babalık A., Ozkis A., Uymaz S.A., and Kiran, M.S., “A multi-objective artificial algae algorithm”, *Applied Soft Computing*, 68: 377-395, (2018).
- [27] Aydilek İ.B., “A hybrid firefly and particle swarm optimization algorithm for computationally expensive numerical problems”, *Applied Soft Computing*, 66: 232-249, (2018).
- [28] Melki G., Kecman V., Ventura S., and Cano A., “OLLAWV: OnLine Learning Algorithm using Worst-Violators”, *Applied Soft Computing*, 66: 384-393, (2018).
- [29] Zhang J., Xiao M., Gao L., and Pan Q., “Queuing search algorithm: A novel metaheuristic algorithm for solving engineering optimization problems”, *Applied Mathematical Modelling*, 63: 464-490, (2018).
- [30] Trunfio G.A., Topa P., Was J., “A new algorithm for adapting the configuration of subcomponents in large-scale optimization with cooperative coevolution”, *Information Sciences*, 372: 773–795, (2016).
- [31] Karafotias G., Hoogendoorn M., and Eiben A.E., “Parameter Control in Evolutionary Algorithms: Trends and Challenges”, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 19(2): 167-187, (2015).
- [32] Sun G., Zhang A., Yao Y., and Wang Z., “A novel hybrid algorithm of gravitational search algorithm with genetic algorithm for multi-level thresholding”, *Applied Soft Computing*, 46: 703–730, (2016).
- [33] Sahin, O., Akay, B., “Comparisons of metaheuristic algorithms and fitness functions on software test data generation”, *Applied Soft Computing*, 49: 1202–1214, (2016).
- [34] Gupta, S., & Deep, K. “A novel random walk grey wolf optimizer”, *Swarm and evolutionary computation*, 44: 101-112, (2019).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



Çeliklerin işlenebilirliği: kimyasal bileşim, mikroyapı, mekanik özellikler ve işlenebilirlik ilişkisi

Machinability of steels: the relationship between machinability and chemical composition, microstructure and also mechanical properties

Yazar(lar) (Author(s)): Yusuf ÖZÇATALBAŞ

ORCID: 0000-0002-4256-8492

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Özçatalbaş Y., “Çeliklerin işlenebilirliği: kimyasal bileşim, mikroyapı, mekanik özellikler ve işlenebilirlik ilişkisi”, *Politeknik Dergisi*, 23(2): 457-482, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.550000

Çeliklerin İşlenebilirliği: Kimyasal Bileşim, Mikroyapı, Mekanik Özellikler ve İşlenebilirlik İlişkisi

Derleme Makalesi / Review Article

Yusuf ÖZÇATALBAŞ

Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Böl., Gazi Üniversitesi, 06500, Beşevler/Ankara, Türkiye

(Geliş/Received : 05.04.2019 ; Kabul/Accepted : 05.11.2019)

ÖZ

“İşlenebilirlik” işlenen malzemenin bir özelliğidir ve ancak malzemenin nitelikleri değiştirilerek işlenebilirliği değiştirilebilir. Bu durum ise, malzemenin kimyasal ve fiziksel özelliklerindeki değişimle sağlanır. Derleme niteliğindeki bu çalışma ile “İşlenebilirlik” kavramını kapsamlı şekilde açıklamak ve çeliklerin işlenebilirliğini geliştirmek amaçlı yapılan çalışmaları tartışmak amaçlanmıştır. İşlenebilirlik değerlendirmelerinde, genel olarak çeliklerin mekanik özellikleri ve esasen sertlikleri dikkate alınır. Sertliği arttıran esas element olan karbon miktarı ve ısıtma işlemleriyle oluşturulan mikroyapılarına bağlı işlenebilirlik değerlendirilir. Bununla birlikte, mekanik özelliklerde belirgin bir değişiklik oluşturmaksızın işlenebilirliği artıran S, Pb, Bi ve Te gibi elementlerin ilavesi, talaşlı işlenebilirliği önemli oranda geliştirir. İşlenebilirlik değerlendirmesi ise, talaş kaldırma sürecinde oluşan kesme kuvveti, takım ömrü, yüzey kalitesi ve talaş biçimi dikkate alınarak dercelendirilir. Kimyasal bileşim ve mikroyapının çeliklerin işlenebilirlik derecelendirmesine etkisi, malzeme ve metalürji bilimi alanında en çok çalışılan konulardan biridir. Çeliğin üretim sürecindeki değişkenlerinin yanında, ısıtma işlemleriyle oluşturulan mikroyapıya bağlı işlenebilirlik değerlendirmeleri de önemlidir. Belirtilen işlemlerle sağlanan mikroyapıdaki fazların heterojen dağılımları, işlenebilirlik değerlendirmelerinde göz ardı edilmemelidir.

Anahtar Kelimeler: Çelik, otomat çelikleri, alaşım elementleri, ısıtma işlemleri, mikroyapı, işlenebilirlik.

Machinability of Steels: The Relationship Between Machinability and Chemical Composition, Microstructure and also Mechanical Properties

ABSTRACT

Machinability is a feature of the material being processed and can only be changed by changing the properties of the material. This is achieved by changes in the chemical and physical properties of the material. The aim of this compilation study is to explain the machinability concept extensively and to discuss the works done to improve the machinability of the steels. When evaluating the machinability of steels, their mechanical properties and especially their hardness are taken into consideration. The machinability depending on the microstructures formed by heat treatments and the amount of carbon which is the main element that increases the hardness are evaluated. However, the addition of S, Pb, Bi and Te etc. elements increase the machinability without significant changes in the mechanical properties of steel. The machinability is graded by taking into consideration of the cutting force, tool life, surface quality and chip shape generated during the machining process. The effect of chemical composition and microstructure on machinability of steels is one of the most investigated subjects in the field of materials and metallurgical science. In addition to the variables in the production process of steel, microstructure-based machinability assessments generated by heat treatments are also important. The heterogeneous distribution of the phases in the microstructure provided by the mentioned processes should not be ignored in the machinability assessments.

Keywords: Steel, free cutting steels, alloying element, heat treatment, microstructure, machinability.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüz yılı aşkın süredir mühendislik malzemelerinin en önemlisi olan ve üretim sektöründe yaygın kullanılan çelik malzemelerin işlenebilirliği ve geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar halen devam etmektedir. Konu hakkında yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunun, ilklerin belirlendiği bulgular ve kuramlar üzerine oturtulduğu görülmektedir. Bununla birlikte, genele münhasır

bilgilerin dışında ve kısmen genel bilinene aykırı verileri içeren çalışmalar da gözden kaçmamaktadır. Detaylı araştırmalarla bu verilerin de delillendirilmesiyle aslında “Talaşlı İşlenebilirliğin”, işlenen malzemenin mikro ve hatta atomik boyutta değişen özelliklerine ne kadar bağlı olduğu görülmektedir. İşlenen malzemenin mikro yapısının homojen ve özelliklerinin izotropik olduğu varsayılarak ulaşılan işlenebilirlik sonuçlarının, aslında yine işlenen malzemenin heterojen mikroyapısına bağlı olarak da önemli oranda değiştiği görülmüştür.

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

Bu çalışmada, farklı yaklaşımlarla da izah edilmeye çalışılan “İşlenebilirlik” kavramının olması gereken malzeme bilimi ve mühendisliği bakış açısıyla izahına çalışılmıştır. Ayrıca çeliklerin işlenebilirliğinin metalürji bilimi ve mühendisliği yaklaşımıyla da izahı amaçlanmıştır. Bu sayede, genel bilinenlerin dışında başlangıçta aykırı gelebilecek mekanik özellik-ışlenebilirlik ilişkisi, mikro yapısal özellik-ışlenebilirlik yaklaşımlarıyla açıklanmaya çalışılmıştır. Geniş bir literatür taramasıyla sunulan bu çalışma ile gerek konuyla ilgili akademik araştırmalara ve gerekse sektörel çalışmalara önemli bilgi desteği sağlanacağı düşünülmektedir.

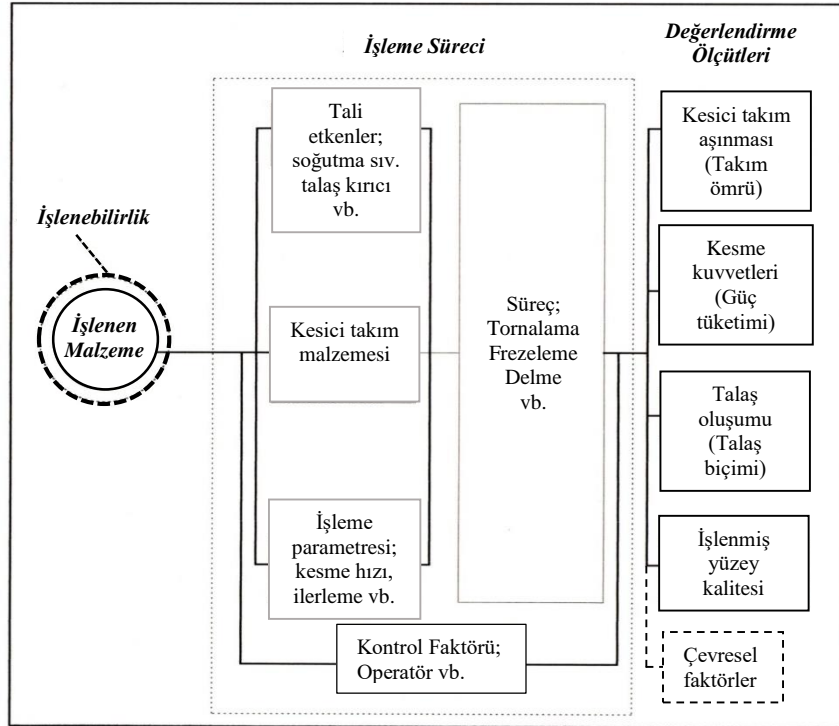
1.1. Talaşlı İmalat (Machining)

Talaşlı imalat süreçleri, modern üretimin vazgeçilmez aşamalarından biridir. Şekillendirilen ürünlerin % 80'inden fazlasının tamamlanmadan önce işlendiği tahmin edilmektedir [1]. Gardner Business Media Inc.'e göre dünya çapında yıllık takım tezgâhları üretimi (metal kesme ve metal şekillendirme) 2012 yılında yaklaşık 93 milyar ABD doları olmuştur [2]. Aynı şirket, bu süre boyunca taşlama diskleri ve diğer aşındırıcılar da dahil olmak üzere metal kesme takımları için 3,6 milyar dolar harcadığını belirtmektedir [3]. Bir metal kesme veya işleme sürecinin kesin bir tanımını bulmak zor olsa da

kısaca, talaş formundaki istenmeyen bir malzemeyi iş parçasından ayırmak için gerekli işleme süreci olarak belirtilebilir [4]. Talaşlı imalat işlemleri tornalama, frezeleme, delme, broşlama ve raybalama işlemleri gibi sayılabilir. Talaşlı imalat alanındaki araştırmaların yüzyıldan fazla bir süredir gerçekleştirilmesine ve yıllar boyunca önemli ilerlemeler kaydedilmesine rağmen, modern bilim insanları tarafından da halen benzer amaçlar için çalışmalara devam edilmektedir. Tüm imalat işlemleri üzerine yapılan araştırmalara göre, parçanın işlenmesiyle ilgili araştırmaların amacı daha düşük üretim maliyetiyle yüksek kalitede ürünler üretmektir. Buna ek olarak, yeni geliştirilen malzemelerin sürekli pazara eklenmesiyle birlikte, talaşlı imalat alanında da sürekli araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır [5].

1.2. İşlenebilirlik Kavramı (Concept of Machinability)

İşlenebilirlik kavramı içindeki en genel mana, talaş kaldırma sırasında meydana gelen kayıpların yüksek veya düşük olacağını ifade eder [6]. Şekil 1'de gösterildiği gibi işlenebilirlik işlenen malzemeye özgü bir özelliktir ve bir malzemenin işlenebilirliğini ancak kimyasal bileşimi, mikroyapısı, mekanik özellikleri vb. değişkenler etkiler [7].



Şekil 1. Kontrol halkası şeklinde gösterilen talaş kaldırma süreci ve işlenebilirlik (Machinability and chip removal process shown as control ring) [7]

Talaş oluşumu, takım aşınması, işlenmiş yüzeyin kalitesi ve kesme kuvvetleri gibi işleme karakteristikleri ile mühendislik malzemelerinin işlenebilirliği belirlenebilir [8-10]. Bununla birlikte, özellikle son yıllarda, bir

malzemenin talaşlı imalatı sürecinde oluşan çevresel etkiler de (alerjik etkiler, gürültü seviyesi, kesme sıvıları vb.) dikkate alınarak işlenebilirlik değerlendirmesi de yapılabilmektedir. [10]. Kısacası iyi veya kötü

işlenebilirlik şeklinde değerlendirme subjektiftir ve göz önünde bulundurulmuş en önemli değerlendirme ölçütüne bağlıdır [11,12].

İşleme sürecindeki değişkenlerin (takım malzemesi, kesme hızı, takım geometrisi, soğutma sıvısı vb.) işlenebilirlik değerlendirme ölçütlerini etkilemesi, işlenen malzemenin işlenebilirliğini değiştirdiği anlamına gelmez. Şekil 1’de verilen kontrol halkası, özgün bir işlenebilirlik özelliğine sahip malzemenin talaşlı imalat sürecini, değerlendirme ölçütlerinden biri veya birkaçını dikkate alarak optimize etmek için de kullanılır. Bu sayede malzemenin sahip olduğu işlenebilirlik özelliğine uygun kesme parametreleri, takım malzemesi vb. seçilerek kesme kuvvetleri ve takım aşınması minimize edilip yüzey kalitesi iyileştirilebilir. Ancak işleme parametrelerindeki değişkenlerle sağlanan değerlendirme ölçütlerindeki iyileşme, işlenen malzemenin işlenebilirliğinin de iyileştiği anlamına gelmez. Zira işlenebilirlik ancak işlenen malzemenin özellikleri değiştirilerek değiştirilebilir. İşlenebilirlik özelliği, malzemenin sahip olduğu sertlik özelliği gibidir. Sertlik ölçme metodunun değişmesiyle değişen sertlik verileri, malzemenin sahip olduğu sertliğin değiştiği anlamına gelmez. Ancak, malzemenin sertliğine uygun bir metotla sertliğinin ölçülmesi gerekliliği vardır.

Bir malzemenin işlenebilirliği kimyasal bileşimine, üretim yöntemlerine ve uygulanan ısıl işlemlere göre oluşan mikroyapıların, sabit işleme süreçleri için değerlendirme ölçütlerinde meydana getirdiği etkilere göre tanımlanır [6]. Genel olarak bir malzemenin işlenebilirliğini tanımlamada kullanılan sertlik, akma ve çekme dayanımı gibi mekanik özellikler bazen yetersiz kalır. Zira, yaklaşık aynı mekanik özelliklerde ancak içerdiği kimyasal bileşim ve mikroyapı bakımından farklılık gösteren malzemeler çok daha farklı işlenebilirlik özellikleri gösterebilirler. Bunun en iyi örneği otomat (kolay işlenebilen) çeliklerdir [13,14]. Ayrıca, benzer kimyasal kompozisyon veya mikroyapıda olmasına rağmen ve yaklaşık aynı mekanik özellikleri veren malzemelerin mikroyapılarındaki homojensizlikten kaynaklanan anizotropik durum, işlenebilirlikte de farklı sonuçlar doğurabilmektedir [15-19]. Malzemelerin üretim proseslerinden kaynaklanan

ve/veya mikro segregasyonların meydana getirdiği mikroyapısal heterojenliğin sebep olduğu işlenebilirlikteki düzensizlik ve anizotropi halen araştırılan konulardandır [20-23].

Derleme niteliğindeki bu çalışmada, “işlenebilirlik” kavramının netleştirilmesi ve çeliklerin işlenebilirliği bakımından bilinen genel literatür verileriyle birlikte, kimyasal bileşim ve ısıl işlemlerle değiştirilen mikroyapının çeliklerin işlenebilirliğine etkisi açıklanmaya çalışılmıştır. İşlenebilirlik değerlendirmeleri ağırlıklı olarak talaş oluşumu, yüzey kalitesi, talaş kaldırma kuvvetleri ve takım ömrü dikkate alınarak yapılmıştır.

2. KİMYASAL BİLEŞİM VE MİKROYAPININ İŞLENEBİLİRLİĞE ETKİSİ (EFFECT OF CHEMICAL COMPOSITION AND MICROSTRUCTURE ON MACHINABILITY)

2.1. Karbonun Etkisi (Effect of Carbon)

Çelikte sertliği arttıran esas element karbondur. Karbon miktarındaki değişim işlenebilirliğin de değişmesine sebep olur. Ötektoid altı çeliklerde sementit (Fe_3C) çeliğin sünekliğini azaltır. Arttırılan sertlikle, süneklikteki azalmaya rağmen işlenebilirlikte ilerleme sağlanır. Yumuşak çelikteki düşük işlenebilirlik, talaş kaldırma sırasında önemli bir deformasyona izin veren metalin sünekliğinden kaynaklanır. Bu deformasyon için aşırı güç tüketimi gereklidir ve önemli miktarda ısı oluşur [24]. Ticari saflıktaki Al, Cu, Ni ve Fe gibi çoğu metallere talaş kaldırılması sırasında meydana gelen kesme kuvvetleri çok yüksektir. Bu metaller işlenirken, takım-talaş arayüzündeki temas alanı çok büyük, kesme düzlemi açısı küçüktür. Geniş temas alanı metallere sünekliği ile ilgilidir [25]. Yüksek kesme kuvvetlerinin geniş temas alanı ile ilgili olduğu özel olarak biçimlendirilmiş (temas alanı azaltılmış) kesici takımlarla yapılan deneylerle gösterilebilir. Çizelge 1’de verilen bu ilişki çok düşük karbonlu bir çeliğin 91,5m/dak kesme hızında, 0,25mm/dev ilerleme ve $a=1,25mm$ talaş derinliği ile işlenmesi sırasında belirlenmiştir.

Çizelge 1. Takım/Talaş temas uzunluğunun talaş kaldırma mekaniğine etkisi (Effect of tool / chip contact length on cutting mechanics) [26]

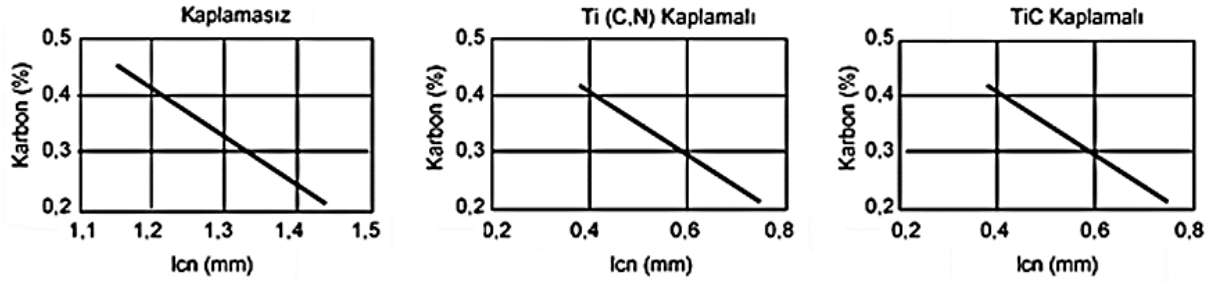
	Normal takım	Temas uzunluğu kısaltılmış takım
Kesme Kuvveti, F_c	1400 N	670 N
İlerleme Kuvveti, F_f	1310 N	254 N
Kesme Düzlemi açısı, ϕ	7 ° 58'	21 ° 39'
Talaş kalınlığı, t_c	1,83 mm	0,66 mm

Araştırmalara göre [26-28], kesme kuvvetini ve takım aşınmasını etkileyen takım-talaş temas uzunluğu, takım ve iş malzemesinin mekanik özelliklerinin bir

fonksiyonudur. Kesici kenarın yapışma bölgesine kadar temas uzunluğundaki azalma takım sıcaklığında, kesme kuvvetlerinde ve her iki yüzey (talaş ve yan yüzey)

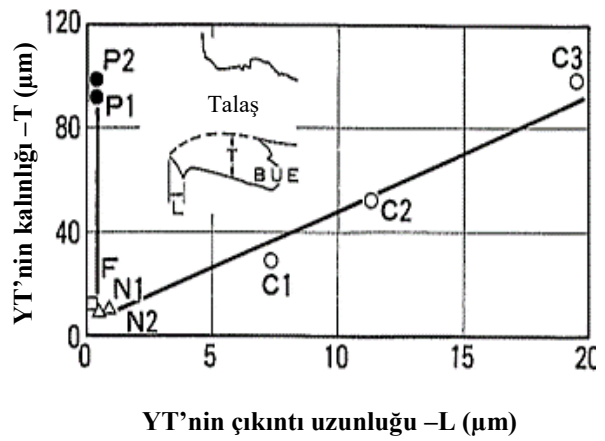
aşınmasında azalmaya sebep olur. Temas uzunluğunun yapışma bölgesinden kısa olması halinde, maksimum sıcaklık bölgesi takımın esas kesme kenarına doğru kayar. Bu durum, takımın plastik şekil değişim miktarındaki artışla birlikte parça-takım yan yüzeyi arasındaki temas alanını da artırır ve daha fazla yan yüzey aşınması meydana gelir. Bu olay, özellikle yüksek kesme hızlarında meydana gelir. Şekil 2’de kaplamalı ve

kaplamasız sert metal takımla $V=250$ m/dak, $f=0,28$ mm/dev ve $a=2,5$ mm kesme şartlarında gerçekleştirilen deneyde, malzemelerin karbon miktarı ile tabii temas uzunluğu (l_{cn}) arasındaki ilişki gösterilmiştir. Buradan anlaşılacağı üzere, artan karbon miktarı takım-talaş temas uzunluğunu kısaltır ve ayrıca seramik kaplı takımlarla işlemek, temas uzunluğunu %70 oranında azaltılabilir.

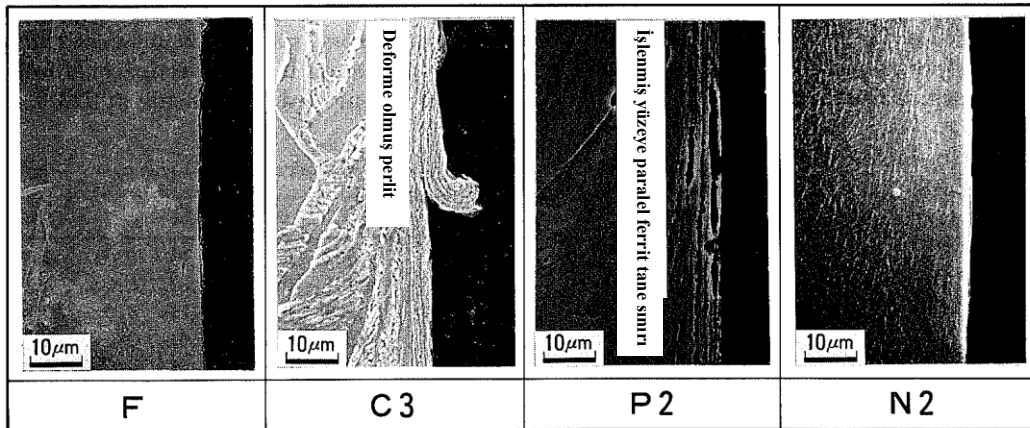


Şekil 2. Kaplamalı/kaplamasız takımlar ve çelikteki karbon miktarı ile tabii temas uzunluğu ilişkisi (Relationship between the amount of carbon in steel and the coated/ uncoated tools and also the contact length) [26].

Çelikte artan karbon miktarı ile birlikte ikincil sert fazın miktarı da artar. Ferrit - Sementit gibi çift fazlı yapıya sahip bir çelikte fazların her birinin sünekligindeki aşırı farklılık nedeniyle kesme sırasında mikro çatlak oluşumu, fazların arayüzeyleri boyunca meydana gelir. Kesme işlemi daima takımın talaş yüzeyi üzerinde başlamaz ve mikro çatlak/mikro boşlukların yoğun olduğu daha ileri bölgede kesme olabilir. Bu durumda artan mikro çatlaklarla talaştan kopan parçacıklar takım ucunda sinterlenerek yığılıp, yığıntı talaşı (YT) (Built-Up Edge-BUE) meydana getirirler [29, 30]. Oluşan yığıntı talaşın kalınlığından (T) ziyade çıkıntı uzunluğundaki (L) artmayla birlikte yüzey pürüzlülüğü de artar. Bu durum saf demir (F), çelikteki karbon miktarı (C1-C3), azot miktarı (N1, N2) ve fosfor miktarı (P1, P2) ile bağıntılı olarak Şekil 3 ve Şekil 4. C3 (% 0,38 C içerir) ’de taramalı elektron mikroskop (SEM) fotoğrafları ile gösterilmiştir [29, 31].

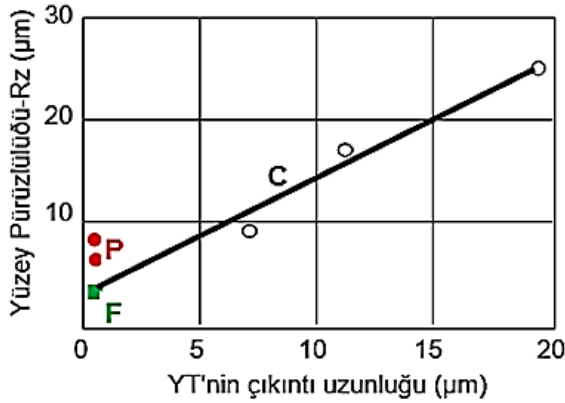


Şekil 3. YT boyutuna alaşım elementlerinin etkisi (Effect of alloying elements on BUE size) [29, 31]



Şekil 4. İşlenmiş yüzey kesitinin SEM görüntüleri (SEM images of machined surface section) [29]

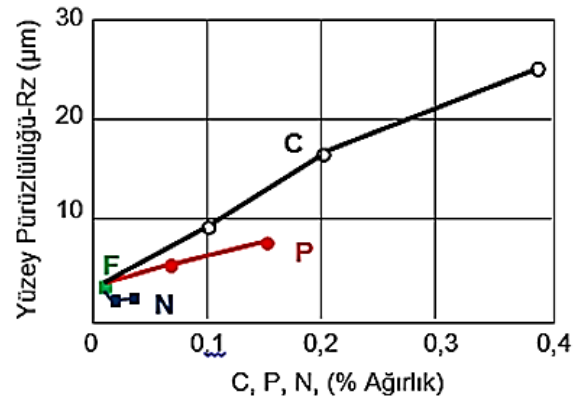
Bitirme yüzeyinin pürüzlülüğü ve işlenen parça boyutundaki artış, yığıntı talaşın parçaya yapışmasına bağlanır (Şekil 4.C3) [17, 29-31]. İlerlemedeki azalış ve kesme hızındaki artışla yığıntı talaş oluşumu azalacağından yüzey pürüzlülüğü de azalır [30]. Detaylı araştırmalar, işlenen yüzeyin pürüzlülüğünün daha çok yığıntı talaşın çıkıntı uzunluğuna (L) bağlı olduğunu ve kalınlığı (T) ile ilişkili olmadığını gösterir (Şekil 5).



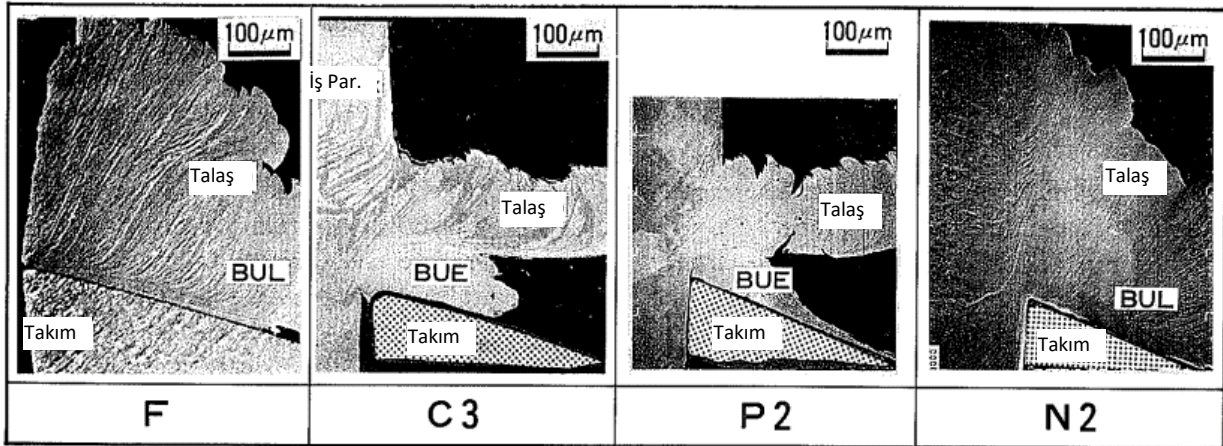
Şekil 5. YT çıkıntı uzunluğunun yüzey pürüzlülüğüne etkisi [28, 30] (Effect of BUE projection length on surface roughness)

En sünek ve yumuşak saf demirin yüzey pürüzlülüğü minimumken, alaşım elementlerinden özellikle C ve P'nin ağırlıkça oranı arttıkça yüzey pürüzlülüğü de artar, ancak azot katkısının saf demire göre yüzey

pürüzlülüğünü daha da iyileştirdiği belirlenmiştir (Şekil 6). Şekil 7'de verilen talaş kökü SEM incelemesinde, saf demirin ve %0,037 N katkılı malzemenin işlenmesinde YT oluşmadığı ancak yığıntı tabaka (YTB) (Built-Up Layer-BUL) meydana geldiğini görülmektedir [29, 31]. Ancak, karbon (C3) katkılı malzemede ise, önemli boyutta kalınlığa ve çıkıntı uzunluğuna sahip YT talaş formu oluşmuştur. % 0,15 fosfor (P2) katkılı malzemelerde ise çıkıntı uzunluğu bulunmayan belirli kalınlıkta YT oluşumuna rastlanmıştır. Bu tespitler esasen, işlenen yüzeyin pürüzlülüğüne yığıntı talaşın kalınlığından ziyade çıkıntı uzunluğunun önemli etkisinin olduğunu göstermektedir.



Şekil 6. Karbon, fosfor ve azot miktarının Yüzey pürüzlülüğüne etkisi [28,30] (Effect of carbon, phosphorus and nitrogen contents on surface roughness)



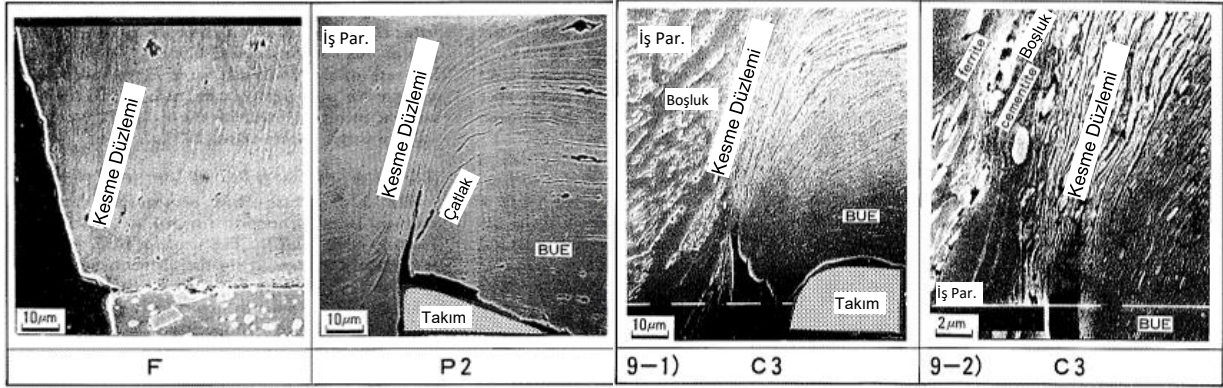
Şekil 7. Takım ve talaş arasındaki yapışmanın SEM görüntüleri [29, 31] (SEM photographs of adhesions between tool and chip)

Bu alaşım elementlerinin YT oluşumuna ve morfolojisine etkisi incelendiğinde ise, Şekil 8'deki SEM görüntülerinden de anlaşılacağı gibi, saf demirin kesme düzleminde mikro çatlak oluşumuna rastlanmaz, fosfor katkısının ise (P2) ancak kesme düzlemi üzerinde (talaş tarafında) mikro çatlaklara sebep olduğu ve bu durumun çıkıntı uzunluğu oluşturmayan bir YT meydana getirdiği görülmektedir. Saf demire karbon katkısı ile birlikte meydana gelen sert fazın (Fe_3C) oranı artar.

Birincil deformasyon bölgesindeki plastik deformasyonun etkisiyle, ferrit ve sementit arayüzeyinde meydana gelen mikroboşluk ve çatlakların kesme düzlemi üzerinde oluşmasının yanında, bu düzlemin altında da (iş parçası tarafı) meydana gelir. Kesme düzleminin altında meydana gelen mikro çatlaklar ise YT'nin kesici takımın altına doğru bir çıkıntı şeklinde büyümesine sebep olmaktadır (C3/9-1 ve 9-2). Bu durum da, C3 malzemenin işlenmesinde oluşan YT

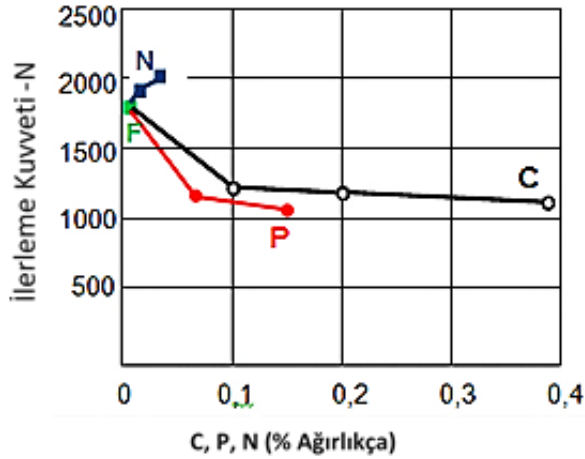
çinkıntılarının işlenen yüzeye batması ve işleme geometrisini bozmasıyla yüzey pürüzlülüğü artar [31].

Şekil 4’de verilmiş olan SEM görüntüleri de bu sonuçları doğrular.



Şekil 8. Birincil deformasyon bölgesine komşu mikro çatlaklar ve mikroyapılar [29,31] (Micro cracks and microstructures in neighborhood of primary deformation zone)

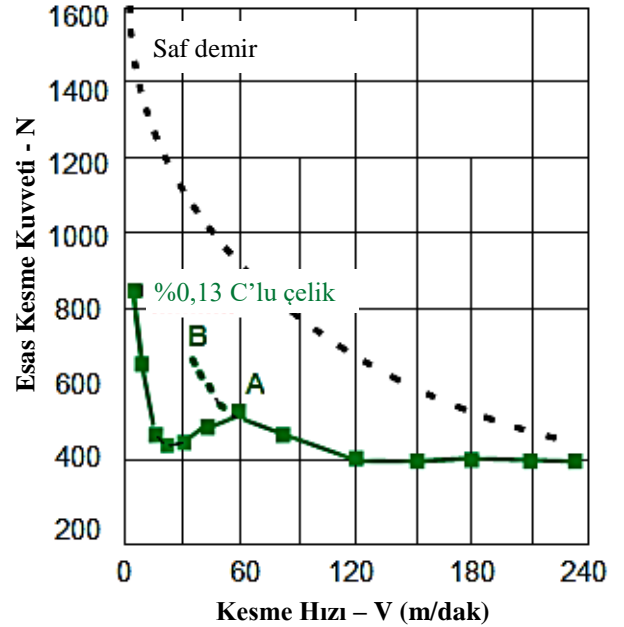
Şekil 9’da saf demire ilave edilen C, N, P gibi alaşım elementlerinin tornalama sürecindeki ilerleme kuvvetine etkisi gösterilmiştir [29, 31]. Burada, azot katkısının sağladığı etkinin tersine, C ve P oranındaki artışla birlikte yatay (ilerleme) kuvvetinin düştüğü görülmektedir. Bu durum, birincil deformasyon bölgesindeki gerilim konsantrasyonu sebebiyle boşluk ve mikro çatlakların başlangıcını oluşturan karbon ve fosfor içerikli ikincil fazların varlığına bağlanabilir. Demir içindeki azot varlığının ilerleme kuvvetini artırma etkisi ise, ikincil faz oluşturmaksızın, azotun arayer katı eriği olarak demir kafesindeki deformasyona karşı direnciyle ilgilidir.



Şekil 9. C, P, N, miktarı ile ilerleme kuvveti arasındaki ilişki [29]. (Effect of C, P and N contents on horizontal force)

Saf demir ve % 0,13 karbonlu bir çeliğin 6°'lik talaş açısıyla işlenmesi sırasında tespit edilen kesme kuvveti eğrileri Şekil 10’da verilmiştir. Karbonlu çelik eğrisinde orta hız aralığındaki sapma yığıntı talaş etkisini gösterir. Bu olay saf metallerde olmayan fakat çift fazlı alaşımların işlenmesi sırasında gözlenen olağan dışı bir sapmadır. Kararlı yığıntı talaş durumunda kuvvetler genellikle anormal olarak düşer. Yığıntı talaş, takım temas yüzeyini kısaltmış gibi davranır ve takım - talaş

temas alanındaki azalma, kesme kuvvetlerinde azalmaya sebep olur [32].



Şekil 10. Karbon oranının esas kesme kuvvetine etkisi [31] (Effect of carbon content on main cutting force)

Ağırlıkça % 0,13 karbonlu çeliğin kesme işleminin başında takım üzerinde YT oluşur. Birkaç cm’lik kesme sonunda 60 m/dak üzerindeki kesme hızında YT giderilir. Bu hızın altında kesme işlemi boyunca yığıntı talaş devam eder. Üzerindeki hızlarda ise, yumuşak çeliğin davranışı kesme kuvvetindeki düşüş bakımında saf demirle benzer ilişkiyi gösterir. % 0,13 C’lu çelik saf demirle karşılaştırıldığında takım-talaş temas uzunluğunun azaldığı ve kesme düzlemi açısının arttığı vurgulanır. Kesme hızı 60 m/dak civarında iken yumuşak çelik için kesme düzlemi açısı 14°, saf demir için ise 6,5°’dir. Bu kesme kesme hızında, talaş kalınlıklarındaki düzensizlik ve ikincil deformasyon bölgesinin kalınlığında artış mevcuttur. Kesme hızındaki artışla

daha düzenli bir talaş ve daha düşük kesme kuvveti ile birlikte, ikincil deformasyon bölgesi kalınlığı azalır. Düşük kesme hızında ise % 0,13 C'lu çelik, saf demire göre farklılık gösterir. 1,5 m/dak'da kesme kuvveti bağıl olarak yüksektir ve talaş dilimlidir. Kesme hızındaki artışla birlikte kesme kuvvetinde hızlı bir düşüş vardır. Sürekli talaş oluşumunun yanında 4,5 ila 6 m/dak civarında takım üzerinde YT oluşur. Düşük kesme hızlarında YT kalınlığı fazladır 60 m/dak'a kadar boyutu giderek azalır ve yaklaşık 60 m/dak'da kaybolur. Takımın etkin talaş açısını artıran yığıntı talaş, takım-talaş temas uzunluğunu azaltarak kesme kuvvetini düşürür. Fakat aynı zamanda YT, kesme enerjisini artıran kör bir takım gibi kesmeye de neden olabilir. Eğer yığıntı talaş oluşmasaydı kesme kuvveti Şekil 10'da BA ile gösterilen eğriyi takip edecektir.

Kesme hızı ve talaş açısındaki artışla mikro çatlakların oluşuma eğilimi azalır [26-30]. Kesme hızı/kesme kuvveti ilişkisi saf veya alaşım malzemelere göre değişkenlik göstermektedir. Tek fazlı saf malzemelerde genellikle artan kesme hızına rağmen kesme kuvvetlerinde düşüş görülür. Bu durum, talaş kaldırma sürecinde birincil deformasyon bölgesindeki iç sürtünme ve ikincil deformasyon bölgesindeki iç ve dış sürtünme kaynaklı ısı oluşumuna ve takım-talaş temas uzunluğunun kısalmasına bağlanır. Zira artan kesme hızı ile birlikte birim zamanda artan sürtünme işi daha fazla ısı oluşumuna ve dolayısıyla talaş kaldırma sıcaklıklarının artmasına sebep olur. Artan sıcaklıkla birlikte, birincil ve ikincil deformasyon bölgelerindeki malzeme mukavemetinin azalması kesme gerilmesini ve sürtünme katsayısını düşüreceğinden [25, 33, 34] kesme kuvvetlerinde azalma görülür. Ancak çok fazlı veya alaşım malzemelerde kesme hızı/kesme kuvveti ilişkisi daha farklı olur. Kesme hızı ve malzemenin alaşımlanması sonucu akma mukavemetindeki artışla kesme düzlemi açısı da artar. ikincil deformasyon bölgesinin kalınlığı ve takım-talaş temas uzunluğu, malzemenin mukavemetindeki ve kesme hızındaki artışla birlikte azalır [16]. Bu durum ise talaş kaldırma kuvvetlerinde azalmaya sebep olur.

2.2. Diğer Alaşım Elementlerinin Etkisi (Effect of The Other Alloying Elements)

Talaşlı işlenebilirliği en çok artıran yumuşak ikincil fazları oluşturan elementlerdir. Bunların arasında en etkili olanı kurşun ve MnS parçacıklarıdır. Ağırıkça % 0,1 - 0,35 S veya % 0,1 - 0,35 Pb veya bunların her ikisinin ilavesi ile üretilen otomat çeliklerinde kesme kuvvetleri, kesme sıcaklıkları ve takım aşınma miktarı azalır [7-13, 35-38].

MnS kalıntılarının işlenebilirlikle ilgili rolü aşağıdaki gibi özetlemiştir [35];

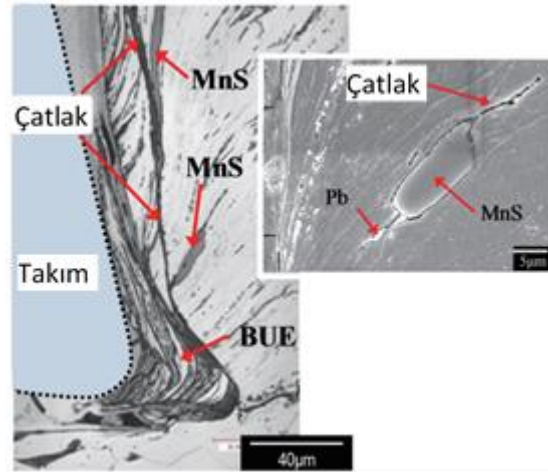
1) Birincil deformasyon bölgesindeki kesme düzlemi içinde çatlak oluşturarak kırılma talaş meydana getirmek için bu düzlemde gerilimi artırıcı rol oynamalı,

2) İkincil deformasyon bölgesinde metalin akışına katılmalı fakat talaşın plastik akışını bozmamalı ve takım yüzeyini sürtünerek aşındırmamalı,

3) Kesme esnasında takım-talaş arayüzeyi sıcaklığında takım yüzeyinde difüzyonlu bir bariyer (tabaka) biçiminde bulunmalı,

4) Kesici takım yan yüzeyinin sürtünerek aşınmasına ve iş parçasında pürüzlü yüzey üretimine engel olmalıdır.

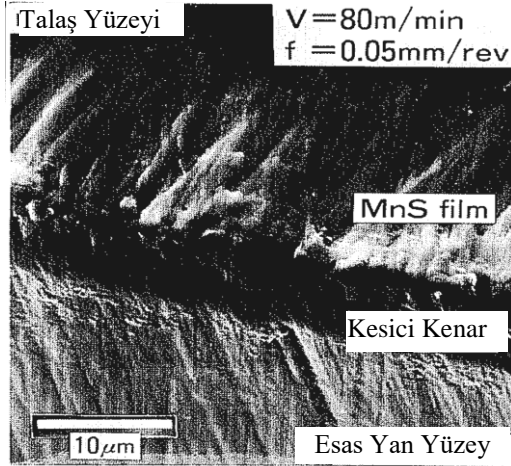
Çeliğe yeterli ve yüksek miktarlarda katılan (Mn) ve kükürt (S), MnS şeklinde bağlanarak kalıntılar (inklüzyonlar) oluştururlar. MnS kalıntıları talaş oluşum sürecinde birincil deformasyon bölgesinde mikro çatlaklar oluşturarak (Şekil 14) kesme gerilmesini düşürür. Böylece kesme kuvvetlerindeki düşüşe paralel olarak tezgâh güç tüketimi azalır [39-42]. Ayrıca, talaş kaldırma sıcaklığı düşürülerek takım ömrü artırılır. Talaş gevrekleştirilerek kısa talaş oluşumu sağlanır. Yüksek deformasyon yeteneği sonucu MnS'ler takım-talaş temas yüzeyinde tabaka oluşturarak (Şekil 15) katı yağlayıcı görevinde bulunur. Takım yüzeyinde bu tip tabaka oluşumu sürtünme katsayısını düşürür. Fakat yüzeyde oluşan tabaka talaş yoluyla uzaklaştırıldığından, tabaka oluşumu sürekli tekrarlanmalıdır [13, 36, 37].



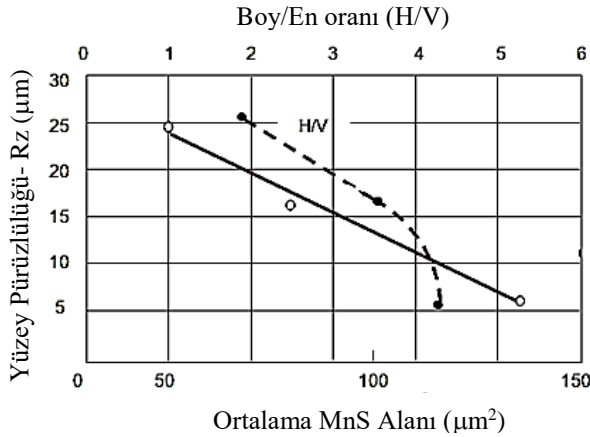
Şekil 14. Pb'li çeliğin I. Deformasyon bölgesinde MnS ve mikro çatlak [39] (MnS and microcrack in I. Deformation zone of steels with Pb)

Talaş kaldırılan kesitteki ortalama MnS alanının artması ve bu yumuşak inklüzyonların boy/en oranındaki artışla birlikte işlenen yüzeyin pürüzlülüğü azalır (Şekil 16). Bu durum, MnS'ün plastik deformasyon kabiliyetinin düşük olduğunu gösterir [44]. Sürekli dökümle üretilen kükürtlü otomat çelikleri ingot döküme göre hemen hemen aynı işlenebilirliğe sahiptir. Fakat mikroskobik hataya sahip olmaması bakımından otomat tezgâhtaki işlenebilirlik deneyine göre [45], sürekli dökümle üretilen otomat çeliğinin işlenebilirlik özelliği daha iyidir [46, 47]. Yumuşak çelik ile kükürtlü otomat çeliğinin işlenmesinde kesme kuvvetleri kıyaslandığında kükürtlü çelikte kesme kuvvetleri daha düşüktür. Bu olay,

kükürtlü çeliğin deformasyon bölgesindeki mikro çatlakların fazlalığı ile ilgilidir [48, 49]. Genel olarak işlenebilirlik değerlendirilmesi yapıldığında ise, küresel forma yakın MnS inklüzyonunun işlenebilirliği arttırdığı, çeliğin deformasyon işlemleri sürecinde çubuksu forma dönüşen inklüzyonların ise göreceli işlenebilirlik sayısını düşürdüğü söylenebilir (Şekil 17) [50].



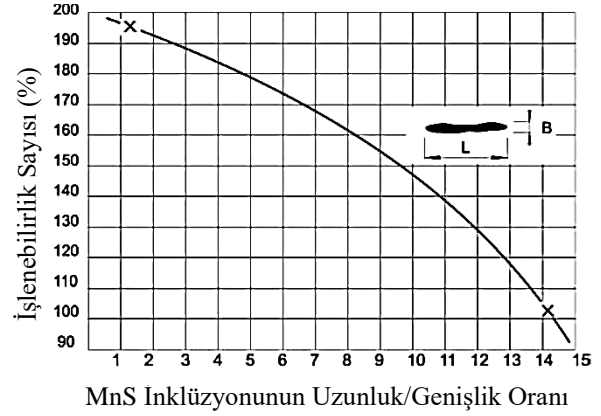
Şekil 15. ZrO₂ takımın talaş yüzeyinde MnS tabakası [43] (MnS layer on rake face of ZrO₂ tool)



Şekil 16. MnS oranı ve biçiminin yüzey pürüzlülüğüne etkisi [48] (Effect of MnS shape and rate on surface roughness)

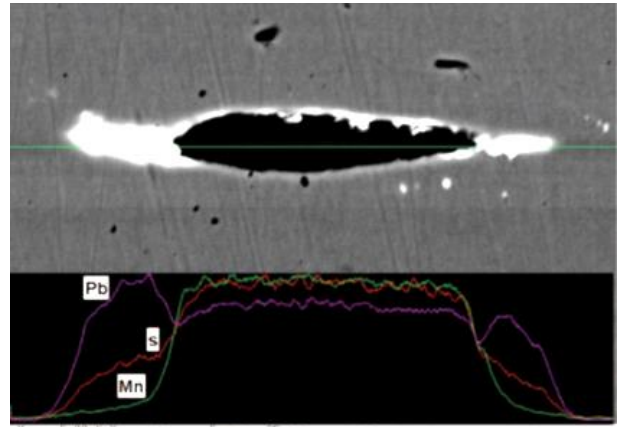
Çeliklerinin yüzey pürüzlülüğü takım malzemesinden de etkilenmektedir. Otomat çeliklerinin farklı kesicilerle işlenmesinde, minimum yüzey pürüzlülüğü ZrO₂ esaslı takımla işlerken oluşur. Daha büyük yüzey pürüzlülükleri sırasıyla, TiN, ZrN, Al₂O₃, TiC, HfO₂, WC+Co, La₂O₃ ve Fe₃C içeren takımlarla işleme ile meydana gelir. MnS kalıntılarının tercihen ZrO₂, TiN, ZrN ve Al₂O₃ takım malzemelerine yapışma eğilimi fazladır. Bu sayede, takım yüzeyinde MnS filmi rahatlıkla oluşur (Şekil 16). Diğer yandan HfO₂, WC+Co, Fe₃C ve La₂O₃ içeren takım yüzeyine ferrit fazının yapışma ve yığıntı talaş oluşma eğilimi görülür. TiC ise kuvvetli şekilde MnS kalıntılarına ve ferrit fazına yapışır. Takımlara MnS kalıntılarının yapışması,

takımların sadece fiziksel özelliklerine bağlı olmayıp kimyasal bileşimine de bağlıdır. Kimyasal etkileşim, çelikteki çok az MnS kalıntısı için dahi takım yüzeyinde MnS tabakası oluşturmayı sağlayabilir [44].



Şekil 17. Çeliklerin işlenebilirlik sayısına MnS biçiminin etkisi [50] (Effect of MnS shape on machinability rate of steels)

Çözünürlüğün olmaması nedeniyle kurşun, çelik mikroyapısı içerisinde küçük tanecikler şeklinde dağılır. Katılaşma sırasında genelde MnS tanelerine takılır ve haddeleme de benzer bir uzama göstererek MnS'lerin çevresini sarar ve/veya uçlarına tutunur (Şekil 18).



Şekil 18. Pb ile sarılmış MnS inklüzyonu [50] (Pb enveloping an MnS inclusion)

Kurşun, yumuşak kalıntı karakteristiğine bağlı olarak işlenebilirliği (MnS'lerin etkisini arttıracak şekilde) olumlu etkiler. İlgili etki mekanizmaları kısmen değişiktir [12, 50];

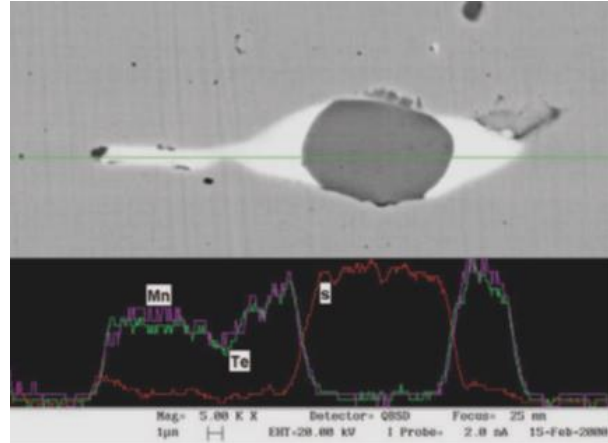
- Kurşunun oldukça düşük ergime sıcaklığı ve çok sünek olması, talaş kaldırma sürecinde kurşun taneciklerinin yoğun plastik deformasyondan geçmesini ve ergimesini sağlar. Sıvı kurşun, çatlak oluşumunu kolaylaştırır. Oluşan talaş parçacıklarının tekrar kaynamasını engelleyerek avantajlı talaş oluşma eğilimini artırır [13].
- Takım/talaş arayüzeyinde oluşan sıvı kurşun sürtünmeyi azaltarak sürtünme aşınmasını

engeller. Düşük miktarlarda yapılan kurşun katkısıyla mangan sülfürün işlenebilirlik etkisi yoğun olarak artırılır.

- MnS ve Pb'nin takım talaş arayüzeyinde devreye girişi talaşların takım yüzeyine yapışarak yığıntı talaş oluşmasını ve krater aşınmasını geciktirir [51, 52].

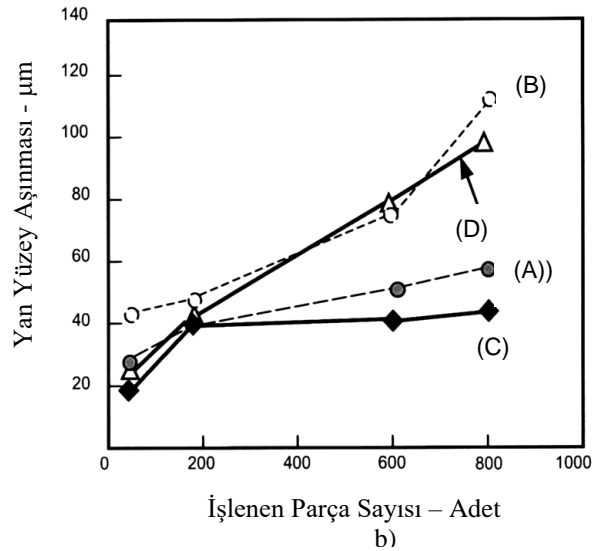
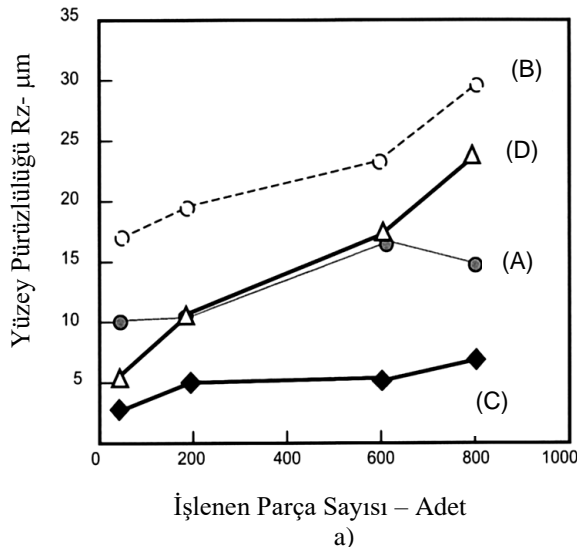
Kükürt ve kurşun ilavelerinden başka, fosfor (P), tellurium (Te), selenyum (Se) ve bismut (Bi) ilaveleri ile çeliğin işlenebilirliği artırılır. Karbon, fosfor ve azot (N)'un yüzey pürüzlülüğü ve yatay (ilerleme) kuvvet üzerine etkisi Şekil 9 ve 10'da verilmişti. Çelikteki Pb ve Bi miktarındaki artışla takım aşınma miktarı azalır [53]. Özellikle yüksek kesme hızlarında Bi, kurşundan daha faydalıdır. Fakat düşük kesme hızlarında durum tersinedir [54, 55]. Otomat çeliklerine Te ilavesi ile kesme kuvvetleri düşürülür ve takım ömrü artırılır [56].

Selenyum (Se) ve tellurium (Te) işlenebilirliği geliştirmede benzer mekanizmalara sahiptir. Bu mekanizma, MnS'nin sıcak deforme edilebilirliğini azaltarak morfolojisinin kontrol edilebilmesiyle ilgilidir. Çelik içindeki MnS Şekil 19' da görüldüğü gibi, mangantellür (MnTe) veya PbTe ile birlikte MnS ötektik formda sarılabilir. Bu sayede sıvı kabuk yüksek gerilmeyi absorbe eder ve MnS'nin deformasyonunu kısıtlar. Bununla birlikte, bütün MnS'ler mangantellür'le çevrelenmez ancak, etkin mekanizmanın esası Te'nin kükürtlerin küreleştirilmesini teşvik etmesine dayanır. Bu mekanizma, malzemenin mekanik özelliklerindeki anizotropiyi azaltmanın yanında işlenebilirliği artırır [50].



Şekil 19. Çelikteki MnTe tarafından sarılmış sülfid inklüzyonu [50] (An inclusion of sulphide surrounded by manganese telluride)

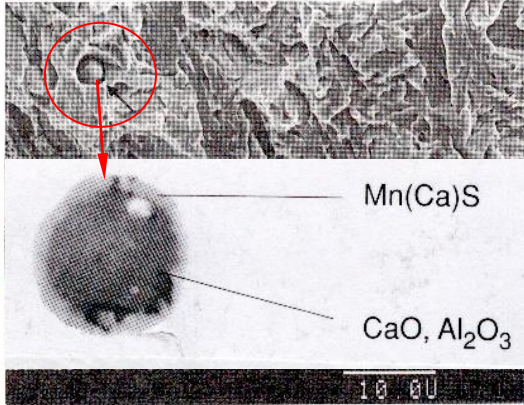
Bununla birlikte, son yıllarda çevreye olan duyarlılığın artması sebebiyle kurşunlu otomat çelikleri (A) yerine geliştirilmeye çalışılan kurşunsuz otomat çelikleri (B) ile ilgili yapılan çalışmalar Şekil 20'de gösterilmiştir [52]. Kurşunsuz otomat çeliklerdeki MnS boyutları ve dağılımlarını değiştirilerek geliştirilen (C) düşük karbonlu otomat çeliklerinin işlenebilirliğinde önemli avantajlar elde edilmiştir. Çelik üretim süreci kontrol edilerek sağlanan homojen dağılımlı çok küçük MnS inklüzyonları ile takım ömrü ve yüzey kalitesinde kaba ve heterojen dağılımlı MnS içeren (D) otomat çeliklerine göre önemli gelişmeler sağlamıştır. Şekil 20'de, iri ve heterojen dağılımlı MnS inklüzyonları içeren çelik ile kurşunsuz otomat çeliğinde yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım yan yüzey aşınma miktarının çok yüksek olduğu görülmektedir. Kurşun katkısı ile her iki olumsuz etki de minimize edilmiştir.



Şekil 20. MnS morfolojisinin otomat çeliklerin işlenebilirliğine etkisi [52] a) Yüzey kalitesine etkisi b) Takım aşınmasına etkisi (Effect of MnS morphology on machinability of free cutting steels a) Effect on surface roughness b) Effect on tool wear)

Ancak, kurşun içermemesine rağmen yalnızca MnS inklüzyonunun boyutları minimize edilerek homojen dağılım sağlanıp geliştirilen otomat çeliğindeki yağlayıcı etkisiyle takım ömründe avantaj sağlanır. Ayrıca, gerek kesme düzlemi boyunca homojen çatlak oluşturma etkisi ve gerekse çok daha küçük boyutlarda oluşan yığıntı talaş sebebiyle minimum yüzey pürüzlülüğü elde edilir.

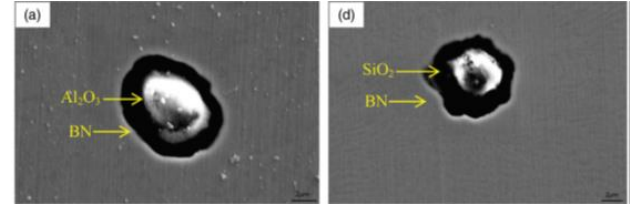
Çelikte işlenebilirliğin artırılmasının bir yolu da oksitlik kalıntıların boyut ve miktar olarak azaltılmasıdır. Artan oksijen miktarı ile birlikte oluşan oksit türü sert inklüzyonlar, takım ömrünü kısaltarak işlenebilirliği düşürür [57, 58]. Bu sebeple oksitler, daha yumuşak MnS'li bir kabuğun içine alınır. Çeliğe katılan kalsiyum'un (Ca) kükürde ve oksijene yüksek aktivitesinden dolayı alümina (Al_2O_3) taneciklerin etrafı Ca içerikli MnS ile sarılır [59-63]. Bu sayede oksit taneleri ile takım arası temas kaldırılır ve kükürt tanelerinin temas yüzeyinde yağlayıcı tabaka oluşturmasıyla işlenebilirlik artırılır (Şekil 21) [13, 64, 65]. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, hexagonal bor nitrid (h-BN) katkılı otomat çeliklerinin geliştirilmesinin [66, 67] yanında, benzer mekanizma ile Al_2O_3 ve SiO_2 gibi sert inklüzyonların, hegzagonal BN çökeltiler içinde kalacak şekilde kaplanmasının (Şekil 22) takım ömrünü arttırarak çeliğin işlenebilirliğini geliştirdiği belirlenmiştir [68, 69].



Şekil 21. Modifiye edilmiş Al_2O_3 kalıntısı [59] (Modified Al_2O_3 inclusion)

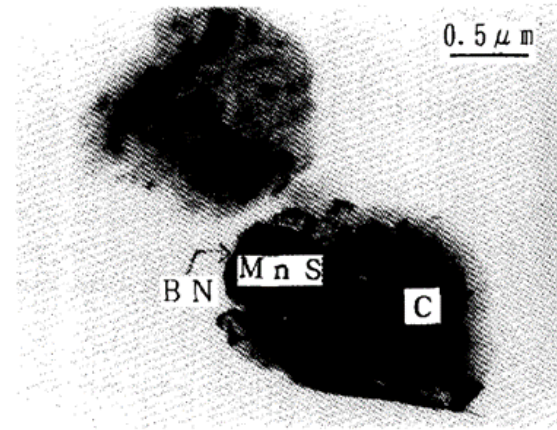
Grafit'in kesme düzleminde gerilmeyi arttırıcı ve takım yüzeyinde yağlayıcı etkisi sebebiyle işlenebilirliği geliştirdiği ve çeşitli dökme demirlerde grafit morfolojisinin işlenebilirliğe etkisi bilinmektedir. Bununla birlikte çeliklerde grafitin işlenebilirliğe etkisi de araştırma konusu olmuştur [70]. Orta karbonlu grafitik çeliklerin işlenebilirliği konusunda, yaklaşık %0,5 C'lu çeliğe ilaveten %1,2 Si ve %0,0025B ilavesiyle sağlanan alaşımlama ile üretilen döküm kütüğün, sıcak haddelenmesi ve akabinde uygulanan ısıl işlemlerle sağlanan grafit çökeltileri Şekil 23'de verilmiştir. Grafitik çelikler (G1-G2/115 VSD) ile, sade karbonlu makine imalat çeliği (S55C/188VSD), kükürtlü otomat çeliği (S/190VSD) ve kalsiyum içerikli kurşunlu otomat çeliğinin (PSC/196VSD) işlenebilirlikleri

kıyaslandığında, grafitin özellikle takım ömründe önemli avantajları mevcuttur [70].

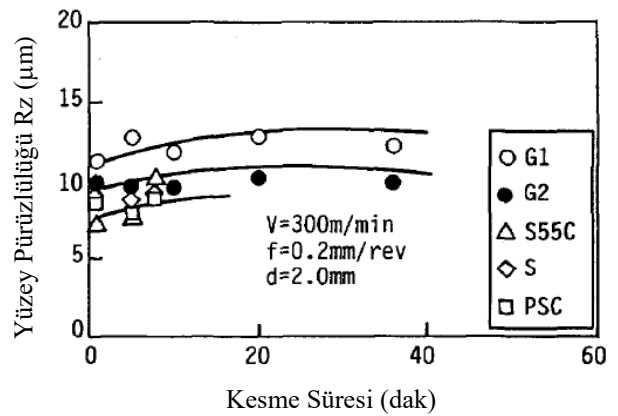


Şekil 22. a) BN- Al_2O_3 ve b) BN- SiO_2 bileşimi inklüzyonlar [68] (a-BN- Al_2O_3 and b-BN- SiO_2 inclusions)

Kaplamalı sementit karbür takımla yapılan tornalama sürecinde diğer otomat çeliklerine göre yüzey kalitesi kötü olan grafitli çeliklerden birkaç mikron daha ince grafit partikül içeren G2 çeliğinin yüzey pürüzlülüğünün diğerinden (G1) daha düşük olduğu görülmektedir (Şekil 24). Daha ince dağılımlı grafit çökeltileri ile yüzey pürüzlülüğü iyileştirilebilmektedir.



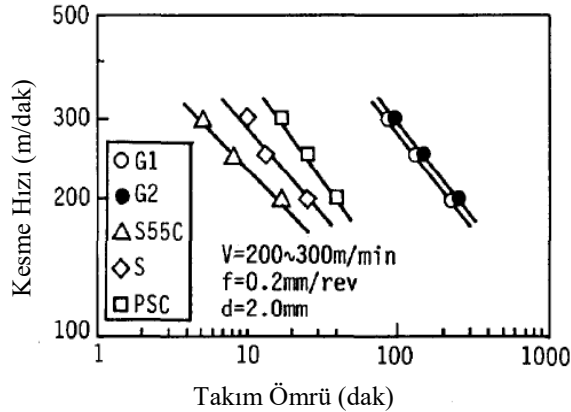
Şekil 23. Grafitlerin taramalı elektron mikroskop görüntüsü [70] (SEM micrographs of graphite)



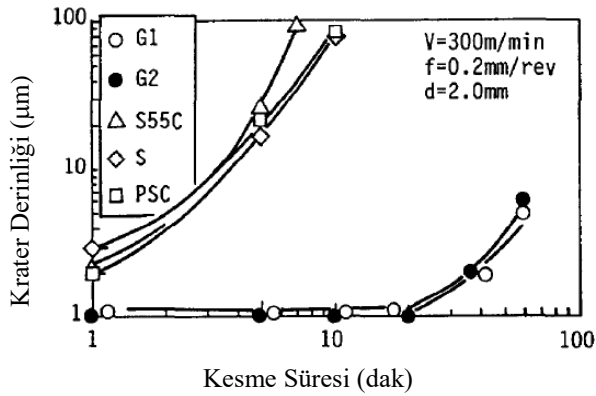
Şekil 24. Yüzey pürüzlülüğü – kesme süresi ilişkisi [70] (Surface roughness and cutting time relationship)

Şekil 25 ve Şekil 26'da ise üretilen grafitik çeliklerin kaplamalı sementit karbür kesici takımla işlenmesi sırasında yan yüzey ömrü kriterine ($VB=0,2mm$) ve krater aşınma miktarına (KT) bağlı kesme hızı ilişkileri

gösterilmiştir. Grafit çökeltili çeliklerin takım ömrüne olumlu etkileri açıkça görülmektedir. Grafit katkısı, sade karbonlu çelikten (S55C) yaklaşık 20 kez, kurşunlu otomat çeliğinden ise yaklaşık 7 kat takım ömrünü arttırmıştır. Grafit çökeltilerinin sertmetal kesicinin krater aşınmasına olumlu etkisi ise çok daha fazladır. Bu çeliklerin 300 m/dak kesme hızında işlenmesi sürecinde yaklaşık 20 dakikalık kesme süresine rağmen minimum krater aşınması oluşmuştur. Bu bakımdan diğer çelik ve otomat çelik türlerine göre süper takım ömrü sağlanmıştır.

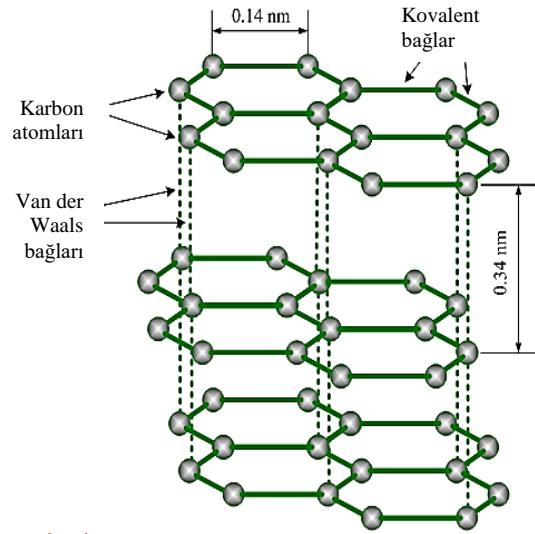


Şekil 25. Kesme hızı-takım ömrü ilişkisi (VB=0,2mm) [70] (Tool life and cutting speed relationship)



Şekil 26. 300 m/dak kesme hızında krater aşınması [70] (Crater wear at cutting speed of 300 m/min)

Bu sonuçlar, grafitin süper yağlayıcı etkisine bağlanır. Ferrit matris deki grafit oranının artmasıyla birlikte takım-talaş arayüzündeki sürtünme katsayısının da önemli oranda düşeceği bellidir ve bu durum grafitin kristal yapısıyla ilişkilendirilir. Karbonun hexagonal kristal kafes yapısındaki (Şekil 27) grafit hali ile oluşan atomik bağ yapıları yağlayıcı özelliğini geliştirir. Birbirlerine güçlü kovalent bağlarla bağlanmış karbon atomlarının oluşturduğu tabakalı düzlemlerin aralarındaki zayıf Van der Waals bağ kuvvetleri sayesinde katmanlar arasında kolayca klivaj kırılma meydana gelir.



Şekil 27. Grafitin Kristal Yapısı (Crystal structure of graphite) [71]

3. ISIL İŞLEMLER VE MİKROYAPININ İŞLENEBİLİRLİĞE ETKİSİ (EFFECT OF MICROSTRUCTURE AND HEAT TREATMENT ON MACHINABILITY)

İşlenebilirliği geliştirmek amaçlı çeliklere uygulanan genel ısıl işlemler tam tavlama, küreselleştirme ve normalizasyon ısıl işlemi olarak sıralanabilir. Özellikle çelikteki karbon oranına göre belirlenen bu ısıl işlemlerden amaç, düşük karbonlu çeliklerde yüksek dayanım ve sertlik sağlayacak mikroyapı, yüksek karbonlu çeliklerde ise daha düşük dayanım ve sertlik sağlayacak mikroyapı elde etmek amaçlıdır [72, 73].

Çeliğin karbon miktarına bağlı işlenebilirliği için en uygun mikroyapıyı veren ısıl işlemler, aşağıdaki gibi özetlenebilir [74-77];

- 1) Düşük karbonlu ($\leq 0,15\%$ C) çelikler normalleştirilmiş veya soğuk çekilmiş durumda en iyi işlenebilirliğe sahiptir. Küçük ferritik tane boyu ve soğuk deformasyon yoluyla artırılan sertlik işlenebilirliği iyileştirme eğilimindedir.
- 2) Yumuşak çelikler ($0,15\%$ C - $0,45\%$ C) tam tavlama veya normalleştirme ısıl işlemi sonunda maksimum işlenebilirlik gösterir. Bu işlemler lamelli perlitik yapıyı meydana getirir. Küreselleştirilmiş bir yapı, özellikle yüzey kalitesi ve talaş biçimi bakımından kötü işlenebilirlik gösterir.
- 3) Orta karbonlu ($0,45\%$ C - $0,80\%$ C) çelikler en iyi işlenebilirlik için düşük sertlik sağlayan kaba perlitik ve küreselleştirilmiş karbür yapıya sahip olmalıdır.
- 4) Yüksek karbonlu ($> 0,85\%$ C) çelikler, tamamen küreselleştirilmiş mikroyapıda en iyi işlenebilirliği verir.

- 5) Küçük östenitik tane boyutlu bir çelik, işleme sırasında daha fazla güç absorbe eder. Ancak ince taneli çelikler bitirme tornalamalarında iyi yüzey kalitesi gösterir.
- 6) Heterojen faz dağılımına sahip bantlı ve kaba görünümdeki mikro yapılar kötü bitirme yüzeyleri ve kısa takım ömrüne sebep olur.

Açıkçası bu veriler genel olarak çeliklerin işlenebilirliğini optimize etmek için uygulanan işlemleri tanımlar ve bilinen genel literatür verileridir. Önerilen bu ısıl işlemlerle birlikte malzemelerin sertlikleri kısmen artırılır veya sertlik de önemli derecede düşüş sağlanır. Bir çeliğin işlenebilirlik değerlendirmesi yapılırken genel yaklaşım, sertlik değerinin dikkate alınmasını içerir ve artan sertlikle birlikte takım aşınması artacağı için takım ömrü bakımından işlenebilirliğin kötüleştiği belirtilir. İşte bu genel yaklaşım çerçevesinde artan veya azalan sertlikle birlikte takım aşınması da artıp azalacağından işlenebilirliğin de azalıp artmasından bahsedilir. Ancak takım ömrünün dikkate alındığı işlenebilirlik değerlendirilmelerinde işlenen malzemenin sertliği yeter değerlendirme kriteri değildir. Zira aynı sertlikte ve aynı fazları içeren farklı mikroyapı dağılımına sahip malzemelerin takım ömürlerinin değişkenliği ile birlikte, takım aşınma mekanizmalarının da farklı olduğu görülebilmektedir. Bazen aynı kimyasal kompozisyonda ve fakat ısıl işlemlerle daha düşük sertlik sağlanan farklı mikroyapıdaki aynı çelik malzemenin takım ömrünü kısalttığı da görülebilmektedir. Bu bakımdan, takım ömrü kriterleri ile işlenebilirlik değerlendirilmesi yapılırken işlenen malzemenin sertliğinden ziyade mikroyapısı dikkate alınmalıdır [24, 25, 81]. Bu konuya ilk örnek, takım ömrü bakımından haddelenmiş durumdaki malzeme (SAE 4120), küreselleştirilmiş daha yumuşak malzeme ile kıyaslandığında, en az takım aşınması hadde malzemede tespit edilmiştir. Yani, küreselleştirme ısıl işlemi sonrası sağlanan sertlik düşük olmasına rağmen takım ömrü kısalmıştır. Düşük kesme hızında ferritik-perlit mikroyapıdaki numuneler, ısıl işlemsiz ferritik-beynitik hadde numune ile kıyaslandığında genellikle düşük işlenebilirlik gözlenir. Fakat yüksek kesme hızı aralığında farklılık oluşur [19].

Bu bölümde dikkat çekilmek istenen husus, yukarıda belirtilen ve çok önemsenmeyen mikroyapının homojensizliği, yani belirtilen mevcut ısıl işlemlerle istenen mikroyapılar elde edilmiş olsa dahi, mikroyapıdaki fazların heterojen dağılımının işlenebilirliği de karmaşık hale getirdiğidir. Zira, çeliğin karbon miktarına uygun seçilen ve uygulanan ısıl işlemlerle sağlanan ferrit+perlit bantlı yapısındaki değişkenlik ve/veya perlit kolonilerinin heterojen dağılımı, takım ömrü ve yüzey kalitesi bakımından işlenebilirliği iyileştirmek yerine kötüleştirir. Bu konuda araştırmacıların yaptığı çalışmalar, uygulanan ısıl işlemlerle elde edilen mikroyapı ve sertlik değişimlerinin her zaman uygun veriler sağlamadığı ve

çelişkili işlenebilirlik sonuçları içerdiği yönündedir [15-19, 78-81].

3.1. Takım Ömrü (Tool Life)

Talaşlı imalat öncesi ısıl işlem gerekliliğini genellikle çelikte bulunan karbon oranı belirler. Düşük karbonlu çeliklerde normalizasyon ısıl işlemi ile artırılan mekanik özelliklerle birlikte çeliğin işlenebilirliği geliştirilirken, orta veya yüksek karbonlu çelikler için uygulanan tam tavlama veya küreselleştirme işlemleri ile takım ömrü artırılarak işlenebilirlik geliştirilir. Genellikle bu ısıl işlemlerle orta ve yüksek karbonlu çeliğin sertliğini azaltacak bir mikroyapı sağlanarak takım aşınma oranı minimize edilmeye çalışılır [37, 45]. Sade karbonlu çeliklerde karbon miktarına bağlı olarak kaba perlitik yapı veya küresel sementitli mikroyapı takım ömrü bakımından iyi işlenebilirlik özellikleri sağlar [32,72]. Dolayısı ile sementit fazının oranı ve morfolojisi takım ömrünü etkileyen önemli bir faktördür. Özellikle takımın abrasiv (çizilme) aşınma direncini belirleyen bu fazın plakalı veya küresel şekil ve morfolojisindeki değişkenlik, ferrit fazının da oran ve morfolojisini değiştireceğinden takımın difüzyon, yapışma ve yorulma ile aşınma dirençlerini de belirler [16,19,75,82]. Son yıllarda çeliklerin işlenmesinde yaygın olarak kullanılan kübik bor nitrür (CBN), kesicilerin yanında Si₃N₄, Al₂O₃, ve SiAlON esaslı seramik kesiciler yüksek aşınma dirençleri nedeniyle tercih sebebi olmaktadır. Çeliklerin işlenmesi sürecinde sertmetal ve sermet gibi karbür kesicilerin tersine genellikle abrasiv, yapışma ve difüzyon aşınma mekanizmalarına karşı yüksek dirençleri sert çeliklerin işlenmesinde de kullanım imkanı sağlamaktadır. Bununla birlikte işleme şartlarında, işlenen malzeme ile kesici arasındaki etkileşime bağlı oluşan kimyasal ve mekanik/ısıl etkilerle aşınmalar da meydana gelmektedir [83-85]. Çelik ve kesici takım malzemesi arasındaki etkileşimle oluşan aşınmalar, Co veya Ni bağlayıcı matrisle üretilen sertmetal (WC-Co) veya sermet (TiC/TiN-Co,Ni) kesicilerde daha yaygındır. Çeliklerin işlenmesinde yoğun olarak kullanılan bu kesicilerin abrasiv aşınma ve ısıl direncini artırmak için %90 'ı geçen oranlarda tungsten karbür (WC) ve/veya titanyum karbonitrür (TiCN) seramik parçacıklar kullanılır. Parçacıkları bağlayan matris malzemesi olarak ise kobalt (Co) veya nikel (Ni) mevcuttur. Kullanılan WC'inn en önemli karakteristiği diğer sertmetallere göre süper tokluğa sahip olmasıdır. İkinci önemli karakteristik özelliği ise, kobalt, nikel ve demirle iyi ıslatabilirliğe ve birleşme eğilimine sahip olmasıdır. Bu elementlerle yüksek ıslatabilirliği, WC' ün kompozit yapı oluşturmasını mümkün kılar [86-90]. Kobalt oranı %4-28 arasında değişir. Günümüze, 4-10 µm'lik kaba denilebilecek parçacık boyutlarından 0,5-0,8 µm parçacık boyutuna kadar inceltilmiş mikroyapı içeren ticari kaliteleri bulunmaktadır. Bu seramik katkıların oranlarındaki artışla sağlanan yüksek sıcaklık sertliği ve abrasiv aşınma dirençlerine rağmen, Co bağlayıcılar, takımın abrasiv etki dışında diğer aşınma mekanizmalarına karşı zafiyetini oluşturmaktadır. Özellikle çelik malzemelerin işlenmesinde kullanılan Co

matrisli kesicilerde oluşan difüzyon ve yapışma etkili aşınma mekanizmaları, abrasiv aşınmadan daha etkin olabilmektedir [91-95]. Bu durumda, genel bilineye aykırı bir ilişki içinde, çeliğin sertliği ile takım aşınması veya ömrü arasında manidar bir ilişki olmayabilir. Yani, daha yumuşak bir çelik işlenirken abrasiv aşınmadan ziyade difüzyon veya yapışma mekanizmalarıyla sertmetal takım daha fazla aşınabilmektedir. Benzer şekilde, tam tavlama ısıl işlemi ile sertlik düşürülmesine rağmen, artan perlit+ferrit bantlaşma oranı ve bantlar arası mesafe, kesici takımında yorulma ile aşınmayı da etkin mekanizma haline getirebilir. Bu konunun ilk örneği % 0,45C'lu dövme çelikle yapılan işlenebilirlik çalışması olabilir [96, 97]. Orta karbonlu bu çeliğe uygulanan normalleştirme ısıl işlemi ile ince perlit ve ferrit yapısı oluşturulmuştur. Ferrit miktarı % 60 civarındadır ve sertlik 183 BSD'dir. Aynı çeliğe sürekli soğutma ısıl işlemi uygulanarak kaba perlitik yapı, % 40 ferrit oranı ve 199 BSD elde edilmiştir. İşlenebilirlik deneyleri sonunda 199 BSD'deki mikroyapıda daha uzun takım ömrü elde edilmiştir.

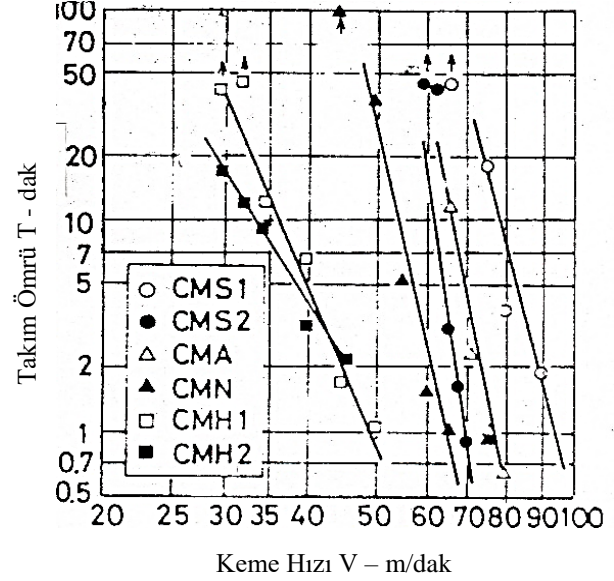
Benzer etki, 5120 çeliğine uygulanan izotermal tavlama ile sağlanan mekanik özelliklere bağlı işlenebilirlik çalışmasında da belirlenmiştir [15]. Bu malzemenin 15 dak'lık takım ömrü için kesme hızlarına (V15) göre işlenebilirlik değerlendirmeleri Çizelge 2. de verilmiştir. Burada, işlenen malzemelerin sertlik değişimleri ile takım ömrüne dayalı işlenebilirlikleri kıyaslandığında anlamlı bir ilişki ortaya konmamaktadır. Zira, en düşük sertliğe sahip (149 BSD) çeliğin işlenmesinde 15 dak'lık takım ömrü kriterine yaklaşık 8 m/dak kesme hızında ulaşılrken, daha yüksek sertliğe (171 BSD) sahip farklı ısıl işlemli aynı çelik malzeme için de aynı kesme hızında takım ömrü kriterine ulaşılmıştır. Bu durumda, ısıl işlemlerle sertliği değiştirilen 5120 çeliğinin işlenebilirliğinin de sertlik değişimiyle manidar ilişki içinde olduğu söylenemez.

Çizelge 2. Çeşitli ısıl işlemlerle sağlanan sertliğe bağlı işlenebilirlik ilişkisi[15] (Relationship between machinability and hardness provided by various heat treatments)

Sertlik (BSD)	V ₁₅ (m/dak)
149	8
150	11
154	6
158	10
171	8
195	7

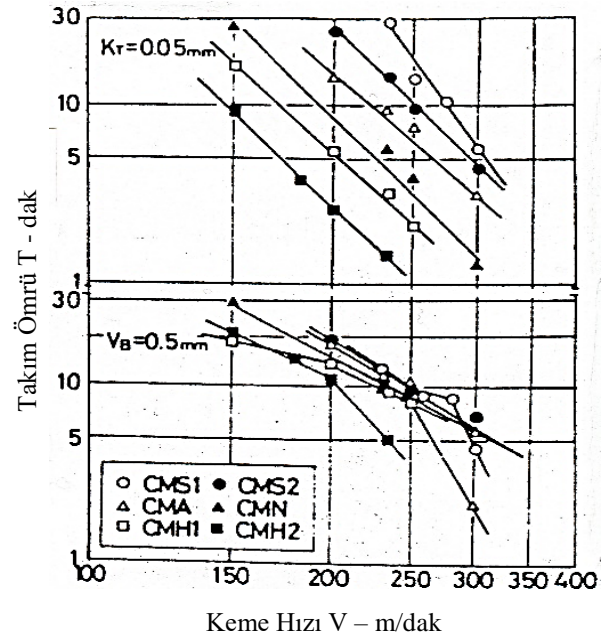
Diğer bir örnekte ise, 4135 çeliğine uygulanan ısıl işlemlerle sağlanan değişik mikroyapı ve mekanik özelliklere bağlı kesme hızı (V), takım ömrü (T) ilişkileri Şekil 28 ve Şekil 29'da verilmiştir [16]. Burada, HSS takım için (Şekil 28) en uzun takım ömrü,

küreselleştirilmiş (CMS1/146BSD ve CMS2/153BSD) mikroyapı ve minimum sertlik değerindeki malzeme işlenirken belirlenmiştir.



Şekil 28. HSS takım için mikroyapı ve sertliğe bağlı V - T ilişkileri [16, 97] (V-T relationships depend on microstructure and hardness for HSS tool)

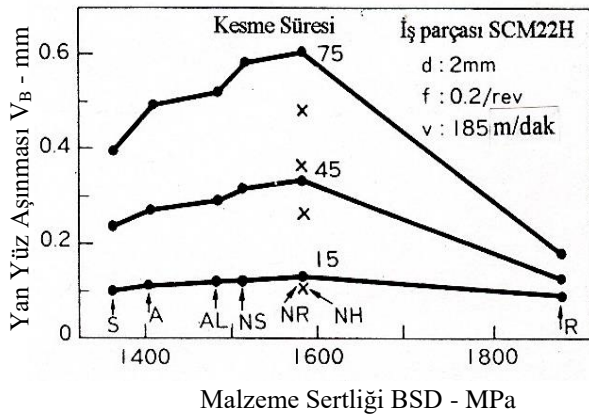
Tavllanmış (CMA/150BD), normalize edilmiş (CMN/187BSD) ve sertleştirilmiş/temperlenmiş (CMH1/238BSD, CMH2/308BSD) numunelerin sertliğindeki artışla birlikte azalan takım ömrü görülmektedir. İşlenen malzeme sertliği ile takım ömrü arasında genel olarak bilinen ve konuyla ilgili handbook'larda dahi belirtilen ilişki budur [16, 97, 98].



Şekil 29. P20 sertmetal takım için mikroyapı ve sertliğe bağlı V - T ilişkileri [16] (V-T relationships depend on microstructure and hardness for P20 tool)

Bununla birlikte aynı araştırmacının [16] aynı malzemeleri, sertmetal (P20) takım ile işleme sırasında krater aşınma kriteri ($KT=0,05\text{mm}$) için belirlenen V-T ilişkisi, HSS takımın V-T ilişkisi ile benzerlik göstermekle birlikte, ısıtım işlem türüne göre V-T sıralamalarında farklılık görülür (Şekil 29). Dikkat çekici en önemli husus ise, ısıtım işlemlerle sağlanan mikroyapı ve sertlik farklılığının, P20 takımın yan yüz aşınması ömür kriterine ($VB=0,5\text{mm}$) göre V-T ilişkisinde anlamlı sonuçların ortaya çıkmasıdır. Zira, 250 m/dak kesme hızı civarında, uygulanan ısıtım işlemle sağlanan sertlik değişimine bağlı takım ömründe anlamlı bir değişim belirlenmemiştir. En düşük sertlikteki CMS1 numunesi ile çok daha yüksek sertlikteki CMH1 numunesinin takım ömürlerinin çok yakın olduğu ve artan kesme hızı ile bu ilişkinin çok daha karmaşık hale geldiği görülmektedir.

İşlenen malzemenin özelliklerine göre farklı kesici takım malzemelerinin farklı aşınma dirençleri ve takım ömürleri gösterecekleri açıktır. Takım ömrü, takım - talaş arayüzündeki ortalama sıcaklık, kesme açısı ve YT oluşma eğilimi, açıkça belli olmamakla birlikte ısıtım işlemle değiştirilen mukavemet ve süneklik yoluyla kontrol edilir. ısıtım işlem uygulanan düşük alaşımlı bir çelik, sertmetal takım ile işlendiğinde, aktif bir difüzyon aşınmasından dolayı krater aşınması takım/talaş arayüz sıcaklığı ile kontrol edilir [16]. Bu veriler aynı zamanda, çelik malzemelerin ısıtım işlemle değiştirilen sertlikleriyle ilişkili ve anlamlı bir takım ömrü gösteremeyebileceğini de ifade etmektedir.

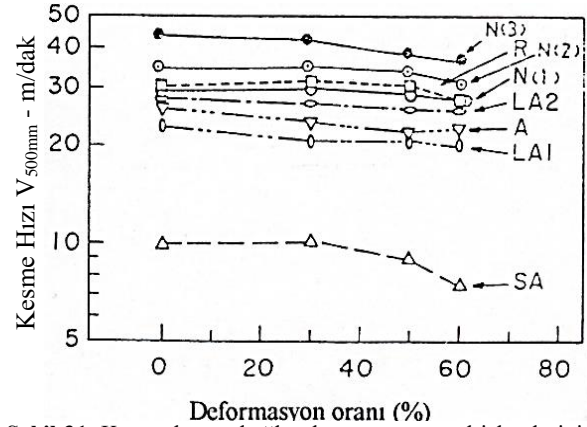


Şekil 30. Homojen olmayan mikroyapının yan yüz aşınmasına etkisi [18] (Effect of heterogeneous microstructure on flank wear)

Sıcak haddelenmiş (R) benzer 4122 çeliği için yapılan çalışmalarda, mikroyapıya bağlı frezelemedeki işlenebilirlikle ilgili bulgular Şekil 30'da verilmiştir [18]. Tavlama (A, Al), küreselleştirme (S) ve normalleştirme (NH, NR) ısıtım işlemleri ile oluşturulan değişken sertlik değerlerine göre yan yüz aşınma miktarına bağlı sonuçlar gayet açıktır ki, bantlı yapıya (ferrit + perlit) sahip (S, A, Al, NS, NH ve NR) numunelerin S'de R'ye kadar sertliğindeki artışa rağmen takım aşınmasında

anlamlı bir ilişki yoktur. Numunelerin artan sertlikleriyle birlikte takım aşınma miktarının da artması beklenir. Ancak, en yüksek sertlikteki orijinal hadde durumundaki (R) malzeme için takım aşınma miktarı en az bulunmuştur. Bu olayın, ısıtım işlem görmüş numunelerdeki perlit bantları arasındaki mesafeyle, ferrit tane boyutuyla ve takım aşınmasında etkili olan numunenin hadde eksenine dik doğrultudaki mekanik özellikleriyle ilgili olduğu düşünülür ve bu konuda daha ileri araştırmaların yapılması gerekliliğini vurgulanır [18].

Şekil 31'de görüldüğü gibi bu örnekleri farklı kesici ve işleme işlemleri için çoğaltmak mümkündür. Zira, 5120 çeliği için de yukarıda belirtilen ısıtım işlemler uygulanmış ve soğuk çekme işlemi ile % deformasyon miktarına bağlı HSS (SKH 9) matkap ucu kullanılarak işlenebilirliği kontrol etmiştir [17]. 5000 mm'lik delme işlemindeki sabit takım ömrü için bağlı kesme hızına ($V_{500\text{mm}}$) bağlı ilişkileri tespit etmiştir. Gayet açıktır ki, minimum kesme hızı en düşük sertliğe sahip küreselleştirilmiş (SA) mikroyapılı malzeme için belirlenmiştir. Sonra sırasıyla tavlama (LA1, A, LA2), normalleştirme (N) ve hadde (R) numunelerde artan sertlikle birlikte en yüksek kesme hızları yani minimum takım aşınması elde edilmiştir. Soğuk deformasyon miktarındaki artışla birlikte özellikle SA numunede kesme hızının azaldığı, yani takım ömrünün kısaldığı belirlenmiştir.

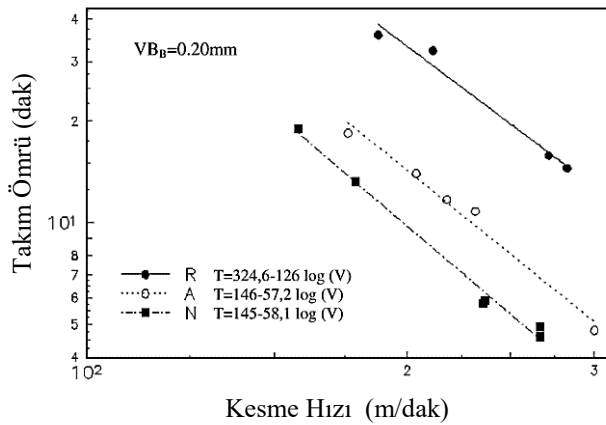


Şekil 31. Kesme hızına bağlı takım ömrüne ısıtım işlemlerinin etkisi [17] (Effect of heat treatment on tool life depend on cutting speed)

Bu çalışma sonuçları göstermektedir ki, düşük alaşımlı çeliğin işlenebilirliği üzerine mikroyapının etkisini ayırt etmek genellikle güçtür. Takım ömrü ve mikroyapılar karşılaştırıldığında, küresel sementit yapının, lamelli sementite göre takım ömrünü arttırdığı görülür. Daha ince sementit aralığı daha az takım ömrü oluşturur [71, 99]. Küresel sementit takım - talaş arayüzünde kesme deformasyonu ile kolaylıkla ferrit matrisi içine gömülebilir. Ancak, ince lamelli veya kaba perlitik yapının takımın sürtünme yüzeyi üzerinde abrasiv etkiyi koruyacağı malumdur. Bununla birlikte adalaşmış (kolonileşmiş) perlitin deformasyon sertleşmesindeki

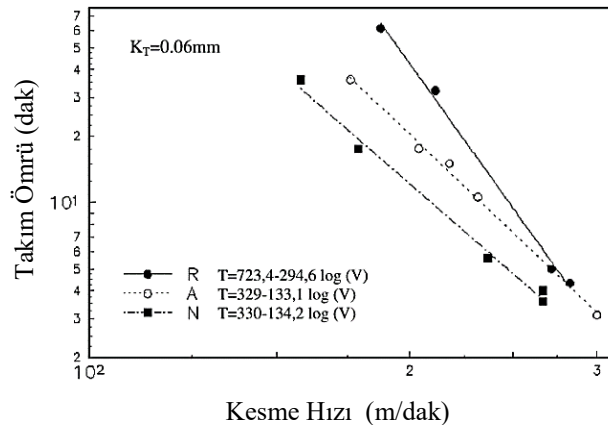
mikroskobik homojensizliği gerilmeyi arttırıcı bölgesel deformasyon sertleşmesine sebep olacak ve kesici takımın yorulma ile aşınma miktarı artacaktır [16, 81, 95].

Sıcak haddelenmiş (R) kısmi perlit+ferrit bantlaşması içeren 1050 çeliğine (204 VSD) uygulanan tam tavlama (A) işlemi ile, kısmi küresel sementitli kaba perlitik yapı ve iri bantlaşmış mikroyapı (171VSD) elde edilmiştir. Devamında uygulanan normalizasyon (N) ısıl işlemleri sonrası (207 VSD) ince perlitik mikroyapılı ve farklı mekanik özelliklerdeki çeliklerin kesme hızı-takım ömrü ilişkileri Şekil 32 ve Şekil 33’de verilmiştir [78].



Şekil 32. Yan yüzey takım ömrüne ısıl işlemlerin etkisi (Effect of heat treatment on flank wear) [78]

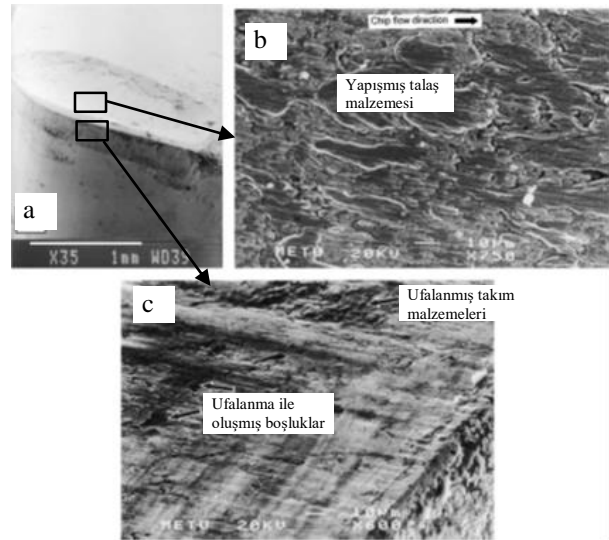
Tavlama işlemi ile düşürülen sertliğe rağmen, tavlı çeliğin işlenmesinde P10 sertmetal kesicinin gerek yan yüzey (Şekil 32) ve gerekse krater (Şekil 33) aşınma ömrünün kısaltıldığı görülür [78].



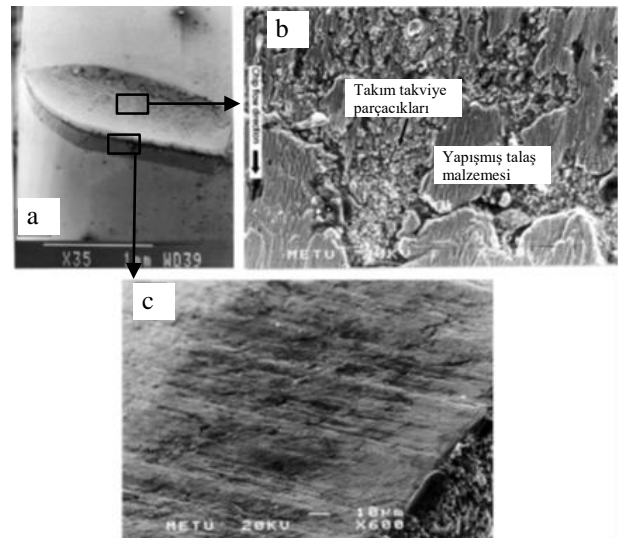
Şekil 33. Krater aşınması takım ömrüne ısıl işlemlerin etkisi (Effect of heat treatment on crater wear) [78]

Şekil 34 ve Şekil 35’de P10 kesicide oluşan aşınma mekanizmaları gösterilmiştir. Bahsedilen önceki örneklerde olduğu gibi bu durum, takım aşınmasında işlenen malzemenin sertliğinden ziyade mikroyapısının etkin olduğunu gösterir. Tavlama ısıl işlemi ile oluşan geniş ferrit+perlit bantlı yapının işlenmesi sürecinde, takımın özellikle yan yüzeyinde yorulma ile aşınma

mekanizmasının da etkinleştiği görülür (Şekil 34c). Bununla birlikte artan sünek faz oranı yapışma aşınmasını da artırır [75, 95]. Hadde malzemede etkin yapışma ve abrasiv aşınma mekanizması takım ömrünü belirlerken, tavlı malzemede yorulma aşınması da etkinleşmiştir. Normalize ile sağlanan ince taneli ve perlitik mikroyapı da ise, yan yüzeyde abrasiv aşınma ve kraterde difüzyon aşınmasının etkin hale geldiği görülmektedir (Şekil 35 b ve Şekil 35c).



Şekil 34. Tavlı (A) çeliğin işlenmesinde P10 kesicide oluşan aşınmalar [78] (Wear on P10 insert at machining of annealed steel)



Şekil 35. Normalize (N) çeliğin işlenmesinde P10 kesicide oluşan aşınmalar [78] (Wear on P10 insert at machining of normalized steel)

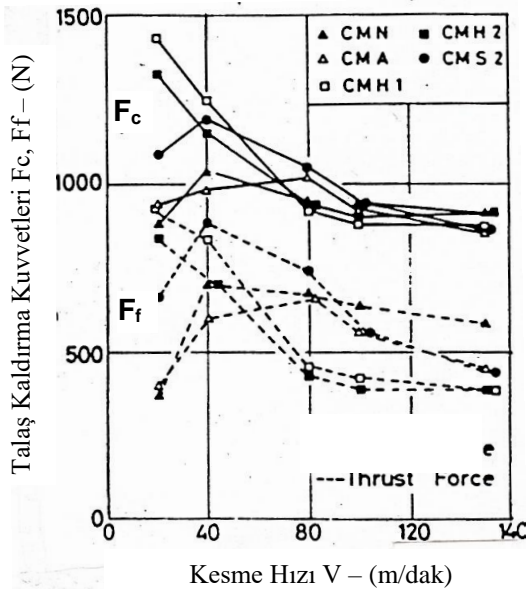
İşlenen malzeme ve kesici takımın tribolojik etkileşimleri takım aşınma mekanizmaları ve dolayısıyla takım ömrü için işlenen malzemenin sertliğinden çok daha önemlidir. İşlenen malzemenin artan sertliği genellikle takımın abrasiv aşınmasını arttırırken, bantlı görünümlü kaba perlitik yapı veya heterojen mikroyapı, sertmetal kesicide

yorulma aşınmasını da etkinleştirebilmektedir. Özellikle Co/Ni bağlayıcı ile üretilen kompozit kesicilerle çeliklerin işlenmesinde ferrit fazının yapışma eğilimi ve kobaltın ferrite difüzyonu ile de özellikle kraterde difüzyon aşınmasını abrasiv aşınmadan daha etkin hale getirebilmektedir [78, 95].

Çeliklerin işlenebilirliğinde önemli bir kriter olan takım ömrü (aşınması) değerlendirmelerinde, işlenen malzemenin sertliğinin yanında mikroyapısının da dikkate alınması gerekir. Kesici takım ve işlenen malzeme ilişkisinin metalürjik etkileşimleri, kimyasal aktivasyonları ve mikroyapının homojenliği/heterojenliği gibi takım ömrünü belirleyen önemli malzeme özellikleri olduğuna dikkat edilmelidir.

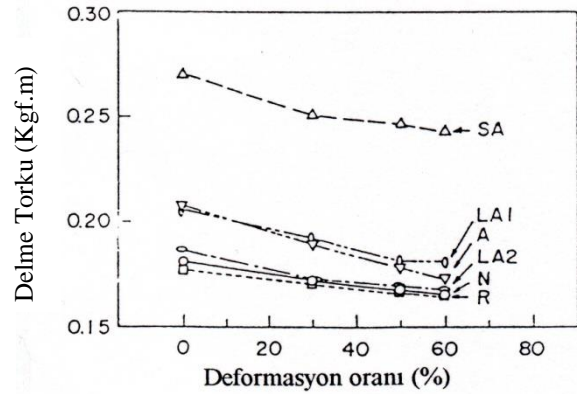
3.2. Kesme Kuvvetleri (Cutting Forces)

Şekil 36'de çeliklere uygulanan ısıl işlemlerle değiştirilen mikroyapı ve mekanik özelliklerin kesme kuvvetine etkileri gösterilmiştir. Gayet açıktır ki, esas kesme kuvveti (F_c) ve ilerleme kuvvetindeki (F_f) 40 m/dak altındaki değişkenlik bu hızlarda oluşan yığıntı talaşla ilişkilidir. Artan kesme hızı ile birlikte farklı mekanik özellik ve mikroyapılarda ki bu malzemelerin özellikle F_c kesme kuvvetinin önemli oranda azaldığı ve 140m/dak kesme hızı civarında, tavlama ve küreselleştirme ısıl işlemi uygulanmış (CMA ve CMS2) çelikler ile sertleştirilmiş (CMH1 ve CMH2) çeliklerin F_c kuvveti değerlerinin yakın olduğu görülmektedir. İlerleme kuvvetlerinde ise ısıl işlemlerle değiştirilen mekanik özelliklere bağlı manidar bir ilişki olmadığı ve en sert malzemelerin yüksek kesme hızlarında ilerleme kuvvetlerinin diğerlerinden daha düşük olduğu görülmektedir.



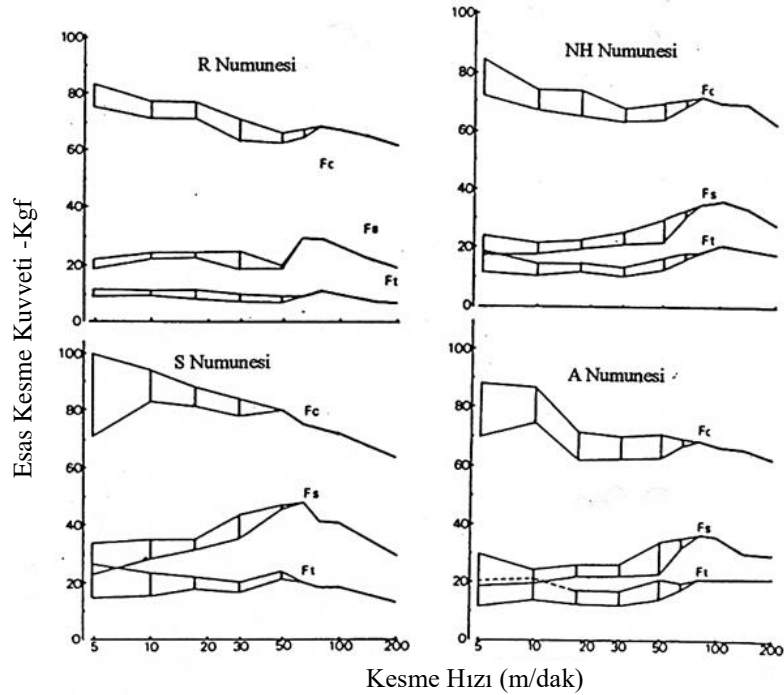
Şekil 36. Mikroyapı ve kesme hızına bağlı oluşan kesme kuvvetleri [16] (Effect of microstructure and cutting speed on cutting forces)

Bu durumda çeliklere uygulanan ısıl işlemlerle düşürülen sertlik ve akma mukavemetine rağmen, düşük kesme hızlarında değil ama, nihai kesme hızlarında mekanik özelliklerdeki farklılığın talaş kaldırma kuvvetlerinde önemli bir değişkenlik oluşturmadığı söylenebilir. Bu durum daha çok kesme parametrelerine ve takım-iş parçası ikilisine bağlı oluşan talaş kaldırma mekanizmasındaki değişkenliklere bağlıdır. Örneğin, Şekil 37'de gösterilen SAE 5120 çelik malzemenin mikroyapılarına ve deformasyon miktarına bağlı kesme torku ilişkilerini belirleyen araştırmacı, %0 deformasyon miktarında en büyük torku küreselleştirme ısıl işlemi uygulanan SA numunesi için tespit etmiştir. Kesme işlemi için gerekli tork, deformasyon miktarındaki artışla birlikte sırasıyla LA1, A, LA2, N ve R numunelerinde artan malzeme sertliğinin tersine giderek azalmıştır [17].



Şekil 37. Isıl işlem ve soğuk deformasyon miktarının delme torkuna etkisi [17] (Effect of heat treatments and cold forging on drilling torque)

Benzer çelik malzeme ile yapılan diğer bir işlenebilirlik çalışmasında (Şekil 38) [19], tavlama (A), normalleştirme (NH) ve küreselleştirme (S) ısıl işlemi uyguladıkları numunelerden A numunesinde aşırı bantlaşma mevcuttur. Hadde malzeme (R), daha yumuşak S, A ve NH ısıl işlemlerle karşılaştırıldığında, yüksek kesme hızlarındaki kesme kuvvetlerinde belirgin farklılığın oluşmadığı görülür. Düşük kesme hızlarında özellikle aşırı yumuşak malzemelerin (A ve S) talaş kaldırma kuvvetlerindeki aşırı sapma aralığı, daha çok karasız yığıntı talaş oluşumuna bağlanır. Ancak artan kesme hızına rağmen A numunesinde sapma aralığının fazla oluşu, bu malzemenin aşırı bantlı mikro yapısıyla ilgilidir. NH ve A numuneleri karşılaştırıldığında bantlı yapılı malzemelerin ilenmesinde oluşan kuvvetlerdeki geniş sapma aralığı açık bir şekilde belirlenmiştir. Talaşın kesme bölgesinde mikroyapının deformasyon davranışı incelendiğinde perlit+ferrit'e göre, beynit+ferrit fazı daha dar bir bölge içinde aşırı sertleşir. Bu etki, yığıntı talaş ucundaki kayma bölgesi içinde daha yüksek sıcaklık artışı ile sonuçlanır ve sürtünme kuvvetinin özellikle ilerleme bileşeninin azalmasına sebep olur. Şekil 38'den, izah edilen bu durumun, düşük kesme hızları aralığında daha sert perlitik yapılı veya beynitik yapılı numunelerin işlenmesi sırasında meydana geldiği görülür.



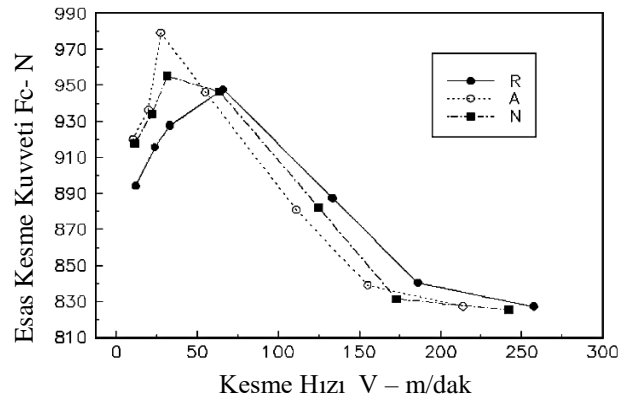
Fc : Kesme Kuvveti, Fs : İlerleme Kuvveti, Ft : Radyal Kuvvet, NH: F+ Perlit, R: F + Beynit, S: Küresel Fe₃C, A: Aşırı bantlı yapı

Şekil 38. Çeliklerin ısıtılma durumlarına bağlı kesme kuvvetleri (Cutting forces due to heat treatment of steels) [19].

Düşük karbonlu alaşımlı çeliklerin işlenebilirliğinin mikroyapıya bağlılığı oldukça karmaşıktır. Bantlaşmış ferrit ve perlitten beynite doğru özelliklerde değişkenlik mevcuttur. Ferrit + beynitik mikroyapıya sahip R numunesi diğer yumuşak numunelerle karşılaştırıldığından, dubleks yapının deformasyon sertleşmesine bağlı kırılabilirliği sebebi ile, kolay talaş kırılabilirliği gösterir. Bununla birlikte hadde durumundaki R numunesi, kesme kuvvetleri bakımından kıyaslandığında daha iyi işlenebilirlik gösterme eğilimindedir.

Şekil 39'da ise, aynı ısıtılma işlemlerinin uygulandığı haddelenmiş SAE 1050 çeliğinin tornalanması sürecinde kesme hızına bağlı kesme kuvvetlerindeki değişim görülmektedir. Düşük kesme hızındaki düşük kesme kuvvetinin oluşumu tamamen kararlı YT'nin varlığı ve geometrisiyle ilgilidir. Düşük kesme hızlarında YT boyutundaki artış, kesici takımın etkin talaş açısını artırır. Kesici takım gibi davranan YT'nin geometrisinin talaş açısını artırma etkisi ise kesme kuvvetlerinde azalmaya sebep olur. Artan kesme hızıyla YT boyutundaki azalma, kesme kuvvetinde de artışa sebep olur. Özellikle R ve N mikroyapısına sahip malzemelerde yaklaşık 80 m/dak kesme hızına kadar azalan kararlı YT boyutu, kesme kuvvetinde de artışa sebep olmuştur. Bu kesme hızından sonra artan kesme hızıyla oluşan etkiler, YT'nin giderilmesi ve takımın kesici kenarının kesmeye başlamasıyla açıklanır. Sonrasında artırılan kesme hızıyla birlikte artan talaş kaldırma sıcaklıkları ve takım-talaş sürtünme etkileşimleri sebebiyle oluşan kesme

mekanizmasındaki değişimler (deforme olmuş talaş kalınlığı, kesme düzlemi açısı, takım-talaş temas uzunluğu vb.) kesme kuvvetinin de azalmasına sebep olmaktadır [26, 30, 72, 73, 78, 100,101].

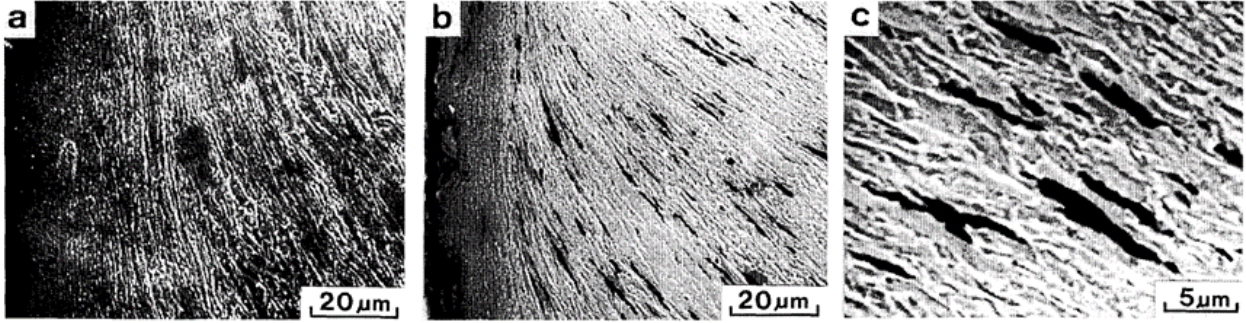


Şekil 39. Farklı mikroyapılı çeliklerde kesme hızı ve esas kesme kuvveti ilişkisi [81] (Cutting speed and principal cutting force relationship in steels with different microstructures)

Ferrit matris içinde ince dağılmış martenzit ve ince dağılmış grafit nodülleri içeren üç fazlı çeliğin işlenebilirliği çift fazlı çeliklerle kıyaslandığında; mikroyapıdaki nodüller grafitin etkisiyle kesme gerilmesi ve sürtünme açısının azaldığı ve bununla birlikte kesme düzlemi açısının artmasıyla kesme kuvvetlerinin azaldığı belirlenmiştir. Üç fazlı çeliklerdeki nodüller grafitin

kesici kenara yakın bölgede mikro çatlak oluşumunu teşvik etmesi sebebiyle (Şekil 40) azalan kesme

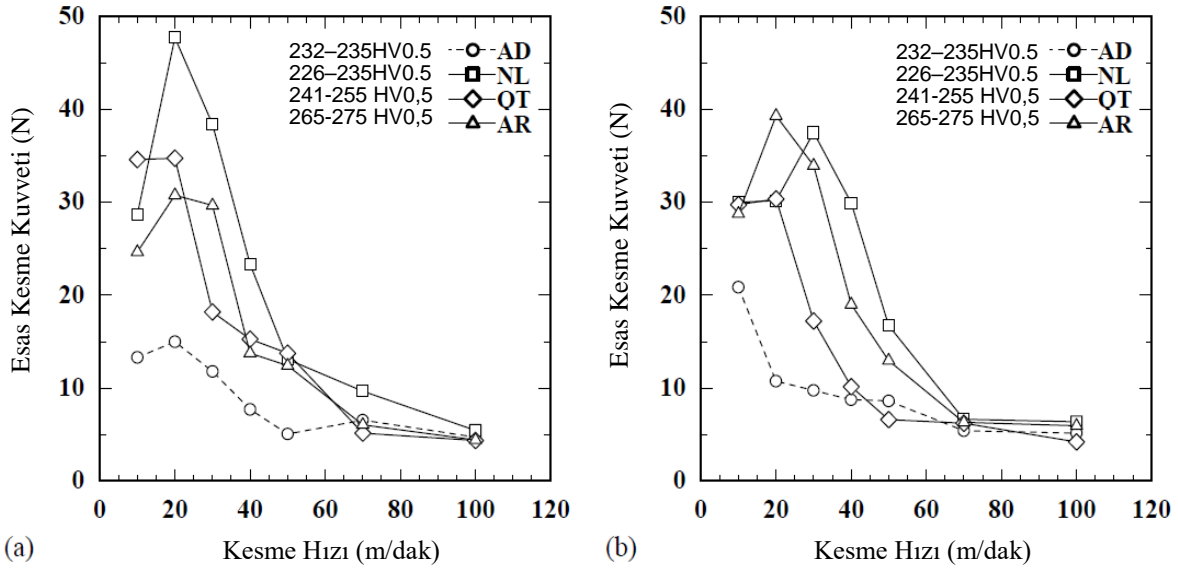
kuvvetlerine rağmen, yüzey pürüzlülüğü çift fazlı çeliklere göre kısmen daha kötüdür [102].



Şekil 40. Aynı kesme şartlarındaki talaş kesitinin SEM görüntüsü a) Çift fazlı çelik b ve c) Üç fazlı çelik [102] (SEM images of the chip section under the same cutting conditions, a-Double-phase steel, b and c- Three-phase steel)

Sıcak haddelenmiş (AR) SAE 4140 çeliğin sertliği 265-275 HV0.5 dir. Yağda su verilip temperlenen (QT), tavlانیp soğuk çekilen (AD) ve normalize edilen (NL) numunelerin sertlikleri yaklaşık birbirine yakın değerdedir. Yalnızca, karşılaştırma yapılacak sıcak hadde çeliğin sertliği bir miktar yüksektir. Farklı

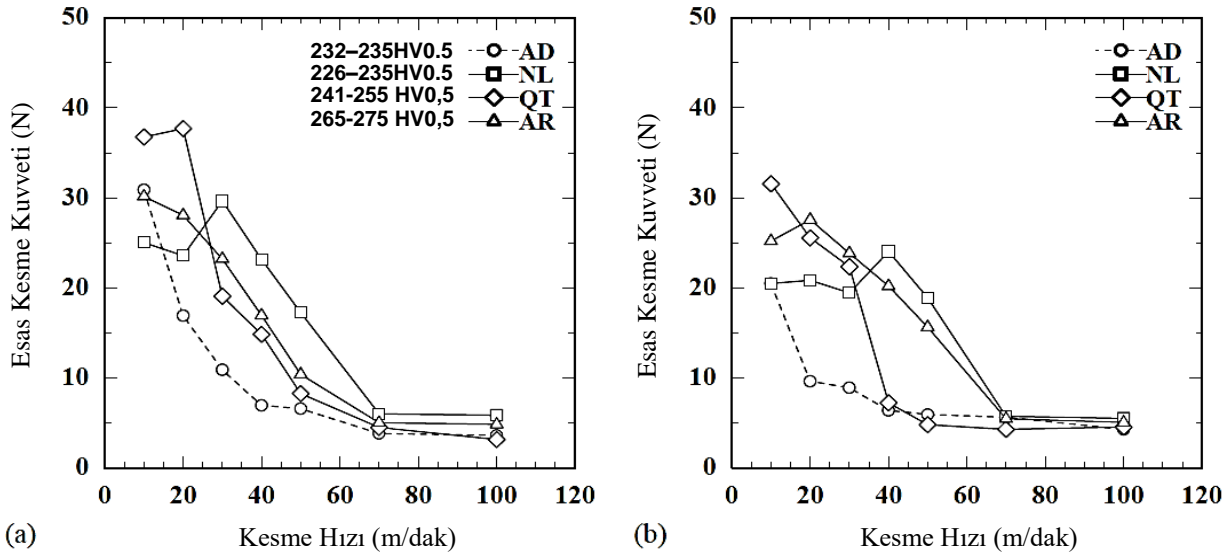
mikroyapılarda fakat benzer sertliklerdeki bu malzemelerin sertmetal (P20) ve sermet kesicilerle kuru ve ıslak tornalanması sırasında oluşan esas kesme kuvvetlerinin kesme hızına bağlı değişimi Şekil 41 ve Şekil 42’de verilmiştir [103].



Şekil 41. Kuru işlemede kesme hızının esas kesme kuvvetine etkisi a) Sermet kesici b) Sertmetal (P20) kesici [103] (Effect of cutting speed on principal cutting force in dry machining, a-Cermet tool b-Hardmetal tool, P20)

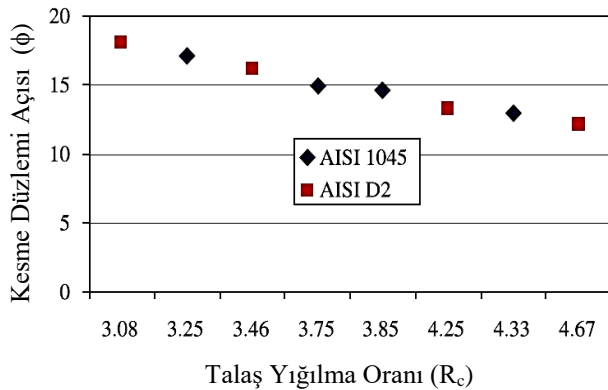
Farklı ısı veya mekanik işlemlerle oluşturulan mikroyapılara bağlı sağlanan sertlik değerlerinin özellikle 70 m/dak altındaki kesme hızında, belirgin değişikliklere sebep olduğu görülmektedir. Bu kesme hızından daha yüksek hızlarda oluşan esas kesme kuvvetlerinde, gerek malzemenin mikroyapısı ve sertliğinden kaynaklanan ve gerekse kesici takım farkı veya kuru/ıslak kesme şartlarından kaynaklanan farklılıkların kesme kuvvetine etkisi ihmal edilecek kadar küçüktür. Bu durum, alaşım malzemelerde yüksek kesme hızlarında oluşan kesme kuvvetlerinin mikroyapıdan ve mekanik özelliklerden bağımsız

olabileceğini göstermektedir. Benzer sonuçlar diğer bazı araştırmacılar tarafından da açıklanmıştır [16, 19, 72, 73]. Bu durumun, çeliğin ısı ile işlemlerle değiştirilen mikroyapı ve mekanik özelliklerine rağmen, talaş kaldırma sırasında takım-talaş arayüzünde meydana gelen sürtünme etkilerindeki farklılıklardan kaynaklanan; takım-talaş temas uzunluğu, talaş yığılma faktörü, kesme düzlemi açısı vb. gibi kesme mekaniğini değiştiren etkilerdeki değişkenlerden kaynaklandığı bilinmektedir.



Şekil 42. Islak işlemede kesme hızının esas kesme kuvvetine etkisi a)Sermet kesici, b) Sertmetal (P20) kesici [103] (Effect of cutting speed on principal cutting force in wet machining, a-Cermet tool b-Hardmetal tool, P20)

Zira, talaş yığılma oranı (R_c =Deforme edilmiş talaş kalınlığının, deforme edilmemiş talaş kalınlığına oranı) ile kesme düzlemi arasındaki ilişkide, yığılma oranını artıran takım-talaş arayüzündeki sürtünme etkileri kesme düzlemi açısını düşürür [104]. Şekil 43’de gösterilen bu etkileşim, farklı mekanik özelliklerdeki iki malzeme için yaklaşık benzer sonuçları verir. Ancak artan ilerleme değeriyle (deforme olmamış talaş kalınlığı) birlikte özellikle daha yumuşak ve sünek malzemede artan yığılma oranı, kesme düzlemi açısını belirgin miktarda düşürür. Azalan kesme düzlemi açısıyla birlikte artan kesme alanı ise kesme kuvvetlerini arttıran bir faktördür.

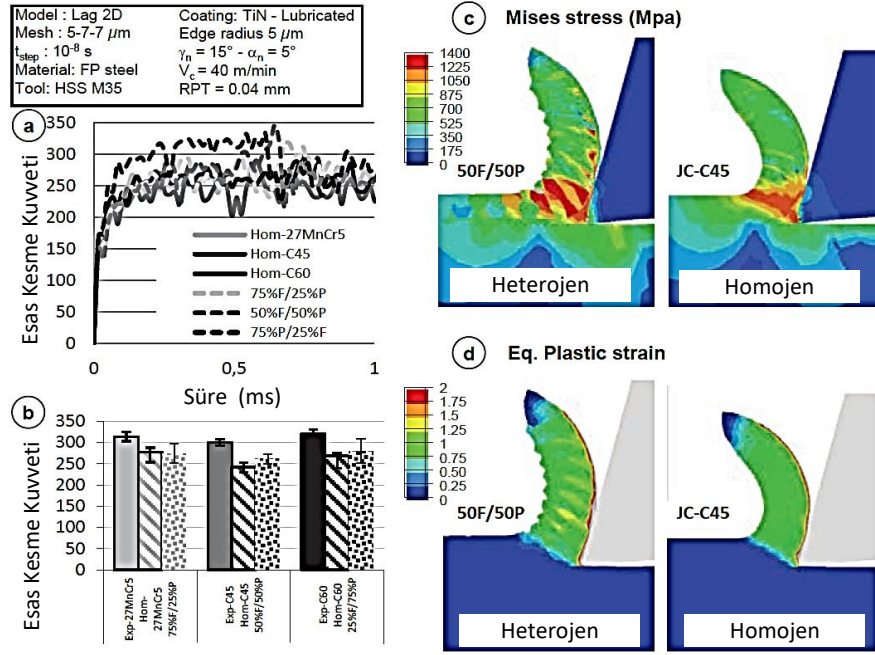


Şekil 43. Talaş yığılma oranına bağlı kesme düzlemi açısındaki değişim [104]. (Experimental shear plane angle versus chip compression ratio)

Kısaca, işlenen malzemenin mekanik özelliklerindeki değişikliklerden kaynaklanan özgül kesme kuvvetindeki (gerilmesindeki) değişkenlik, kesme mekaniğini değiştiren etkiler sebebiyle dengelenmektedir. Bu sayede farklı sertlik ve mikroyapılara rağmen orta kesme hızlarının üzerinde

işlenen çelik malzemelerin esas kesme kuvvetleri benzerlik göstermektedir. Yaklaşık 40 m/dak kesme hızına kadar var olan kesme kuvvetindeki sapmalar ise, her bir çeliğin farklı mikroyapılarından kaynaklanmaktadır. Bu çeliklerin işlenmesi sürecinde yığıntı talaş oluşma eğilimi ve kesme hızına bağlı yığıntı talaş morfolojisindeki değişkenlikler kesme kuvvetlerinde de önemli değişkenlikler meydana getirir [12]. Bu kesme hızına kadar (60 m/dak) her bir mikroyapıdaki malzemenin (Örn. Şekil 41’de NL ve AR numunelerinde ve Şekil 42’de AR ve NL) işlenmesinde kesme kuvvetindeki belirgin sapmalar, tamamen büyük boyutlu YT oluşumunun etkisine bağlıdır. Aynı zamanda, kesici takım malzemesi türüne göre de değişkenlik gösteren YT boyutlarına bağlı olarak, kesme kuvvetlerinde kararlılığın sağlandığı kesme hızları değişkenlik gösterir. Şekil 41 ve 42’de verilen AD numunesinde bu etkilerin görülmemesi, daha küçük boyutlu oluşan YT etkisiyle ilgilidir.

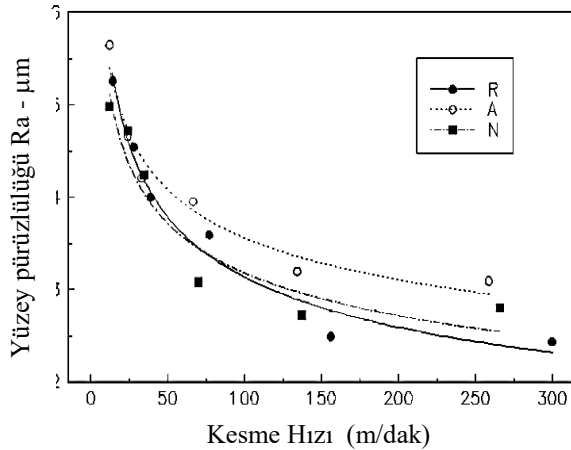
Şekil 44’de ferritik-perlitik çeliklerin işlenmesiyle ilgili yapılan bir modelleme çalışması [80, 81] verilmiştir. Burada, mikroyapı heterojenliği, faz dağılımı, ferrit-perlit oranı ve tane boyutu gibi malzeme özelliklerinin; kesme kuvveti ve talaş oluşumu karşılaştırması ile simüle edildiği görülür. Buna göre tane boyutu ve faz dağılımı, farklı fazların başarıyla kesilmesi için önemli rol oynar ve esas kesme kuvvetinin değişkenliğine sebep olur. Perlit tanelerinin bulunduğu bölgede takım üzerine etkiyen kuvvetler yüksekken, devamındaki yumuşak fazların kesme deformasyonu sürecinde kuvvetler düşer. Mikroyapısal bu değişimler, raybalama ile talaş kaldırma sürecinde homojen ve heterojen mikroyapılı malzemelerin talaş formlarını da önemli derecede etkiler.



Şekil 44. Homojen ve heterojen mikroyapılı malzemelerin işleme sürecinin kıyaslanması a-b) Esas kesme kuvveti değişimi c) Mises gerilmesi –MPa d) Eşdeğer plastik gerinim [80]

3.3. Yüzey Pürüzlülüğü (Surface Roughness)

Farklı ısıl işlemlenmiş malzemelerin kesme hızlarına bağlı değişen yüzey kalitesi incelendiğinde, özellikle düşük kesme hızlarında oluşan talaş morfolojisinin yüzey pürüzlülüğüne de yansıdığı belirlenmiştir [72, 73, 78]. Şekil 45’de haddelenmiş (R) SAE1050 çeliği için gösterilen kesme hızı-yüzey pürüzlülüğü ilişkisinden, tavlı numunede (A) düşük kesme hızında oluşan YT’nin yüzey pürüzlülüğünü artırdığı görülmektedir.

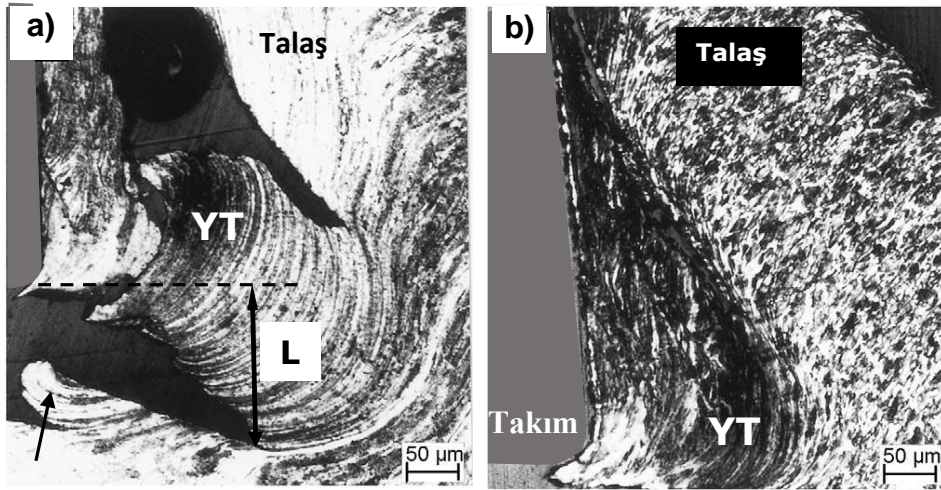


Şekil 45. Farklı mikroyapılı çelik malzemede kesme hızı yüzey pürüzlülüğü ilişkisi [72,78] (The relationship between surface roughness and cutting speed in different microstructured steel materials)

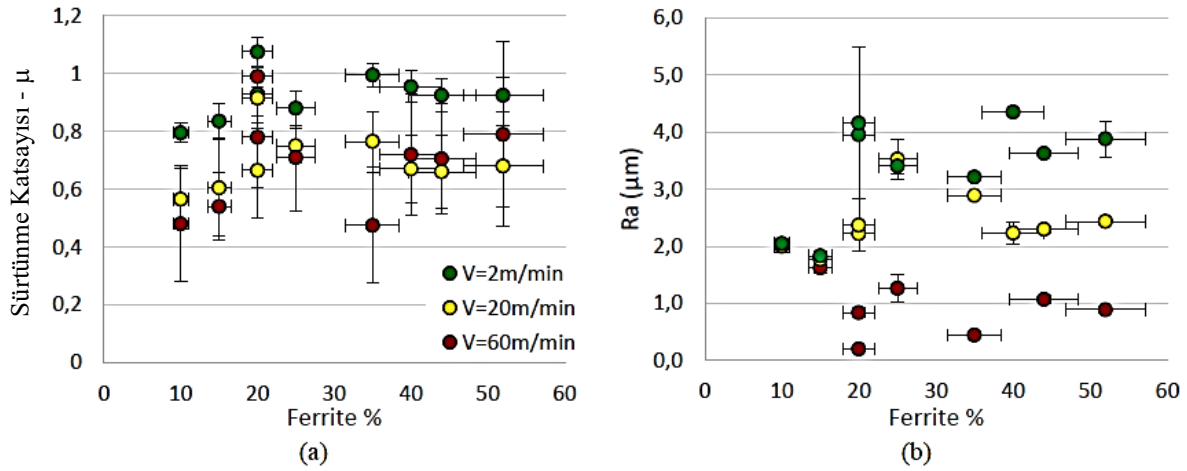
Arttırılan kesme hızıyla birlikte yaklaşık 80 m/dak kesme hızına kadar yüzey pürüzlülüğünde önemli miktarda

azalma belirlenmiştir. Bu durum, artan kesme hızıyla azalan YT boyutlarıyla ilgilidir. Çeliklerde yaklaşık 80 m/dak’ dan yüksek kesme hızlarında YT oluşmaz. Nihai kesme hızında dahi tavlı malzeme yüzey kalitesinin kötü olduğu görülmektedir. Bu durum ise YT varlığından daha çok kesici kenar altındaki 3. deformasyon bölgesinde meydana gelen plastik deformasyon etkisine bağlanabilir [78].

Şekil 46’da sıcak haddelenmiş (R) SAE1050 çeliğine tam tavlama (A:Kaba perlit) ve normalizasyon (N:Daha ince perlit ve tane boyutu) ısıl işlemleri sonrasında oluşan mikroyapıların talaş oluşum morfolojisine etkisi gösterilmiştir. Aynı kimyasal kompozisyonda fakat farklı mikroyapılara sahip malzemelerin yaklaşık aynı kesme hızında ($V=13\text{m/dak}$) tormalanması sırasında oluşan talaş köklerinin belirgin farklılık içerdiği görülmektedir. Özellikle tavlama ısıl işlemi ile kaba perlitik yapı ve minimum sertlik sağlanan malzemenin işlenmesi sırasında maksimum boyutta yığıntı talaş çıkıntı uzunluğu (L) ve yüksekliği meydana gelmiştir (Şekil 46a). Ayrıca YT çıkıntı uzunluğundaki aşırı büyümeden kaynaklanan ve yüzey pürüzlülüğünü artıran kopmuş ve işlenmiş yüzeyde kalmış YT parçacığı okla gösterilmiştir. Normalize edilmiş malzemenin işlenmesi sürecinde ise daha küçük ve kararlı YT oluşmuştur ve tavrın kesici kenar altına uzanan YT çıkıntı uzunluğu minimum boyuttadır (Şekil 46b). İşlenen malzemenin yumuşak veya sert faz oranlarına bağlı oluşan YT boyutları ve geometrisi, düşük kesme hızlarındaki yüzey kalitesini önemli oranda etkiler. Sert fazın hakim olduğu ısıl işlemlenmiş mikroyapılarda oluşan YT boyutları azalacağından işlenmiş yüzey kalitesi artar [72, 73, 78].



Şekil 46. Farklı ısıl işlemler uygulanmış SAE 1050 çeliğinde talaş oluşumu a)Tavlanmış b) Normalize edilmiş [72, 73, 78] (Chip formation in SAE 1050 steel with different heat treatments a- Annealed, b- Normalized)

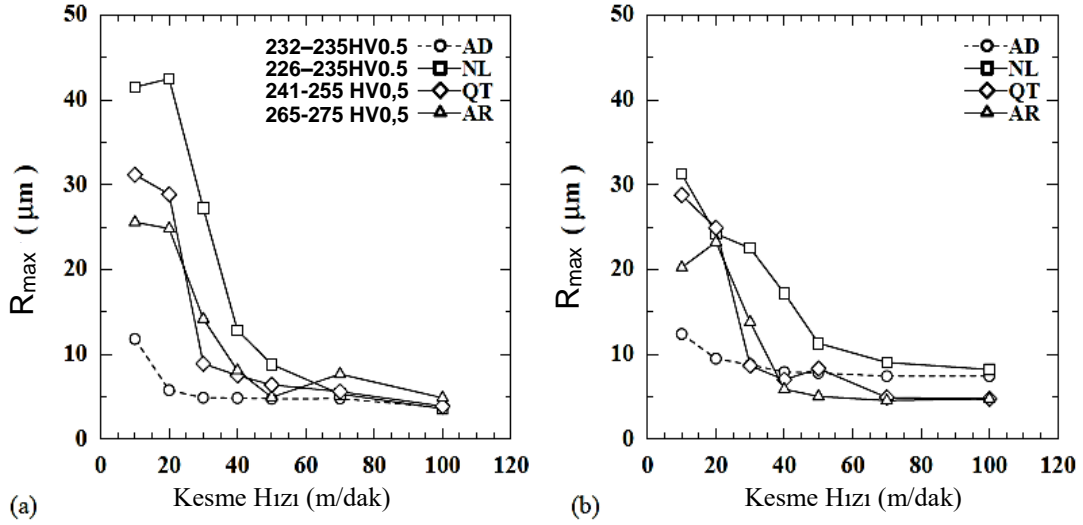


Şekil 47. Ferrit miktarının a) makroskobik sürtünme katsayısı ve b) yüzey pürüzlülüğüne etkisi [105] (Effect of ferrite content on a)macroscopic friction coefficient and b)surface roughness

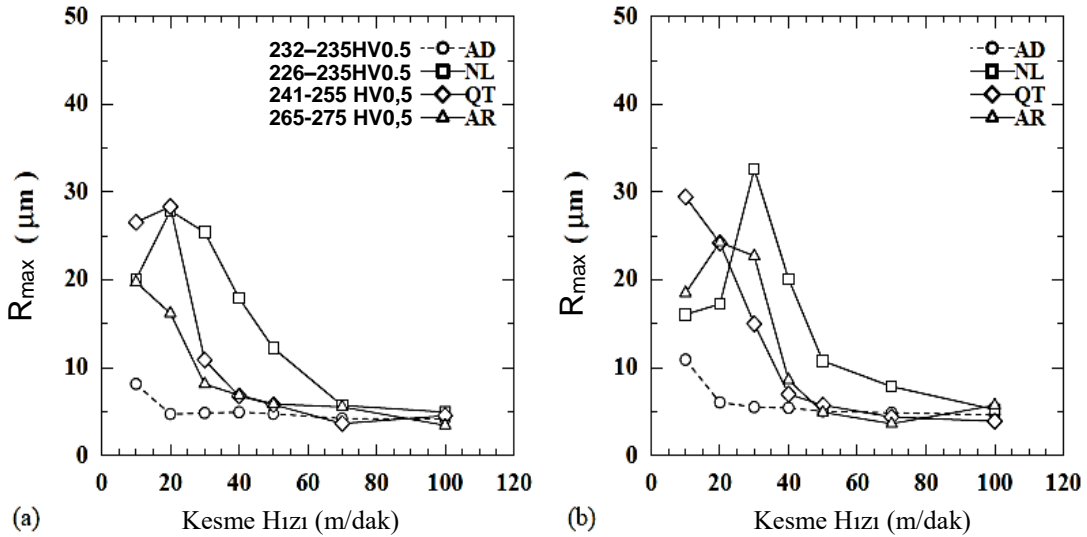
Ferritik ve perlitik çeliklerin mikroyapısının HSS M35 takım ile kuru işleme sırasında oluşan sürtünme katsayısı ve yüzey kalitesine etkisi Şekil 47’de verilmiştir. Şekil 47a’ da verilen grafiklerde artan ferrit/perlit oranı ile birlikte sürtünme katsayısının da arttığı görülmektedir. Bununla birlikte, artırılan kesme hızıyla birlikte artan malzeme-takım kayma hızının sürtünme katsayısını düşürdüğü görülmektedir. Bu ilişki ile bağlantılı olarak, artan ferrit/perlit oranı ile birlikte pürüzlülük de artmakta ve artan kesme hızı ile de pürüzlülük azalmaktadır (Şekil 47b). Takım ve işlenen malzeme arasındaki tribolojik ilişki ile açıklanan bu durum, yüksek ferrit oranında ve düşük kesme hızında takıma daha çok yapışma eğilimindeki yığıntı talaşın varlığı ile açıklanmaktadır. Ayrıca tane boyutu, perlit morfolojisi ve faz dağılımı gibi sertliği etkileyen faktörlerin de tribolojik faktörleri etkilediği bilinmektedir [105].

Şekil 48 ve 49’da görüldüğü gibi, yığıntı talaşın etkisi işlenen malzemelerin yüzey kalitesinde de belirgindir ve

kesme kuvvetlerinde meydana gelen değişkenlik benzer şekilde yüzey pürüzlülüğünde de mevcuttur. Düşük kesme hızlarında dahi en küçük YT boyutuna sahip AD numunesinde en düşük yüzey pürüzlülüğü oluşmuştur. Yaklaşık 70 m/dak kesme hızına kadar artan hızla azalan pürüzlülük, mikroyapı veya mekanik özellikten bağımsız olarak bütün numuneler için benzer minimum değere ulaşmıştır. Bu kesme hızı çelikler için kritiktir ve deney sonuçlarından da görüldüğü gibi 70-80 m/dak kesme hızından sonra YT oluşmaz ve kesici takımın kendisi kesmeye başladığından kesici uç yarıçapına ve ilerlemeye bağlı oluşan ideal yüzey pürüzlülüğüne yaklaşılar [36, 103, 106-109]. Soğutma sıvısının kullanımı veya kesici takım malzemesindeki farklılığın özellikle düşük kesme hızlarında YT oluşumuna bağlı olarak yüzey kalitesini etkilediği bilinir. Ancak, artan kesme hızıyla birlikte gerek takım malzemesi ve kuru/ıslak kesme şartları ve gerekse malzeme mikroyapılarındaki değişkenlik, yüzey kalitesini kısmen de olsa etkileyebilir (Şekil 48 ve Şekil 49).



Şekil 48. Kuru işleme sırasında yüzey pürüzlülüğünün kesme hızı ile değişimi a) Sermet kesici b) Sertmetal (P20) kesici [103]
(Surface roughness vs. cutting speed in dry machining: a-cermet tool, b- P20 tool)



Şekil 49. Islak işleme sırasında yüzey pürüzlülüğünün kesme hızı ile değişimi a) Sermet kesici b) Sertmetal (P20) kesici [103]
(Surface roughness vs. cutting speed in wet machining: a-cermet tool, b- P20 tool)

4. SONUÇ (CONCLUSION)

- Bir malzemenin talaşlı işlenebilirlik özelliği, o malzemeye ait bir özelliktir. Talaşlı imalat sürecindeki kesme parametrelerinde veya takım malzemesinde yapılan değişiklik, o malzemenin işlenebilirliğini değiştirmez. Ancak işlenebilirlik özelliğine uygun, talaşlı imalat sürecindeki değişkenlerin optimizasyonunu sağlar. Malzemenin işlenebilirliği ancak kimyasal kompozisyonu, mikroyapısı ve mekanik özellikleriyle değiştirilip, geliştirilebilir.
- Saf demire katılan alaşım elementleri ile azalan süneklığe ve artan akma mukavemetine rağmen kesme kuvvetlerinde azalma meydana gelir. Ayrıca otomat çeliklerinin mikro yapısında bulunan MnS ve Pb gibi

yumuşak ikincil fazlar da (inklüzyonlar) kesme kuvvetlerinde azalma ve talaş kaldırmada kolaylık sağlar. Bu olay, farklı süneklığe sahip fazları ihtiva eden mikroyapı sebebi ile birincil deformasyon bölgesinde fazların arayüzeyinde kolayca mikro çatlak oluşumu ile açıklanır.

- Çelikteki alaşım elementleri (özellikle karbon) süneklikteki azalmayla birlikte takım-talaş temas uzunluğunun da kısalmasına sebep olur. Azalan temas uzunluğu kesme kuvvetinin de azalmasını sağlar. Ancak artan karbon miktarı, çelikte sert ikincil fazın da artışına sebep olur. Bu nedenle, takımda özellikle abrasiv aşınma artar ve takım ömrü kısalmır.

- Otomat çeliklerinde bulunan yumuşak ikincil fazlar (inklüzyonlar), birincil deformasyon bölgesinde mikro çatlak oluşumunu kolaylaştırarak talaş kırılabilirliğini artırır, takım yüzeyinde koruyucu bir tabaka oluşturarak sürtünme kuvvetlerini düşürür ve takım aşınmasını azaltır. Bu durum, inklüzyonların oranları ve morfolojileriyle de yakından ilgilidir.
- Çeliklerde yüzey kalitesini etkileyen esas faktör yığıntı talaş (YT/BUE) oluşumu ve oluşan YT'nin çıkıntı uzunluğudur. Takım malzemesi ve işlenen malzeme etkileşimine bağlı da oluşan YT, özellikle düşük kesme hızlarında ve farklı süneklilikteki fazlara sahip mikroyapılarda oluşur. Zira, aşırı süneklığe ve yumuşak tek faza sahip saf metallere talaş kaldırılması sırasında yığıntı talaş oluşumu ve yüzey kalitesinde kötüleşme görülmeyebilir.
- Yığıntı talaş oluşumundaki genel bakış açısı, malzemenin sünekliliğindeki artışla birlikte YT oluşma eğilimi ve yüzey pürüzlülüğünde de artışın olacağı yönündedir. Ancak araştırmalar göstermiştir ki, talaş kaldırma sürecinde birincil ve üçüncül deformasyon bölgelerinde mikro çatlak oluşturmayacak kadar aşırı süneklığe sahip malzemelerin işlenmesinde yığıntı talaş oluşmaz. Bu sebeple, işlenen yüzey kalitesinin de iyi olduğu belirtilir.
- Çeliklerin sertliğini düşürmek ve işlenebilirliği geliştirmek amaçlı yapılan ısı işlemler fazların homojen dağılımını sağlanamıyor, aksine bantlaşma oranını artırıyor ve/veya heterojen dağılımlı mikroyapı oluşturuyorsa, işlenebilirlikte kötüleşme görülebilir. Bu durumda işlenen malzemenin azalan sertliğine rağmen, yüzey kalitesinde ve takım ömründe kötüleşme görülebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Dieter G. E., "*Mechanical Metallurgy*", SI Metric Edition, McGraw-Hill, London, UK, (1988).
- [2] Jablonowski J., Eigel-Miller N., "*World Machine-Tool Output and Consumption Survey*", Gardner Business Media Inc., Cincinnati, OH, USA, (2013)
- [3] Kline S., "*Tooling Equipment Report*", Gardner Business Media Inc., Cincinnati, OH, USA, (2012).
- [4] Stahl J. E., "*Metal Cutting - Theories and models*", Lund University in cooperation with Seco Tools AB, Lund/Fagersta, Sweden, (2012).
- [5] Schultheiss, F., "*On the Machinability of Ductile and Strain Hardening Materials*", Media-Tryck, Lund University, Lund, Sweden (2013).
- [6] Özçatalbaş, Y., Ercan, F., "Talaşlı İmalatta İşlenebilirlik ve İşlenebilirliğin Ölçülmesi", *Standard Dergisi*, Mayıs, (1996).
- [7] Smith, T. G., "*Advanced Machining The Handbook of Cutting Technology*", IFS Publications Ltd. UK., (1989).
- [8] Mills, B., Redford, A. H., "*Machinability of Engineering Materials*", Applied Science Publications Ltd. UK., (1989).
- [9] Shaw, M.C., "*Metal Cutting Principles*", Oxford University, New York, (1991).
- [10] Genculu S., "*Factors Affecting Machinability of Metals*", <http://www.cabinc.com/pdf/MachinabilityFactors-wp.pdf>, (2018).
- [11] Özçatalbaş Y., "The machinabilities of 1050, 4140 and 8620 steels related to changing microstructures and mechanical properties before and after the heat treatment", *Ph.D. Thesis, G.Ü. Institute of Science and Technology*, Ankara, (1996).
- [12] Özçatalbaş Y., "The Effects of Chemical Composition and Microstructure on Machinability of Steels", *8th International Advanced Technologies Symposium (IATS'17)*, 1437-1444, Elazığ, Turkey, (2017).
- [13] Çelik A., "*Kurşunlu Otomat Çelikleri*", Asil Çelik Teknik Yayın 3, (1990).
- [14] Ramalingam, B., Thomann, K., "The Role of Sulphide Type and of Refractory Inclusions in The Machinability of Free Cutting Steel", *Influence of Metallurgy on Machinability, Prod. Int. Conf.*, ASM, (1975).
- [15] Vasillko, K., Novak, S., "Results of Research in to the Effect Isothermal Annealing on the Machinability of Steels", *Hutn. Listy*. 35: 14, (1980).
- [16] Araki, T., Fukunaga, H., Sata, T., "Some Results of Cooperative Research on te Effect of Heat Treated Structure on the Machinability of a Low Alloy Steel", *Influence of Metallurgy on Machinability of Materials, (Prod. Conf.)*, 381, ASM, (1975).
- [17] Abeyama, S., Kimura, S., "The Influence of Heat Treatment and Cold Forging on Machinability of Low Alloyed Steels", *The Machinability of Engineering Materials, (Prod. Conf.)*, ASM, (1983).
- [18] Okusa, K., Kitagawa, R., "Method of Testing Steel Machinability by Milling End of Cylindrical Workpiece", *Conference on Machinability Testing and Utilization of Machining Data (Prod. Conf.)*, ASM International Materials and Metal Working Sersies, Oak, Brook, IL, (1979).
- [19] Araki, T., Yamamoto, S., "An Evaluation of Machinability of Low Alloy Steel Materials with or Without Heat Treatment", *Machinability Testing and Utilization of Machining Data (Prod. Conf.)*, ASM, (1979).
- [20] Ozcatalbas, Y., "Machinability of Elongated Coarse Grain Fe-Based Superalloys", *Machining Science and Technology*, 18(4): 626-637, (2014).
- [21] Capdevilla C., Miller U., Jelenak H., Bhadeshia H.K.D.H., "Strain Heterogeneity and the Production of Coarse Grains in Mechanically Alloyed Iron-Based PM2000 Alloy". *Materials Science and Engineering, A*, 316: 161-165, (2001b)
- [22] Kim, H. Y., Kwon, O. Y., Jang, J., Hong, S.H., "Modification of Anisotropic Mechanical Properties in Recrystallized Oxide Dispersion Strengthened Ferritic Alloy", *Scripta Materialia*, 54: 1703-1707, (2006).
- [23] Williams, J. A., Horne, J.G., "Crystallographic Effects in Metal Cutting", *Journal of Materials Science*, 17: 2618-2624, (1982).
- [24] Lane, J. D., Stam, J. W., "General Inroductor Review of the Relationship Between Metallurgy and Machinability", *Iron and Steel Inst. (Prod. Confer.) Machinability*, 65-70, (1967).

- [25] Trent, E. M., *Metal Cutting*, Tanner Ltd., London, 2000.
- [26] Sadık, M. I., Lindström, B., “The Role of Tool-Chip Contact Length in Metal Cutting”, *Journal of Materials Processing Technology*, 37: 613-627, (1993).
- [27] Babu, S. S., Chakraborty, A. K., Chattopadhyay, A. B., “Microscopic Study on Chips Formed by Sharp and Beveled Turning Carbide Inserts”, *Journal of Mater. Proces. Tech.*, 37: 781-789, (1993).
- [28] Das A., Mukhopadhyay A., S. Patel K., Biswal, B. B. “Comparative Assessment on Machinability Aspects of AISI 4340 Alloy Steel Using Uncoated Carbide and Coated Cermet Inserts During Hard Turning”, *Arab J Sci Eng*, 41: 4531-4552, (2016).
- [29] Katayama, S., Hashimura, M., “Effect of Carbon, Phosphorus and Nitrogen Contents in Steel on Machined Surface and Cutting Force”, *ISU International*, 30(6): 457-463, (1990).
- [30] Özçatalbaş Y., “Düşük Alaşımli Çelikte Yığıntı Talaş Oluşumunun İşleme Özelliklerine Etkisi”, *8.Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi*, 25-34, Ankara, (1998).
- [31] Özçatalbaş, Y., “Çelikteki Karbon, Fosfor ve Azot Miktarının İşlenen Yüzey ve Kesme Kuvvetleri Üzerine Etkisi”, *G.Ü.T.E.F. Dergisi*, 5(1-2): 71-82, (1996).
- [32] Williams J. E., Smart E. F., Milner D. R., “The Metallurgy of Machining- Part 2”, *Metallurgia*, February, 51-60, (1970).
- [33] Aouici H., Bouchelaghem H., Yaltese M.A., Elbah M., Fnides B., “Machinability investigation in hard turning of AISI D3 cold work steel with ceramic tool using response surface methodology”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 73: 1775-1788, (2014).
- [34] Trent E. M., “The Assessment of Machinability”, *Iron and Steel Inst., Machinability*, 1-9, 1967
- [35] Nagamachi, M., “Effect of MnS on Machinability”, *Transaction ISU*, 25: (1985).
- [36] Yamaguchi, K., “Friction Reducing Actions of Inclusions in Metal Cutting”, *Journal of Engineering for Industry*, 102, August (1980).
- [37] Robat, D., Bellot, J., “Steel With Improved Machinability Under Varried Conditions”, ASM, *International Conference on High Productivity Machining, Materials and Processing (Proc. Conf.)*, New Orleans, Louisiana, 7-9 May, (1985).
- [38] Özçatalbaş, Y., “Alaşım Elementlerinin Çeliğin İşlenebilirliğine Etkisi”, *Makine Tek*, 40: (1998).
- [39] Koji W., Tatsuya I., Toshiharu A., “Development of Lead-free Free-cutting Steel and Cutting Technology”, *Nippon Steel & Sumitomo Metal Tech.* Rep. No. 116, September, (2017).
- [40] Pavel K., Borislav S., Lepa S., Ondrej L., Ildiko M., “The influence of material microstructure on the chip forming process”, *Contemporary Materials*, 1: 69-76, (2014).
- [41] Naylor D.J., Llewellyn D.T., “Control of machinability in medium-carbon steels” *Keane Journal*, Metals Technology, 3(1): 254-271, (1976).
- [42] Laizhu J., Kun C., Hannu H., “Effects of the composition, shape factor and area fraction of sulfide inclusions on the machinability of re-sulfurized free-machining steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, 58: 160-165, (1996).
- [43] Katayama, S., Imal, T., “Effect of Tool Materials on Surface Machined Roughness and Cuting Force of Low-Carbon Resulfurized Free-Machining Steels”, *ISU, International*, 30, 4, (1990).
- [44] Ramalingam, S., Watson, J. D., “Steel Making, Microstructure and Machinability”, *Mecanical Working and Steel Processing XVIII. (Proc. Confer.)*, Toronto, Iron and Steel Society, (1980).
- [45] Şeker, U., “Otomatik tezgahlarda çeliğin işlenebilirlik değerlendirmesi”, *G.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi Dergisi*, 1(1): 105-114, (1987)
- [46] Yamamoto, Y., Nishimura, T., “Development of A low Carbon Resulfurized Free Cutting Steel by Continuous Casting Process”, ASM, *International Conference on High Productivity Machining, Materials and Processing (Proc. Conf.)*, New Orleans, Louisiana, 7-9 May, (1985).
- [47] Ohtani, S., Koyasu, Y., Izumi, S., “Properties of Resulphurized Free-Machining Steels Made From Continious Casting Process”, *Transactions ISIJ*, 23: (1983).
- [48] Luong, L. H. S., “Influence of Microcracks on Machinability of Metals”, *Metals Technology*, November, (1980).
- [49] Luong, L. H. L., Brown, R.H., “The Role of Microcracks in Large Plastic Deformation”, *Journal of Engineering for Industry*, 103: November (1981).
- [50] Luiz N. E., Machado A. R., “Development trends and review of free-machining steels”, *Proc. IMechE Part B: J. Engineering Manufacture*, 222: (2008).
- [51] Katayama, S., Imai, T., Suzuki, N., “Effect of Cuting Tool-Chip Interface on Built-Up Edge Formation”, *Trasaction ISU*, 25, (1985).
- [52] Hashimura M., Miyanishi K., Mizuno A., “Development of Low-Carbon Lead-Free Free-Cutting Steel Friendly to Environment”, *Nippon Steel Technical Report*, 96, July, (2007)
- [53] Ingo E., “Machinability Enhancement of Non-Leaded Free Cutting Steels”, *Franhaur Inst.*, Germany, (Ph.D. Thesis), (2006).
- [54] Pickett, M. L., Naylor, D. J., “Development and Application of Improved Machinable Engineering Steel”, ASM, *International Conference on High Productivity Machining, Materials and Processing (Proc. Conf.)*, New Orleans, Louisiana, 7-9 May, (1985).
- [55] Yaguchi, H., “Effect of Soft Additives (Pb/Bi) on Machinability of Low Carbon Resulphurised Free Machining Steel”, *Materials Science and Technology*, 5, March, (1989).
- [56] Kato, T., Abeyama, S., Kimura, A., “Machinability and Other Properties of Resulfurized Free Machining Steel Containing of Small Amount of Tellurium”, ASM, *International Conference on High Productivity Machining, Materials and Processing (Proc. Conf.)*, New Orleans, Louisiana, 7-9 May, (1985).
- [57] Haitao L., Weiqing C., “Effect of Total Oxygen Content on the Machinability of Low Carbon Resulfurized Free Cutting Steel”, *Steel Research Int.*, 83(12): (2012).
- [58] Uhlmann E., Zanatta, A. M., Mahr F., Gomes, J. O., “Influence of inclusion contents on the micro-machinability of three plastic mold steels”, *Int J Adv Manuf Technol*, 68: 2451-2460, (2013)

- [59] Kankaanpaa, H., Pöntinen, H., “Machinability of Calcium-Treated Steels Using TiN-Coated High Speed Steel Tools”, *Materials Science and Technology*, 3: 155-158, (1987).
- [60] Aple, A. C., “The Relationship Between Inclusions and The Machinability of Steel”, *31st Mechanical Working and Steel Processing Conference proceedings*, Chicago, IL, October 22-25, (1989).
- [61] Ånmark N., Karasev A., Jönsson P. G., “The Influence of Microstructure and Non-Metallic Inclusions on the Machinability of Clean Steels”, *Steel Research Int.* 1(88): 1-8, (2017).
- [62] Ånmark N., Karasev A., Jönsson P.G., “The Effect of Different Non-Metallic Inclusions on the Machinability of Steels”, *Materials*, 8: 751-783, (2015).
- [63] Balart M. J., Davis C. L., Strangwood M., “Fracture behaviour in medium-carbon Ti-V-N and V-N microalloyed ferritic-pearlitic and bainitic forging steels with enhanced machinability”, *Materials Science and Engineering A*, 328: 48–57, (2002).
- [64] Pöntinen, H., Paju, M., “Effect of Layer Formation on The Machinability of Steels”, *Factors Influence Machining and Their Controls (Proc. Conf.)*, Cincinnati, Ohio, USA, 61-67, (1989).
- [65] Joseph, A.R., Tipnis, V.A., “The Influence of Non-Metallic Inclusions on The Machinability of Free-Machining Steels”, *Influence of Metallurgy on Machinability of Materials (Prod. Conf.)*, ASM, 1985.
- [66] Tanaka R., Yamane Y., Sekiya K., Narutaki N., Shiraga T., “Machinability of BN free-machining steel in turning”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47: 1971–1977, (2007).
- [67] Wang Y.N., Bao Y.P., Wang M., Zhang L.C., “Precipitation and control of BN inclusions in 42CrMo steel and their effect on machinability”, *Int. J. Minerals Metall. And Mater.*, 20(9): 842-849, (2013)
- [68] Ya-nana C., Yan-pinga B., Minb W., Xiao-fenga C., Lin-jinga W., Li-huaa Z., “Basic research on mechanism of BN inclusion in improving the machinability of steel”, *Revista de Metalurgia*, 50(4): October–December, e028, (2014).
- [69] Yu-Nan W., Jian Y., Yan-Ping B., “Effects of Non-metallic Inclusions on Machinability of Free-Cutting Steels Investigated by Nano-Indentation Measurements”, *Metallurgical and Materials Trans. A*, 46A: 281, (2015).
- [70] Katayama, S., Toda M., “Machinability of medium carbon graphitic steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, 62: 358-362, (1996).
- [71] Gaitonde, V. N., Karnik, S. R., Figueira, L. Davim, J. P., “Machinability investigations in hard turning of AISI D2 cold work tool steel with conventional and wiper ceramic inserts”, *Int. J. Refractory Metals Hard Mater.* 27: 754–763, (2009).
- [72] Özçatalbaş Y., “1050 Çeliğinde Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerin Talaş Morfolojisi İle İşleme Özelliklerine Etkisi”, *9.Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, İst., (1997).
- [73] Özçatalbaş Y., “Isıl İşlemlerin Cr-Mo Esaslı Bir Çeliğin İşlenebilirliğine Etkisi”, *10. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, 759-766, İstanbul, (2000)
- [74] Lane J. D., Stam J. W., “General Introductor Review of The Relationship Between Metallurgy and Machinability”, *Iron and Steel Inst., (Prod. Confer.)* Machinability, 65-70, (1967).
- [75] Metals Handbook, “*Machining of Carbon and Alloy Steel*”, Metals Handbook -Machining, Ninth Edition, Vol.16, ASM, (1989).
- [76] Bellot J., “Steels With Ipmmrowed Machinability”, *Translated From Metallovedenie Termicheskaya Obrabotka Metallov*, 11, (1980).
- [77] Naylor D. J., Llewellyn D. T., Keane D. M., “Control of Machinability in Medium Carbon Steels”, *Metals Technology*, 3(1): 254-271, (1976).
- [78] Özçatalbaş Y., Ercan F., “The Effects of Heat Treatment on The Machinability of Mild Steels”, *Journal of Materials Processing Technology*, 136(1-3): 227-238, (2003).
- [79] Björkeborn K., Klement U., Oskarson H.B., “Study of microstructural influences on machinability of case hardening steel”, *Int J Adv Manuf Technol*, 49: 441–446, (2010).
- [80] Mabrouki T., Courbon C., Fabre D., Arrieta I., Arrazola P.J., Rech J., “Influence of Microstructure on Chip Formation when Broaching Ferritic-Pearlitic Steels”, *Procedia CIRP*, 58: 43 – 48, (2017).
- [81] Abouridouanea M., Klockea F., Döbbeler B., “Characterisation and modelling of the machinability of ferritic-pearlitic steels in drilling operations”, *Procedia CIRP*, 58: 79 – 84, (2017).
- [82] Diniz, A. E., Machado, A. R., Corrê J. G., “Tool wear mechanisms in the machining of steels and stainless steel”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(9–12): 3157–3168, (2016).
- [83] Stachowiak G. W. and Stachowiak, G. B. "Wear Behaviour of Ceramic Cutting-Tools", *Key Engineering Materials*, 96: 137-164, (1994).
- [84] Rahman, M. “Advanced ceramic tools for machining application-HI”, *Machining Science and Technology*, 3(2): 295-296, (1999).
- [85] Komanduri, R. “Advanced ceramic tool materials for machining”, *Sadhan* 13(1-2), 119-137, (1988).
- [86] Fernandes, C. M., Senos. A. M. R., “Cemented carbide phase diagrams: A review”, *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 29: 405–418, (2011).
- [87] Acchar, W., Zollfrank, C., Greil, P., “Microstructure and Mechanical Properties of WC-Co reinforced With NbC”, *Materials Research*, 7(3): 445-450, (2004).
- [88] Chang, S. H., Chang, M. H., Huang, K. T., “Study on the sintered characteristics and properties of nanostructured WC-15 wt% (Fe-Ni-Co) and WC-15 wt% Co hard metal alloys”, *Journal of Alloys and Compounds*, 649: 89-95, (2015).
- [89] Konyashin, I., Zaitsev, A.A., Sidorenko, D., Levashov, E. A., “Wettability of tungsten carbide by liquid binders in WC-Co cemented carbides: Is it complete for all carbon contents?”, *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 62: 134-148, (2017)
- [90] <https://www.quora.com/What-is-tungsten-carbide,What-is-tungsten-carbide?>, (2017).
- [91] Xin, W., “WC/Co Tool Wear in Dry Turning of Commercially Pure Aluminium”, *Journal of*

- Manufacturing Science and Engineering*, 136: 031006/1-7, (2014).
- [92] Xin Liu, L. L., Li, X. Q., Li, Y. Y., “Wear mechanisms of WC–10Ni3Al carbide tool in dry turning of Ti6Al4V”, *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 48: 272–285, (2015).
- [93] Bai, D., Sun, J., Chen, W., “Wear mechanisms of WC/Co tools when machining high-strength titanium alloy TB6 (Ti-10V-2Fe-3Al)”, *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, 90: 2863–2874, (2017).
- [94] Liang L., Liu X., Li X. Q., Li Y. Y., “Wear mechanisms of WC–10Ni3Al carbide tool in dry turning of Ti6Al4V”, *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 48: 272–285, (2015).
- [95] Özçatalbaş Y., “Wear mechanisms of WC–Co tool in dry machining of heat treated steels”, *8th International Advanced Technologies Symposium (IATS’17)*, 1854–1861, Elazığ / TÜRKİYE, (2017).
- [96] Tonshoff H. K., “Machinability of Forged Steels in Interrupted Cutting”, *Journal of Materials Processing Technology*, 21: 219-236, (1990).
- [97] Tonshoff H. K., “Materials Aspects in Machining of Forged Steels”, *High Productivity Machining (Proc. Conf.)*, 207-221, (1985).
- [98] Finn M. E., “*Machining of Carbon and Alloy Steel*”, Metals Handbook, Ninth Edition, 16: 672-673, ASM Int., Ohio, (1989).
- [99] Das S. R., Dhupal D., Kumar A., “Experimental investigation into machinability of hardened AISI 4140 steel using TiN coated ceramic tool”, *Measurement*, 62: 108–126, (2015).
- [100] Bhattacharya D., Machinability of Steel, *Journal of Metals*, March, 32-35, (1987).
- [101] Tan E., Ovalı I., Mavi A., Kaplan M., Okay S., “Influence of repeated tempering on the machinability and microstructure of an AISI 52100 steel”, *Materials Testing*, 57(11-12): 947-953, (2015).
- [102] Sueyosh H., Tanaka R., “Heat Treatment and Machinability of the Tri-Phase Steel Composed of Ferrite, Martensite and Graphite”, *J. Japan Inst., Metals*, 54(2): 231–236, (1990).
- [103] Akasawa T., Fukuda I., Nakamura K., Tanaka T., “Effect of microstructure and hardness on the machinability of medium-carbon chrome-molybdenum steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, (153–154): 48–53, (2004).
- [104] Silva L. R., Abrão A. M., Faria P., Davim J. P., “Machinability Study of Steels in Precision Orthogonal Cutting”, *Materials Research*, 15(4): 589-595, (2012).
- [105] Arrieta, I., Courbon, C., Cabanettes, F. P.-J. Arrazola, and J. Rech, “Influence of the ferritic-pearlitic steel microstructure on surface roughness in broaching of automotive steels” *AIP Conference Proceedings*, 1896, 090011, (2017).
- [106] Yazman Ş., Akdemir A., Uyaner M., Bakırcıoğlu B., “The Effect of Build Up Edge Formation on The Machining Characteristics in Austempered Ferritic Ductile Iron”, *Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, IMECE2013, 15-21, California, USA, (2013).
- [107] Akdemir, A., Yazman Ş., Sağlam H., Uyaner M., “The Effects of Cutting Speed and Depth of Cut on Machinability Characteristics of Austempered Ductile Iron”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 134: 021013-1, (2012).
- [108] Korkut, İ., Kasap, M., Çiftçi, İ., and Şeker U., “Determination of Optimum Cutting Parameters During Machining of AISI 304 Austenitic Stainless Steel”, *Materials Design*, 25: 303-305, (2004).
- [109] Yıldız, Y., Günay, M., Şeker, U., “The effect of the cutting fluid on surface roughness in boring of low carbon steel”, *Machining Science and Technology*, 11(4): 487-494, (2007).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



Blokzincir teknolojisinin dijital kimlik yönetiminde kullanımı: bir sistematik haritalama çalışması

Blockchain technology for digital identity management: a systematic mapping study

Yazar(lar) (Author(s)): Çetin KARAHAN¹, Aslıhan TÜFEKÇİ²

ORCID¹: 0000-0002-8697-9162

ORCID²: 0000-0002-8669-276X

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Karahan Ç. ve Tüfekçi A., “Blokzincir teknolojisinin dijital kimlik yönetiminde kullanımı: Bir sistematik haritalama çalışması”, *Politeknik Dergisi*, 23(2): 483-496, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.654503

Blokzincir Teknolojisinin Dijital Kimlik Yönetiminde Kullanımı: Bir Sistemik Haritalama Çalışması

Araştırma Makalesi / Research Article

Çetin KARAHAN^{1*}, Ashlhan TÜFEKÇİ²

¹İç Denetim Birimi Başkanlığı, T.C. Cumhurbaşkanlığı Savunma Sanayii Başkanlığı, Türkiye

²Bilişim Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 03.12.2019 ; Kabul/Accepted : 23.12.2019)

ÖZ

Çevrimiçi sunulan birçok ürün ve hizmete internet üzerinden erişerek işlem gerçekleştirmek için kullanılması zorunlu olan dijital kimlik, gerçek dünya kimlikleri ile güvenli biçimde ilişkilendirildiğinde insanların gerçekten iddia ettikleri kişi olduklarını kanıtlamalarını sağlamakta olup dijitalleşmenin en önemli unsurlarından biridir. Dijital kimliklerin tasarımı, kullanılması, yönetimi ve güvenliği gibi konularda mevcut uygulamalarda bazı sorunlar yaşanmaktadır. Bu sorunlardan en önemlileri arasında kimlik sistemlerinin devletler ya da büyük teknoloji şirketleri gibi merkezi otoritelerin kontrolünde olması, bu durumun verilerin usulsüz kullanımı ve mahremiyetin ihlal edilmesi risklerini doğurması, aynı bilgilerin farklı otoritelere tutulması zorunluluğundan kaynaklanan veri tutarsızlıkları ve verimsiz iş süreçleri sayılabilir. Blokzincir teknolojisinin yapısal özellikleri mevcut sistemdeki bu verimsizlik ve problemleri gidermek için oldukça uygundur. 2008 yılında ilk ortaya çıkmasından bu yana sürekli olarak artan bir ilgiyle takip edilen ve uygulama sahası sürekli olarak genişleyen blokzincir teknolojisi konusunda hem devletler hem de Birleşmiş Milletler ve Avrupa Birliği gibi uluslararası kuruluşlar ve özel sektör tarafından dijital kimlik özelinde araştırma, model ve prototip geliştirme çalışmaları yürütülmektedir. Bu çalışmada, blokzincir teknolojisinin dijital kimlik alanında kullanımına ilişkin çalışmalar ve elde edilen çıktılar hakkında bütünsel bir fikir edinmek ve geleceğe yönelik bir perspektif sunmak amacıyla, sistemik haritalama metodu kullanılarak konu incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Blokzincir, dijital kimlik yönetimi, sistemik haritalama.

Blockchain Technology for Digital Identity Management: A Systematic Mapping Study

ABSTRACT

The digital identity, which is a must for accessing many online products and services, lets individuals to prove that they really are who they claim to be when it is securely associated with real world identities. Besides, digital identity is one of the most important elements of digitalization. However, there are some deficiencies in existing applications related to design, implementation, management and security of digital identities. The principal deficiencies may be count as the risks of improper use of data and violation of privacy arising from being under the control of central authorities such as governments or technology giants, and inconsistent data and nonproductive business processes arising from duplication of identity data amongst different authorities. Blockchain technology has a potential to eliminate these problems and nonproductivity by its inherent characteristics. Since its first emerge in 2008, blockchain technology has been closely followed and the field of application consistently expanded. Today, governments, international organizations such as United Nations and European Union and private sector carry out research, modelling and prototype development studies on digital identity with blockchain. In this study, systematic mapping method was used to have a holistic insight about the researches on utilization of blockchain for digital identity and it is also aimed to provide a perspective for future works.

Keywords: Blockchain, digital identity management, systematic mapping.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüz dünyasında kamu ve özel sektör tarafından sunulan eğitim, sağlık, finans, oy kullanma ve sosyal yardımlardan faydalanma gibi birçok hizmete erişmek için insanların kim olduklarını kanıtlamaları, bunun için de resmi bir kimlik sahibi olmaları gerekmektedir. İnsan Hakları Evrensel Beyannamesi'nin altıncı maddesinde herkesin her nerede olursa olsun, hukuksal kişiliğinin tanınması hakkına sahip olduğu belirtilmektedir. Öte yandan, dijital olarak sunulan hizmetler büyük oranda

kimlikle ilişkilidir. Bu nedenle, kimlik yönetimi sürdürülebilir gelişim ve dijitalleşme için en önemli unsurlardan biridir. Resmi olarak devletlerce sağlanan kimlik belgelerinin yanı sıra, dijital olarak sunulan birçok hizmete erişim için dijital kimliklerin kullanılması zorunludur.

Dijital kimlik bir şahsın internet üzerinden yapacağı bazı işlemler ve bağlantılar için kullanmaları gereken, gerçek dünya kimliklerinin bir karşılığıdır. Fiziksel kimlik ile dijital kimlikler arasında güvenilir bir bağlantı kurularak, insanların dijital dünyada gerçekten iddia ettikleri kişi olduklarını kanıtlamaları gerekmektedir.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : ckarahan@ssb.gov.tr

Gerek fiziksel kimlik gerekse dijital kimlik olsun, kimliklerin yönetilmesinde mevcut sistemde yaşanan bazı problemler bulunmaktadır. Birleşmiş Milletlere göre dünya üzerinde bir milyardan fazla insanın kimliklerini kanıtlayabilecekleri bir belgeleri bulunmamaktadır. Bu nedenle bu insanlar birçok kamu hizmetine erişememekte ve finansal sisteme dahil olamamaktadır. Mevcut kimlik sistemleri tek bir merkezi otorite tarafından yönetilmekte, bu durum da tek nokta hatası, verilerin usulsüz kullanımı ve kişi mahremiyetinin ihlal edilmesi risklerini doğurmaktadır. Farklı kamu kuruluşları kendi hizmetleri için kimlik bilgilerini yönetmekte, bazı durumlarda veriler arasında güncellemelerden kaynaklı uyumsuzluklar meydana gelmektedir. Mevcut kimlik yönetim sistemlerinde kimlik doğrulama işlemleri maliyetli, verimsiz ve külfet getiricidir.

Mevcut sistemdeki problemleri ortadan kaldırmak ve hızla dijitalleşen dünyaya uyum sağlamak adına üzerinde çalışılan en güncel konu blokzincir teknolojisidir. Blokzincir teknolojisi veri sahiplerinin kendi verilerini yönetmelerine imkan sağlayan, merkezi otoriteye güven ihtiyacı olmadan taraflar arasında işlem yapılmasını mümkün kılan, kriptoloji kullanımı ile güvenliği sağlanmış, finans alanı dışında da pek çok kullanım sahəsi bulunan yıkıcı bir teknolojidir. Bu çalışmada, dijital kimlik yönetimi alanında kullanımına ilişkin olarak yapılmış olan çalışmalar hakkında bütünsel bir fikir edinmek ve gelecekte yapılacak çalışmalar için bir fikir vermek amacıyla blokzincir teknolojisi ve dijital kimlik konusu sistematik haritalama metodu ile incelenmiştir.

2. BLOKZİNCİR TEKNOLOJİSİ VE DİJİTAL KİMLİK YÖNETİMİ (BLOCKCHAIN TECHNOLOGY and DIGITAL IDENTITY MANAGEMENT)

Blokzincir teknolojisinin üzerinde uzlaşmış tek bir tanımı bulunmamasıyla birlikte en temel ifadeyle tek bir kişi ya da kuruluşun kontrolünde olmayan, düğüm adı verilen çok sayıda bilgisayar tarafından yönetilen, işlemlerin doğrulanması için özetleme algoritmasını, onaylanması için ise mutabakat protokollerini kullanan, işlemleri zaman damgası ile sıralayan, onaylanmış işlemleri birbiri ardına kriptografi ve özetleme fonksiyonları ile bağlayarak tüm düğümlerde özdeş kopyasını tutan, içerdiği verilerin değiştirilmesi ve geriye çevrilmesi hemen hemen imkansız olan dağıtık bir veri kayıt sistemidir [1].

Blokzincir teknolojisinin temelleri 1990'lı yıllara dayanmakla birlikte bu teknolojinin değeri Bitcoin ortaya çıkana dek anlaşılabilmiştir. Bitcoin'deki başarılı ve popüler uygulamasından dolayı blokzincir kavramı öncelikli olarak finansal teknolojiler alanında değerlendirilmiş olsa da gerçekte bunun ötesinde birçok farklı uygulama alanına sahiptir [2]. Bu uygulama alanlarından en önemlileri dijital kimlikler, küresel ödeme sistemleri, müşteri tanıma, elektronik oylama, tedarik zinciri yönetimi, fikri hakların korunması ve telif

hakkı yönetimi, varlık kayıtları ve sosyal yardımların dağıtımı ve izlenmesi biçimindedir.

Blokzincir teknolojisi vatandaşlar, işletmeler ve diğer devlet iştirakleri için dijital kimliklerin oluşturulmasında ve yönetilmesinde kullanılabileceği gibi kimliklerin birçok farklı özelliğinin yönetiminde de kullanılabilir. Örneğin; doğum kayıtları, evlilik cüzdanları, pasaport ve vize bilgileri, ölüm kayıtları blokzincirlerle yönetilebilir. Kimlik yönetimi, adet bakımından, yürütülmekte olan blokzincir proje konuları arasında ikinci sıradadır. Hizmetleri daha kusursuz ve daha külfetsiz hale getirmesinin yanı sıra blokzincire dayalı kimlikler özellikle çok faktörlü doğrulama veya biyometrik kontrolle birleştirildiğinde kimlik hırsızlığı ile mücadelede önemli avantaj sağlayacaktır [3].

Günümüzde, internet üzerinden sunulan dijital hizmetlerin sayısının sürekli olarak artması da dijital kimlik yönetiminin önemini hem hizmetlere erişim, hem de güvenliğin ve mahremiyetin sağlanması bakımından artırmıştır.

Kimlik yönetimi dijital kimliklerin yaratılmasını, gerektiğinde değişiklik ve güncellemelerin yapılmasını ve silinmesini içeren faaliyetlerdir. Dijital kimlik, gerçek dünyadaki bir kişi ya da varlığın elektronik ortamdaki temsilidir [4].

25 Eylül 2015 tarihindeki Birleşmiş Milletler Genel Kurulu, 17 Sürdürülebilir Gelişim Amacı (SGA) altında 169 spesifik hedef bulunan 2030 Sürdürülebilir Gelişim Gündemini resmi olarak kabul etmiştir. SGA 16.9 ile belirtilen temel amaçta, üye ülkelerin, 2030 yılı itibariyle tüm vatandaşları için doğum kayıtlarını da içeren yasal kimlikler sağlaması ifadesine yer verilmektedir. Bu amaç aynı zamanda diğer 7 adet amacı da desteklemektedir. Bu, tüm insanların yasal bir kimlik sahibi olması ile ilgili küresel ölçekteki ilk hedeftir [5].

Yasal olarak varlığını ispat edemediği sürece insanlar oy vermek, araç kullanmak, banka hesabı açmak, kamu hizmetlerine erişmek gibi birçok haktan faydalanamamaktadır. Dünya Bankası Gelişim İçin Kimliklendirme (ID4D) Girişimi 2018 yılı Faaliyet Raporuna (2019) göre dünya üzerinde 1 milyardan fazla insanın kimliklerini ispat edecekleri bir belgeleri bulunmamasıyla, bu insanlar sağlık, eğitim, finans hizmetleri gibi en temel gereksinimlere erişim sağlayamamaktadır. Aynı zamanda, kimlik sistemleri zayıf, dışlayıcı ve insanların mahremiyetini riske atan bir yapıda olabilir. Bu da kimlik sistemlerinin sadece kapsamını değil kalitesini de artırmanın önemini ortaya koymaktadır.

Dijital kimlik, başlı başına bir blokzincir uygulama örneği olmasının yanı sıra hem blokzincir kullanılarak yapılacak diğer uygulamalar için hem de çoğu dijital hizmete erişim için bir kolaylaştırıcıdır [6]. Hâlihazırda Estonya'da blokzincir teknolojisine dayalı dijital kimlikler kullanılmaktadır. Hollanda, Amerika Birleşik Devletleri, İsviçre, Lüksemburg ve Avustralya başta olmak üzere birçok devlet bu teknolojinin dijital

kimliklerde kullanımına yönelik olarak pilot çalışmalar yürütmektedirler.

3. SİSTEMATİK HARİTALAMA (SYSTEMATIC MAPPING)

Sistemik haritalama çalışmaları, bir sınıflandırma vasıtasıyla, belirli bir araştırma alanına ilişkin genel bir bakış sağlamak ve bu sınıflandırmanın kategorilerine ilişkin katkıları saymak amacıyla tasarlanırlar. Sistemik literatür gözden geçirme ile ortak bazı noktaları olmakla birlikte, birbirlerinden amaç ve veri analiz yaklaşımı bakımlarından ayrılırlar [7].

Sistemik haritalama sıklıkla tıbbi araştırmalarda kullanılan bir yöntem olmakla birlikte son zamanlarda farklı araştırma konularında da kullanılmaya başlanmıştır. Ancak blokzincir teknolojisinin uygulama alanları ile ilgili olarak sistemik haritalama çalışması oldukça kısıtlı sayıdadır.

Sistemik haritalamada çalışmaların aranması ve dahil edilmesi süreçleri tam bir gözden geçirme ile aynı kapsamlı biçimde gerçekleştirilir, ancak süreç kritik değerlendirme ve veri sentezini içermez. Standart bir şablon ve tanımlanmış anahtar kelimeler kullanılarak çalışmaların önemli yönlerini tanımlamak için seçilen çalışmalardan veri çıkarılır. Bu yaklaşım, çalışmanın gerçekleştirildiği ülke gibi jenerik değişkenler konusunda bilgi toplamak için tasarlanmıştır [8].

Sistemik haritalama kapsamındaki sentezler kapsamlı olmalı ve önceden belirlenmiş bağımsız bir gözden geçirme metoduna göre yapılmalıdır. Sistemik harita çalışmasında hedef bir hipotezin test edilmesi veya çalışmanın etkilerine ilişkin sorulara nitel ya da nicel bir cevap bulunması amaçlanmaz, daha çok hangi araştırmanın, nerede ve nasıl yapıldığı ile ilgilenilir [9].

4. ARAŞTIRMA YÖNTEMİ (RESEARCH METHOD)

Bu çalışmada, Petersen ve arkadaşları (2015) tarafından tanımlanmış olan sistemik haritalama süreci izlenmiştir. Bu süreç adımları aşağıda listelenmiş olup ayrıca Şekil 1’de de gösterilmiştir.

1. Araştırma sorularının belirlenmesi
 - 1.1. Gözden geçirmenin kapsamının ve hedeflerin belirlenmesi
2. Araştırmanın yürütülmesi

- 2.1. Araştırma sorularından arama söz dizilerinin oluşturulması
- 2.2. Araştırma yapılacak veri tabanlarının belirlenmesi
- 2.3. Tüm yayınların listelenmesi
3. Yayınların elemeyden geçirilmesi ve kalite değerlendirmesi
 - 3.1. Eleme kriterlerinin belirlenmesi
 - 3.2. İlgili yayınların kriterlere göre listelenmesi
4. Özetlerden anahtar kelimelerin çıkarılması
 - 4.1. Seçilen birincil yayınlardan veri çekmek için veri alanlarının belirlenmesi
5. Veri çıkarma ve haritalama süreci
 - 5.1. Verilerin sentezi ve sistemik haritalama

4.1. Araştırma Sorularının Belirlenmesi (Determination of Research Questions)

Sistemik haritalama sürecinin ilk adımı araştırma sorularının belirlenmesidir. Bu çalışmada, blokzincir teknolojisinin dijital kimlik alanında kullanılmasına yönelik çalışmaların araştırılması hedeflenmektedir. Bu kapsamda, sürecin sonraki adımlarına da dayanak olmak üzere aşağıdaki araştırma soruları (AS) belirlenmiştir:

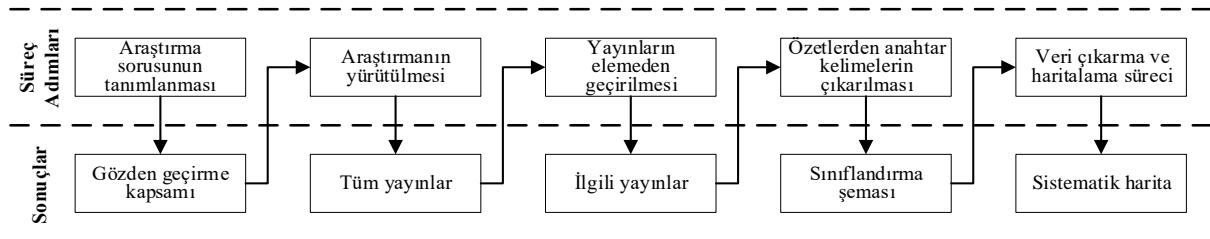
AS1: Blokzincir teknolojisinin dijital kimlik uygulamaları konusunda yürütülmüş olan çalışmaların yayın çeşitleri, çalışmaların coğrafi dağılımları ve çalışmaların çıktı tipleri nelerdir?

Bu sorunun cevabı çalışmaların genel yapısı hakkında bilgi sahibi olmak, gelecekte yürütülecek çalışmalar için mevcutta eksik olan çalışma çeşit ve çıktı tiplerini anlamak konularında yardımcı olacaktır.

AS2: Blokzincir teknolojisinin dijital kimlik alanında kullanılmasına ilişkin olarak hangi başlıklarda araştırmalar yürütülmüştür?

Seçilmiş olan veri tabanlarından elde edilen tüm ilgili çalışmalar değerlendirilerek mevcut çalışma konuları listelenmiş olup bu soruya verilecek cevap ile blokzincir teknolojisinin dijital kimlik alanında kullanımına yönelik daha ileri çalışmalar yapmak isteyen araştırmacılara çalışılabilecek konular hakkında bir fikir verilmektedir.

AS3: Blokzincir teknolojisinin dijital kimlik uygulamaları konusundaki mevcut araştırmalarda hangi problemler ele alınmıştır? Dijital kimlikle ilgili olarak



Şekil 1. Sistemik haritalama süreci [7] (The systematic mapping process)

blokzincir teknolojisinin çözüm vadettiği mevcut sorunlar nelerdir?

Dijital kimlikler ve kimlik yönetimi konularında yapılmış olan çok sayıda çalışma olmakla birlikte, blokzincir teknolojisinin mevcut kimlik yönetiminin hangi sorunlarına çözüm getirebileceği konusu spesifik olarak değerlendirilmelidir. Bu araştırma sorusunun cevabı ile blokzincirin çözüm getirebileceği sorunlar sınıflandırılarak daha ileri çalışmalar için odaklanılabilecek alanlar konusunda bir fikir verilmektedir.

AS4: Blokzincir teknolojisinin dijital kimlik alanındaki mevcut problemlere sunduğu çözümler nelerdir?

Bu sorunun cevabı birinci Araştırma Sorusunun cevabında yer alan çıktı tipleri ile ilişkilendirilerek önerilmiş olan çözümler ana başlıklar altında verilmiştir.

Araştırma sorularının belirlenmesiyle, birinci aşama sonucunda gözden geçirme kapsamı temel olarak aşağıdaki biçimde oluşmuştur.

- Araştırma Sorusu 1:
 - Yayınların çeşidi
 - Çalışmaların kaynağı (ülke ve sektör)
 - Çalışmaların çıktı tipleri
- Araştırma Sorusu 2:
 - Çalışmaların konu başlıkları
- Araştırma Sorusu 3:
 - Çalışmalarda ele alınan problemler
- Araştırma Sorusu 4:
 - Çalışmalarda ele alınan problemlere sunulan çözüm önerileri

4.2. Araştırmanın Yürütülmesi (Conduction of Research)

4.2.1. Araştırma sorularından arama söz dizinlerinin oluşturulması (Creating search strings from research questions)

Blokzincir teknolojisinin dijital kimlik alanında kullanımına ilişkin öncelikli çalışmaların belirlenmesi için araştırma soruları dikkate alınarak arama söz dizini oluşturulmuştur. Bu aşamada, araştırmacıların ön yargısını devre dışı bırakmak ve ilk aşamada mümkün olduğunca fazla çalışmayı listelemek için arama söz dizini geniş tutulmuş, anahtar kelimeler olarak “*blockchain*”, “*digital*”, “*identity*”, “*certificate*” ve “*licence*” belirlenmiştir.

Belirlenen kelimelerle bazı pilot aramalar yapılarak arama sonuçları değerlendirilmiş, nihai olarak “*AND*” ve “*OR*” kombinasyonları ile, belirlenmiş olan bilimsel veri tabanlarında aranmıştır. Aramada “*blockchain*” terimi sabit kalmak üzere diğer terimlerin farklı

kombinasyonları kullanılarak “*blockchain*” *AND* (“*digital identity*” *OR* “*digital certificate*” *OR* “*digital licence*”) söz dizini araştırılmıştır.

4.2.2. Araştırma yapılacak veri tabanlarının belirlenmesi (Selection of the databases to be researched in)

Arama için anahtar kelimelerin ve söz dizilerinin belirlenmesinden sonra içerisinde arama yapılacak bilimsel veri tabanları seçilmiştir. Veri tabanları seçilirken Google ya da Yandex aramaları gibi gri literatürün kullanılmamasına karar verilmiş, konferans bildirileri, kitap ve dergi yayınları gibi yüksek kalitede makalelere yoğunlaşmış, arama yapılırken yayın türü kısıtlanmıştır. Yapılan çalışmaların listelenmesi için altı bilimsel veri tabanı seçilmiştir:

- ACM Digital Library
- BASE (Bielefeld Academic Search Engine)
- Google Scholar
- Microsoft Academic
- Science Direct
- Springer Link

4.2.3. Tüm yayınların listelenmesi (Listing of all publications)

Belirlenmiş olan arama söz dizini seçilmiş olan bilimsel veri tabanlarında arandıktan sonra tüm arama sonuçları birleştirilmiştir. İlk arama sonuçlarına göre bulunan yayınların veri tabanlarına göre dağılımları Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Arama sonucunda listelenen ilgili yayın sayıları (The number of relevant publications listed in the search result)

Veri tabanı	Yayın sayısı
ACM Digital Library	247
BASE (Bielefeld Academic Search Engine)	164
Google Scholar ¹	14
Microsoft Academic	38
Science Direct	155
Springer Link	120
Toplam	738

4.3. Yayınların Elemeden Geçirilmesi (Screening of Publications)

Listelenen tüm yayınlar, hem doğrudan araştırma soruları ile ilgili olması beklenmediğinden, hem de farklı nedenlerle incelenmesi uygun ya da mümkün olmadığından bir elemeden geçirilerek birincil yayınların listesine ulaşılmıştır. Eleme süreci iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk eleme aşamasında, listelenen yayınlar başlıklarına göre değerlendirilmiş, araştırma

digital identity” söz dizini ile sadece yayın başlıkları içerisinde arama yapılmıştır.

¹ Google Scholar veri tabanında, tüm metin içinde yapılan söz dizini araması sonucunda 16.200 yayın listelenmiştir. Bu nedenle, bu veri tabanındaki aramada “*allintitle: blockchain*”

başlığına uygun olmayanlar listeden çıkarılmıştır. Başlığa göre karar verilemeyen yayınlar daha detaylı okuma için bir sonraki aşamaya aktarılmıştır. Başlıklar dışında yayınları ilk aşamada değerlendirme dışı bırakmak için bazı hariç tutma kriterleri kullanılmıştır:

- Yayın başlığı araştırma konusu ile ilgili olmayan yayınlar,
- Tam erişim imkanı olmayan yayınlar,
- İngilizce olmayan yayınlar,
- Tekrarlı olan (farklı veri tabanlarında listelenen) yayınlar,
- Yayın tipi uygun olmayan (sunum, bülten) yayınlar.

Yayın başlığı ve yukarıda verilmiş olan dört kritere göre elenmiş olan yayınların eleme gerekçelerine göre dağılımları Çizelge 2’de verilmiştir. Blokzincir teknolojisi 2008’den sonra ortaya çıkmış olan yeni bir konu olduğundan ve incelenmiş olan çalışmaların en eskisi 2014 yılına ait olduğundan çalışmaların tarihlerine dayalı bir eleme yapılmamıştır.

Çizelge 2. Hariç tutma kriterlerine göre ilk aşamada elenen yayınların sayıları (The number of eliminated publications in first screening according to exclusion criteria)

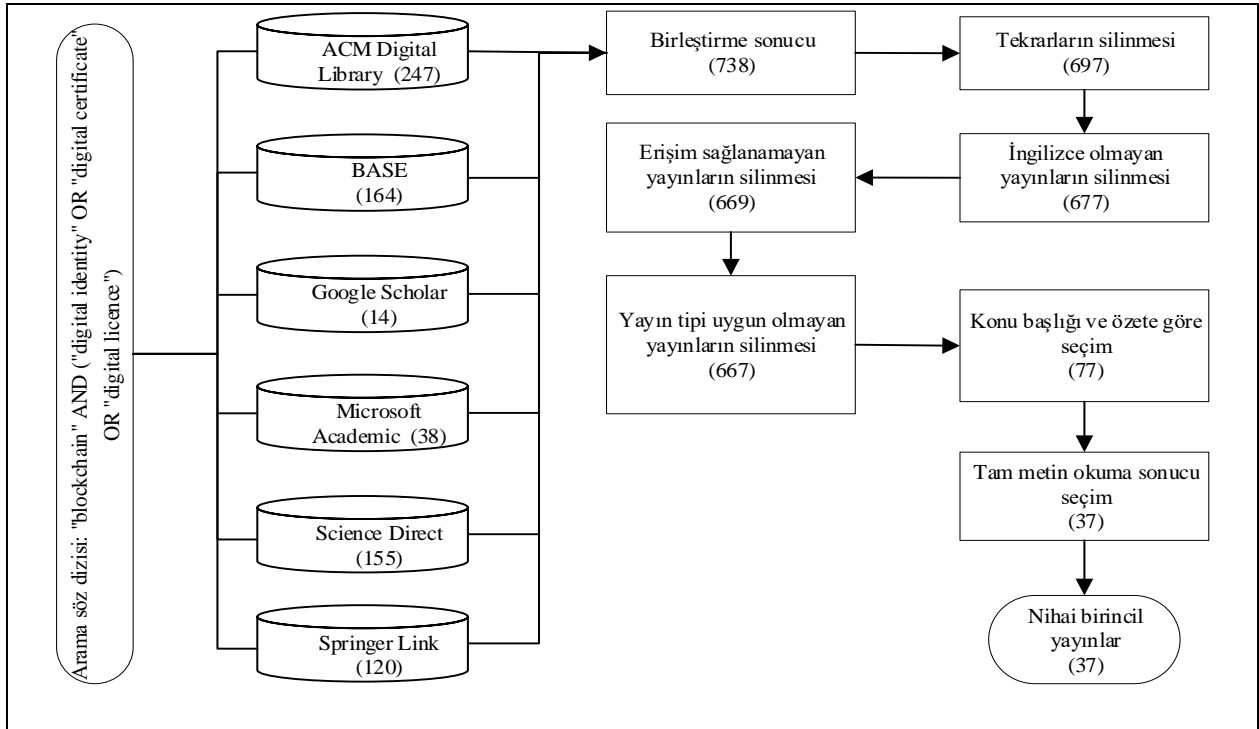
Hariç tutma kriteri	Yayın sayısı
Konu başlığı tam ilgili olmayan yayınlar	590
Tam erişim imkanı olmayan yayınlar	8
İngilizce olmayan yayınlar	20
Tekrarlı olan (farklı veri tabanlarında listelenen) yayınlar	41
Yayın tipi uygun olmayan yayınlar	2
İkinci aşamaya aktarılan yayınlar	77
Toplam	738

Konu başlığı uygun olan ve diğer dört hariç tutma kriterini geçen yayınlar özet bölümleri okunarak ilgililik kriteri bakımından emin olunduktan sonra ikinci eleme aşamasına geçilmektedir. İlk inceleme sonuçlarına göre, altı veri tabanındaki arama sonucunda bulunan toplam 738 yayından 77 adedi ikinci aşamada değerlendirmek üzere seçilmiştir. İlk aşamada elenen yayınların listeden çıkarılmasıyla kalan 77 yayının veri tabanlarına göre dağılımları Çizelge 3’te verilmiştir.

Çizelge 3. İlk eleme sonucunda seçilen yayın sayıları (The number of selected publications after first screening)

Veri tabanı	Yayın sayısı
ACM Digital Library	6
BASE (Bielefeld Academic Search Engine)	39
Google Scholar	4
Microsoft Academic	20
Science Direct	6
Springer Link	2
Toplam	77

İlk aşamadan sonra kalan 77 yayının tamamının tam metni incelenerek blokzincir ve dijital kimlik konusu ve araştırma soruları ile tam ilgili olmayan yayınlar ikinci bir elemeye tabi tutulmuştur. Bu eleme sonucunda 40 yayın listeden çıkarılarak nihai değerlendirme için 37 yayın seçilmiştir. Aşağıda verilmiş olan Şekil 2’de veri tabanlarından yapılan sorgulama sonucunda elde edilen yayınların sayıları ile eleme aşamaları sonucunda seçilen birincil yayınların adetleri verilmiştir.



Şekil 2. Yayınların arama, elemeyi geçirme ve seçim süreci (Search, screening and selection process for the publications)

4.4. Özetlerden Anahtar Kelimelerin Çıkarılması (Extracting Keywords from Abstracts)

Bu aşamada, birincil yayın olarak belirlenmiş olan 37 çalışmanın öncelikle özet ve sonuç kısımları, bu kısımların yeterli bilgi içermediği durumlarda tam metni okunarak yayınların temel bağlamı, çıktısı ve katkıları çıkarılarak tüm yayınlardaki anahtar kelimeler bir araya getirilmiş, daha üst düzey ve genel bakış açısıyla yayınları temsil eden kategoriler tanımlanmıştır. İncelenmiş olan birincil yayınlar sonuçlarına göre değerlendirme ve araştırma çalışması, model önerisi, pilot çalışma ve uygulama geliştirme olarak kategorilere ayrılmış olup bu kategoriler altında ilgili yayınların ele aldıkları konular Şekil 3’te verilmiştir.

Seçilmiş olan 37 yayında yer verilmiş olan anahtar kelimeler bir araya getirilerek listelenmiştir. Bu yayınlarda toplam 79 farklı anahtar kelime bulunmakta olup 25 yayında “*blockchain*”, 16 yayında “*digital identity*”, 8 yayında “*distributed ledger technology*”, 5 yayında “*KYC-Know Your Customer*” anahtar kelimelerine yer verilmiştir.

4.5. Veri Çıkarma ve Haritalama (Data Extraction and Mapping)

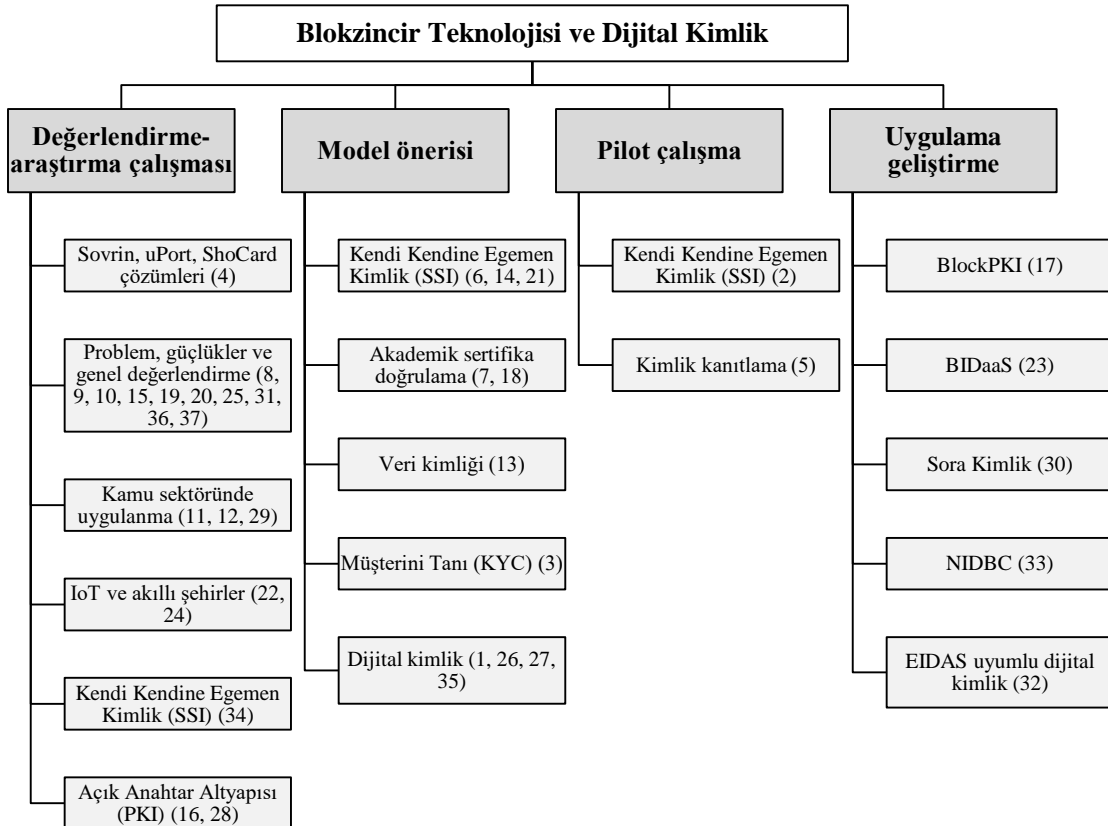
Bu çalışma kapsamında veri toplamak ve toplanan verileri değerlendirerek sentezlemek üzere bir tablo yapısı tasarlanarak incelenen tüm yayınlardan elde edilen

veriler Ms Excel kullanılarak oluşturulmuş bu tablonun ilgili alanlarına kaydedilmiştir. Tasarlanmış olan tabloda yer alan alanlar Çizelge 4’te verilmiştir.

Çizelge 4. Yayınların listelenmesinde kullanılan veri maddeleri
(Data items which used for listing publications)

No	Veri maddesi	Açıklama
VM01	Yer aldığı veri tabanı adı	Yayının alındığı bilimsel veri tabanı
VM02	Yayın başlığı	Yayının başlığı
VM03	Yazarlar	Yayının yazar(lar)ının isim bilgileri
VM04	Yayın tipi	Makale, kitap, tez, rapor, bildiri vb.
VM05	Alıntılanma sayısı	Yayının alıntılanma sayısı
VM06	Ülke	Yayının kaynak ülkesi (birinci yazar ya da yayıncı kuruluş)
VM07	Yayın tarihi	Yayınlanma tarihi
VM08	Yayının kaynağı	Akademik, kamu, özel sektör vb.
VM09	Özet (İngilizce)	Yayın özetinin orijinal metni
VM10	Özet (Türkçe çevirisi)	Yayın özetinin yazarlarca yapılan çevirisi
VM11	Anahtar kelimeler	Yayında yer verilmiş olan anahtar kelimeler
VM12	Problemler, araştırma soruları	Yayında belirtilmiş olan, konu ile ilgili problemler alanlar
VM13	Çalışmanın bulguları (sonuçlar)	Yayında belirtilmiş olan bulgu ve sonuçlar ile öneriler
VM14	Çıktı tipi	Değerlendirme-araştırma, model önerisi, uygulama, prototip, pilot çalışma vb.

Bölüm 4.1.’de verilmiş olan araştırma sorularının yanıtlanmasında bu veri maddelerinin istatistik ve analizlerinden faydalanmıştır.



Şekil 3. Yayınların kategorileri ve her bir kategoride ele alınan konular (ilgili yayının Çizelge 5’deki yayın listesindeki sıra numarası parantez içerisinde verilmiştir) – (Categories of publications and the topics covered in each category (the sequence number of the publication in Table 5 was given into parenthesis))

4.5.1. Araştırma sorularının yanıtları (Answers to research questions)

Çalışmanın ilk aşamasında belirlenmiş olan dört araştırma sorusuna ilişkin sonuç ve yanıtlar aşağıda sıralanmıştır.

AS1: Blokzincir teknolojisinin dijital kimlik uygulamaları konusunda yürütülmüş olan çalışmaların yayın çeşitleri, çalışmaların coğrafi dağılımları ve çalışmaların çıktı tipleri nelerdir?

• Yayın tipleri (VM04)

Aşağıda verilmiş olan Şekil 4'de, seçilmiş olan yayınların tipleri gösterilmektedir. Bu çalışmada yayın tipi olarak konferans bildirisi, süreli yayın makalesi, makale, tez, rapor, kitap bölümü ve ön rapor belirlenmiştir. Çalışmaların çoğunluğu konferans bildirisi (%29,7), süreli yayın makalesi (%24,3) ve makale (%21,6) tipindedir.

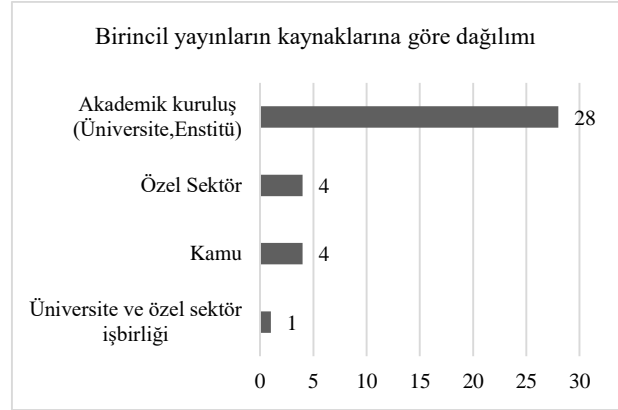


Şekil 4. Birincil yayınların yayın türlerine göre dağılımları (Distribution of primary publications according to types)

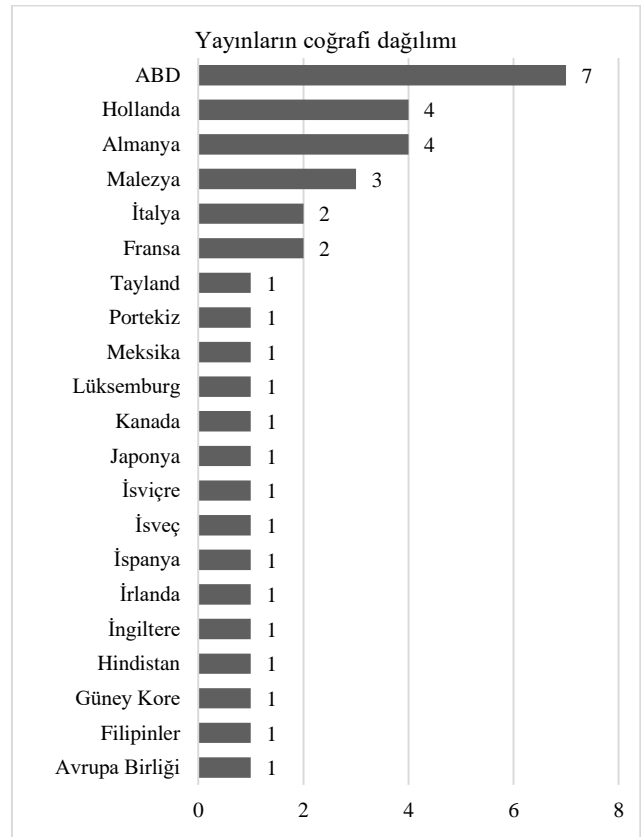
• Çalışmaların kaynağı (VM08) ve coğrafi dağılımı (VM06)

Aşağıda verilmiş olan Şekil 5'te, seçilmiş olan birincil yayınların kaynakları gösterilmektedir. Yayınların kaynakları akademik kuruluş (üniversite, enstitü), kamu, özel sektör ve üniversite-özel sektör işbirliği biçiminde kategorize edilmiştir. Yayınların kaynağı büyük oranda (%75,7) akademik kuruluşlardır.

Birincil yayınların coğrafi dağılımları Şekil 6'da verilmiştir. Buna göre, en fazla yayın 7 adet ile Amerika Birleşik Devletleri'ne (%18,9) ait olup Amerika Birleşik Devletleri'ni 4'er yayımla (%10,8) Almanya ve Hollanda izlemektedir. Listedeki diğer ülkelerin yayın sayıları 3 ve daha azdır. 37 yayının 20 ülke ve Avrupa Birliği arasında dağılımı olması konuya tüm dünyadan ilgi olduğunu göstermektedir.



Şekil 5. Birincil yayınların yayın kaynağına göre dağılımları (Distribution of primary publications according to sources)



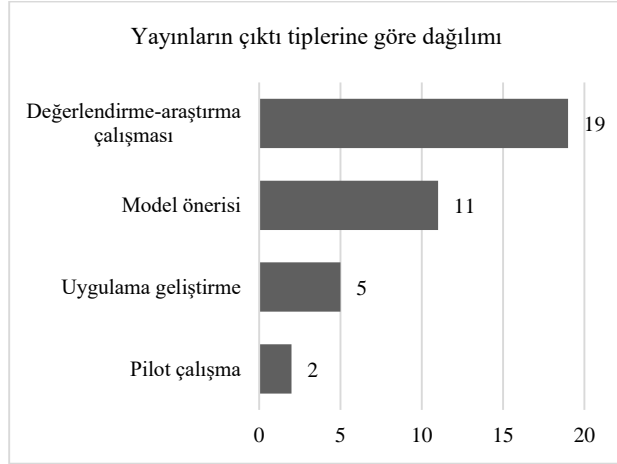
Şekil 6. Birincil yayınların coğrafi kaynağına göre dağılımları (Distribution of primary publications according to geographic origin)

• Çalışmaların çıktı tipleri (VM14)

Birincil çalışmalar sunmuş oldukları katkı ve bulgularına göre değerlendirme-araştırma çalışması, model önerisi, pilot çalışma, uygulama geliştirme olarak kategorize edilmiş olup bu çıktı tiplerine göre dağılım Şekil 7'de verilmiştir.

Çalışmaların büyük bölümü (%51,4) konu ile ilgili genel bilgilere yer veren değerlendirme ve araştırma çalışmalarıdır. Değerlendirme-araştırma çalışmalarını

model önerisi içeren çalışmalar (%29,7) takip etmektedir. Uygulama geliştirme ve pilot çalışma içeren çalışmaların sayıları nispeten daha düşüktür.



Şekil 7. Birincil yayınların çıktı tiplerine göre dağılımları (Distribution of primary publications according to output types)

AS2: Blokzincir teknolojisinin dijital kimlik alanında kullanılmasına ilişkin olarak hangi başlıklarda araştırmalar yürütülmüştür?

Blokzincir teknolojisinin dijital kimlik alanında kullanılmasına ilişkin olarak belirlenmiş olan 37 adet birincil yayının başlıkları ve çalışma içeriğinde yer verilmiş temel konular Çizelge 5’te verilmiştir.

Çizelge 5. Birincil yayınların listesi (The list of primary publications)

No	Yayın Başlığı	Yayın Kapsamında İncelenen Konular
1	On the Relevance of Blockchain in Identity Management [4]	Blokzincir teknolojisinin uygulanabilirliğinin değerlendirilmesi için bir karar modeli ortaya konmaktadır. Blokzincire dayalı dijital kimlik çözümlerinden uPort, Sovrin ve ShoCard önerilen karar modeli kapsamında uygunluk bakımından değerlendirilmektedir.
2	Deployment of a Blockchain-Based Self-Sovereign Identity [10]	Blokzincire dayalı bir Kendi Kendine Egemen Kimlik (SSI) çözümü için pilot çalışma sunulmaktadır.
3	Privacy-preserving KYC on Ethereum [11]	Blokzincirin finans sektöründe, Müşterini Tanı (KYC) yükümlülüğü için kullanılmasına yönelik bir program tasarımı sunulmaktadır.
4	A First Look at Identity Management Schemes on the Blockchain [12]	Blokzincir teknolojisinin dijital kimlik alanında sunduğu çözümleri uPort, Sovrin ve ShoCard uygulamaları üzerinden değerlendirilmektedir.
5	Using Blockchain to Create Transaction Identity for Persons Experiencing Homelessness in America: Policy Proposal [13]	Kimlik sahibi olmayan evsizlerin kamu hizmetleri ve yardımlarından faydalanması için blokzincir teknolojisinin dijital kimlik çözümü olarak kullanımına yönelik bir pilot çalışma sunulmaktadır.
6	The Horcrux Protocol: A Method for Decentralized Biometric-based Self-sovereign Identity [14]	Biyometrik kimlik bilgisinin blokzincirde tutulduğu Kendi Kendine Egemen Kimlik (SSI) uygulaması için bir model önerisi sunulmaktadır.
7	A Graduation Certificate Verification Model via Utilization of the Blockchain Technology [15]	Akademik sertifikaların kimlik doğrulaması için blokzincir teknolojisinin kullanımına dair bir model önerisi sunulmaktadır.
8	Eagle-eye on identities in the digital world: evolution and challenges [16]	Blokzincir teknolojisinin dijital kimlik alanında uygulanmasına yönelik bir değerlendirme sunulmaktadır.
9	Global Challenge of Identity: Blockchain E-ID System for a Sustainable Development and Good Governance [17]	Blokzincir teknolojisinin dijital kimlik alanında uygulanmasına yönelik bir değerlendirme sunulmaktadır.
10	Distributed Ledger Technologies for Developing Asia [18]	Blokzincir teknolojisinin dijital kimlik alanında uygulanmasına yönelik bir değerlendirme sunulmaktadır.
11	Decentralized digital identity management using blockchain and its implication on public sector [19]	Blokzincire dayalı dijital kimlik yönetimi ve bu çözümün kamu sektörü üzerindeki etkileri değerlendirilmektedir.
12	Challenges and Opportunities of Blockchain-based Platformization of Digital Identities in the Public Sector [20]	Blokzincir teknolojisinin dijital kimlik alanında kullanılması ve kamu sektöründe uygulanabilirliğine dair bir değerlendirme sunulmaktadır.
13	Invisible Ink : blockchain for data privacy [21]	Kullanıcıların hassas verilerinin şifreli biçimde dağıtımını ve verilerin kullanıcıları tarafından yönetilebilmesini sağlayan bir model önerilmektedir.
14	Self-Sovereign Identities for Humanitarian Interventions, A Case Study on Protective Cash Transfer Programs [22]	Kendi Kendine Egemen Kimlik çözümü olarak blokzincirin dijital kimlik alanında kullanılması için bir model önerilmektedir.
15	Towards a Theory of Decentral Digital Process Ecosystems : Evidence from the Case of Digital Identities [23]	Merkezi olmayan dijital ekosistem, mülteciler için blokzincire dayalı dijital kimlik çözümüne dair bir proje üzerinden değerlendirilmektedir.
16	A Distributed Public Key Infrastructure for the Web Backed by a Blockchain [24]	Blokzincir teknolojisinin web kimliği için Açık Anahtar Altyapısı (PKI) alanında kullanımına yönelik bir değerlendirme sunulmaktadır.

No	Yayın Başlığı	Yayın Kapsamında İncelenen Konular
17	BlockPKI: An Automated, Resilient, and Transparent Public-Key Infrastructure [25]	Blokzincir teknolojisinin web kimliği için Açık Anahtar Altyapısı (PKI) alanında kullanımına yönelik bir pilot çalışma sunulmaktadır.
18	Using blockchain as a tool for tracking and verification of official degrees: business model [26]	Akademik sertifikaların kimlik doğrulaması için blokzincir teknolojisinin kullanımına dair bir model önerisi sunulmaktadır.
19	E-Residency and Blockchain [27]	Estonya tarafından uygulanan e-Residency programı kimlik doğrulama sürecini de içeren riskler ve katkılar bakımından değerlendirilmektedir.
20	Blockchain, Digital Identity, E-government [5]	Blokzincir teknolojisinin e-Devlet hizmetlerine erişim ve kimlik doğrulaması alanında uygulanmasının yasal, politik ve teknik etkileri değerlendirilmektedir.
21	Towards self-sovereign identity using blockchain technology [28]	Dijital hizmetlere erişmek için web ortamında kullanılan dijital kimliklerin yönetiminde blokzincire dayalı Kendi Kendine Egemen Kimlik çözümüne ilişkin model önerisi sunulmaktadır.
22	How digital identity on blockchain can contribute in a smart city environment [29]	Blokzincire dayalı dijital kimlik çözümlerinin akıllı şehir tasarımında kullanımına yönelik bir sistematik haritalama çalışması sunulmaktadır.
23	BIDaaS: Blockchain Based ID As a Service [30]	Blokzincire Dayalı Hizmet Olarak Kimlik (BIDaaS) çözümünün bir mobil telekomünikasyon şirketinin mobil kullanıcıları için kimlik ve kimlik doğrulama yönetimi altyapısı olarak nasıl çalıştığını gösteren bir uygulama örneği sunulmaktadır.
24	Identity Management Systems for the Internet of Things: A Survey Towards Blockchain Solutions [31]	Nesnelerin interneti için kimlik uygulamasında blokzincirin kullanılmasına yönelik bir değerlendirme sunulmaktadır.
25	Fintech for Financial Inclusion: A Framework for Digital Financial Transformation [32]	Finansal katılım ve finans sektöründe teknolojinin etkin kullanımı için blokzincire dayalı Müşterini Tam (KYC) ve dijital kimlik çözümleri değerlendirilmektedir.
26	Transforming Face-to-Face Identity Proofing into Anonymous Digital Identity Using the Bitcoin Blockchain [33]	Blokzincir teknolojisinin anonim olarak kimlik kanıtlamada kullanımına ilişkin bir model önerisi sunulmaktadır.
27	Achieving Service Accountability Through Blockchain and Digital Identity [34]	Blokzincir ve dijital kimlik teknolojilerinin birleştirilerek hesap verebilirliğin artırılmasına yönelik bir model önerisi sunulmaktadır.
28	Blockchain: the Emperors New PKI? [35]	Blokzincir teknolojisinin dijital kimlik alanında uygulanmasına yönelik bir değerlendirme sunulmaktadır.
29	A Blockchain Ecosystem for Digital Identity: Improving Service Delivery in Canada's Public and Private Sectors [36]	Blokzincir teknolojisinin dijital kimlik alanında kullanılması ve kamu sektöründe uygulanabilirliğine dair bir değerlendirme sunulmaktadır.
30	Sora Identity: Secure, Digital Identity on the Blockchain [37]	Blokzincir teknolojisinin dijital kimlik alanında kullanılmasına ilişkin bir uygulama örneği sunulmaktadır.
31	Blockchain Technology the Identity Management and Authentication Service Disruptor: A Survey [38]	Blokzincire dayalı farklı kimlik yönetimi ve kimlik doğrulama çerçeveleri eleştirel olarak incelenmektedir.
32	Integrating Digital Identity and Blockchain [39]	Kendi Kendine Egemen Kimlikler kavramına genel bir bakış sunulmaktadır.
33	A Practical National Digital ID Framework on Blockchain (NIDBC) [40]	Blokzincire dayalı Tayland Ulusal Dijital Kimlik çerçevesi önerilerek uygulama örneği sunulmaktadır.
34	A survey on essential components of a self-sovereign identity [41]	Kendi Kendine Egemen Kimlikler kavramına genel bir bakış sunulmaktadır.
35	Implementing Decentralized Digital Identity using Blockchain [42]	Çevrim içi kimlik yönetimi ve Kendi Kendine Egemen Kimlik kavramları değerlendirilerek blokzincirin dijital kimlik alanında uygulanması için kavramsal bir model önerilmektedir.
36	Blockchain and a Digital Identity System: Simply another mislead application of a popular technology [43]	Blokzincir teknolojisinin dijital kimlik alanında uygulanmasına yönelik bir değerlendirme sunulmaktadır.
37	Digital Identity Management on Blockchain for Open Model Energy System [44]	Blokzincir teknolojisinin dijital kimlik alanında uygulanmasına yönelik bir değerlendirme sunulmaktadır.

Çizelge 5'te verilmiş olan çalışma konularının değerlendirilmesi sonucunda, yürütülen araştırmaların temel konu başlıkları aşağıdaki biçimde özetlenmektedir:

- Blokzincir teknolojisinin dijital kimlik alanında kullanım potansiyeline ilişkin inceleme ve değerlendirmeler,
- Blokzincir teknolojisine dayalı dijital kimlik uygulamaları olan uPort, Sovrin ve ShoCard'a ilişkin inceleme ve değerlendirmeler,
- Blokzincir teknolojisine dayalı Kendi Kendine Egemen Kimlik (SSI – Self Sovereign Identity) çözümü,
- Blokzincir teknolojisi ve Müşterini Tamı (KYC – Know Your Customer) yükümlülüğü için kullanım potansiyeli,
- Kimlik sahibi olmayan mülteciler ve evsizler için dijital kimlik yönetiminde blokzincir teknolojisinin kullanımı,
- Akademik sertifikalar için kimlik doğrulamada blokzincir teknolojisinin kullanımı,
- Blokzincir teknolojisine dayalı dijital kimlik çözümlerinin kamu sektöründe uygulanması,
- Dijital hizmetlere erişimde kullanılan dijital kimlikler için blokzincir teknolojisine dayalı Açık

Anahtar Altyapısı (PKI – Public Key Infrastructure) uygulaması,

- Nesnelerin interneti ve akıllı şehirlerde blokzincir teknolojisine dayalı dijital kimlik kullanımı.

Çalışmaların büyük bölümü değerlendirme ve incelemeye dayalı teorik araştırmaları içermekte olup yukarıda sıralanmış olan konulara ilişkin gerçek hayat uygulamaları ya da uygulamaya geçirilebilecek kapsamlı model önerileri alanlarında yeterli yayın bulunmadığı değerlendirilmektedir.

AS3: Blokzincir teknolojisinin dijital kimlik uygulamaları konusundaki mevcut araştırmalarda hangi problemler ele alınmıştır? Dijital kimlikle ilgili olarak

blokzincir teknolojisinin çözüm vadettiği mevcut sorunlar nelerdir?

Birincil yayınların tamamının tam metni incelenerek çalışma konularına ilişkin olarak değerlendirilmiş problemler ve iyileştirilebilir alanlar her bir çalışma için maddeler halinde listelenmiştir. İlk listelemede 37 adet birincil yayında değerlendirilmiş olan 80 adet problem ifadesi tespit edilmiştir. Listelenen konular daha sonra ana başlıklar halinde kategorize edilerek sınıflandırılmıştır. Ele alınan problemler yayınlarda yer verilme adetleriyle birlikte Çizelge 6’da listelenmiştir. Ele alınan problemler ayrıca Şekil 8’de, ilgili kategoriler altında gösterilmiştir.

Çizelge 6. Yayınlarında ele alınmış olan problemler (The problem statements reviewed in publications)

Yayınlarda Ele Alınmış Olan Problemler	Adet
Mevcut kimlik yönetim sistemlerinin gizlilik, güvenlik, kullanılabilirlik ve mahremiyet konularındaki eksikliği, bireysel ve kitlesel izlemeye, yolsuzluk ve veri ihlallerine açık olması, kimlik doğrulama metodlarının verimsizliği, yüksek kayıt maliyetleri ve vatandaşların süreçlerine uyumsuzluk	16
Dünya üzerinde 1,1 milyardan fazla insanın kimliğinin olmaması, kimliksiz insanların kamu hizmetlerine erişim güçlükleri ve yardımların koordinasyonundaki problemler	9
Dijital kimlikler için üçüncü taraflara ya da güvenilir Sertifika Otoritesine (CA) güven zorunluluğu	7
Farklı kuruluşlarca tutulan kimlik kayıtları arasında uyumsuzluk, güncelleme ve koordinasyon güçlüğü ve vatandaşlara getirdiği külfet	7
İnsanların çeşitli hizmetlere erişebilmek için çok sayıda dijital kimliğe sahip olma zorunlulukları, farklı hizmetler için farklı kimlik doğrulayıcı bilgileri hatırlama zorunluluğu nedeniyle kullanıcılar açısından kullanışsızlık	5
Mevcut sistemde kimlik sahiplerinin kendi verilerini yönetememesi	5
Yükseköğretim sertifikalarında sık rastlanan sahtecilik, bu sertifikaların doğrulanmasının zaman alıcı ve maliyetli olması	3
Merkezi sistemlerin tek nokta hatası riski	3
Sertifika Otoritelerinin (CA) güvenlik riski	3
Blokzincir kimlik uygulamalarında düzenleme ve standartların eksikliği, performans, ölçeklenebilirlik, mahremiyet ve gizlilik	2
Blokzincir ile kimlik yönetimi konusundaki çalışma sayısının az olması	2
Dijital kanallardaki işlemlerin hacmindeki artış nedeniyle dijital kimlik kullanımının da artması ve karmaşıklaşması, insanların kimliklerini kanıtlamaları için uygun maliyetli çözümlere olan ihtiyaç	2
Estonya devleti tarafından sunulan e-Residency hizmeti kapsamındaki dijital kimliklerin güvenlik, vergi kaçırma ve kara para aklama riskleri	2
Hem özel hem de kamu hizmetlerine erişim için kimlik doğrulamanın en kritik unsur olması, etkin bir dijital kimlik sisteminin yokluğunun devletlerin dijital dönüşümünü kısıtlaması	2
Mevcut finans sisteminin devletler tarafından verilen kimliklere bağımlı olması	2
Mevcut kimlik yönetimi sistemlerinin ölçeklenebilirlik, birlikte çalışabilirlik ve mobilite gibi bazı doğal IoT özelliklerine uyumsuzluğu, IoT için erişim kontrolleri, mahremiyet, güven, performans problemleri	2
Akıllı şehirlerin oluşturulması için güvenilir ve uygun maliyetli dijital kimliklere olan ihtiyaç	1
Fiziksel kimlik belgelerine dayanan kimlik araçlarının dijital yaklaşımı desteklememesi	1
Hizmet sağlayıcıların kullanıcı kimlik verilerini tutma zorunluluğunun getirdiği maliyet	1
Kullanıcıların bilgisi veya rızası olmadan veri madenciliği yapılması, profil oluşturma ve kötüye kullanım için kişisel bilgilerin toplanması	1
Mevcut fiziksel kimliklerin yerini tutacak dijital bir kimlik doğrulama sisteminin henüz bulunmaması	1
Mevcut literatürde Nesnelerin İnterneti (IoT) için dijital kimlik yönetimi üzerine kapsamlı bir çalışma bulunmaması	1
Müşterini tanı (KYC) ve kara para aklama mevzuatına uyumun maliyetli ve hantal olması	1
Sadece insanlar için değil birçok elektronik cihaz için de güvenilir dijital kimliklere ihtiyaç duyulması	1



Şekil 8. Mevcut araştırmalarda ele alınan problemler ve blokzincir teknolojisinin çözüm vadettiği sorunlar (KYS: Kimlik Yönetim Sistemi) – (The problems reviewed in the current publications and the challenges for which blockchain technology promises solution)

AS4: Blokzincir teknolojisinin dijital kimlik alanındaki mevcut problemlere sunduğu çözümler nelerdir?

İncelenmiş olan 37 adet birincil yayından 19 adedi değerlendirme ve inceleme içeren çalışmalar olup bu yayınlarda genel olarak mevcut durum analiz edilmiş, üçüncü araştırma sorusunun yanıtında belirtilmiş olan dijital kimlik yönetimindeki problemler alanların çözümü için blokzincir teknolojisine sahip olduğu güvenlik, şeffaflık, anonimlik, merkezi otoriteye ihtiyaç duymama ve mahremiyet gibi özelliklerin önemi vurgulanmıştır.

Model önerisi, pilot çalışma ve uygulama örneği içeren diğer 18 çalışmada yer verilmiş olan çözümler ise aşağıdaki biçimdedir:

- Blokzincir teknolojisine dayalı Kendi Kendine Egemen Kimlik tasarımı,

- Blokzincir teknolojisine dayalı Sovrin, uPort ve ShoCard dijital kimlik çözümleri,
- Müşterini Tanı yükümlüğü için akıllı sözleşmeleri kullanan blokzincir çözümü,
- Dijital hizmetlere erişimde kullanılacak dijital kimlikler için blokzincir teknolojisine dayalı Açık Anahtar Altyapısı çözümü,
- Biyometrik veri destekli blokzincire dayalı pasaport uygulaması,
- Kimlik sahibi olmayan evsiz insanlar için biyometrik özellikler kullanılarak blokzincire dayalı kimlik çözümü,
- Nesnelere interneti ve akıllı şehirlerin tasarımında blokzincire dayalı kimlik çözümü.

5. SONUÇ (CONCLUSIONS)

Blokzincir teknolojisi doğası gereği taşıdığı merkezi otoriteye ihtiyaç duymama, güvenlik, gizlilik, şeffaflık, değiştirilmesi ya da silinmesi mümkün olmayan kayıt sistemi gibi özellikleri nedeniyle birçok potansiyel kullanım alanına sahiptir. Bu kullanım alanlarından en önemlilerinden biri de dijital kimlik yönetimidir. Hem kamu hem de özel sektör tarafından sunulan hizmetler hızla dijitalleşmekte, bu hizmetlere erişebilmek için insanların kim olduklarını kanıtlayabilecekleri dijital kimliklere sahip olmaları gerekmektedir. Mevcut geleneksel kimlik yönetimi uygulamalarının yönetsel, mali ve işlemsel bazı problemleri bulunmakta olup blokzincir teknolojisinin bu problemlere çözüm getirme potansiyeli bulunmaktadır.

Sistemik haritalama çalışması belirli bir konu üzerinde yapılmış olan akademik çalışmaları belirli bir sistemik dahilinde ve belirlenmiş araştırma soruları doğrultusunda inceleyen, inceleme sonuçlarını belirlenmiş olan araştırma sorularına yanıt verecek biçimde görsel özetlerle destekleyerek sunan bir yöntemdir. Bu çalışmada, blokzincir teknolojisinin dijital kimlik alanında kullanımına ilişkin çalışmaların incelenmesi, hangi alt konularda araştırmaların yürütüldüğünün belirlenmesi, çalışmalara ait sayısal verilerin çıkarılarak değerlendirilen problemlerin ve çözüm önerilerinin ortaya konulması için sistemik haritalama metodu kullanılmıştır. Bu çalışma ile, blokzincir teknolojisinin dijital kimlik alanında kullanılmasına ilişkin mevcut akademik çalışmaların kapsamı hakkında bir fikir sahibi olunması, gelecekte yapılacak çalışmalar için araştırmacılara yön verecek veri ve bilgilerin sağlanması hedeflenmektedir.

Sistemik haritalama çalışması kapsamında, belirlenmiş olan bilimsel veri tabanlarından seçilmiş olan anahtar kelimelerle yapılan tarama sonucunda 738 yayına ulaşılmış, bu yayınların haritalama süreç adımlarında belirtilmiş olan kriterlere göre değerlendirilerek elenmesinden sonra nihai inceleme için 37 birincil yayın seçilmiştir. Bu yayınlar büyük oranda blokzincir teknolojisinin dijital kimlik alanında uygulanmasına ilişkin değerlendirme ve inceleme çalışmalarıdır. Sayıları daha az olmakla birlikte, geliştirilmiş olan prototip ve uygulamalara ilişkin yayınlar ile mevcut kimlik yönetimi sistemindeki problemlerin blokzincir teknolojisiyle çözümüne yönelik model önerisi içeren yayınlar da bulunmaktadır. Yayınların kaynağı genellikle üniversite ve enstitülerdir. Yayın kaynağı olarak birçok farklı ülke bulunmakta olup bu durum konuya tüm dünyanın bir ilgisi olduğunu göstermektedir. Yayınlarda, ağırlıklı olarak mevcut kimlik yönetim sistemlerinin gizlilik, güvenlik, kullanılabilirlik ve mahremiyet konularındaki eksikliği, bireysel ve kitlesel izlemeye, yolsuzluk ve veri ihlallerine açık olması, kimlik doğrulama metodlarının verimsizliği, yüksek kayıt maliyetleri ve vatandaşların süreçlerine uyumsuzlukları, dünya üzerinde çok sayıda resmi bir kimliği olmayan insanın yaşaması ve bu insanların hem finans sisteminin dışında kalması hem de devletler ya da uluslararası kuruluşlarca sağlanan

hizmetlere erişememesi, kimlik yönetiminde merkezi otoriteye bağımlı olunması, vatandaşların kendi kişisel verilerini yönetememeleri gibi çözüm gerektiren sorunlara değinilmiştir.

Blokzincir teknolojisinin yapısal özelliklerinin değerlendirilen bu sorunları maliyet etkin bir biçimde giderme potansiyeli taşıdığı çalışmaların çoğunda vurgulanmaktadır.

Bu çalışma ile, blokzincir teknolojisinin dijital kimlik alanında kullanımına ilişkin mevcut araştırmaların durumu ortaya konulmuş olup gelecekteki aynı konulu çalışmalarda araştırma konusu seçilirken bu tespitlerden faydalanılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Karahan Ç. ve Tüfekçi A., "Blokzincir Teknolojisinin İç Denetim Faaliyetlerine Etkileri: Fırsatlar ve Tehditler", *Denetim*, 19:55-72, (2019).
- [2] Usta A. ve S. Doğanekin, "Blockchain 101", *Kapital Medya Hizmetleri A.Ş.*, İstanbul, (2017).
- [3] Berryhill J., Bourgerie T. ve Hanson A., "Blockchains Unchained: Blockchain Technology and its Use in the Public Sector", OECD Working Papers on Public Governance, No. 28, *OECD Publishing*, Paris, (2018).
- [4] Grüner A., Mühle A. ve Meinel C., "On the Relevance of Blockchain in Identity", *arXiv:1807.08136*, (2018).
- [5] Sullivan C. L. ve Burger E. W., "Blockchain, Digital Identity, E-government", Business Transformation through Blockchain Volume II, *Springer International*, 233-258, New York, (2019).
- [6] Killmeyer J., White M. ve Chew B., "Will blockchain transform the public sector?", *Deloitte University Press*, 14, Washington, (2017).
- [7] Petersen K., Vakkalanka S. ve Kuzniarz L., "Guidelines for conducting systematic mapping studies in software engineering: An update", *Information and Software Technology*, 64:1-18, (2015).
- [8] Collaboration for Environmental Evidence, "Guidelines for Systematic Review and Evidence Synthesis in Environmental Management Version 4.2.", *Centre for Evidence-Based Conservation*, Bangor University, UK, (2013).
- [9] Haddaway N. R., Bernes C., Jonsson B.-G. ve Hedlund K., "The benefits of systematic mapping to evidence-based environmental management", *Ambio*, 45 (5):613-620, (2016).
- [10] Stokkink Q. ve Pouwelse J., "Deployment of a Blockchain-Based Self-Sovereign Identity", *ArXiv*, (2018).
- [11] Biryukov A., Khovratovich D. ve Tikhomirov S., "Privacy-preserving KYC on Ethereum", *1st ERCIM Blockchain Workshop*, Amsterdam, (2018).

- [12] Dunphy P. ve Petitcolas F. A. P., “A First Look at Identity Management Schemes on the Blockchain”, *IEEE Security and Privacy Magazine*, 16(4):20-29, (2018).
- [13] Khursid A. ve Gadnis A., “Using Blockchain to Create Transaction Identity for Persons Experiencing Homelessness in America: Policy Proposal”, *JMIR Research Protocols*, 8(3): e10654, (2019).
- [14] Othman A., ve Callahan J., “The Horcrux Protocol: A Method for Decentralized Biometric-based Self-sovereign Identity”, *ArXiv:1711.07127v1*, (2017).
- [15] Ghazali O., ve Saleh O. S., “A Graduation Certificate Verification Model via Utilization of the Blockchain Technology”, *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC)*, 10(3-2):29-34, (2018).
- [16] Chaudron S. ve Eichinger H., “Eagle-eye on identities in the digital world: evolution and challenges”, *Publications Office of the European Union*, Luxembourg, (2018).
- [17] Dhau S. B. ve Rohman I., “Global Challenge of Identity: Blockchain E-ID System for a Sustainable Development and Good Governance”, *International Conference EGOV-CeDEM-ePart*, Guimarães, (2018).
- [18] Ferrarini B., Maupin J. ve Hinojales M., “Distributed Ledger Technologies for Developing Asia”, *ADB Economics Working Paper Series* ; No. 533, (2017).
- [19] Wadhwa S., “Decentralized digital identity management using blockchain and its implication on public sector”, *Yüksek Lisans Tezi*, Dublin: Dublin Business School, (2019).
- [20] Fridgen G., Guggenmos F., Lockl J., ve Rieger A., “Challenges and Opportunities of Blockchain-based Platformization of Digital Identities in the Public Sector”, *Workshop on Platformization in the Public Sector*, Portsmouth, (2018).
- [21] Lazarovich A., “Invisible Ink: blockchain for data privacy”, *Yüksek Lisans Tezi*, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, (2015).
- [22] Stevens L., “Self-Sovereign Identities for Humanitarian Interventions, A Case Study on Protective Cash Transfer Programs”, *Delft University of Technology*, (2018).
- [23] Lockl J., Rieger A., Fridgen G., Röglinger M., ve Urbach N., “Towards a Theory of Decentral Digital Process Ecosystems : Evidence from the Case of Digital Identities”, *26. European Conference on Information Systems (ECIS2018)*, Portsmouth, (2018).
- [24] Fredriksson B., “A Distributed Public Key Infrastructure for the Web Backed by a Blockchain”, *Yüksek Lisans Tezi*, Stockholm: Royal Inst. of Technology, (2017).
- [25] Dyckik L., Chuat L., Szalachowski P., ve Perrig A., “BlockPKI: An Automated, Resilient, and Transparent Public-Key Infrastructure”, *ArXiv:1809.09544v1*, 2018.
- [26] Oliver M., Moreno J., Prieto G. ve Benítez D., “Using blockchain as a tool for tracking and verification of official degrees: business model”, *29th European Regional Conference of the International Telecommunications Society (ITS)*, (2018).
- [27] Sullivan C. L., ve Burger E. W., “E-Residency and Blockchain”, *Computer Law & Security Review*, 33(4):470-481, (2017).
- [28] Baars D. S., “Towards self-sovereign identity using blockchain technology”, *University of Twente*, Twente, (2016).
- [29] Rivera R., Robledo J. G., Larios V. M., ve Avalos J. M., “How digital identity on blockchain can contribute in a smart city environment”, *International Smart Cities Conference (ISC2)*, (2017).
- [30] Lee J.-H., “BIDaaS: Blockchain Based ID As a Service”, *IEEE Access*, 6:2274-2279, (2018).
- [31] Zhu X., ve Badr Y., “Identity Management Systems for the Internet of Things: A Survey Towards Blockchain Solutions”, *Sensors*, 18(12):4215, (2018).
- [32] Arner D. W., Buckley R. P., ve Zetsche D. A., “Fintech for Financial Inclusion: A Framework for Digital Financial Transformation”, *Alliance for Financial Inclusion*, (2018).
- [33] Augot D., Chabanne H., Clémot O., ve George W., “Transforming Face-to-Face Identity Proofing into Anonymous Digital Identity Using the Bitcoin Blockchain”, *Conference on Privacy, Security and Trust*, Paris, (2017).
- [34] Angiulli F., Fassetti F., Furfaro A., ve Piccolo A., “Achieving Service Accountability Through Blockchain and Digital Identity”, *Forum of 30th International Conference on Advanced Information Systems Engineering (CAiSE'18 Forum)*, Calabria, (2018).
- [35] Orman H., “Blockchain: the Emperors New PKI?”, *IEEE Internet Computing*, 22(2):23-28, (2018).
- [36] Wolfond G., “A Blockchain Ecosystem for Digital Identity: Improving Service Delivery in Canada’s Public and Private Sectors”, *Technology Innovation Management Review*, 7(10):35-40, (2017).
- [37] Takemiya M., ve Vaniciev B., “Sora Identity: Secure, Digital Identity on the Blockchain”, *2018 IEEE 42nd Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC)*, (2018).
- [38] Lim S. Y., Fotsing P. T., Almasri A., Musa O., Kiah M. L. M., Ang T. F., ve Ismail R., “Blockchain Technology the Identity Management and Authentication Service Disruptor: A Survey”, *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 8:1735-1745, (2018).
- [39] Buccafurri F., Lax G., Russo A. ve G. Zunino, “Integrating Digital Identity and Blockchain”, *OTM 2018 Conferences*, (2018).

- [40] Chalaemwongwan N., ve Kurutach W., “A Practical National Digital ID Framework on Blockchain (NIDBC)”, *15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, Mahanakorn, (2018).
- [41] Mühle A., Grüner A., Gayvoronskaya T., ve Meinel C., “A survey on essential components of a self-sovereign identity”, *Computer Science Review*, 30:80-86, (2018).
- [42] Bakre A., Patil N., ve Gupta S., “Implementing Decentralized Digital Identity using Blockchain”, *International Journal of Engineering Technology Science and Research, IJETS*, 379-385, (2017).
- [43] Robinson R., “Blockchain and a Digital Identity System: Simply another mislead application of a popular technology”, *Tuft University*, (2016).
- [44] Kikitamara S., “*Digital Identity Management on Blockchain for Open Model Energy System*”, *Yüksek Lisans Tezi*, Radboud University, 2017.
- [45] Identification for Development (ID4D), “2018 Annual Report”, *World Bank*, New York, (2019).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



Diffusion welding of Al- α -Si₃N₄ composite materials

Al-a-Si₃N₄ kompozit malzemelerin difüzyon kaynağı

Yazar(lar) (Authors): Halil ARIK¹, İbrahim Okan ERDEN², Mustafa AYDIN³

ORCID¹: 0000-0001-6521-7399

ORCID²: 0000-0002-0299-9554

ORCID³: 0000-0002-9150-4081

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Arık H., Erden İ.O. and Aydın M., "Diffusion welding of Al- α -Si₃N₄ composite materials", *Politeknik Dergisi*, 23(2): 497-503, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.524988

Diffusion Welding of Al- α -Si₃N₄ Composite Materials

Araştırma Makalesi / Research Article

Halil ARIK^{1*}, İbrahim Okan ERDEN², Mustafa AYDIN³

¹Faculty of Technology, Department of Metallurgy & Materials Engineering, Gazi University, Ankara, Turkey

²Keçiören Vocational and Technical Anatolian High School, Department of Metal Technologies, Ankara, Turkey

³Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, Celal Bayer University, Turgutlu, Turkey

(Geliş/Received : 09.02.2019 ; Kabul/Accepted : 15.01.2020)

ABSTRACT

In this study, Al- α -Si₃N₄ composite, produced by powder metallurgy method, were joined at 2.5 MPa pressure with various welding temperatures (620, 630, and 640 °C) and durations (1, 1.5, and 2 h.) by diffusion welding method. Optical microscopy examination was carried out from welded interfaces and shear tests were also conducted to the sample interfaces to find out the effect of welding parameters and amount of α -Si₃N₄ reinforcement on the weldability properties of composite materials. The test results show that increase in the welding temperature and duration resulted in increase shear resistance of the welded zone. Results indicated that optimum parameters (welding temperatures, durations and amount of α -Si₃N₄ are 640 °C, 2 h., and 15wt % respectively) MMCs produced in this study could be joined by diffusion welding technique successfully with the 97.5 % strength of base material.

Keywords: Composite, Al-Si₃N₄, diffusion welding, shear strength.

Al- α -Si₃N₄ Kompozit Malzemelerin Difüzyon Kaynağı

ÖZ

Bu çalışmada toz metalurjisi metodu ile üretilen Al-Si₃N₄ kompozit malzeme değişen sürelerde, değişen sıcaklıklarda ve 2,5 MPa basınç altında difüzyon kaynağı ile birleştirilmiştir. Kompozit malzemeninin kaynaklanabilirliği üzerine α -Si₃N₄ miktarı ve kaynak parametrelerinin etkilerini belirlemek için numune kaynak arayüzeyleri üzerinden optik mikroskop incelemeleri ve kesme testleri yapılmıştır. Test sonuçları kaynak süresi ve kaynak sıcaklığı artarken kaynak arayüzeylerinin kesilme mukavemetlerinin de arttığını göstermektedir. Numunelerin kesilme testi sonuçlarına optimum kaynak parametrelerinde üretilen (% 15 α -Si₃N₄ içeren numunede 2 saat süreli 640 °C sıcaklıkta üretilen numunede) metal matrisli kompozit malzemelerin difüzyon kaynak tekniği ile matris yapının % 97,5' i kadar mukavemette birleştirilebilir olduğunu göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Kompozit, Al-Si₃N₄, difüzyon kaynağı, kesilme mukavemet.

1. INTRODUCTION

Due to its low density, high corrosion resistance, high ductility and easy to formability properties, aluminum and its alloys are widely consumed in the aerospace and aerospace sectors, particularly in the automotive sector. For this reason, the studies that scientists are doing on improving the properties of these materials continue to increase. [1-2]. In order to improve the mechanical properties of this materials, different strengthening methods such as mechanical alloying, in-situ, extrusion and reinforcing with small and hard refractory particles have been using. [3-5]. By applying one of those processes, we can produce composite materials having better mechanical properties than those of obtained at plain alloys especially at high temperatures. [6-8]. Metal matrix composites are produced by liquid or solid state method. In the liquid state, ceramic particles are added to liquid metal by stirring before casting, but the resulting distribution of reinforcing elements in matrix structure is generally inhomogeneous. In the solid-state method, known as the powder metallurgy technique, reinforcing ceramic particles such as oxide, carbide and nitride are

added into the metal powders, and then respectively compaction and sintering processes were done to produce block parts from mixed powder. One of the most important problems encountered in this method, diffusion bonding of metal and ceramic powders to each other may be inadequate [9-10]. When adjoining of these kinds of composite materials to each other is required, weldability properties gains particular importance. In generally, these materials can be joined by either fusion welding (arc welding, shielding gas welding, laser welding and electron beam welding etc.) or solid-state welding (soldering, explosive welding, friction welding and diffusion welding). In fusion welding, some problems may be seen at the vicinity of welding where particularly at the heat-affected zone [11-13]. During the welding process of aluminum material an oxide film occurs, which covers the surface of Al and makes the welding process difficult [14] In this case, we can use a protective gas reducing negative effect of oxide film on the welding zone in this way it can be achieved demanded welding quality. Diffusion welding is an effective and potential joining process especially for non-ferrous metals or composite materials. Using this method, we can reduce the problems such as cracking, distortion and

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : harik@gazi.edu.tr

segregation usually occurs during the liquid-phase welding process. [15]. In this method, a temperature between 50 % - 80 % of the melting point of the materials is chosen as welding temperature. Therefore, some problems caused by high welding temperature such as phase transformation or microstructural change can not occur during welding process [16-20]. According to some research results, it is indicated that the expected strength of a joint can be obtained by a correct selection of the welding temperature, duration, pressure and protective atmosphere [1]. In this study, initially Al- α - Si_3N_4 composite material were produced by using powder metallurgy method and then the samples were joined by diffusion welding method under the various welding parameters. Finally, mechanical and microstructural properties of weld interface were examined. Hence, to optimize optimum welding parameters for this study, shear test and microstructure examinations were performed on the welded sample.

2. EXPERIMENTAL PROCEDURE

2.1 Production of Composite Material

In present study, to produce composite material atomized aluminum powder (mean particle size of 104.8 μm) as matrix material and α - Si_3N_4 powders as a reinforcing material were used (Table 1). Al and α - Si_3N_4 powders were mixed together according to the proportions of Al- α - Si_3N_4 (5; 10; 15 % wt.) and then mechanical mixing process were carried out for 2 hours with steel balls in a mechanical mixing device. (Figure 1).

Table 1. Properties of α - Si_3N_4 powder

Grade	SN-E-10
Morphology	Equiaxed
Particle size (μm)	0.1 ~ 0.3
Specific surface area (m^2/g)	10 ~ 14
Purity	N > 38 % Fe < 100 ppm O < 2.0 % Ca < 50 ppm C < 2.0 % Al < 50 ppm
Degree of crystallinity (%)	~100
Phase composition	α -Phase 95 % β -Phase 5 %

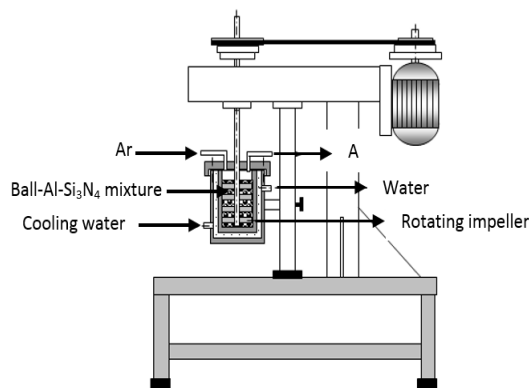


Figure.1. Mechanical mixing device

The parameters chosen for mechanical mixing process are as shown in Table 2. The first propose of the use of argon gas was to prevent possible oxidation of the new surfaces of Al particles created by fracturing Al particles during the mechanical mixing process. In addition, in order to minimize the welding tendency of aluminum particles to each other during mechanical milling process, stearic acid (1.5 wt %) as process control agent (PCA) was added to the mixed powder. Then, to determine the effects of mechanical milling process on the morphology (as shape and particle size) of mixed powder, characterization studies were performed by using optic microscope and Malvern Master Sizer E version 1.2b laser scattering machine.

Table 2. Parameters of mechanical mixing process

Mixture Powders	Al+5 % Si_3N_4
	Al+10 % Si_3N_4
	Al+15 % Si_3N_4
PCA (%)	1.5
Charge ratio (balls: powder)	10:1
Mixing time (h)	2
Mix. Atm.	Ar
Rotor speed (rev. min^{-1})	450

After the characterization of particle size and morphology of mixed powder, to produce powder metal block samples with dimensions $\text{Ø}10 \times 15 \text{ mm}$ in size, compaction processes were performed at 500 MPa pressure in a single action die. Block specimens were then put into graphite boats and then the boats were placed in an atmosphere controlled tube furnace. The furnace was heated to test temperature for predetermined duration under flowing argon atmosphere. Sintering was performed at sintering temperature for two hours. After the sintering process composite specimens were characterized by measuring the densities, hardness, shear strength, and doing the optic microscope examinations.

2.2. Diffusion Welding

Before the welding process surfaces of sintered samples, with the size of $\text{Ø}10 \times 15 \text{ mm}$, were polished by 0.4 Ra surface roughness (Figure 2) and then cleaned by alcohol. Surface roughness of the samples were measured by using Taylor Hobson instrument. In order to obtain suitable weld couples, surfaces of the samples were fully connected to each other as shown in Fig 3.

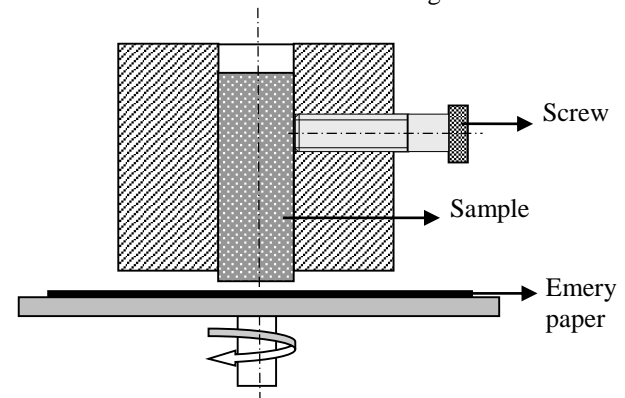


Figure 2. Schematic representation of surface preparation apparatus.

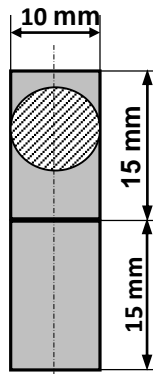


Figure 3. Welding couple

Samples were then placed in the center of the diffusion welding device as showed Fig. 4. In order to prevent the oxidation of welding couple Ar gas was introduced into the test chamber before welding. Then 2.5 MPa pressure was applied to the samples before welding. Ambient temperature was risen up to test temperature with a heating rate of 5 °C.min⁻¹ and samples were isothermally soaked at desired durations then cooled down to room temperature in Ar atmosphere. Welding parameters for this experiment is shown in Table 3.

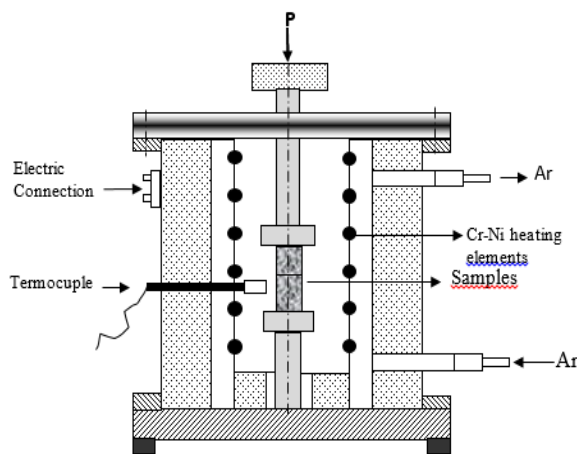


Figure 4. Diffusion welding device

Table 3. Welding parameters

Welding temperature (°C)	620 – 630 - 640
Applied pressure (MPa)	2.5
Protective gas	Ar
Surface roughness Ra (µm)	0.4
Welding time (h.)	1-1,5-2

2.3. Shear Test

One of the samples had different amount of Si₃N₄ and welded at different welding parameters were prepared metallographically for microstructure determination. Remains were subjected to shear test with the speed of 1.5 mm/sec load applying by using shear test apparatus (Figure 5).

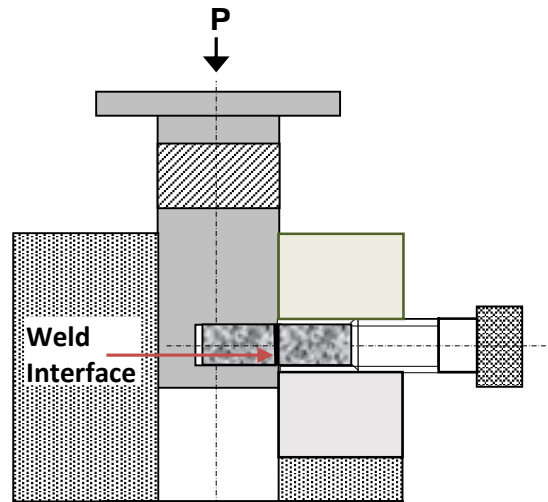


Figure 5. Shear test apparatus

3. RESULT AND DISCUSSION

After the compaction, green densities of the composite materials are given in figure 6. The density results show that maximum density was obtained in the composite sample containing 10 wt. % α-Si₃N₄. The main reason for this may be related to the particle size of the used mixture powder. After the mixing process, because of the increase in amount of Si₃N₄ in the aluminum powders, mean particle size of mixed powders was calculated as 97.87, 42.23, and 61.02 µm respectively. It is seen that the green density of powder metal composite materials increase while the mean particle size of mixed powder decreases. After the sintering, a considerable increment was seen in final density (Figure 6) for all the composite samples.

The test results show that composite material containing 15 % α-Si₃N₄ have maximum density value. The hardness values of the composite materials had different amount of α-Si₃N₄ reinforcing materials were given in Figure. 7. Similar to density maximum hardness value was taken from composite materials containing 15 % α-Si₃N₄. Test results show that increasing of the amount of Si₃N₄ had a considerable positive effect on the hardness of composite materials and there was a good concord between the density and hardness values of the all of the composite materials.

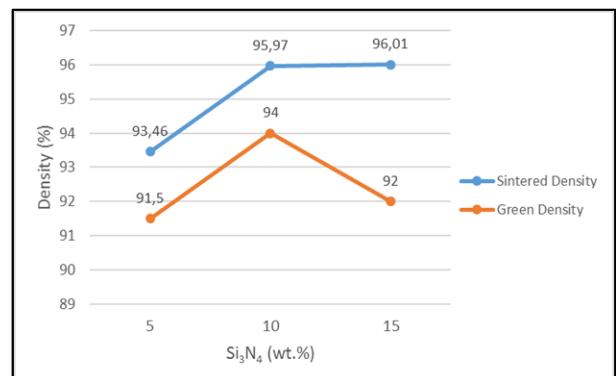


Figure 6. Chang of green and full density of composite materials with increasing of α-Si₃N₄ content.

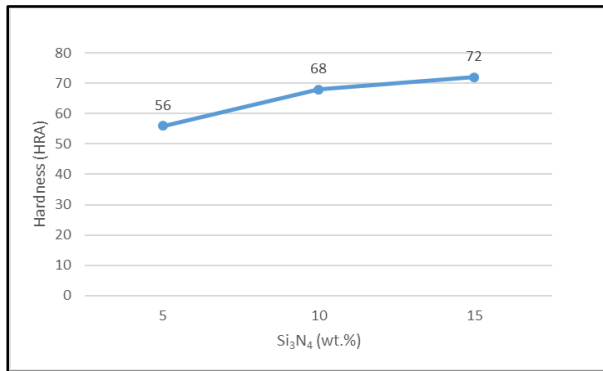


Figure 7. Hardness values of composite materials containing different amount of α -Si₃N₄

The shear test results given in Figure 8 show that shear resistance values increase while amount of α -Si₃N₄ in composite material increase. As a result of the tests made, the best results in terms of density, hardness and cut resistance were obtained from the composite sample containing 15% α -Si₃N₄.

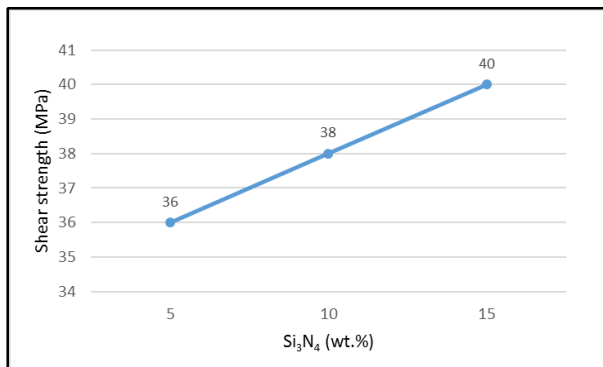


Figure 8. Shear strength values of composite materials containing of different amount of α -Si₃N₄

The main variables of this study are the variation of α -Si₃N₄ ratio in terms of material, welding temperature and duration in welding process while the samples obtained from MMCs are welded to each other by diffusion welding. The highest shear strength values of all samples after welding at different temperatures and durations under constant load were obtained from composite materials containing 15% Si₃N₄ (Figure 9). These results show that the increase of the silicon nitride ratio in the composite material increases the shear strength of the weld zone. In some similar studies in the literature, it is stated that the amount of reinforcements increases while the weldability decreases in composite materials. However, the increase in Si₃N₄ reinforcement ratio in this study increased the weldability of the composite and the shear resistance of the welded area. The most important reason being that the size of the particles of Si₃N₄ used as reinforcing element is very small and is homogeneously distributed in the matrix structure [21].

The most important and effective parameter for this type of solid state diffusion is the welding temperature [22-

23]. The increase in welding temperature in all joining process resulted in an significant increase in the cut-off resistance of the weld zone (Fig. 9; 10; 11).

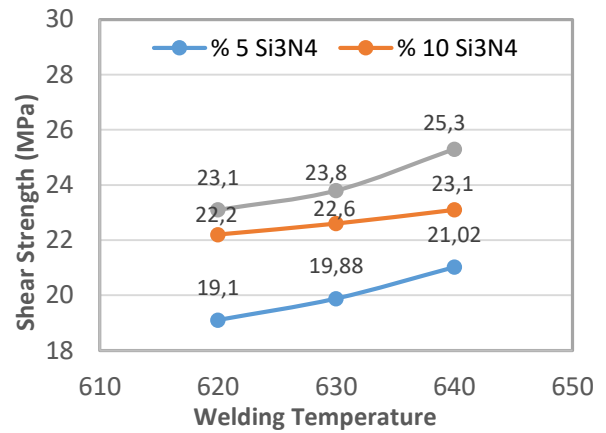


Figure 9. Comparing of shear strength values obtained from composite materials welded at different temperatures and for 1-hour duration.

Composite samples containing 15 % Si₃N₄ were welded at 620, 630, and 640 °C for 2h. The result showed the 83.2 %, 87 %, and 91 % of the shear strength of original un-welded material respectively.

The shear strength values show that while the welding temperature increases the diffusion at the welded sample interface continues to increase. According to the values seen in the literature, either the sintering temperature of the composite material production stage and the welding temperature values of the diffusion welding are selected to be slightly higher because of oxidation problem of especially Al powders.

During the production process of the powder metal part, the mixing of the powders in the mechanical mixing medium and especially during the pressing of the mixed powders in die after mixing, the partial oxidation of the aluminum powders could not be prevented completely. To prevent these oxidation problems, it is important to carry out that operations should be made in a protective atmosphere in glove box. In the mechanical mixing process, the aluminum powder particles are broken, the clean surfaces are exposed, and the internal energy that is loaded on the particles by deformation has an effect of accelerating the oxidation.

During sintering, the sintering temperature chosen is somewhat higher than the values given in the literature in order to allow diffusions to occur by exceeding the oxide film at the points of contact between the powder particles. In some applications, pressing process of powders is done at higher pressures than chosen in this process to try overcome negative effect of the oxide film been on the powder particles surface [24-26].

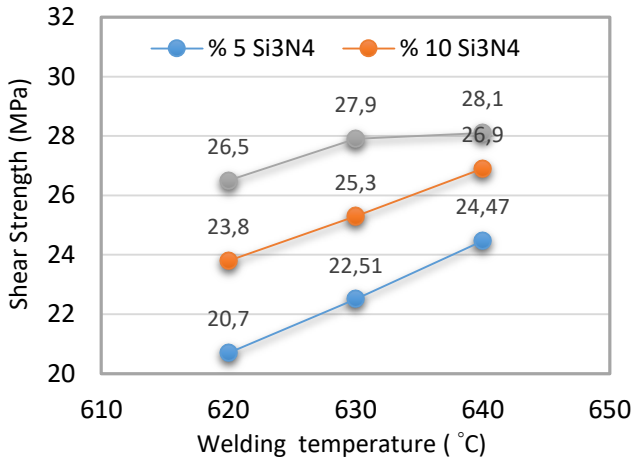


Figure 10. Comparing of shear strength values of composite materials welded at different temperatures for 1.5 h duration.

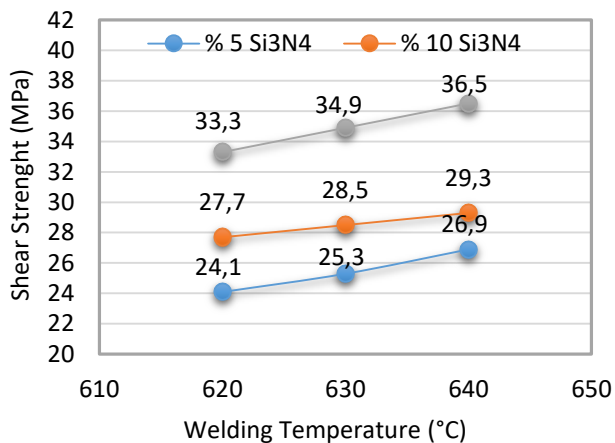


Figure 11. Comparing of shear strength values of composite materials containing different amount of Si₃N₄ and welded at different temperatures for 2 hours duration.

The welding double surfaces to be welded before the diffusion welding were degreased by sanding and welding was carried out in a protective gas environment. Thus, the oxide problem at the weld interfaces was removed considerably, and the desired welding was obtained by diffusing bonding at the weld interface of the samples (Fig. 12). As a result, in such samples, the weld zone shear resistance increased up to 91% of the original un-welded composite material. One of the main factors affecting the shear resistance of the welded zone of the welded specimens is the degree of contact between the to be welded surfaces before welding.

Especially for the interfaces of the samples to be welded, there should be full contact on the outer edge. Otherwise, edges that are not in contact with each other cause notch effect at this zone during the shear test, cause decreasing of shear resistance of the welding zone [Figure 13-14].

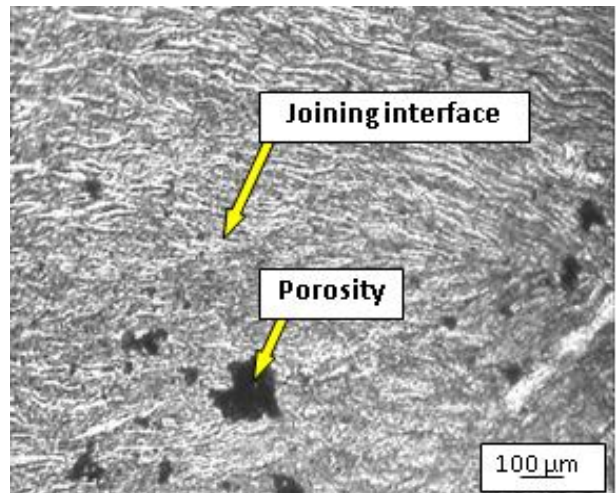


Figure 12. Composite: Al+15 % α -Si₃N₄ Welding Temperature: 640 °C Welding duration:1 h.

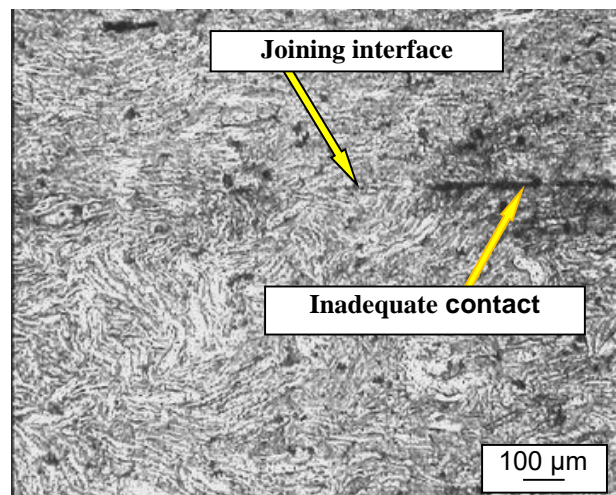


Figure 13. Composite: Al + 15% α -Si₃N₄ Welding Temperature: 640 °C Welding Duration: 2 h.

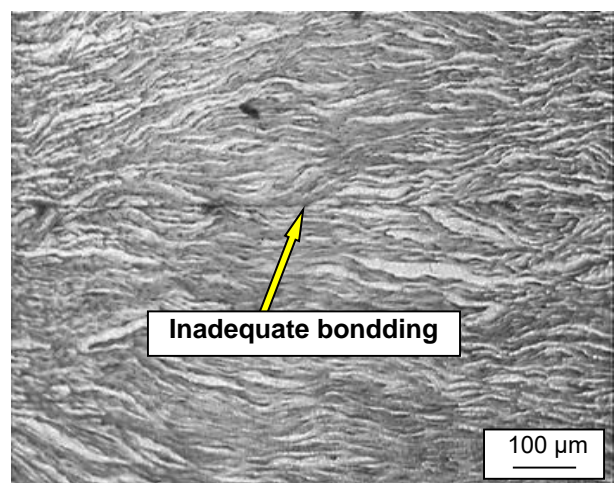


Figure 14 Composite: Al + 5 % α -Si₃N₄ Welding temperature: 640 °C Welding duration: 1 h.

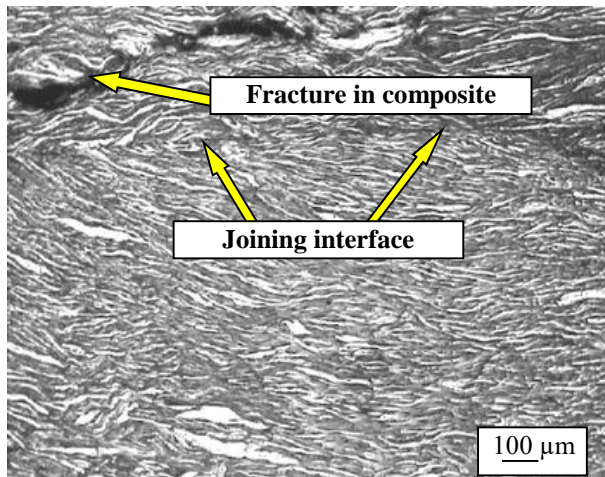


Figure 15. Composite: Al + 15% α -Si₃N₄ Welding
Temperature: 640 °C Welding Duration: 2 h.

For all samples with different composition and welded at different temperatures, test result show that increasing of the welding duration cause increasing of the shear resistance of welded zone (Fig. 9-11). Optical images obtained from microstructural studies show that increasing welding duration effects positively shear resistances of welded zone of samples. Microstructural images show that diffusion bonding increases at the interface of welding couple when welding temperature and amount of α -Si₃N₄ increase (Fig.15).

CONCLUSION

1. In this study, composite specimens containing α -Si₃N₄ reinforcing elements at different ratios were successfully welded to each other with a diffusing welding under constant load and different temperatures and duration.
2. After the sintering maximum density increment was observed at powder metal composite sample containing 15 wt % α -Si₃N₄ and this reached 90 % density of theoretical density of mixture powders.
3. The shear resistance values show that the increasing welding temperature resulted in diffusion bonding at the interface of welding double.
4. Before welding process the surface must be fully contacted with each other. Non-contact surfaces are the most important barrier for diffusion that must be at the interface. When this problem is present on the outer surface of the welded double, the weld zone severely reduces the shear resistance by creating a notch effect during the shear test.
5. In the process of composite material production, it is necessary to form a more effective protective environment in order to prevent oxidation of mixture powders and pre-welding surfaces. Preventing oxidation during the production and welding of the composite material is important for the mechanical properties of the composite material and for the desired level of diffusion welding.

6. Powder metal composite sample containing 15 wt % α -Si₃N₄ and welded for 2 hour at 640 °C showed the best shear resistance result. During the shear test of this sample, 91 % of the shear strength of original composite material was reached.

REFERENCES

- [1] Ozan S., Karaoglu S., Ipek R., "Examination of diffusion welding capabilities of particle-reinforced aluminum-based metal matrix composites", *Engineer and Machine*, 53: 45-53, (2012).
- [2] Arık H., Sandal R., "Investigation regarding Al-Al₂O₃ composite material production and its weldability to aluminum by diffusion welding", *GU J Sci, Part A*, 4(4): 101-111, (2017).
- [3] Arık H., "Production and characterization of in situ Al₄C₃ reinforced aluminium-based composite produced by mechanical alloying technique", *Materials & Design*, 25: 31- 40, (2004).
- [4] Mahajan G. V., Aher V. S., "Composite material: A review over current development and automotive application", *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2(11): 1-5, (2012).
- [5] Mollaoglu Altuner H., "Diffusion bonding of particle reinforced aluminum-based metal matrix composites", *Phd. Thesis*, Yildiz Technical University, Institute of Sciences, (2011).
- [6] Akbulut H., "Production and investigation of microstructure-properties of Al₂O₃ fibrous reinforced Al-Si based composite", *Phd. Thesis*, Istanbul Technical University, Institute of Science and Technology, (1994).
- [7] Ben R. C., Mirchandani P. K., "New materials by mechanical alloying techniques", Editors: Arzt E, and Schultz C, Colw-Hirson (FRG) 1988.
- [8] Zhang X. P., Ye L., Mai W., "Investigation on diffusion bonding characteristics of SiC particulate reinforced aluminum metal matrix composites", *Composites Applied Science and Manufacturing Part A*, 30: 1415-1421, (1999).
- [9] Arık H., Turker M, Saritas S., "Investigation of mechanical properties of in situ Al₄C₃ reinforced aluminium based composites by mechanical alloying technique", *Powder Metallurgy World Congress and Exhibition*, Kyoto, 543-549, (2000).
- [10] Singer R. F., Oliver W. C., Nix W. D., "Identification of dispersoid phases created in aluminum during mechanical alloying", *Metallurgical Transactions A*, 11A: 1895-1901, (1980).
- [11] Ellis B. D., "Joining of aluminum based metal matrix composites", *International Materials Reviews*, 41: 41-58, (1996).
- [12] Zhang X. P., Quan G. F., Wei W., "Preliminary investigation on joining performance of SiCp reinforced aluminum metal matrix composite (Al/SiC-MMC) by vacuum brazing", *Composites, Applied Science and Manufacturing Part A*, 30: 823-827, (1999).
- [13] Huang Y., Ridley N., Humphreys F. J., "Diffusion bonding of superplastic 7075 aluminium alloy", *Materials Science And Engineering A*, 266: 295-302, (1999).

- [14] Dunkerton S. B., "Diffusion bonding – an overview, diffusion bonding 2, Stephenson, D.J, Elsevier Applied Science, New York: 1-11, (1991).
- [15] Luo J.G., Acoff V. L., "Interfacial reactions of titanium and aluminum during diffusion welding", *Welding Research Supplement to the welding Journal*, 239-243, (2000).
- [16] Dunkerton S.B., "Solid– state processes for dissimilar metal welding", *The Welding Institute Research Bulletin*: 388, (1982).
- [17] Calvo F.A., Urena A., Gomez S., "Solid state transformations during diffusion bonding of cooper to iron", *Journal of Materials Science*, 23: 1231-1236, (1988).
- [18] Aydın M., Gurler R., Turker M., "The diffusion welding of 7075Al-3% SiC particles reinforced composites", *Strength and Plasticity*, 207: 219-224, (2009).
- [19] Liming L., Meili Z., Longxiu P., "Studing of micro-bonding in diffusion welding joint for composite", *Materials Science and Engineering A*, 315: 103-107, (2001).
- [20] Qiaofang F., Yanchuan Y., Ming W., "Research on key welding technologies of aluminum matrix composite", *International Conference on Materials Science and Biological Engineering (ICMSBE 2017)*, 14-17, (2017).
- [21] Elßner M., Weis S., Grund T., at. al., "Microstructure of arc brazed and diffusion bonded joints of stainless steel and SiC reinforced aluminum matrix composite", *Materials Science and Engineering*, 118: 1-11, (2016).
- [22] Arık H., Aydın M., Kurt A., at. ol. "Weldability of Al₄C₃-Al composites via diffusion welding technique", *Materials & Design*, 26: 550-560, (2005).
- [23] Kurt A., Uygur I., and Hakan, A., "Effects of temperature on the weldability of powder metal parts joined by diffusion welding", *Materials Science Form*, 546: 667-670, (2007).
- [24] Kucukkara H., Acarer M., Ahlatcı H., and Turen Y., "The investigation of the diffusion welding capability of the Al-SiC composites produced through powder metallurgy method", *V. International advanced technologies symposium (IATS'9)* Karabuk, 13-15 Mayıs, (2009).
- [25] Akca E., Gursel A., "The effect of diffusion welding parameters on the mechanical properties of titanium alloy and aluminum couples", *Metals*, 7(1), 22, 1-11, (2017).
- [26] Aydın K., Kaya Y., Kahraman N., "Experimental study of diffusion welding/bonding of titanium to copper", *Materials & Design*, 37: 356-368, (2012).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



Akıllı bir şebekedeki risk indikatörlerinin bulanık analitik hiyerarşi prosesi ile modellenmesi

Modelling of risk indicators in a smart grid by fuzzy analytic hierarchy process

Yazar(lar) (Author(s)): İlter Şahin AKTAŞ¹, Tayfun MENLİK², Adnan SÖZEN³

*ORCID*¹: 0000-0002-2664-5208

*ORCID*²: 0000-0003-0970-6600

*ORCID*³: 0000-0002-8373-2674

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Aktaş İ.Ş., Menlik T. ve Sözen A., “Akıllı bir şebekedeki risk indikatörlerinin bulanık analitik hiyerarşi prosesi ile modellenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 23(3): 505-513, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.669465

Akıllı Bir Şebekedeki Risk İndikatörlerinin Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi ile Modellenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

İlter Şahin AKTAŞ^{1*}, Tayfun MENLİK², Adnan SÖZEN²

¹Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Müh. Bölümü, Siirt Üniversitesi, Türkiye

²Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 02.07.2019 ; Kabul/Accepted : 26.10.2019)

ÖZ

Akıllı şebeke sistemlerinde, enerji arzının kesintisiz ve güvenli bir şekilde yapılması için kapsamlı bir risk analizi gerektirmektedir. Bu çalışmada, akıllı şebeke sistemi için, gelişmiş, çoklu ve detaylı bir Risk Değerlendirme Endeksi çerçevesi oluşturulmuş, riskler; Finansal, Güvenlik, Çevresel, Teknolojik ve Yönetimsel Riskler olmak üzere beş ayrı ana başlık altında toplanmıştır. Çalışmada, Chang'ın Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (BAHP) Yöntemi, Geliştirilmiş Entegral Değer ve Kuadratik Ortalama Metot yöntemleri kullanılarak risklerin önem dereceleri belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Akıllı Şebekeler, bulanık AHP, risk analizi, bulanık sayılar, bulanık sıralamalar.

Modelling of Risk Indicators in a Smart Grid Network by Fuzzy Analytic Hierarchy Process

ABSTRACT

In smart grid systems, a comprehensive risk analysis is required to be able to transfer supply of energy continuous and secure. In this study, an advanced, multiple and detailed *Risk Assessment Index Framework* has been established for a smart grid system. Risks are constituted as Financial, Security, Environmental, Technological and Management Risks. The significance of the risks are determined by using Chang's Fuzzy Analytic Hierarchy Process (BAHP) Method, Enhanced Integral Value and Quadratic Mean Method.

Keywords: Smart grid, fuzzy AHP, risk assessment, fuzzy numbers, fuzzy rankings.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mevcut şebeke sisteminde iletim ve dağıtım kayıplarının önceki yıllara kıyasla artarak devam etmesi sebebiyle, sistemin yenilenmesi ve modernize edilmesi gündeme gelmiştir¹. Özellikle dağıtım ağı tarafında tek yönlü güç akışının olması ve tüketicilerin pasif durumda kalmaları akıllı şebekelere olan ihtiyacı doğurmuştur.

Akıllı bir şebeke sistemi, içerisinde barındırdığı farklı teknolojiler sebebiyle, karmaşık bir yapıdadır. Risk yönetiminin doğru bir şekilde yapılması ve planlanması sistem işleyişi bakımından çok önemlidir. Bu sebeple, sistemin güvenli çalışması ve doğru bir şekilde karakterize edilmesi için, çoklu risk indikatörlerinin kullanılması gerekmektedir. Bu yüzden, risklerin doğru bir şekilde gruplanması ve sisteminin tümünü içine alarak yansıtan bir risk endeksi çerçevesi oluşturulması oldukça kritiktir.

Literatürde, akıllı şebekelerin genel verimliliği, bulanık analitik hiyerarşi prosesi ile analiz edilmeye çalışılmış², akıllı şebeke sistemindeki tehlike kaynaklarının değerlendirilmesini yapılarak, sistemi güvenli bir şekilde işletilmesi adına öneriler sunulmuş⁴, akıllı şebeke

sistemi içindeki dağıtım ayağında bir değerlendirme endeksi sistemi oluşturulmuş⁵ ve akıllı şebeke projelerindeki riskleri değerlendirmek için sıra korelasyon analizi, gri üçgen kümeleme yöntemi, Spearman'ın borda sayım yöntemi ve analitik hiyerarşi prosesi gibi yöntem ve metotlar kullanılmıştır^{6,7}. Akıllı şebeke sistemleri için, siber güvenlik dalında daha çok çalışma ve uygulama yapılmış, sistemin özellikle iki taraflı haberleşmeden kaynaklanan güvenlik açıkları tespit edilmeye çalışılmıştır^{8,9}. Akıllı şebeke içerisinde gerçekleşecek potansiyel riskleri bir bütün olarak belirleyerek, derleyen ve bir modelle analiz eden detaylı bir çalışma bulunamamıştır.

Bu çalışmada akıllı bir şebekede bulunabilecek muhtemel riskler beş ana başlık altında gruplanmış, riskler kendi aralarında, bulanık analitik hiyerarşi prosesi (BAHP) yöntemi yardımıyla karşılaştırılmıştır. Bu yöntemin dışında Geliştirilmiş Entegral Değer ve Kuadratik Ortalama Metodu gibi iki farklı sıralama yöntemi kullanılmış ve farkları incelenmiştir.

2. YÖNTEM (METHOD)

Thomas L. Saaty tarafından 1980 yılında ilk defa ortaya atılan Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP), çok ölçütlü karar

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : ilter@siirt.edu.tr

verme tekniklerinden biridir ¹⁰. Grup ya da bireylerin önceliklerinin dikkate alındığı, nitel ve nicel değişkenlerin bir arada değerlendirildiği ¹¹, kompleks kararların ikili gruplar oluşturmak suretiyle karşılaştırılarak, daha iyi anlaşıldığı, daha sonra sonuçların birleştirilerek, hem öznel hem de nesnel yönlerden değerlendirilmesine olanak sağlayan matematiksel bir araçtır ¹². Ayrıca AHP, alınacak kararların tutarlı olup olmadıkları hakkında bilgi verebilen, dolayısıyla da önyargıları azaltacak ya da ortadan kaldıracabilecek, kabul gören yararlı bir yöntemdir ¹².

2.1. Bulanık Küme Teorisi ve Üyelik Fonksiyonları (Fuzzy Set Theory and Membership Function)

Bulanık küme teorisi, kesinlikle doğrudan kesinlikle yanlış olana kadar değişen, kısmi gerçek değerler kavramını ele almak için geliştirilmiştir ¹³. Bulanık küme teorisi hakkındaki ilk çalışmalar Lotfi A. Zadeh (1965) ve Joseph Amadee Goguen (1967) tarafından yapılmıştır ^{14 15 16}. Bulanık küme teorisi, gerçek dünya problemleri için izlenebilirlik, sağlamlık ve düşük maliyetli çözümleri hedefleyen; belirsizliği ele alan, önemli bir araç haline gelmiştir ¹³.

Bulanık küme teorisi, karar vericiler tarafından, sabit değerli yargı yerine aralıklı yargı vermeyi sağladığı için daha güvenli bulunmaktadır ¹⁷. Çünkü karşılaştırma sürecinin bulanık yapısı gereği, karar vericiler, tercihleri hakkında net olamamaktadırlar ¹⁷. Son yirmi yıla yakın bir zamanda ise, bulanık küme teorisi, yapay zekâ, bilgisayar, yönetim bilimi, kontrol teorisi ve istatistik gibi alanlarda geniş yelpazede uygulanmakta ve kullanılmaktadır ¹³. Bulanık kümeler, üyelik derecesi [0-1] kapalı aralığında, gerçel sayılar ile ifade edilen ve yetersiz tanımlanmış kümeler olarak tanımlanabilir.

Üyelik fonksiyonu ya da karakteristik fonksiyon, 0 ile 1 sayıları arasında, tercih kümesine ait olma derecesini ifade etmektedir ve μ ile gösterilmektedir ¹⁸. Kümeye dâhil olmayan, kümenin dışında kalan elemanlar için üyelik değerleri 0, kümeye dâhil olanlar için 1 değeri atanmaktadır.

Bulanık bir A kümesinin μ ile ifade edilen üyelik fonksiyonu aşağıdaki gibi gösterilir:

$$\mu: X \rightarrow [0,1]$$

Burada X, evrensel kümeyi göstermektedir.

Herhangi bir A kümesi için, karakteristik fonksiyon şu şekilde tanımlanır ¹⁹:

$$X_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases}$$

Bulanık sayılarda üyelik fonksiyonları farklı şekillerde olabilmektedir. Üçgensel üyelik fonksiyonları, kolay anlaşılır ve uygulanabilir olması, matematiksel işlemlerin karmaşık olmaması ve sayıların lineer olması sebebiyle, pratikte en fazla tercih edilen üyelik fonksiyonlarından biridir.

Üçgensel bulanık sayılar (l, m, u) şeklinde üç parametre ile gösterilirler. Burada l en küçük değeri ya da alt sınırı, m en olası değeri, u en büyük değeri ya da üst sınırı temsil etmektedir. Şekil 4'te gösterilen \tilde{M} , bir bulanık küme olsun.

$x \in M$ ve $\mu(x)$, x bulanık sayısının üyelik fonksiyonu

olmak üzere $\mu(x)$ şu şekilde tanımlanır:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & , & x < l \\ \frac{x-l}{m-l} & , & l \leq x \leq m \\ \frac{u-x}{u-m} & , & m \leq x \leq u \\ 0 & , & x > u \end{cases}$$

Üçgensel bulanık sayılarda çeşitli ve çok sayıda işlemler gerçekleştirilebilmektedir. İki üçgensel sayı olan \tilde{A} ve \tilde{B} verilsin. Bu iki üçgensel bulanık sayı $\tilde{A} = (l_1, m_1, u_1)$ ve $\tilde{B} = (l_2, m_2, u_2)$ şeklinde tanımlanmış olsun. Aşağıda bu iki üçgensel bulanık sayı ile gerçekleştirilebilecek operasyonlarla ilgili bilgilere yer verilmiştir ²⁰.

- Toplama:

$$\tilde{A} (+) \tilde{B} = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2)$$

- Çıkarma:

$$\tilde{A} (-) \tilde{B} = (l_1 - u_2, m_1 - m_2, u_1 - l_2)$$

- Çarpma:

$$\tilde{A} (x) \tilde{B} = (l_1 x l_2, m_1 x m_2, u_1 x u_2)$$

- Bölme:

$$\frac{\tilde{A}}{\tilde{B}} = \left(\frac{l_1}{l_2}, \frac{m_1}{m_2}, \frac{u_1}{u_2} \right) \tilde{A}, \tilde{B} > 0$$

- Tersini Alma:

$$(\tilde{A})^{-1} = \frac{1}{u_1}, \frac{1}{m_1}, \frac{1}{l_1}$$

- Üstel (Eksponansiyel) İşlem:

$$\exp(\tilde{A}) \approx [\exp(l_1), \exp(m_1), \exp(u_1)]$$

- Negatifini Alma:

$$-(\tilde{A}) = (-l_1, -m_1, -u_1)$$

2.2. Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (Fuzzy Analytic Hierarchy Process)

AHP' nin amacı her ne kadar karar vericilerin ya da uzmanların bilgi birikimlerini göstermek ise de, hâlâ, insan düşünme stilini yansıtmamaktadır. Kararlar verilirken, sözel ifadelerin kullanılmasından kaynaklı birçok risk ortaya çıkmaktadır. Kişiler arasındaki farklılıklarda, tercih sıralamalarını etkilemektedir. AHP' deki tercihler esasında, insanların algılarına dayanan yargılarından meydana geldiği için, doğru olmayan sonuçlarla karşılaşılabılır fakat bulanık (fuzzy) yaklaşım, karar verme sürecinin daha doğru tanımlanmasına olanak sağlar^{21 22}. Özne alıdan kaynaklanan kararsızlık ve belirsizlik ile başa çıkabilmek için bulanık mantık ve yaklaşım geliştirilmiştir.

Literatürde, farklı araştırmacılar tarafından önerilen birçok bulanık AHP metodları vardır. Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi ile ilgili ilk çalışmalar Van Laarhoven ve Pedrycz tarafından 1983 yılında yapılmıştır²³. Bu çalışmada, karar vericilere, düşüncelerini, üçgenel üyelik fonksiyonları ile bulanık sayılarda ifade etmesi istenmiştir. Buckley (1983) ise, karşılaştırma oranlarının bulanık önceliklerini belirlemek için trapezoidal (ikizkenar yamuk) üyelik fonksiyonunu ve geometrik ortalama metodunu kullanmıştır. Daha sonra, bütün alternatifler için, nihai bulanık ağırlıkları hesaplamıştır²².

Van Laarhoven, Pedrycz ve Buckley, bulanık sayılar ile temsil edilen bulanık programları kullanarak, ikili karşılaştırma süreçlerindeki kararsızlığı ve özneliği en az indirmek için Saaty' nin çalışmasını²⁴ geliştirmeye çalışmışlardır²⁵. Fakat kullandıkları bulanık programların (fuzzy utility), ilgili alternatiflerin önceliklerini belirleyebilmek için, sıralanması gerekmektedir. Bu da, kullanılan sıralama metodlarının son derece karmaşık olmasından dolayı güvenilir olmayan sonuçlar doğurabilmektedir^{26 25}. Bu problemin üstesinden gelmek için Mikhailov tarafından (2003), en uygun öncelikler elde etmek için, bulanık tercih programlama fikrini ortaya atıldı²⁷. Bu yaklaşımda, bulanık karşılaştırma matrislerinin karşılaştırılmasına gerek yoktur ve öncelikler, tamamlanmamış bulanık kararlardan türetilmektedir²⁷. Fakat bu program, mevcut diğer bulanık önceliklendirme metodlarından^{23 22} daha iyi olduğunu iddia etse de, içerdiği karmaşık matematik, uygulanabilirliğini kısıtlayabilmektedir²⁵. Chang (1996) ise, bulanık AHP (BAHP) çözümünde, bulanık AHP'nin ikili karşılaştırma değerleri için, üçgenel bulanık sayıların kullanımı ile yeni bir yaklaşım önermiştir²⁸.

Bulanık AHP'de, karşılaştırmalar için çok çeşitli ölçekler kullanılmaktadır. Chang'ın yönteminde, Risk İndikatörlerinin değerlerinin bulunmasında kullanılan bulanık önem dereceleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1. Karşılaştırma Matrisleri için Kullanılan Ölçek (Scale used for Comparison Matrices)

Dilsel İfadeler	Bulanık Ölçek	Karşılık Ölçek
Tam Olarak Eşit	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
Zayıf Derecede Önemli	(2/3, 1, 3/2)	(2/3, 1, 3/2)
Oldukça Önemli	(3/2, 2, 5/2)	(2/5, 1/2, 2/3)
Çok Fazla Önemli	(5/2, 3, 7/2)	(2/7, 1/3, 2/5)
Kesinlikle Önemli	(7/2, 4, 9/2)	(2/9, 1/4, 2/7)

2.2.1. Genişletilmiş Bulanık AHP Metodu (Extended Fuzzy Analytical Hierarchy Process Method)

Bulanık önceliklendirmeler için diğer bir yaklaşım, Chang (1996) tarafından geliştirilen sentetik genişletilmiş analiz adı verilen yaklaşımdır^{28 27}. Bu yaklaşım, hesaplama kolaylığı, uygulama adımlarının basitliği ve daha az zaman harcaması sebebiyle literatürde çok sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yaklaşımın adımları aşağıda verilmiştir:

Adım 1: Bulanık karşılaştırma matrisi $\tilde{B} = [\tilde{a}_{ij}]$ olarak verilsin.

$$\tilde{B} = \begin{bmatrix} (1,1,1) & \tilde{a}_{12} & \dots & \tilde{a}_{1n} \\ \tilde{a}_{21} & (1,1,1) & \dots & \tilde{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n2} & \dots & (1,1,1) \end{bmatrix}$$

Burada: $\tilde{a}_{ij} \times \tilde{a}_{ji} \approx 1$,

Tüm $\tilde{a}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$ ve $i, j = 1, 2, \dots, n$ üçgenel bulanık sayılardır.

Adım 2: Bulanık yapay büyüklük değeri, i . kritere göre şu şekilde tanımlanır.

$$S_i = \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} \right]^{-1} \quad (3)$$

Eşitlik 3'te $\sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij}$ ve $\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} \right]$ değerleri, n değerleri

üzerinde, bulanık ekleme işlemi kullanılarak, bulanık ikili karşılaştırma matrisi şu şekilde hesaplanır.

$$\sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} = \left(\sum_{j=1}^n l_j, \sum_{j=1}^n m_j, \sum_{j=1}^n u_j \right) \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} = \left(\sum_{i=1}^n l_i, \sum_{i=1}^n m_i, \sum_{i=1}^n u_i \right) \quad (5)$$

Sonrasında ise, Eş. 5'in hesaplanması gerekir.

$$\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} \right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n u_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n l_i} \right)$$

Bulanık sayıların karşılaştırılmasına ilişkin ilkeler, hiyerarşinin bütün seviyelerinde, bulanık yapay değerler kullanılarak, tüm elemanların ağırlık vektörlerinin türetilmesi için tanımlanmıştır.

Adım 3: Bulanık sayıları karşılaştırmak için, $M_2 \geq M_1$ ifadesinin olasılık derecesi, şu şekilde hesaplanır:

$$V(M_2 \geq M_1) = \sup_{y \geq x} \left[\min(\mu_{M_1(x)}, \mu_{M_2(x)}) \right] \quad (6)$$

$$= \text{hgt}(M_1 \cap M_2) = \mu_{M_2(d)}$$

$$= \begin{cases} 1, & m_2 \geq m_1 \\ 0, & l_1 \geq u_2 \\ \frac{(l_1 - u_2)}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)}, & \text{diğer hallerde} \end{cases} \quad (7)$$

Adım 4: Bulanık bir sayının olasılık derecesinin k konveks bulanık sayılarından S_i ($i = 1, 2, 3, \dots, k$) daha büyük olması durumunda şu şekilde tanımlanabilir.

$$V(S \geq S_1, S_2, \dots, S_k) = \min V(S \geq S_i), \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (8)$$

$$d'(A_i) = \min V(S_i \geq S_k), \quad i, k = 1, 2, \dots, n; \quad k \neq i \quad (9)$$

Bu durumda ağırlık vektörü şu şekilde verilir:

$$W' = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T \quad (10)$$

Adım 5: Normalize işlemi ile birlikte, normalize edilmiş bulanık bir sayı olmayan ağırlık vektörü şu şekilde hesaplanır:

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T \quad (11)$$

2.3. Bulanık Sayıların Sıralanması (Ranking of Fuzzy Numbers)

Bilindiği üzere pratik hayatta, dilsel karar verme süreçlerinde bulanık sayıların sıralanması çok önemli bir rol oynamaktadır²⁹. Dünyada mevcut olan problemlerin çoğu olasılıksal olmaktan çok bulanıktır. Çoklu karar verme problemlerinde (MADM) kullanılan sayılar bulanık olduğunda, kriter ve alternatiflerin aldıkları son değerlerde bulanık sayılar olmaktadır. Bulanık sayılar, farklı üyelik değerlerine sahip, çok sayıda olası gerçek sayıyı temsil ettiğinden dolayı, alternatif ya da kriterlerin son değerlerini kıyaslayarak hangisinin tercih

edileceğine karar vermek çok zordur³⁰. Diğer bir deyişle, bulanık sayılar, reel sayılardaki gibi net sıralı bir küme vermez. Bu sebeple, bulanık sayıların sıralanması üzerine yirminin üzerinde, farklı metod geliştirilmiştir²⁹. Her bir yöntemin kendi içinde avantaj ve dezavantajları olduğu için, en iyi yöntemi söylemek ya da sıralamak mümkün olmamaktadır.

Bulanık sayıların sıralanma prosedürü ile ilgili yapılan çalışmalar ilk olarak 1976 yılında Ramesh Jain tarafından yapılmıştır³¹. Jain, çalışmasında bulanık sayıları sıralamak için, küme maksimize etme kavramını kullanmıştır. Jain' in metodunda, karar verici, üyelik fonksiyonunun sadece sağ tarafını değerlendirmektedir. Baas ve Kwakernaak ise (1977), gerçek sayıların doğal sıralanmasının, bulanık sayılar içinde uygulanabilmesi için kanonik bir yol önermiştir³². Baldwin ve Guild (1979) yaptıkları çalışmada, bu iki yöntemin bazı dezavantajları olduğunu göstermiştir³³. Bartolan ve Degani (1985), bazı bulanık sayı sıralama metodlarını karşılaştırmış ve test etmiştir²⁶. Chen (1985) ise, küme maksimize ve minimize etme kavramlarını kullanarak yeni bir yaklaşım geliştirmiştir³⁴. Liou ve Wang (1992), Chen'in yaklaşımındaki bazı eksiklikleri tamamlamak için, entegral değer yöntemine dayanan bir sıralama yaklaşımı önermişlerdir. Cheng (1998), bulanık sayıları sıralama problemleri için, mesafe metodu yaklaşımını benimsemiş ve varyasyon katsayısını (coefficient of variation) tanımlamıştır³⁵. Chu ve Tsao (2002) yaptıkları çalışmada, Cheng' in metodunda bazı yanlışları belirlemiş ve bulanık sayıları sıralayabilmek için, merkez ve orijinal noktalar arasında alanı kullanarak bir metod geliştirmişlerdir³⁶. Abbasbandy ve Asady (2006) ise, bulanık sayıları işaret mesafesi metodu ile sıralamışlardır³⁷. Abbasbandy ve Hajjari (2009) ise, trapezoidal bulanık sayıların sıralanmasını yapabilmek için, yeni bir yaklaşım önermişlerdir.

2.3.1. Geliştirilmiş Entegral Değer Metodu (Improved Integral Value Method)

Bu metotta, adından da anlaşılacağı üzere, bulanık sayıları, net olarak ifade edebilmek için entegral ifadeler kullanılmaktadır³⁸. İyimserlik endeksi olarak tanımlanan $\alpha \in [0, 1]$ ve normal ya da normal olmayan üçgensel bulanık sayısı $\tilde{A} = (a, b, c; w)$ ve $x_{\min} = \inf X$ olmak üzere, geliştirilmiş entegral değer;

$$S_T^\alpha(\tilde{A}) = \left(\frac{w}{2} \right) \left[\alpha(b+c) + (1-\alpha)(b+a) - 2x_{\min} \right]$$

$$= \left(\frac{w}{2} \right) \left[\alpha c + b + (1-\alpha)a - 2x_{\min} \right] \quad (12)$$

tanımlanır.

Buna göre;

$$S_T^\alpha(\tilde{A}_i) < S_T^\alpha(\tilde{A}_j) \Rightarrow \tilde{A}_i < \tilde{A}_j$$

$$S_T^\alpha(\tilde{A}_i) = S_T^\alpha(\tilde{A}_j) \Rightarrow \tilde{A}_i = \tilde{A}_j$$

$$S_T^\alpha(\tilde{A}_i) > S_T^\alpha(\tilde{A}_j) \Rightarrow \tilde{A}_i > \tilde{A}_j$$

İyimserlik endeksi olan α , karar vericinin iyimserlik derecesini temsil etmektedir. İyimserlik endeksi, bir (1) rakamına ne kadar yakın olursa, karar verici o kadar iyimserdir, denilebilir.

2.3.2. Kuadratik Ortalama Metodu (Quadratic Mean Method)

Kuadratik ortalama formülü, diğer bir adıyla, kare ortalamalarının kökü formülü, verilen bir sayı kümesinin büyüklüğünün göstermek için kullanılabilir.

$\tilde{A} = (a, b, c)$ üçgensel bulanık sayısı için;

$$\tilde{A}_{rms} = \sqrt{\frac{a^2 + b^2 + c^2}{3}} \quad (13)$$

hesaplanır. Kuadratik ortalama metodu yardımıyla durulaştırılan üçgensel bulanık sayılar, daha sonra kendi aralarında sıralanabilirler.

3. UYGULAMA (IMPLEMENTATION)

Bu çalışmada akıllı bir şebekede bulunabilecek riskler, 5 ana başlıkta oluşturulmuştur. Bunlar: Finansal Riskler (B1), Güvenlik Riskleri (B2), Çevresel Riskler (B3), Teknolojik Riskler (B4) ve Yönetimsel Risklerdir (B5). Akıllı bir şebekedeki risk değerlendirmesini doğru ve gerçekçi bir şekilde yapabilmek için, oluşturulacak endeks sistemi aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır:

- Akıllı şebekelerdeki risk seviyelerinin detaylı ve sistemli bir analizi sonucu oluşturulmalıdır.
- Akıllı şebekelerin karakteristik özelliklerine göre oluşturulmalı ve kapsamlı olmalıdır.
- Sistemdeki riskler, açık ve belirleyici olmalıdır.
- Risklerin kapsadıkları alanlar mümkün olduğunca birbirleriyle kesişmemelidir.
- Sistem, anlaşılması kolay ve uygulanabilirlik anlamında pratik olmalıdır.

Yukarıdaki bahsedilen özellikler, sistemin sahip olduğu karakter ve yapılan araştırmalar sonucunda ortaya çıkan risk endeks sistemi Şekil 1'deki gösterilmiştir.

Şekil 1'deki gibi oluşturulan hiyerarşik sisteme göre, alanında tecrübeli olan dört uzmana, ikili karşılaştırma matrislerini kullanarak, risk başlıklarını karşılaştırmaları istenmiştir.

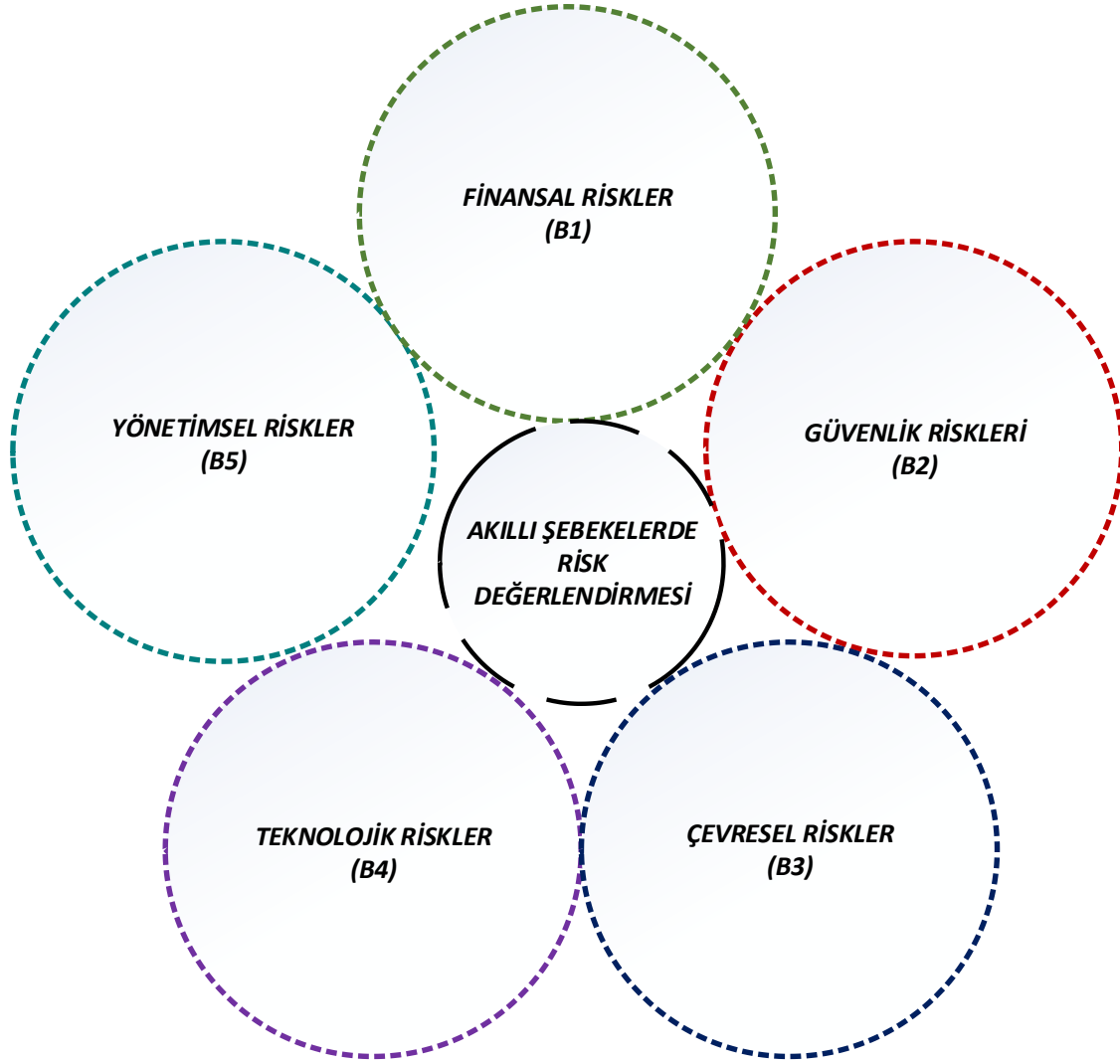
Uzmanların ana risk başlıklarını karşılaştırmalarından sonra oluşan ağırlık vektör yüzdeleri ve sıralamaları Çizelge 2'de görülmektedir

Ana risk başlıkları için normalize edilmiş ağırlık vektörleri de hesaplandıktan sonra Çizelge 3'de bulanık ağırlık vektörleri hesaplanarak gösterilmiştir.

Çizelge 2. Ana Risk Grupları ve Sıralamaları (Risks and Rankings)

ANA BAŞLIKLAR	Toplam Ağırlık Vektörü (%)	BAHP Sonucu Sıralama
<i>Güvenlik Riskleri</i>	32,96	1
<i>Teknolojik Riskler</i>	28,65	2
<i>Finansal Riskler</i>	21,57	3
<i>Yönetimsel Riskler</i>	13,74	4
<i>Çevresel Riskler</i>	3,06	5

Buna göre, ana başlıkların önem dereceleri yüzde olarak ifade edilirse; Finansal Riskler %22, Güvenlik Riskleri %33, Çevresel Riskler %3, Teknolojik Riskler %29 ve Yönetimsel Risklerin % 14 öneme sahip görülmektedir.



Şekil 1. Akıllı Şebekede Bulunan Ana Risk Başlıklarının Gösterim (Schematic Diagram of Main Risks in Smart Grid)

3.1. Bulanık Sayıların Sıralamasını Yaparak Değerlendirme (Assessment with Ranking of Fuzzy Numbers)

Chang'ın metodu dışında, geliştirilmiş entegral değer ve kuadratik ortalama yöntemleri kullanılarak bulanık sayıların sıralamaları yapılmıştır.

3.1.1. Geliştirilmiş Entegral Değer Metoduna Göre Değerlendirme (Assessment with Improved Integral Value Method)

Chang'ın önerdiği genişletilmiş bulanık AHP yönteminin 2. adımından sonra, yapay ağırlık değerleri kullanılarak, risklerin önem dereceleri belirlenerek, sıralamaları yapılmıştır. İyimserlik derecesi $\alpha = 0.5$ olmak üzere;

$$S_{B_1} = (0.1433, 0.2012, 0.2823)$$

$$S_T^\alpha(B_1) = \left(\frac{1}{2}\right) \left[\alpha(0.2823) + 0.2011 + (1-\alpha)0.1433 - 2(0.1433) \right]$$

$$S_T^\alpha(B_1) = 0.0695\alpha + 0.0289 = 0.0636$$

$$S_{B_2} = (0.1781, 0.2562, 0.3623)$$

$$S_T^\alpha(B_2) = \left(\frac{1}{2}\right) \left[\alpha(0.3623) + 0.2562 + (1-\alpha)0.1781 - 2(0.1781) \right]$$

$$S_T^\alpha(B_2) = 0.0921\alpha + 0.0391 = 0.0852$$

$$S_{B_3} = (0.1050, 0.1402, 0.1901)$$

$$S_T^\alpha(B_3) = \left(\frac{1}{2}\right) \left[\alpha(0.1901) + 0.1401 + (1-\alpha)0.1050 - 2(0.1050) \right]$$

$$S_T^\alpha(B_3) = 0.0389$$

$$S_{B_4} = (0.1657, 0.2336, 0.3281)$$

$$S_T^\alpha(B_4) = \left(\frac{1}{2}\right) \left[\alpha(0.3281) + 0.2336 + (1-\alpha)0.1657 - 2(0.1657) \right]$$

$$S_T^\alpha(B_4) = 0.0746$$

$$S_{B_5} = (0.1206, 0.1689, 0.2406)$$

$$S_T^\alpha(B_5) = \left(\frac{1}{2}\right) [\alpha(0.2406) + 0.1688 + (1-\alpha)0.1206 - 2(0.1206)]$$

$$S_T^\alpha(B_5) = 0.0541$$

Değerleri elde edilir. Bu değerlere göre ağırlık vektörü

$$W' = (0.0636, 0.0852, 0.0389, 0.0746, 0.0541)^T$$

olarak bulunur. Normalize edilmiş ağırlık vektörü ise ;

$$W = (0.2010, 0.2693, 0.1229, 0.2358, 0.171)^T \text{ olarak bulunur.}$$

Bu sonuçlara göre, finansal riskler %20, Güvenlik Riskleri % 27, Çevresel Riskler %12, Teknolojik Riskler %24 ve Yönetimsel risklerin %17 öneme sahip olduğu gözükmektedir. Chang'ın genişletilmiş bulanık AHP yöntemindeki sıralama sonucu ile benzer bir sonuç bulunmuştur.

3.1.2 Kuadratik Ortalama Metodu Kullanılarak Değerlendirme (Assessment with Quadratic Mean Method)

Daha önce bulunan yapay ağırlık değerleri kullanılarak ağırlık vektörü bulunmuştur. Çizelge 3'ye göre yapay değerler:

$$S_{B1} = (0.1433, 0.2012, 0.2823)$$

$$S_{B2} = (0.1781, 0.2562, 0.3623)$$

$$S_{B3} = (0.1050, 0.1402, 0.1901)$$

$$S_{B4} = (0.1657, 0.2336, 0.3281)$$

$$S_{B5} = (0.1206, 0.1689, 0.2406)$$

Elde edilen bu vektörler eşitlik (13) kullanılarak kuadratik ortalama metodu ile sıralanır;

$$K_{B_1 rms} = \sqrt{\frac{0.1433^2 + 0.2011^2 + 0.2823^2}{3}} = 0.217$$

$$K_{B_2 rms} = \sqrt{\frac{0.1781^2 + 0.2562^2 + 0.3623^2}{3}} = 0.276$$

$$K_{B_3 rms} = \sqrt{\frac{0.1050^2 + 0.1401^2 + 0.1901^2}{3}} = 0.149$$

$$K_{B_4 rms} = \sqrt{\frac{0.1657^2 + 0.2336^2 + 0.3281^2}{3}} = 0.251$$

$$K_{B_5 rms} = \sqrt{\frac{0.1206^2 + 0.1668^2 + 0.2406^2}{3}} = 0.183$$

Değerleri bulunur. Bu değerlere göre ağırlık vektörü;

$$W' = (0.217, 0.276, 0.149, 0.251, 0.183)^T \text{ olarak elde edilir. Normalize edilmiş ağırlık vektörü ise;}$$

$$W = (0.201, 0.257, 0.138, 0.233, 0.17)^T \text{ olarak bulunur.}$$

Kuadratik ortalama yöntemi sonucunda, risklerin önem dereceleri yüzde olarak, finansal riskler % 20, güvenlik riskleri % 26, çevresel riskler % 14, teknolojik riskler % 23 ve yönetimsel risklerin % 17 olarak gözükmektedir. Burada da, bulanık AHP yöntemi kullanılarak elde edilen sıralama sonucu ile benzer bir sonuç elde edilmiştir.

Çizelge 3. Risklerin İkili Karşılaştırma Matrisleri ve Bulanık Ağırlıkları (Comparison Matrices and Fuzzy Weights of Risks)

Ana Riskler	B1	B2	B3	B4	B5	Bulanık Ağırlıklar
B1	(1, 1, 1)	(0,581, 0,707, 0,888)	(1,368, 1,682, 2,027)	(0,661, 0,760, 0,880)	(0,904, 1,189, 1,540)	(0,1433, 0,2012, 0,2823)
B2	(1,126, 1,414, 1,720)	(1, 1, 1)	(1,581, 2,060, 2,603)	(0,643, 0,760, 0,904)	(1,257, 1,565, 1,903)	(0,1781, 0,2562, 0,3623)
B3	(0,493, 0,595, 0,731)	(0,384, 0,486, 0,633)	(1, 1, 1)	(0,525, 0,639, 0,795)	(0,904, 1, 1,107)	(0,1050, 0,1402, 0,1901)
B4	(1,136, 1,316, 1,514)	(1,107, 1,316, 1,554)	(1,257, 1,565, 1,903)	(1, 1, 1)	(0,719, 1, 1,392)	(0,1657, 0,2336, 0,3281)
B5	(0,649, 0,841, 1,107)	(0,525, 0,639, 0,795)	(0,904, 1, 1,107)	(0,719, 1, 1,392)	(1, 1, 1)	(0,1206, 0,1688, 0,2406)

Çizelge 3'e göre elde edilmiş yapay ağırlık değerleri;

$$S_{B1} = (4.5133, 5.3377, 6.3350) \times (22.4434, 26.533, 31.494)^{-1} \approx (0.1433, 0.2012, 0.2823)$$

$$S_{B2} = (5.6078, 6.7989, 8.1303) \times (22.4434, 26.533, 31.494)^{-1} \approx (0.1781, 0.2562, 0.3623)$$

$$S_{B3} = (3.3065, 3.719, 4.2656) \times (22.4434, 26.533, 31.494)^{-1} \approx (0.1050, 0.1402, 0.1901)$$

$$S_{B4} = (5.2189, 6.1972, 7.3628) \times (22.4434, 26.533, 31.494)^{-1} \approx (0.1657, 0.2336, 0.3281)$$

$$S_{B5} = (3.7969, 4.4798, 5.4003) \times (22.4434, 26.533, 31.494)^{-1} \approx (0.1206, 0.1689, 0.2406)$$

Elde edilir. Bu vektörler kullanılarak,

$$\begin{aligned}
V(S_{B_1} \geq S_{B_2}) &= 1, & V(S_{B_1} \geq S_{B_3}) &= 1, & V(S_{B_1} \geq S_{B_4}) &= 0.6545, & V(S_{B_1} \geq S_{B_5}) &= 0.7826 \\
V(S_{B_2} \geq S_{B_1}) &= 1, & V(S_{B_2} \geq S_{B_3}) &= 1, & V(S_{B_2} \geq S_{B_4}) &= 1, & V(S_{B_2} \geq S_{B_5}) &= 1, \\
V(S_{B_3} \geq S_{B_1}) &= 0.4341, & V(S_{B_3} \geq S_{B_2}) &= 0.4341, & V(S_{B_3} \geq S_{B_4}) &= 0.2071, & V(S_{B_3} \geq S_{B_5}) &= 0.7714 \\
, \\
V(S_{B_4} \geq S_{B_1}) &= 1, & V(S_{B_4} \geq S_{B_2}) &= 0.8690, & V(S_{B_4} \geq S_{B_3}) &= 1, & V(S_{B_4} \geq S_{B_5}) &= 1, \\
V(S_{B_5} \geq S_{B_1}) &= 0.7501, & V(S_{B_5} \geq S_{B_2}) &= 0.4169, & V(S_{B_5} \geq S_{B_3}) &= 0.4169, & V(S_{B_5} \geq S_{B_4}) &= 0.5361
\end{aligned}$$

Elde edilir. Buna göre hesaplanan ağırlık vektörü;

$W'=(0.6545, 1, 0.093, 0.8690, 0.4169)T$ olarak bulunur. Bu vektör normalize edildiğinde ise, risk başlıklarının ağırlıkları;

4. SONUÇ ve ÖNERİLER (CONCLUSION and RECOMMENDATIONS)

Fosil kaynakların kullanımının azaltılması ve CO₂ salınımının düşürülmesi hedefi için, yenilebilir enerji kaynaklarının geleneksel şebekeye entegrasyonu ile birlikte akıllı şebeke sistemlerine geçiş zaruri olmuştur. Gelecekte akıllı şebeke sistemlerinin devletler tarafından kullanımının zorunlu tutulması, dolayısıyla kullanıcılar düzeyinde daha çok kullanılmaya başlamasıyla, iki yönlü enerji akışının olacağı şebeke sistemine, ülkeler, daha çok bağımlı hale geleceklerdir. Bu da sistemde çok büyük potansiyelde risk ve/veya riskler oluşmasına sebep olacaktır. Bu nedenle, sistemdeki risklerin sistemin bütününe ele alarak, doğru bir şekilde tespit edilmesi, ona göre değerlendirilmesi, ileride karşılaşılabilecek tehditleri ve çözüm yollarının belirlenmesi açısından çok önemli olduğu düşünülmektedir.

Bu çalışmada, akıllı şebeke sisteminde yer alabilecek riskler, ana başlıklar halinde oluşturmuş ve çok ölçütlü bir problem olarak değerlendirilmiştir. Oluşturulan bu hiyerarşik yapı, genişletilmiş Bulanık Analitik Hiyerarşik Prosesi (BAHP) metoduyla çözümlenmeye çalışılmıştır.

Sonuç olarak, akıllı bir şebekede bulunabilecek ana riskler için değerler oluşturulmuş, sıralamalar yapılarak sistem içerisindeki risk oranı en yüksek ve düşük belirlenmiştir.

Buna göre, Güvenlik Riskleri %33' lük oranıyla, en önemli risk başlığı olarak göze çarpmaktadır. Genişletilmiş entegral değer ve kuadratik ortalama metotlarında da güvenlik riskleri %27' lik oran ile en önemli risk başlığı olarak bulunmuştur. Üç sıralama yönteminde de, diğer risk başlıklarının sıralamasında bir değişiklik olmamıştır.

Bu risklerin karşılaştırılması için, literatürde, başka, çok amaçlı değerlendirme yöntemleri bulunmaktadır. Bu metotlar kullanılarak sistemdeki risklerin kritik oranları hesaplanarak karşılaştırma yapılabilir.

İleride yapılacak çalışmalar için, akıllı bir şebekedeki güvenlik riskleri başlığı altında, alt risk başlıkları oluşturularak, bu riskler kendi aralarında karşılaştırılmalı ve sonuçlar tartışılmalıdır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1]. ABB. "Toward a Smarter Grid ABB' s Vision for the Power System of the Future". (2010).
- [2]. Janjic, A., Savic, S., Janackovic, G., Stankovic, M. & Velimirovic, L., "Multi-criteria assessment of the smart grid efficiency using the fuzzy analytic hierarchy process". *Facta Univ. - Ser. Electron. Energ.*, 29: 631–646, (2016).
- [3]. Janjic, A., Savic, S., Velimirovic, L. & Nikolic, V., "Renewable Energy Integration in Smart Grids-Multicriteria Assessment Using the Fuzzy Analytical Hierarchy Process", *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, 23: 1896–1912, (2015).
- [4]. Li, Y., Guo, X., Tang, H. A. O. & Li, D. "Construction of Hazard Source Evaluation Index System of Smart Grid", *Int. Conf. Artif. Intell. Eng. App.*, 487–491, (2017).
- [5]. Xiaojing, W., Xingyin, C., Kun, Y. & Haojie, S., "Construction of Smart Distribution Grid Efficiency Evaluation Index System". *IEEE Conf. Energy Internet Energy Syst.*, 1(4): (2017).
- [6]. Xu, W., "Research on Risk Assessment of Smart Grid Project", *Natl. Conf. Electr. Electron. Comput. Eng.* (NCEECE 2015) 558–562 (2015).
- [7]. Liu, R., "Preliminary Analysis of Smart Grid Risk Index System and Evaluation Methods", *Energy Power Eng.*, 5: 807–810, (2013).
- [8]. Rawat, D. B. & Bajracharya, C., "Cyber security for smart grid systems: Status, challenges and perspectives", *Conf. Proc. - IEEE SOUTHEASTCON*, June, 1–6 (2015).
- [9]. Hecht, T., Langer, L. & Smith, P., "Cybersecurity Risk Assessment in Smart Grids", *5th Symp. Commun. Energy Syst.* (ComForEn 2014) (2014).
- [10]. Saaty, T. L., "Decision making with the analytic hierarchy process", *Int. J. Serv. Sci.*, 1(83): (2008).

- [11]. Dağdeviren, M., Akay, D. & Kurt, M., "İş değerlendirme sürecinde analitik hiyerarşi prosesi ve uygulaması", *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.*, 19: 131–138, (2004).
- [12]. Saaty, T. L. "The Analytic Hierarchy Process", Education, McGraw-Hill International Book, (1980).
- [13]. Emrouznejad, A. & Ho, W., "Fuzzy Analytic Hierarchy Process", *Congresso Latino-Iberoamericano de Investigación Operativa* CRC Press, (2012).
- [14]. Zimmermann, H.-J., "Fuzzy set theory and its applications", *Fuzzy Sets and Systems*, 47: (2001).
- [15]. Zadeh, L. A., "Fuzzy sets. Information and Control" 8: 338–353 (1965).
- [16]. Goguen, J. A., "L-fuzzy sets", *J. Math. Anal. Appl.* 18: 145–174, (1967).
- [17]. Büyüközkan, G., Kahraman, C. & Ruan, D. A "Fuzzy Multi-criteria Decision Approach for Software Development Strategy Selection", *Int. J. Gen. Syst.*, 33: 259–280, (2004).
- [18]. Toshiro Terano, Kiyoji Asai, M. S., "Fuzzy systems theory and its applications", *Academic Press*, (1992).
- [19]. Chen, G. & Pham, T. T., "Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic and Fuzzy Control Systems". CRC Press, (2001).
- [20]. Zimmerman, H. J., "Fuzzy Set Theory and Its Applications", Springer, (1992).
- [21]. Kuo, M. S., Liang, G. S. & Huang, W. C. "Extensions of the Multicriteria Analysis With Pairwise Comparison Under a Fuzzy Environment", *Int. J. Approx. Reason.* 43: 268–285, (2006).
- [22]. Buckley, J. J., "Fuzzy Hierarchical Analysis", *Fuzzy Sets Syst.*, 17: 233–247, (1985).
- [23]. van Laarhoven, P. J. M. P. W. A Fuzzy Extension of Saaty's Priority Theory. *Fuzzy Sets Syst.* 11(11): 229–241, (1983).
- [24]. Saaty, T. L., "The Analytic Hierarchy Process", New York: Mc Graw-Hill (1980).
- [25]. Chan, F. T. S. & Kumar, N., Global Supplier Development Considering Risk Factors Using Fuzzy Extended AHP-based Approach", *Omega* 35: 417–431, (2007).
- [26]. Bortolan, G. & Degani, R. A, "Review of Some Methods for Ranking Fuzzy Subsets", *Fuzzy Sets Syst.* 15: 1–19, (1985).
- [27]. Mikhailov, L., "Deriving Priorities From Fuzzy Pairwise Comparison Judgements", *Fuzzy Sets Syst.* 134: 365–385, (2003).
- [28]. Chang, D., "Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP", 2217, (1996).
- [29]. Deng, Y., Zhenfu, Z. & Qi, L., "Ranking fuzzy numbers with an area method using radius of gyration", *Comput. Math. with Appl.*, 51: 1127–1136, (2006).
- [30]. Chen, S.-J. J. & Hwang, C.-L., "Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications", 375: (Springer, 1992).
- [31]. Jain, R., "Decision Making in the Presence of Fuzzy Variables", *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, 6: 698–703, (1976).
- [32]. Baas, S. M. & Kwakernaak, H., "Rating and Ranking of Multiple-Aspect Alternatives Using Fuzzy Sets", *Automatica*, 13: 47–58, (1977).
- [33]. Baldwin, J. F. & Guild, N. C. F., "Comparison of Fuzzy Set On the Same Decision Space", *Fuzzy Sets Syst.*, 2: 213–231, (1979).
- [34]. Chen, S., "Ranking Fuzzy Numbers with Maximizing Set and Minimizing Set", *Fuzzy Sets Syst.* 17: 113–129, (1985).
- [35]. Cheng, C. H., "A new approach for ranking fuzzy numbers by distance method", *Fuzzy Sets Syst.*, 95: 307–317, (1998).
- [36]. Chu, T.-C. & Tsao, C.-T., "Ranking Fuzzy Numbers with an Area between the Centroid Point and Original Point", *Comput. Math. with Appl.*, 43: 111–117, (2002).
- [37]. Abbasbandy, S. & Asady, B., "Ranking of Fuzzy Numbers by Sign Distance", *Inf. Sci. (Ny)*, 176: 2405–2416, (2006).
- [38]. Liou, T. S. & Wang, M. J. J., "Ranking Fuzzy Numbers With Integral Value", *Fuzzy Sets Syst.*, 50: 247–255, (1992).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



Turkey's energy efficiency and its relative position against OECD and BRICS countries

Türkiye'nin enerji etkinliği ve OECD ve BRICS ülkeleri arasındaki görece konumu

Yazar(lar) (Author(s)): Fatih KARİK¹, Ümit İSKENDER², Cuma KILINÇ³

ORCID¹: 0000-0002-7830-2426

ORCID²: 0000-0001-8604-882X

ORCID³: 0000-0002-6258-617X

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Karık F., İskender Ü. ve Kılınc C., "Türkiye'nin enerji etkinliği ve OECD ve BRICS ülkeleri arasındaki görece konumu", *Politeknik Dergisi*, 23(2): 515-525, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.671336

Türkiye'nin Enerji Etkinliği ve OECD ve BRICS Ülkeleri Arasındaki Görelî Konumu

Araştırma Makalesi / Research Article

Fatih KARİK*, Ümit İSKENDER, Cuma KILINÇ

Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 07.04.2019 ; Kabul/Accepted : 26.07.2019)

ÖZ

Enerjiye olan talep günden güne artmaktadır ve aynı zamanda ekonomi de bu büyüme ile ele alınacak önemli bir konudur. Bu bakımdan, birçok ülke enerji yoğunluğunu (birim ekonomik çıktı için harcanan veya tüketilen enerji) azaltmak için önemli roller üstlenmektedir halbuki bu değişken uluslar arası karşılaştırmalar için sadece tek bir faktördür. Enerji yoğunluğu ile birlikte birçok parametre içeren bu çalışma ülkelerin enerji etkinliğini ölçmektedir ve bu ülkeler arasında Türkiye'nin konumunu belirlemektedir. Veri zarflama analizi (VZA) çoklu girdi ve çıktı kullanarak benzer türden karar verme birimleri (KVB) için etkinlik değerlendirme amaçlı kullanılan parametrik olmayan bir yöntemdir. Analizlerde, 2009–2013 dönemi için OECD ve BRICS (Brezilya, Rusya, Hindistan, Çin Halk Cumhuriyeti, Güney Afrika) ülkeleri kullanılmıştır. Bu dönem için, VZA analizlerinin dinamik seyirini izlemek üzere Malmquist verimlilik endeksi (MVE) yöntemi de kullanılmıştır. OECD (Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü) ve BRICS (Brezilya, Rusya, Hindistan, Çin ve Güney Afrika) ülkelerinin etkinlik analizi 2009 yılından 2013 yılına kadar yapılmıştır. Sonuçlar göre, etkin ülkeler OECD grubu ülkeler içerisinde ve ortalama MVE ise dönem boyunca %1.4 kötüleşmiştir. OECD üyesi bir ülke olan Türkiye 0.048 değeri ile etkin bir ülke değildir ve MVE değeri tüm dönem boyunca %4.5 kötüleşmiştir. Çünkü enerji ithalatı Türkiye için son yıllarda önemli bir tehdit haline gelmiş olup, bulgular Türkiye'nin görelî konumunu görmede ve tedbir almasında yardımcı olacaktır. Sonuç olarak, Türkiye'nin etkinliğini arttırması için bazı önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Enerji etkinliği, veri zarflama analizi, Malmquist verimlilik endeksi.

Turkey's Energy Efficiency and Its Relative Position against OECD and BRICS Countries

ABSTRACT

The demand for energy is growing day by day, and at the same time economy is an important issue to be handled with this growing. In this respect, many countries are undertaking significant roles to decline their energy intensities (energy supply or consumption per unit of economic output) whereas this variable may be single factor for the international comparisons. This study including many factors with the energy intensity measures energy efficiency of countries and positions Turkey among them. Data envelopment analysis (DEA) using multiple input and outputs is a non-parametric technique for the efficiency evaluation of a set of decision making units (DMUs). In the analyzes, the OECD and BRICS (Brazil, Russia, India, Democratic People of China and South Africa) countries were used for 2009–2013 period. For this period, the Malmquist productivity index (MPI) method was also used to observe the dynamic progress of DEA analyzes. The efficiency analysis of OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) and BRICS (Brazil, Russia, India, China and South Africa) countries is conducted from 2009 to 2013. According to the results, the efficient countries are members of the OECD group and MPI of an average country worsens 1.4% over the period. As a member of OECD, Turkey is not efficient country with the score of 0.048 and Turkey's MPI also worsens 4.5% for the whole period. Because the energy imports have become a threat to Turkey's economy in recent years, the findings will be helpful guidance in seeing its relative position and in taking precautions. As a result of this study, it is given some suggestions to increase the efficiency of Turkey in the model.

Keywords: Energy efficiency, data envelopment analysis, Malmquist productivity index.

1. INTRODUCTION

The energy demand is growing because of the increase of world's population with the development of living standards so managing the issue of energy resources has been a hot topic on the national policy agenda of most developed countries. In this context, energy efficiency has become an important issue for policy makers at both national and international level [1]. In 2001, the BRICs acronym was first formulated paper titled "The World

Needs Better Economic BRICs" and represents a significant share of the world's population and production. The other important group, OECD, establishing in 1961 is accepted as developed countries and has market economies work with each other. Total final energy consumption of this two group, in the scope of this work, is 73% of the world use in 2013 [2].

As a member of OECD and a candidate for EU, Turkey is a fast growing country and its economy and population are expanding each year so its energy demand increases accordingly. Total final energy consumption grew by an average 3.25% for Turkey per year from 2000 to 2014

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : fatih.karik@enerji.gov.tr

whereas this value is 0.03% for the OECD group. Besides, total electricity consumption grew by an average 5.48% for Turkey and 0.69% for the OECD group per year from 2000 to 2014 [2]. On the other hand, Turkey is a big energy importer so it needs to use energy resources efficiently [4,5].

To measure energy efficiency, several methods have been used ranging from single (e.g. energy intensity) to multi-criteria (e.g. DEA) approaches. The term “energy intensity” has been used since the 1990s and is measured as dividing primary or final energy consumption by GDP [3]. A decrease in energy intensity means that the desired economic output can be reached with less energy input. However, unless it is put together with other inputs such as labor force and/or capital, only using energy as input cannot produce economic outputs in the actual production process [6]. In the study of Zhou et al. [7], 100 DEA studies published in energy and environmental issues were classified over the period 1983–2006. The majority of relevant studies have used DEA-based modeling techniques to measure the energy efficiency since energy intensity has limited information.

New energy efficiency indexes can be defined by the DEA approach [8,9]. The DEA studies can be divided into two part: sector specific level such as in [1, 10-16] and macro level such as in [17-23]. In this study, an efficiency indicator is defined. As distinct from above studies, this paper including the multiple-inputs with the output of energy intensity evaluates the efficiencies of the OECD and BRICS countries in terms of static (DEA) and dynamic (MPI) and shows Turkey’s position among the countries. Taking into account all the above works, there is no similar research in this area so the results are highly valuable for the countries having high energy dependency such as Turkey. By this way, it will be possible to inspect and develop the energy policies in an accurate manner in accordance with the results obtained.

This paper is organised into four sections: Methodology is described in Section 2. Section 3 presents the empirical results and discussion. Section 4 shows Turkey’s current situation and give some suggestions. Section 5 concludes this study.

2. THEORY

2.1. Data Envelopment Analysis

DEA is the non-parametric mathematical programming approach and was developed by Charnes et al. [24] to determine the relative efficiency scores of decision making units (DMUs) with multiple outputs and multiple inputs. It provides a reasonable perspective for objectively evaluating the DMUs’ performances. Generally, DEA models are divided into two types; that is, the type of scale effects (reference technology) and model orientation. There are two basic assumptions concerning the scale types in the model. The first one is constant returns to scale (CCR or CRS) introduced by Charnes et al. [24]. It estimates the overall technical efficiency (OTE) of each DMU. The second one is

variable returns to scale (BCC or VRS) introduced by Banker et al. [25] and defines the pure technical efficiency (PTE) of each DMU. The relationship between PTE and OTE is defined as follow:

$$OTE = SE.PTE \quad \text{and} \quad PTE \geq OTE \tag{1}$$

That is, the BCC efficiency scores are always equal or higher from the CCR ones, and so scale efficiency (SE) is not greater than one. Either input or output-oriented models can be used, depending on which variable is the target. If the objective is to produce a given output using a minimum of inputs, an input-oriented model is selected. The mathematical equations of the input-oriented model based on CRS is as follows:

$$\begin{aligned} \min h_o &= \theta_o - \varepsilon \sum_{i=1}^m S_{io}^- - \varepsilon \sum_{r=1}^s S_{ro}^+ \quad \text{s.t.} \\ \left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + S_{io}^- &= \theta_o x_{io} \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - S_{ro}^+ &= y_{ro} \\ \lambda_j, S_{io}^-, S_{ro}^+ &\geq 0 \\ j &= 1, \dots, n \quad i = 1, \dots, m \quad r = 1, \dots, s \end{aligned} \right\} \tag{2} \end{aligned}$$

Where the subscript *o* shows the DMU being assessed and *h_o* stands for efficiency score of DMU_o. *x_{ij}*, *y_{rj}* and *λ_j* stand for the input *i* and output *r* of DMU_j and weights, respectively. *S_{io}⁻* and *S_{ro}⁺* are the slacks in the *i_{th}* input and the *r_{th}* output and *n*, *m* and *s* are the number of DMUs, inputs and outputs, respectively. *θ_o* stands for the radial input shrinkage constant and *ε* represents a “non-Archimedean” arbitrary-infinitesimal.

If *θ_o*=1 and the slacks are zero, then the DMU_o under evaluation is on the efficient frontier. Otherwise, if *θ_o*<1 and/or the slacks are not zero, then the DMU_o under evaluation is inefficient. This DMU_o should decrease its input levels at a given outputs.

Although basic CCR or BCC DEA models can discriminate the performance of efficient DMUs from inefficient ones, they do not have the ability to distinguish between the efficient units. To rank the efficient DMUs, the CCR model of Charnes et al. [24] is modified by Andersen and Petersen [26] whose model is called “super efficiency”. The DMU under assessment is excluded from the reference set in this method while the efficiency scores and weights remain unchanged for the inefficient DMUs. Based on CRS, the mathematical equations of the super efficiency in input-oriented model is as follows:

$$\begin{aligned}
 \min h_o^s &= \theta_o - \varepsilon e S_{io}^- - \varepsilon e S_{ro}^+ \quad \text{s.t.} \\
 \left. \begin{aligned}
 \sum_{j=1, \neq o}^n \lambda_j x_{ij} + S_{io}^- &= \theta_o x_{io} \\
 \sum_{j=1, \neq o}^n \lambda_j y_{rj} - S_{ro}^+ &= y_{ro} \\
 \lambda_j, S_{io}^-, S_{ro}^+ &\geq 0 \\
 j = 1, \dots, n \quad i = 1, \dots, m \quad r = 1, \dots, s
 \end{aligned} \right\} \quad (3)
 \end{aligned}$$

Where the subscript h_o^s stands for super efficiency score of DMU_o and e is a row vector with unity for all elements.

2.2. Malmquist Productivity Index

Efficiency scores are calculated for a specific time period but the change of efficiency by time is an important issue to be evaluated. Färe et al. [27] defined the output-based MPI between time t and $t+1$ as a geometric mean of the indexes proposed by Caves et al. [28]. Since the idea of calculating indexes by using the distance functions belongs to Sten Malmquist [29], Caves et al. [28] named their index as Malmquist.

The input distance function (D_t) used for MPI measurement is defined on the output set, P_t , as:

$$D_t^i(x^t, y^t) = \max\{\theta : (x^t / \theta, y^t) \in P^t\} \quad (4)$$

According to Färe et al. [30], input-oriented Malmquist productivity index is defined by using this function as follows:

$$M_t(x^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1}) = \left[\left(\frac{D_t^i(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_t^i(x^t, y^t)} \right) \cdot \left(\frac{D_{t+1}^i(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_{t+1}^i(x^t, y^t)} \right) \right]^{1/2} \quad (5)$$

M_t (or MPI) is used to measure the total factor productivity change of DMU over time. $M_t > 1$, $M_t = 1$ and $M_t < 1$ respectively show that the productivity of DMU has made progress, remained unchanged and worsened from period t to $t+1$.

Färe et al. [30] showed that M_t (or *tfpch*) can be decomposed into two components which provides useful indexes for the study of efficiency change (*effch*) and technical change (*techch*) as follows:

$$tfpch = effch \cdot techch \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned}
 effch &= \frac{D_{t+1}^i(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_t^i(x^t, y^t)} \\
 techch &= \left[\left(\frac{D_t^i(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_{t+1}^i(x^{t+1}, y^{t+1})} \right) \cdot \left(\frac{D_t^i(x^t, y^t)}{D_{t+1}^i(x^t, y^t)} \right) \right]^{1/2}
 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

effch measures the “catch-up” effect, in other words if a specific DMU is closer or further away from the production frontier between periods t and $t+1$. *techch*

which depicts the technological progress or regression of DMUs from t to $t+1$ is known as the “frontier shift” effect.

3. EMPIRICAL STUDY

3.1. Material and Specification of Model

In this section, a new energy efficiency index including energy intensity is defined by the DEA approach. It is taken 33 OECD and BRICS countries as DMUs for the analysis. It can be said that their power structure and economic status represent the appeal of different kinds of countries. Mexico is excluded from the analysis due to the lack of data. The data period extends from 2009 to 2013 and variables of the countries are collected from the International Energy Agency (IEA) and the World Bank (WB). Energy intensity, electricity capacity, populations and energy data are taken from the IEA database [2] and labor and capital are obtained from the WB database [31]. Electricity capacity (W/capita), primary energy supply (toe/capita), final energy consumption (toe/capita), energy production (toe/capita), electricity consumption (MWh/capita), labor force/population and net capital account (USD/capita) are the seven inputs while energy intensity (per capita) is used as the only output.

To analyze efficiency and its change, DEA models including OTE, PTE, SE, super efficiency scores and MPI are used. For this purpose, the DEAP version 2.1 developed by Coelli [32] and the EMS version 1.3 developed by Scheel [33] software packs are used. Since the efficiency scores using the VRS reference technology are locally efficient, the analyses are conducted under the CRS assumption providing globally efficient scores, and so CRS-input oriented DEA model is implemented.

3.2. Results and Discussions

For the static analyses, the scores of OTE, PTE, SE and super efficiencies are calculated. If both OTE and PTE scores of a DMU are equal to 1.0 (or 100%), it is operating in the most productive scale size (MPSS). That is, when a DMU has the MPSS, its SE is 1.0. It implies that the DMUs having the MPSS transform the inputs into outputs excellently. As measured from Table 1, average OTE is 0.161 and average PTE is 0.858. Mean SE showing the potential productivity to be gained is 0.177. The scale and globally efficient countries are Estonia, Iceland and Luxembourg namely, they are operating on the MPSS. Turkey's OTE, PTE and SE scores are 0.048, 1.000 and 0.048, respectively. This means that OTE and SE scores of Turkey are under the average country and the reason of lower global efficiency (OTE) is deviations from the optimal scale. Many OECD countries has higher SE from BRICS and this indicates that BRICS' energy efficiency do not benefits from its economic scale such as China and India.

Table 1. CRS efficiency scores and benchmarks of the countries for the period of 2009–2013.

Years	2009	2010	2011	2012	2013	Mean				Benchmarks in 2013	
Countries	Super efficiency score (%)					Super	O _{TE}	P _{TE}	SE	Peer and weights	
1 Australia	2.30	2.02	2.07	2.14	2.01	2.11	0.021	0.786	0.027	13 (0.01)	19 (0.00)
2 Canada	1.67	1.52	1.52	1.56	1.46	1.55	0.016	0.739	0.021	13 (0.01)	19 (0.00)
3 Chile	16.52	17.42	18.07	17.22	15.74	16.99	0.170	0.867	0.196	13 (0.03)	22 (0.02)
4 Israel	22.22	21.23	20.37	24.39	17.81	21.20	0.212	0.893	0.237	13 (0.03)	22 (0.04)
5 Japan	0.74	0.74	0.96	1.09	1.12	0.93	0.009	0.926	0.010	13 (0.00)	22 (0.00)
6 Korea	3.28	3.33	3.45	3.51	3.57	3.43	0.034	0.803	0.043	13 (0.01)	22 (0.02)
7 New Zealand	12.35	11.39	12.19	13.83	13.44	12.64	0.126	0.726	0.174	13 (0.10)	19 (0.00) 22 (0.01)
8 United States	0.16	0.14	0.15	0.15	0.14	0.15	0.001	0.787	0.002	13 (0.00)	19 (0.00)
9 Austria	6.69	6.97	7.31	7.21	7.56	7.15	0.072	0.805	0.089	13 (0.02)	22 (0.03)
10 Belgium	8.04	8.02	7.65	7.96	8.20	7.97	0.080	0.871	0.092	13 (0.02)	22 (0.03)
11 Czech Republic	11.30	10.58	11.42	11.68	12.11	11.42	0.114	0.776	0.148	13 (0.08)	22 (0.02)
12 Denmark	5.58	5.33	5.57	5.88	5.99	5.67	0.057	0.799	0.071	13 (0.04)	
13 Estonia	253.17	254.13	237.50	223.40	252.43	244.13	1.000	1.000	1.000	35	
14 Finland	10.17	10.39	10.53	10.75	10.50	10.47	0.105	0.788	0.133	13 (0.06)	19 (0.00) 22 (0.04)
15 France	0.87	0.87	0.91	0.97	0.97	0.92	0.009	0.852	0.011	13 (0.00)	22 (0.00)
16 Germany	0.75	0.76	0.78	0.82	0.86	0.79	0.008	0.809	0.010	13 (0.00)	22 (0.00)
17 Greece	9.33	10.21	11.64	13.02	13.62	11.56	0.116	0.813	0.142	13 (0.03)	22 (0.02)
18 Hungary	21.30	21.58	22.09	23.36	23.68	22.40	0.224	0.851	0.263	13 (0.06)	22 (0.02)
19 Iceland	327.87	351.99	406.75	366.82	333.97	357.48	1.000	1.000	1.000	8	
20 Ireland	17.26	17.10	17.61	19.59	16.94	17.70	0.178	0.965	0.185	13 (0.02)	22 (0.05)
21 Italy	1.83	1.82	1.87	1.85	1.87	1.85	0.019	0.905	0.021	13 (0.00)	22 (0.00)
22 Luxembourg	1052.42	1029.55	1097.98	1073.06	2664.37	1383.48	1.000	1.000	1.000	23	
23 Netherlands	3.10	3.05	2.85	3.76	2.70	3.09	0.031	0.844	0.037	13 (0.02)	19 (0.00)
24 Norway	5.16	5.04	5.14	5.15	5.23	5.14	0.051	0.780	0.066	13 (0.03)	19 (0.01)
25 Poland	5.68	5.31	5.46	5.61	4.98	5.41	0.054	0.813	0.067	13 (0.02)	
26 Portugal	14.89	13.63	15.05	17.21	16.93	15.54	0.155	0.779	0.199	13 (0.02)	22 (0.03)
27 Slovak Rep.	41.55	41.68	42.38	43.42	43.21	42.45	0.425	0.805	0.528	13 (0.12)	22 (0.09)
28 Slovenia	50.33	49.51	52.98	57.66	58.20	53.74	0.538	0.884	0.609	13 (0.23)	22 (0.12)
29 Spain	2.38	2.30	2.58	2.75	2.67	2.54	0.025	0.803	0.032	13 (0.00)	22 (0.01)
30 Sweden	4.42	4.35	4.50	4.47	4.45	4.44	0.045	0.802	0.056	13 (0.03)	19 (0.00) 22 (0.01)
31 Switzerland	4.42	4.47	5.38	4.78	4.85	4.78	0.048	0.914	0.053	13 (0.02)	22 (0.01)
32 Turkey	4.77	4.62	4.72	4.98	4.79	4.78	0.048	1.000	0.048	13 (0.00)	22 (0.01)
33 United Kingdom	0.68	0.64	0.70	0.80	0.82	0.73	0.007	0.826	0.009	13 (0.00)	22 (0.00)
34 Brazil	1.65	1.44	1.51	1.68	1.52	1.56	0.015	0.917	0.017	13 (0.00)	
35 P.R. of China	0.54	0.44	0.44	0.44	0.39	0.45	0.004	0.888	0.005	13 (0.00)	
36 India	2.29	1.81	1.70	1.75	1.58	1.83	0.018	1.000	0.018	13 (0.00)	
37 Russian Fed.	2.50	2.26	2.50	2.68	2.43	2.47	0.025	0.799	0.031	13 (0.02)	
38 South Africa	8.22	7.21	7.80	8.23	7.40	7.77	0.078	0.990	0.078	13 (0.03)	

According to the super efficiency scores, the value of scores higher than 100% refer to efficient units. As can be seen in Table 1, for inefficient DMUs, the reference DMUs with corresponding peers and weights can be used as ancillary instrument in order to determine the target values. But, the output is calculated as a necessity of the model in input-oriented DEA models used for solution. Namely, this is a undesired situation for the specific problem of energy intensity. For that reason, it is not recommended that inefficient countries increase their energy intensities. Instead, it can only be suggested that they recover the redundancies in inputs. Turkey is inefficient country and its references are Estonia and Luxembourg. As known, in any economy, energy use are

strongly connected to the level of economic growth and economic activity. So, the problem of energy import dependency and its negative effects on the economy are the considerable factors in Turkey.

On average, the most efficient country is Luxembourg and the other super efficient countries are Iceland and Estonia as members of OECD. The economical parameters of Luxembourg’s remained very strong with a prompt recovery after the economical crisis of 2009 so its performance can be explained by its strong economic welfare [20, 34]. At the same time, this finding may result from some government policies such as promoting energy-efficient new buildings, energy performance of building regulations, the renovation of older ones and

decentralized renewable energy sources [35]. It is a striking result that the BRICS group has low performance although it takes a pivotal position in the global economy and in the energy consumption/production.

For the analyses in the time horizon, the score of *tfpch* is calculated. Following the idea of Färe et al. [36] for international growth comparison, Figure 1 shows the geometric mean of *tfpch* estimates which can also stand for the cumulative MPI to a certain extent and presents

Turkey's and countries' efficiency changes by year. A value of the index higher than 1 depicts the productivity improvement, for example 1.045 means a 4.5% increase in *tfpch* from 2012 to 2013 and vice versa. *tfpch* of Turkey is below the average country and the OECD group and there is no significant rising in its efficiency from 2009 to 2013. *tfpch* improvement of the OECD group has higher than the BRICS group but the value is inconsiderable.

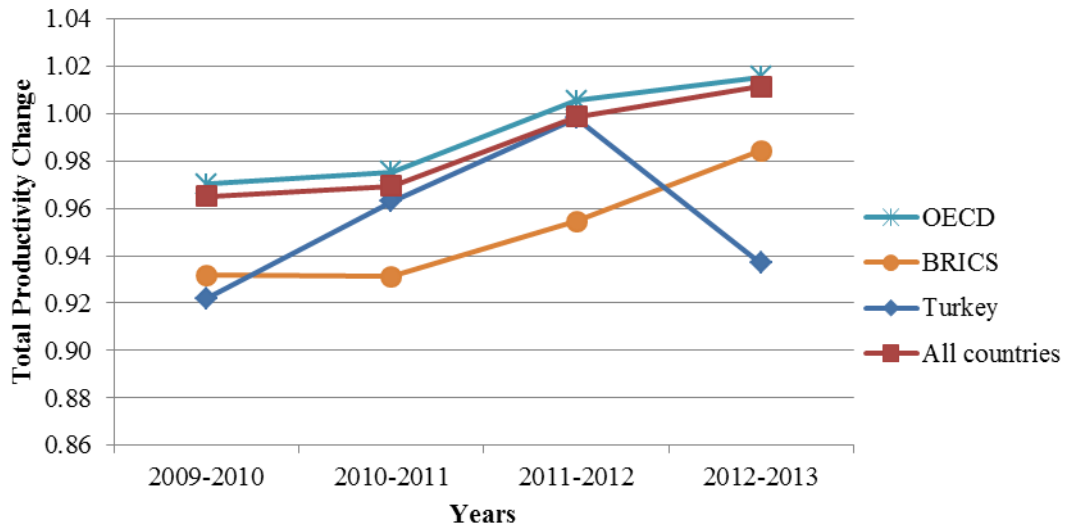


Figure 1. The total factor productivity change of the countries by the years.

However, global financial crisis triggered by the subprime credit problem in the period of 2007–2009 can be negative effects on the countries in 2009 and in 2010. In other words, it can be stated that countries overcame economic shock with a one-or two-year time lag. The smallest average *tfpch* appears in period 2009/2010 together with the economic recession effects.

Chien and Hu [37] argue that an economy's technical efficiency can be significantly improved by substituting traditional energy with renewable energy. In this sense, Turkey has poor conventional energy resources such as natural gas and oil. Turkey's main energy resources are the low-quality lignite and hydrolic but Turkey has high of renewable energy potential that is to say, renewable sources, clean and not dependent on foreign countries, are still under-utilized [5]. For the potential performance to be gained, Turkey should evaluate its energy potential with proper policies year by year.

Table 2 presents *tfpch* of countries for the whole period in detail. As can be seen from the Table, most of their average values are lower than 1. The empirical results show that the total productivity of the countries decreases 1.4% over the period. Among them, Luxembourg has the highest value with an average annual increase of 39% and Turkey's productivity worsens 4.5% for the whole period. No countries continuously improve efficiency throughout the time period and this trend shows that nations do not struggle to improve efficiency during the study period generally. For developing countries with

rapid economic growth, for instance Turkey, the optimization of power structure and usage of renewable energy are the important issues, but for developed countries with steady growth, more efforts on developing new technology will help them gain higher MPI.

As aforementioned, *tfpch* can be divided into two components as efficiency change and technological change. This distinction provides useful information for policy purposes [30]. Table 3 presents *effch* and *techch* values of countries. According to the Table, Luxembourg's growth are due to improvements in technological change. Considering the average values over the period, *effch* and *techch* has almost same effect in total productivity change of Turkey and there is a slight difference *techch* and *effch* in total improvement of growth. According to Färe et al. [36], *techch* component is related to capture diffusion of technology and *effch* implies whether the corresponding country is approaching the production frontier (optimum scale). In the period of 2012–2013, the average *techch* of all countries is 1.052 as the highest estimation, indicating a 5.2% growth in average *techch*. The lowest *effch* estimation is 0.961, indicating a 3.9% decrease in average *effch* from 2012 to 2013. As expected, many OECD countries have the highest growth in *effch* for the entire study period, because they have the competitive advantage of developing renewable energy technology, energy efficiency strategies and economic cooperation.

Table 2. The total factor productivity change of the countries for the period of 2009–2013.

Countries	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	G.Mean
Australia	0.944	0.962	0.978	0.997	0.970
Canada	0.966	0.967	0.970	0.964	0.967
Chile	1.012	0.974	0.903	0.897	0.945
Israel	0.916	0.904	1.157	0.709	0.908
Japan	0.961	1.223	1.118	0.984	1.066
Korea	0.984	0.975	0.961	0.993	0.978
New Zealand	0.954	0.985	1.074	0.979	0.997
United States	0.969	0.973	0.956	0.996	0.973
Austria	0.995	0.977	0.945	1.026	0.985
Belgium	1.000	0.877	0.969	1.014	0.963
Czech Republic	0.988	0.968	0.964	1.042	0.990
Denmark	1.007	0.960	1.013	1.007	0.997
Estonia	1.027	0.921	0.924	1.044	0.977
Finland	1.036	0.938	0.979	0.965	0.979
France	0.966	0.962	0.998	0.985	0.978
Germany	0.977	0.961	0.995	1.020	0.988
Greece	1.054	1.059	1.064	1.030	1.052
Hungary	1.014	0.937	0.977	1.018	0.986
Iceland	1.036	1.016	0.960	0.988	1.000
Ireland	0.950	0.978	1.086	0.836	0.958
Italy	0.963	0.966	0.955	0.976	0.965
Luxembourg	0.652	0.964	1.202	4.958	1.391
Netherlands	1.074	0.847	1.230	0.766	0.962
Norway	1.006	0.965	0.977	1.003	0.988
Poland	1.019	0.927	0.930	0.968	0.960
Portugal	0.883	1.039	1.097	0.960	0.991
Slovak Republic	0.972	0.942	0.970	0.976	0.965
Slovenia	0.987	0.976	1.016	0.990	0.992
Spain	0.935	1.051	1.016	0.948	0.986
Sweden	0.978	0.961	0.965	0.996	0.975
Switzerland	0.981	1.138	0.866	0.994	0.990
Turkey	0.922	0.963	0.998	0.937	0.955
United Kingdom	0.984	1.002	1.069	1.017	1.018
Brazil	0.954	0.944	1.010	0.987	0.973
P.R. of China	0.896	0.905	0.897	0.982	0.919
India	0.864	0.848	0.932	0.984	0.905
Russian Federation	0.994	0.992	0.982	0.989	0.989
South Africa	0.956	0.974	0.956	0.980	0.966
G. Mean	0.965	0.969	0.999	1.011	0.986

4. THE EVALUATION OF TURKEY'S STATUS

The obtained results are high valuable for shaping Turkey's energy policy so this section focuses on the primary objectives of increasing energy efficiency and utilizing domestic resources. In order to assess the success of Turkey's energy and economy policies, this study provides a proper monitoring and comparative mechanism. The current situation of Turkey also reinforces the validity of the DEA scores.

In Turkey, the value of energy intensity (0.18 toe per thousand 2005 USD) and the electric power transmission

and distribution losses (15.4% of output) are significantly higher than that of the OECD countries on average in 2013. Figure 2. shows the distribution of energy intensity and consumption according to the countries. As it can be seen, BRICS countries have energy-intensive economies [2,31]. According to the Energy Efficiency Strategy Paper [38], Turkey's target is a 20% reduction of energy intensity by 2023 (0.14) compared to the values for 2011 (0.18).

Table 3. Efficiency and technological changes of the countries for the period of 2009–2013.

Countries	<i>effch</i>				<i>techch</i>			
	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013
Australia	0.877	1.025	1.033	0.941	1.076	0.939	0.947	1.060
Canada	0.908	1.003	1.025	0.934	1.064	0.963	0.946	1.033
Chile	1.052	1.041	0.949	0.915	0.962	0.936	0.951	0.981
Israel	0.956	0.961	1.201	0.727	0.958	0.940	0.963	0.975
Japan	1.001	1.294	1.142	1.021	0.960	0.945	0.979	0.964
Korea	1.017	1.036	1.012	1.020	0.968	0.941	0.950	0.974
New Zealand	0.923	1.071	1.134	0.972	1.034	0.920	0.947	1.007
United States	0.906	1.021	1.010	0.953	1.069	0.953	0.946	1.045
Austria	1.043	1.046	0.987	1.048	0.953	0.934	0.957	0.979
Belgium	0.998	0.954	1.040	1.031	1.002	0.920	0.932	0.983
Czech Republic	0.937	1.078	1.023	1.037	1.055	0.898	0.942	1.005
Denmark	0.955	1.044	1.056	1.019	1.054	0.920	0.959	0.988
Estonia	1.000	1.000	1.000	1.000	1.027	0.921	0.924	1.044
Finland	1.024	1.013	1.023	0.974	1.012	0.926	0.957	0.991
France	0.999	1.043	1.065	0.999	0.967	0.923	0.937	0.986
Germany	1.013	1.034	1.051	1.039	0.964	0.929	0.947	0.981
Greece	1.094	1.137	1.123	1.049	0.963	0.931	0.947	0.983
Hungary	1.013	1.026	1.056	1.016	1.002	0.913	0.925	1.003
Iceland	1.000	1.000	1.000	1.000	1.036	1.016	0.960	0.988
Ireland	0.995	1.028	1.112	0.863	0.954	0.951	0.976	0.969
Italy	1.006	1.023	0.991	1.002	0.957	0.944	0.964	0.975
Luxembourg	1.000	1.000	1.000	1.000	0.652	0.964	1.202	4.958
Netherlands	0.984	0.933	1.320	0.720	1.091	0.908	0.932	1.064
Norway	0.979	1.018	1.002	1.016	1.027	0.948	0.975	0.987
Poland	0.935	1.029	1.027	0.888	1.090	0.901	0.906	1.090
Portugal	0.921	1.106	1.141	0.984	0.959	0.940	0.961	0.976
Slovak Republic	1.009	1.014	1.027	0.993	0.964	0.929	0.945	0.983
Slovenia	0.985	1.069	1.089	1.006	1.002	0.913	0.933	0.984
Spain	0.973	1.122	1.063	0.969	0.961	0.937	0.956	0.978
Sweden	0.985	1.035	0.993	0.995	0.994	0.928	0.972	1.000
Switzerland	1.014	1.203	0.888	1.015	0.968	0.946	0.976	0.979
Turkey	0.972	1.027	1.044	0.959	0.949	0.938	0.956	0.977
United Kingdom	0.938	1.099	1.142	1.027	1.050	0.912	0.936	0.990
Brazil	0.875	1.047	1.116	0.905	1.090	0.901	0.906	1.090
P. R.of China	0.821	1.004	0.991	0.901	1.090	0.901	0.906	1.090
India	0.792	0.941	1.029	0.903	1.090	0.901	0.906	1.090
Russian Federation	0.906	1.105	1.071	0.907	1.096	0.897	0.918	1.090
South Africa	0.877	1.081	1.056	0.899	1.090	0.901	0.906	1.090
G.Mean	0.963	1.043	1.051	0.961	1.002	0.929	0.950	1.052

The energy import has direct or indirect effects on increasing an economy's GDP and trade balance [37]. In Turkey, the sharp increase in energy demand by reasons of development and population growth have been continue recently. The demand is also expected to be an increase in the following years. However, this increase brings with the problem of import dependency especially in fossil fuels. While the economy is to continue its fast growth, the issue of energy dependence is bound to be more acute in the near future as shown in Figure 3 [39]. To overcome the foreseeable risks of energy supply and external shocks to the economy, the government is currently pursuing a number of policies which mainly are

the maximum usage of domestic sources and energy efficiency applications [40].

As can be seen in Table 4 in detail, Turkey has substantial amount of renewable energy capacity among EU members, so this source can meet the energy demand of Turkey in the future. Turkey endeavors to be a full-member of the EU so the priorities and goals of the EU also affect Turkey. According to the directive 2009/28/EC of the European parliament, ambitious targets are determined for all member states, such that the EU will reach a 20% share of energy from renewable sources by 2020 and a 10% share of renewable energy specifically in the transport sector. It also establishes the content for national renewable energy action plans and

the methodology for their preparation. In this regard, the Turkish Ministry of Energy and Natural Resources (MENR) has prepared a national “Renewable Energy Action Plan” for the period 2013–2023. Substantial amount of electricity is generated from fossil fuels, especially from imported natural gas, and this means increasing trade deficit and lack of source diversity. According to the Action Plan, Turkey's target is 30% of total electricity production from renewable sources and the objective is a maximum share of natural gas in the production mix, which is 30% by 2023 [41].

Table 4. Turkey’s renewable energy installed power and potential.

Source type	Electricity Install Power (MW, End of 2016)	2023 Target (MW)	Total Potential (MW)
Hydrolic	26515	34000	36000
Wind	5387	20000	48000
Solar	792	5000	50000
Geothermal	775	1000	2000
Biomass	465	1000	2000

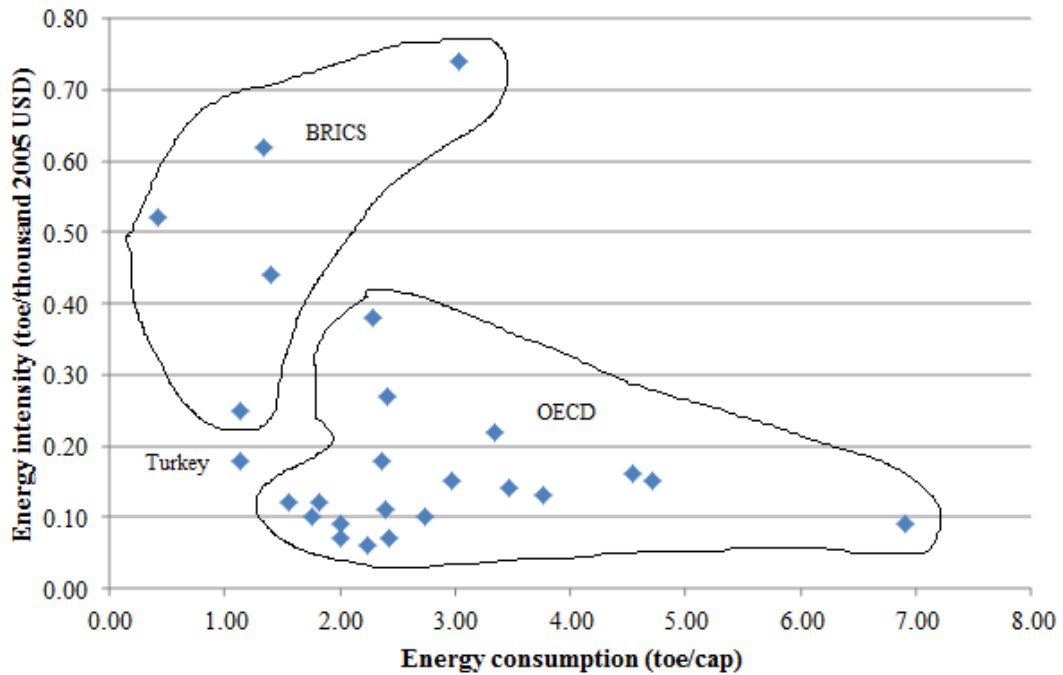


Figure 2. Energy consumption and energy intensity in some countries (in 2013).

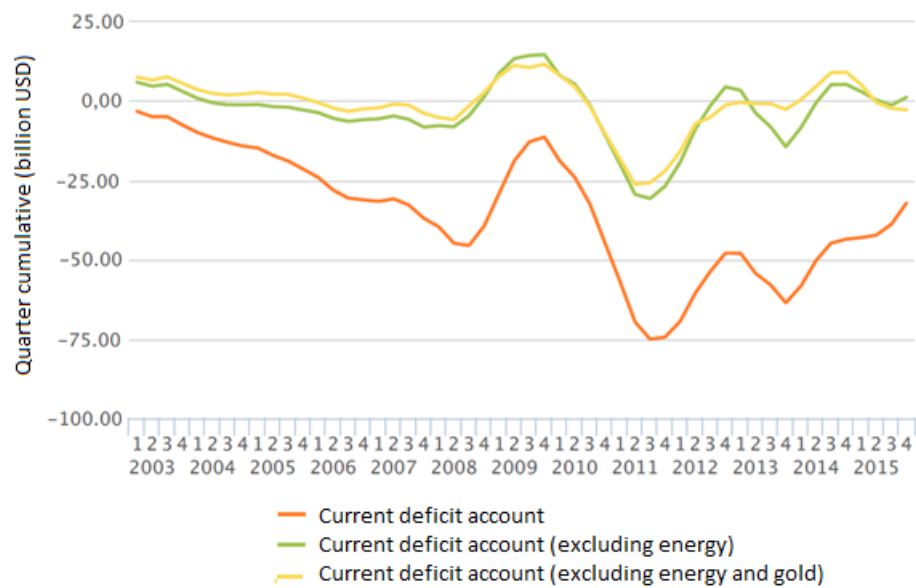


Figure 3. The current deficit account of Turkey by year.

5. CONCLUSIONS AND POLICY RECOMMENDATIONS

DEA provides insights into the reasons for the sources of inefficiency to help the design of national policies and MPI gives a good perspective for evaluating efforts of countries in a time horizon as well. This paper applies DEA combined with MPI in order to benchmark OECD and BRICS countries by multiple criteria and determines Turkey's situation over the period 2009–2013. To analyze the efficiencies, DEA models including BCC, CCR and super-efficiency approaches are used. On the basis of DEA analysis results, Luxembourg, Iceland and Estonia may be considered as super-efficient DMUs from the OECD group. Considering the SE scores, it can be said that the countries have operating problems in optimum scale. The total productivity growth of Turkey and the countries worsen with values of 4.5% and 1.4% on average, respectively. It can also be seen that the efficiency scores of the OECD countries are higher on average than the BRICS countries, but Turkey is inefficient country with score of 0.048 as an OECD member. As a result, the developments with economic cooperation including greater energy efficiency promote the OECD economies [42]. On the other hand, the BRICS governments should put the energy-intensive industries as the key industries and encourage a more effective use of the energy by the development of new technology. The existing problem of the current account deficit in the country is largely owing to energy import needs in Turkey. Considering large amount of energy import,

Turkey should take into account analysis results and evaluate its resource endowments. Besides, the role of energy efficiency will be very important for Turkey in the near future to overcome the issues of import dependence in energy and making its economy more competitive. The current government projections indicate a rapid increase in the energy demand of the country in the next years. In this respect, the results achieved are highly valuable to determine the roadmap including foreign policy for Turkey. On the other hand, Turkey is a fast developing country and a regional power in the Middle East and North Africa (MENA) region. It is surrounded by the Central Asia, Middle East and Europe, that is to say, this area is very important both geographical location and economic activities. Turkey is also an important candidate to be the “Energy Corridor” for transmission of the natural gas resources and rich oil of Middle East, Asian countries and Caspian Area to the Mediterranean countries and to the demand centers of the West side. As a result, energy performance also depend on energy diplomacy so the influence of these factors on the empirical results should be evaluated carefully to increase the performance. In Figure 4, a flowchart has been proposed to increase the energy performance of Turkey within the scope of this study. However, this study may enable governments to review their energy policies by considering simultaneously inputs and outputs in the evaluation of targets with the purpose of increasing efficiency.

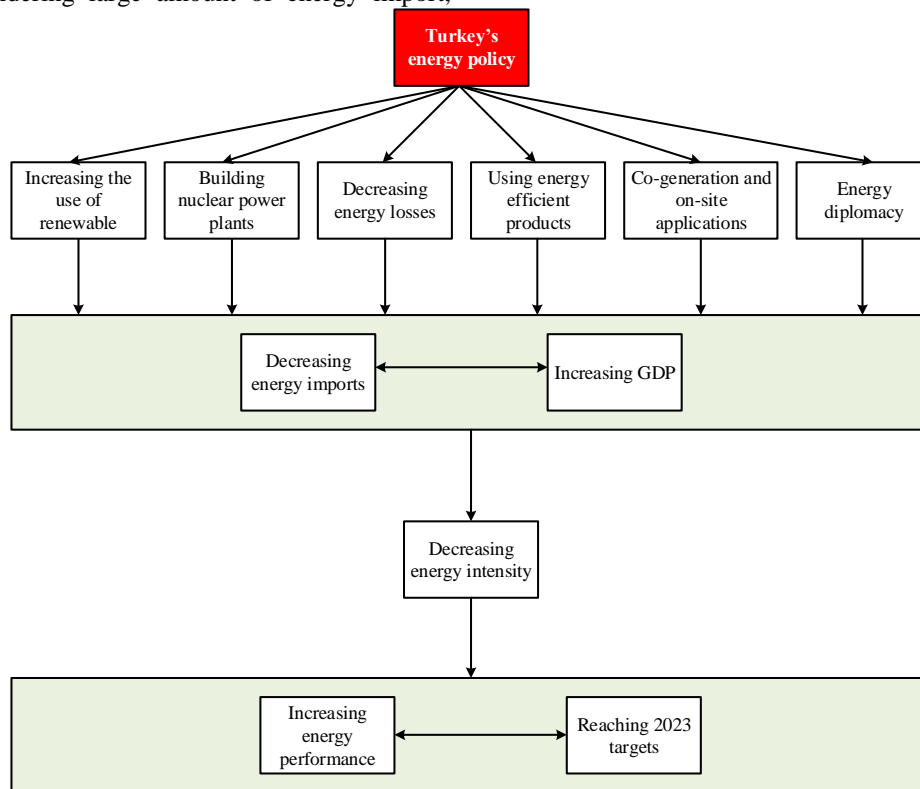


Figure 4. The flowchart for fundamental planning criteria for energy efficiency

ACKNOWLEDGEMENT

The authors gratefully acknowledge to anonymous referees for their valuable contributions.

REFERENCES

- [1] Makridou, G., Andriosopoulos, K., Doumpos, M. and Zopounidis, C., “Measuring the efficiency of energy-intensive industries across European countries”, *Energy Policy*, 88: 573–583 (2016)
- [2] IEA, 2015b. Available from: <http://data.iea.org/> accessed: 07.07.2015.
- [3] IEA, 2015a. *Energy Balances of OECD Countries*, 2015 edition.
- [4] Sözen, A., Alp, İ. and İskender, Ü., “An Evaluation of Turkey's Energy Dependency” *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 9:4, 398–412 (2014)
- [5] Republic of Turkey MENR, “Department of Nuclear Energy Project Implementation, Nuclear Power Plants and Turkey”, Publication No.2 (2015)
- [6] Chang, M.-C., “Energy intensity, target level of energy intensity, and room for improvement in energy intensity: An application to the study of regions in the EU”, *Energy Policy*, 67: 648–655 (2014)
- [7] Zhou, P., Ang, B.W. and Poh, K.L., “A survey of data envelopment analysis in energy and environmental studies”, *European Journal of Operational Research*, 189: 1–18, (2008)
- [8] Hu, J.-L. and Wang, S.C., “Total-factor energy efficiency of regions in China”, *Energy Policy*, 34: 3206–3217, (2006)
- [9] Hu, J.-L. and Kao, C.H., “Efficient energy-saving targets for APEC economies”, *Energy Policy*, 35: 373–382, (2007)
- [10] Mukherjee, K., “Energy use efficiency in U.S. manufacturing: a nonparametric analysis”, *Energy Economy*, 30: 76–96, (2008)
- [11] Fang, H., Wu, J. and Zeng, C., “Comparative study on efficiency performance of listed coal mining companies in China and the US”, *Energy Policy*, 37: 5140–5148, (2009)
- [12] Oggioni, G., Riccardi, R. and Toninelli, R., “Eco-efficiency of the World cement in dustury: a data envelopment analysis”, *Energy Policy*, 39: 2842–2854, (2011)
- [13] Blomberg, J., Henriksson, E., Lundmark, R., “Energy efficiency and policy in Swedish pulp and paper mills:a data envelopment analysis approach”, *Energy Policy*, 42: 569–579, (2012)
- [14] Sueyoshi, T. and Goto, M., “Efficiency-based rank assessment for electric power industry: a combined use of Data Envelopment Analysis(DEA) and DEA Discriminant Analysis (DA)”, *Energy Economy*, 34(3): 634–644, (2012)
- [15] Broeren, M.L.M., Saygin, D. and Patel, M.K., “Forecasting global developments in the basic chemical industry for environmental policy analysis”, *Energy Policy*, 64: 273–287, (2014)
- [16] Zhou, G., Chung, W. and Zhang, Y., “Measuring energy efficiency performance of China's transport sector: a data envelopment analysis approach”, *Expert Syst. Appl.*, 41(2): 709–722, (2014)
- [17] Zhang, X.-P., Cheng, X.-M., Yuan, J.-H. and Gao, X.-J., “Total-factor energy efficiency in developing countries”, *Energy Policy*, 39: 644–650, (2011)
- [18] Song, M.-L., Zhang, L.-L., Liu, W. and Fisher, R., “Bootstrap-DEA analysis of BRICS' energy efficiency based on small sample data”, *Appl. Energy*, 112: 1049–1055, (2013)
- [19] Sözen, A., Alp, İ. and Kazancıoğlu, Ş., “Turkey's Performance of Sectoral Energy Consumption”, *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 8:1, 94–105, (2013)
- [20] Menegaki, A.N., “Growth and renewable energy in Europe: benchmarking with data envelopment analysis”, *Renew. Energy*, 60: 363–369, (2013)
- [21] Xie, B.-C., Shang, L.-F., Yang, S.-B. and Yi, B.-W., “Dynamic environmental efficiency evaluation of electric power industries: evidence from OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) and BRIC (Brazil, Russia, India and China) countries”, *Energy*, 74: 147–157, (2014)
- [22] Woo, C., Chung Y., Chun, D., Seo, H. and Hong, S., “The static and dynamic environmental efficiency of renewable energy A Malmquist index analysis of OECD countries”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47: 367–376, (2015)
- [23] Camiato, F.C., Moralles, H.F., Mariano E.B. and Rebelatto D.A.N., “Energy efficiency analysis of G7 and BRICS considering total-factor structure”, *Journal of Cleaner Production*, Article in Press, 1–11, (2016)
- [24] Charnes, A., Cooper, W.W. and Rhodes, E., “Measuring the efficiency of decision making units”, *European Journal of Operational Research*, 2: 429–444, (1978)
- [25] Banker, R.D., Charnes, A. and Cooper, W.W., “Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis”, *Management Science*, 30: 1078–1092, (1984)
- [26] Andersen, P. and Petersen, N.C., 1993., “A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis”, *Management Science*, 39: 1261–1264, (1993)
- [27] Färe, R., Grosskopf, S., Lindgren, B. and Roos, P., “Productivity Developments in Swedish Hospitals: A Malmquist Output Index Approach”, Department of Economics Discussion Paper 89–3, Southern Illinois University, Carbondale, (1989)
- [28] Caves, D.W., Christensen, L.R., and Diewert, W.E., “The economic theory of index numbers and the measurement of input, output and productivity”, *Econometrica*, 50: 1393–1414, (1982)
- [29] Malmquist, S., “Index numbers and indifference surfaces”, *Trabajos de Estadística*, 4: 209–242, (1953)
- [30] Färe, R., Grosskopf, S., Lindgren, B. and Roos, P., “Productivity changes in Swedish pharmacies 1980–1989: a non-parametric Malmquist approach”, *The Journal of Productivity Analysis*, 3: 85–101, (1992)

- [31] WB, 2015. Available from: <http://databank.worldbank.org/data/home.aspx> accessed: 08.08.2015.
- [32] Coelli, T.J., "A Guide to DEAP Version 2.1: A Data Envelopment Analysis (Computer) Program", CEPA Working Paper 96/08, Department of Econometrics, University of New England, Armidale NSW Australia , (1996)
- [33] Scheel, H., "EMS Version 1.3: Efficiency Measurement System User's Manual" (2000) Available from: <http://www.holger-scheel.de/ems/> accessed: 02.02.2016.
- [34] Jury, C., Rugani, B., Hild, P., May, M. and Benetto, E., "Analysis of complementary methodologies to assess the environmental impact of Luxembourg's net consumption", *Environmental Science&Policy*, 27: 68–80, (2013)
- [35] Ministry of Economy, Luxembourg, "Third National Energy Efficiency Action Plan for Luxembourg", National Report, (2014)
- [36] Färe, R., Grosskopf, S., Norris, M. and Zhang, Z., "Productivity Growth, Technical Progress, and Efficiency Changes in Industrialised Countries", *The American Economic Review*, 84(1): 66–83, (1994)
- [37] Chien, T. and Hu, J-L., "Renewable energy and macroeconomic efficiency of OECD and non-OECD economies", *Energy Policy*, 35: 3606–3615, (2007)
- [38] Energy Efficiency Strategy Paper 2012-2023, Official Paper No:28215 (2012)
- [39] Republic of Turkey TCB (Turkish Central Bank), (2016)
- [40] Energy Efficiency Law, Official Paper No:26510 (2007)
- [41] Republic of Turkey MENR., "National Renewable Energy Action Plan For Turkey" (2014)
- [42] European Commission (EC), "Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council on energy efficiency", Official Journal of the European Union (EU), (2012)



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



Hava akışkanlı güneş kolektöründe ısı transferi iyileştirmesine etki eden parametrelerin taguchi metodu ile optimizasyonu

Optimization of the parameters affecting the heat transfer enhancement on the solar air collector with taguchi method

Yazar(lar) (Author(s)): İsmail ATA¹, Adem ACIR²

ORCID¹: 0000-0003-0412-8397

ORCID²: 0000-0002-9856-3623

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Ata İ., Acır A, “Hava akışkanlı güneş kolektöründe ısı transferi iyileştirmesine etki eden parametrelerin taguchi metodu ile optimizasyonu”, *Politeknik Dergisi*, 23(2): 527-535, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.525884

Hava Akışkanlı Güneş Kollektöründe Isı Transferi İyileştirmesine Etki Eden Parametrelerin Taguchi Metodu ile Optimizasyonu

Araştırma Makalesi / Research Article

İsmail ATA^{1*}, Adem ACIR²

¹Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uzay Müh. Bölümü, Erciyes Üniversitesi, Türkiye

²Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 12.02.2019 ; Kabul/Accepted : 21.06.2019)

ÖZ

Bu çalışmada, yutucu yüzeyi üzerinde farklı geometriye sahip kanatçıklar bulunan hava akışkanlı güneş kolektörlerinde ısı transferine (Nusselt sayısı) etki eden parametrelerin optimizasyonu için Taguchi metodu kullanılmıştır. Deneysel parametre olarak dört farklı Reynolds sayısı (Re=3150, 3800, 4400 ve 5000), iki farklı kanatçık tipi (Tip-I ve Tip-II) ve iki farklı kolektör eğim açısı ($\alpha=25^\circ$ ve 40°) belirlenmiştir. Üç farklı deneysel parametresi olan Reynolds sayısı, kolektör eğim açısı ve yutucu yüzey kanatçık tipinin kolektörün ısı transferine olan etkileri incelenmiştir. Taguchi metodu kullanılarak elde edilen $L_8 (4^1 \times 2^2)$ dikey deneysel dizilimi ile ısı transferinin maksimum olması için gerekli olan optimum deneysel dizilimi tespit edilmesi amaçlanmıştır. En yüksek Nu sayısı değeri için optimum deneysel dizilimi $A_4 B_2 C_1$ (Re=5000, Tip-II, $\alpha=25^\circ$) olarak elde edilmiştir. Her bir deneysel parametresinin ısı transfer miktarına olan etkilerinin analizi için ANOVA yöntemi kullanılmıştır. Kullanılan deneysel parametrelerinden deneysel sonucuna en yüksek etki eden parametre %73,77 ile Re sayısı olarak bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Güneş kolektörü, ısı transferi, taguchi metodu, ANOVA.

Optimization of the Parameters Affecting the Heat Transfer Enhancement on the Solar Air Collector with Taguchi Method

ABSTRACT

In this study, Taguchi method was used to optimize the parameters that are related to the heat transfer (Nusselt number) of solar air collectors having different geometry fins on the absorber surface. Four different Reynolds numbers (Re=3150, 3800, 4400 ve 5000), two different fin types (Tip-I and Tip-II) and two different tilt angles ($\alpha=25^\circ$ and 40°) were determined as test parameters. The effects of Reynolds number, collector tilt angle, and absorber surface flap type on heat transfer of the collector were investigated. The $L_8 (4^1 \times 2^2)$ orthogonal test sequence obtained by using the Taguchi method was aimed to determine the optimum experimental sequence required for maximum heat transfer. The optimum experimental sequence for the highest Nu number was obtained as $A_4 B_2 C_1$ (Re = 5000, Type-II, $\alpha = 25^\circ$). ANOVA method was used to analyze the effects of each experimental parameter on the heat transfer amount. The most effective parameter was Re number with 73.77% of the experimental results

Keywords: Solar air heater, heat transfer, taguchi method, ANOVA.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji, günlük yaşantımızı sürdürmek için gerekli olan en temel ihtiyaçlarımızdan bir tanesidir. İnsanoğlunun yaşam standartları arttıkça enerji tüketimi de günden güne artış göstermektedir. Günümüzde en yaygın olarak kullanılan enerji kaynağı fosil yakıtlardır ve giderek azalmaktadır. Fosil tabanlı yakıtlardaki azalma ve buna ters orantılı olarak enerji ihtiyacındaki artış alternatif enerji kaynaklarının aranmasına yol açmıştır. Alternatif olarak kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları, güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, biokütle enerjisi, jeotermal enerji, okyanus ve gelgit enerjisi vb. gibi sayılabilir.

Güneş enerjisi bu alternatif enerji kaynakları içerisinde en büyük potansiyele sahip olan ve en umut verici olanıdır [1]. Güneş enerjisi birçok alanda kullanılmaktadır. Bu alanlardan bir tanesi de çalışma akışkanı olarak havanın kullanıldığı ve güneşten aldığı yararlı ısıyı havaya aktaran kolektör uygulamalarıdır. Hava akışkanlı güneş kolektörleri mahal ısıtma, meyve sebze kurutma ve benzeri alanlarda büyük avantajlar sağlarken ısı verimlerinin düşük olması ise en büyük dezavantajlarıdır. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden biri de havanın ısıtıldığı alandaki temas süresini uzatan yutucu yüzey üzerinde kanatçık kullanımınıdır [2]. Literatürde hava akışkanlı güneş kolektörlerinin ısı transfer miktarlarını arttırmak için yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Lin ve Ma çalışmalarında, bina ısıtması için

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : ismailata@erciyes.edu.tr

kullanılan, faz değiştirici malzeme ile desteklenmiş fotovoltaik termal kollektörün CTPE (termal performans geliştirme katsayısı) maksimize eden parametreleri Taguchi-Fibonacci araştırma metodunu kullanarak optimize etmişlerdir. Parametre olarak PVT hava kütleli debisi, faz değiştirici malzeme tipi, faz değiştirici malzeme kalınlığı ve duvar izolasyonunu belirlemişlerdir. Her bir parametrenin CTPE katsayısına etkisini varyans analizi yaparak hesaplamışlardır. Yapılan optimizasyon sonucu elde edilen değer, optimizasyon yapılmayan sonuçlara göre daha yüksek CTPE değerine sahip olduğunu göstermişlerdir [3]. Kuo ve ark., düz tip bir güneş kollektörünün performansını etkileyen parametrelerin optimizasyonu için Taguchi dikey deney dizilimini kullanmışlardır. Güneş kollektörünün tüp malzemesi, yutucu yüzey malzemesi, tüp sayısı, tüp çapı, yutucu film tipi ve alt ısı yalıtım malzemesi kalınlığını deney parametresi olarak belirlemişlerdir. Deney parametrelerinin etki miktarları ANOVA analiz yöntemini kullanarak tespit etmişlerdir. Elde ettikleri optimum deney dizilimini test etmek için üç adet doğrulama deneyi yapmışlar ve %95 güven aralığında deney sonuçlarının uyum içinde olduğunu göstermişlerdir [4]. Kotcioğlu ve ark., dikdörtgen kesitli akış kanalına sahip bir ısı değiştiricide ısı transferi ve basınç düşümü değerlerine etki eden tasarım parametrelerini Taguchi metodunu kullanarak optimize etmişlerdir. Akış kanalı içerisine değişik geometrilere kanatçıklar yerleştirmişler ve $L_{25} (5^6)$ dikey deney dizilimini kullanarak altı farklı parametrenin beş farklı seviyesi için deney sonuçlarını incelemişlerdir. Deney sonuçları incelendiğinde kullanılan metodun uygun olduğu görülmüştür [5]. Yadav ve ark. deneysel çalışmalarında, bir yüzeyi sabit ısı akısı ile ısıtılmış diğer üç yüzeyi yalıtılmış şekilde tasarlanan dikdörtgen kesitli bir kanalda farklı tasarım parametrelerinin akış kanalından geçen türbülanslı havanın ısı transferi ve sürtünme faktörü değerlerine olan etkilerini incelemişlerdir. Kanal içerisinde farklı parametrelere sahip kanatçıklar kullanılması ile elde edilen ısı transferi ve sürtünme faktörü değerlerinin içerisi boş olan düz kanala göre 2,89 ve 2,93 kat daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir [6]. Acir ve Ata, yan yana yerleştirilmiş bakır borulardan oluşan yutucu yüzeye sahip hava akışkanlı güneş kollektörü içerisine dairesel şekilli türbülötörler yerleştirerek ısı transferi, sürtünme faktörü ve termal performans faktörü değerlerine olan etkilerini incelemişlerdir. İçerisinde türbülötör bulunan kollektörlerden elde ettikleri deneysel sonuçları içi boş düz tip kollektör ile karşılaştırmışlardır. Kollektör içerisinde türbülötör kullanılması ile içi boş düz kollektöre göre ısı transferi değerinde %416 iyileştirme elde etmişlerdir [7]. Chamoli ve ark. Taguchi Gri ilişkisel analiz (GRA) yöntemini kullanarak bir ısı değiştiricisinde kullanılan dairesel şekilli türbülötörlerin farklı geometrik özelliklerinin ve farklı deney parametrelerinin performansa olan etkilerini optimize etmişlerdir. Faktörel dizayn yöntemi ile elde edilen optimum dizilimi doğrulamak için deneysel bir çalışma

yapmışlardır. Çalışmaları ile bir ısı değiştiricinin performansının Taguchi-GRA tekniği ile optimize edilebileceğini göstermişlerdir [8]. Bopche ve Tandale, bir hava ısıtıcı kanal içerisinde kullanılan yutucu yüzeye, özel olarak tasarlanmış U şekilli türbülötörler yerleştirerek yapay pürüzlülüğün ısı transferine ve sürtünme faktörüne olan etkilerini incelemişlerdir. Kanalda kullanılan üç duvarı yalıtılmış pürüzlü yüzeye ise hava akışkanlı güneş kollektörlerine benzer sınır şartlarında ısı akısı uygulamışlardır. Farklı deney parametreleri için deneyleri tekrarlayarak yutucu yüzeyinde herhangi bir pürüz bulunmayan düz yüzeyli deney düzeneği sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Üzerinde pürüzler bulunan sistemden elde edilen ısı transferi değerlerinin düz yüzeyli sisteme göre 2,82 kat daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir [9]. Celik ve ark. eş merkezli bir ısı eşanjör sisteminde oluklu türbülötörler kullanmışlar ve deney parametrelerinin ısı transferi ve basınç düşümüne olan etkilerini Taguchi dikey deney tasarımı kullanarak incelemişlerdir. Kullanılan oluklu bant şeklindeki türbülötörlerin kalınlık, genişlik, adım miktarı ile Reynolds sayısı değerlerini deney parametresi olarak belirlemişlerdir. ANOVA analiz yöntemi ile her bir parametrenin deney sonuçlarına olan etki miktarlarını belirlemişlerdir. Isı transferini en çok etkileyen parametrenin Reynolds sayısı olduğunu ve basınç düşümünü en çok etkileyen parametrenin ise türbülötör kalınlığı olduğunu göstermişlerdir [10]. Ansari ve Bazargan çalışmalarında, bir hava ısıtıcısı yutucu yüzeyi üzerine tekrarlanan engeller yerleştirilmesinin ısıtıcının termal performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Ampirik bağıntıları kullanarak optimum deney parametre dizilimini tespit etmişlerdir. Belirlenen dizilimin geçerliliğini değerlendirmek için deneysel sistemlerini tasarlamışlar ve sonuçların uyum içinde olduğunu göstermişlerdir. Düz plakalı sisteme göre engelli olan sistemden elde edilen termal verimleri %9 daha büyük bulmuşlardır [11]. Acir ve ark. deneysel çalışmalarında, hava akışkanlı bir güneş kollektörü içerisinde kullanılan türbülötörlerin ısı verime olan etkilerini incelemişlerdir. L_9 dikey deney dizilimini kullanarak oluşturdukları deney tasarımı çıktılarını Gri ilişkisel analiz yöntemi ile optimize etmişlerdir. Her bir deney parametresinin sonuçlara etkisini incelemek için ANOVA yöntemini kullanmışlardır [12]. Chamoli deneysel çalışmasında, dikdörtgen kesitli bir akış kanalında kullanılan V şeklindeki delikli engellere ait değişkenlerin ısı transferi ve basınç düşümüne etkilerini Taguchi yöntemini kullanarak optimize etmiştir. Dört farklı değişkenin dört farklı seviyesi için L_{16} dikey deney dizilimini kullanmıştır. Isı transferi için optimum deney dizilimini $A_2B_2C_1D_4$ olarak bulurken basınç düşümü için ise $A_4B_1C_4D_3$ olarak elde etmiştir [13]. Sahin ve Demir, kanal içerisine yerleştirilen kanatçıkların ısı transferi ve basınç düşümüne olan etkilerini incelemişlerdir. Kanal içerisinde kanatçıklar kullanılmasıyla ısı transferine katkı sağladığını göstermişlerdir. Üç farklı parametrenin üç seviyesinin kullanıldığı L_9 dikey deney dizilimini kullanarak optimum deney parametrelerini tespit

etmişlerdir [14]. Sharma ve Kalamkar bir hava ısıtıcısı içerisine yerleştirilen farklı şekillerdeki kanatçıkların ısıtıcı performansına olan etkilerini Reynolds sayısının 4000 ile 16000 arasındaki aralığında deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal değerlendirme için ANSYS Fluent™ programında k-ε türbülans modelini kullanmışlardır. Çalışmaları sonucunda deneysel sonuçlar ile sayısal sonuçların birbiri ile uyum içinde olduğunu göstermişlerdir. Her iki çalışmada da kanatçık kullanılmasının ısıtıcının performansını arttırdığını tespit etmişlerdir [15]. Pandey ve ark. yutucu yüzeyi yay şeklindeki boşluklar ile pürüzlendirilmiş bir dikdörtgen kesitli kanaldaki ısı transferi ve sürtünme faktörü değerlerini incelemişlerdir. Yay şekilli pürüzlülük elemanının farklı boyutsuz özellikleri ve Reynolds sayısının yedi değeri için deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Düz kanala göre pürüzlendirilmiş kanaldaki ısı transferi ve sürtünme faktörü değerlerinin daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir [16].

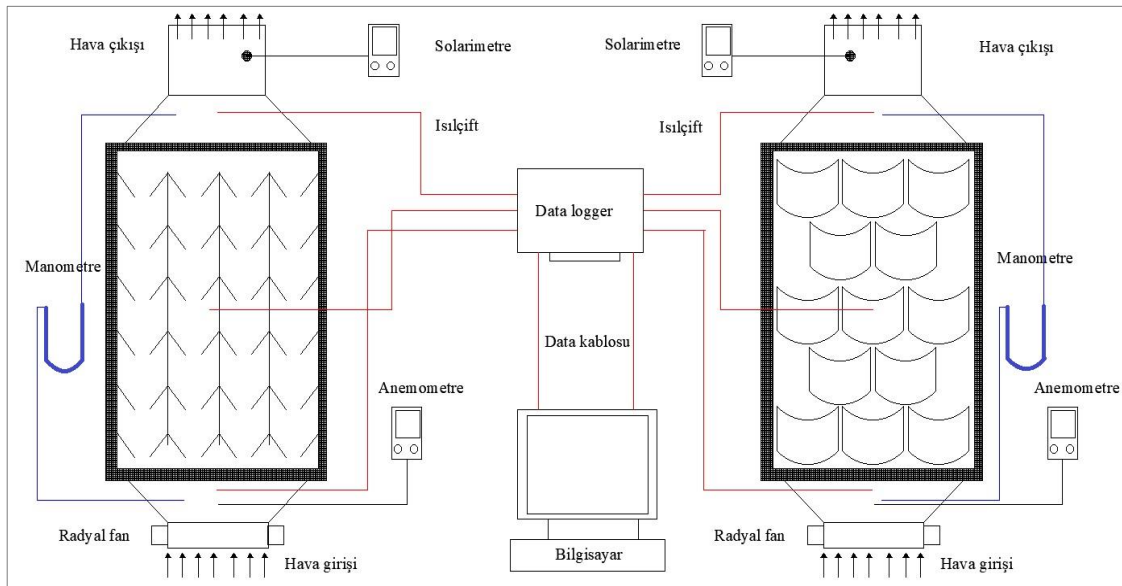
Literatürde hava akışkanlı güneş kollektörlerinde ve ısı değiştirici çeşitlerinde ısı transferinin artırılması için birçok yöntemden bahsedilmektedir. Yutucu yüzey üzerine kanatçıklar yerleştirilmesi bu yöntemlerden bir tanesidir. Çalışmalarda genellikle bütün deney koşulların için deneyler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar irdelenmiştir.

transferine olan etki miktarları ANOVA yöntemi kullanılarak tespit edilmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

2.1. Deneysel Sistem (Experimental Set-up)

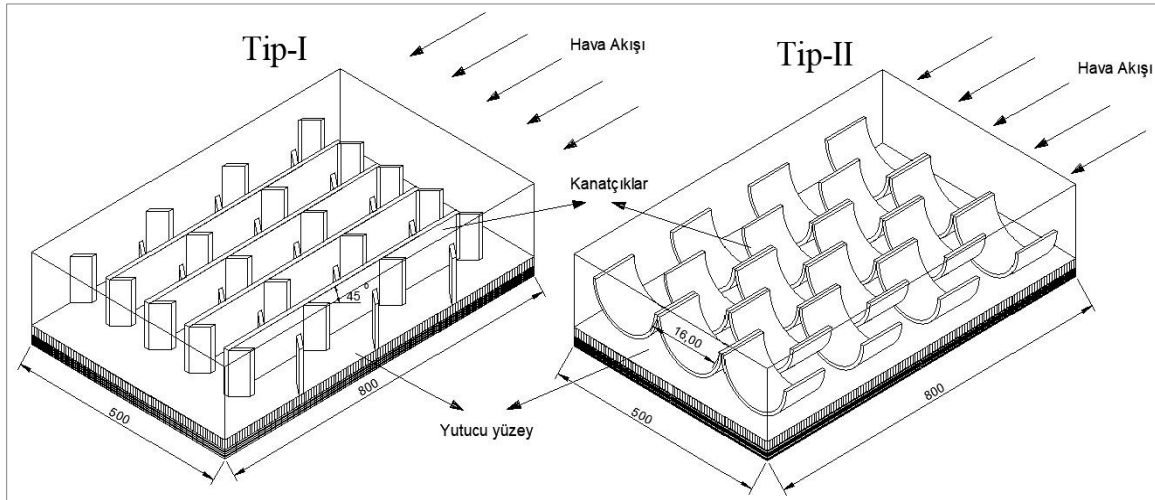
Farklı deney parametrelerinin ısı transferine etkileri araştırmak amacıyla iki farklı yutucu yüzeye sahip hava akışkanlı güneş kollektörü dizayn edilmiştir. Kollektör dış kasası hafif olması ve güneşten gelen ışığı yansıtması amaçlandığı için alüminyum malzemeden imal edilmiş ve 800 mm x 500 mm x 120 mm ebatlarındadır. Kollektörün yan yüzeylerinde ve yutucu yüzeyin altında yalıtım malzemesi olarak 20 mm kalınlığında polistiren sert köpük kullanılmıştır. Bu sayede kollektör içerisindeki havanın ısı kayıpları minimize edilmesi ve dış ortamdan oluşabilecek etkilerin azaltılması amaçlanmıştır. Güneşten gelen ışımın yutucu yüzeye geçişi ve yutucu yüzeyden geri yansımaları önlemesi için geçirgen örtü olarak 3 mm kalınlığında normal pencere camı kullanılmıştır. Kasa malzemesi ve saydam örtü arasındaki sızdırmazlığı sağlamak için silikon conta kullanılmıştır. Deneysel sisteminin şematik görünümü Şekil 1'de verilmiştir. Kollektör yutucu yüzeyi 1,5 mm



Şekil 1. Deneysel düzeneğin şematik görünümü (Schematic view of experimental set-up)

Bu çalışmada ise Taguchi metodu kullanılarak oluşturulan L_8 dikey deney dizilimi sayesinde normalde gerekli olan 16 deney yerine 8 adet deney ile sonuçların optimize edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla yeni tasarlanan yutucu yüzeyi üzerinde iki farklı tip kanatçık yapısı bulunan ve iki farklı eğim açısına sahip kollektörler kullanılmıştır. Reynolds sayısının dört farklı değeri, iki farklı kanatçık tipi ve iki farklı kollektör eğim açısı deney parametreleri olarak belirlenmiş ve bu parametrelerin ısı transferine (Nu) olan etkileri araştırılmıştır. Her bir parametrenin kollektörlerdeki ısı

kalınlığında bakır malzemeden imal ettirilmiştir. Bakır yutucu yüzey üzerinde iki farklı kanatçık tipi (Tip-I ve Tip-II) kullanılmıştır. Tip-I kanatçıklar akış yönüne 45° açı ile engel oluşturacak şekilde yerleştirilmiş ve 1,5 mm kalınlığında bakır malzemeden imal edilmiştir. Kanatçıklar, 10 mm eninde ve 20 mm yüksekliğinde imal edilmiş ve belirli aralıklar ile yutucu yüzey üzerine yerleştirilmiştir. Tip-II kanatçıklar ise 160 mm çapında yarım silindirik şeklinde 1,5 mm kalınlığında bakır malzemeden imal edilmiştir. Yutucu yüzeyler üzerindeki kanatçıkların şematik görünümleri Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. Yutucu yüzeyler üzerindeki kanatçık yapıları (Fin structures on absorber surfaces)

Güneşten gelen yararlı ısıyı daha iyi absorbe edebilmesi ve çalışma akışkanı olan havaya aktarabilmesi için yutucu yüzey siyah mat boya ile boyanmıştır. Akış kanalı üzerinde farklı geometrilere kanatçıklar kullanılarak akışkanın daha çok yüzey ile temas etmesi ve bu sayede yutucu yüzeyden akışkana olan ısı transferinin artırılması amaçlanmaktadır. Kollektör yutucu yüzeylerinin görünümü Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 3. Yutucu yüzeylerin görünümü Tip-I ve Tip-II (Appearance of absorber surface Type-I and Type-II)

Hava akışkanlı güneş kollektörü güney yöne bakacak şekilde konumlandırılmış ve iki farklı eğim açısı için ($\alpha=25^\circ$ ve $\alpha=40^\circ$) deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney sistemi, Gazi Üniversitesi Teknoloji fakültesi yerleşkesinde kurulmuş ve deneyler güneş ışınım şiddetinin yüksek olduğu Haziran-Temmuz aylarında gerçekleştirilmiştir. Çalışma akışkanı olarak kullanılan havanın kollektörler içerisinde dört farklı hızda (0,4 m/s, 0,48 m/s, 0,56 m/s ve 0,64 m/s) akmasını sağlamak için kollektör girişinde bulunan davlumbaz üzerindeki radyal fanlar kullanılmıştır. Akışkanın hızı Cem DT-3893 termo-anemometre yardımı ile ölçülerek fanın dönüş hızı ayarlanmıştır. Kollektör giriş çıkışında bulunan basınç prizleri arasında meydana gelen basınç farkı U tipi fark basınç manometresi ile ölçülmüştür. Yutucu yüzeye gelen ışınım şiddetini ölçmek için Kimo-SL100

solarimetre kullanılmış ve gün boyunca birer saat aralıklarla güneş ışınımı değerleri kayıt edilmiştir. Akışkanın giriş, çıkış sıcaklıkları ile yutucu yüzey sıcaklıkları ve çevre sıcaklıklarını ölçmek için K tipi (NiCr-Ni) ısı çiftleri kullanılmıştır. Isıl çiftlerden gelen sıcaklık ölçüm değerleri çok kanallı dijital Data-Logger yardımı ile belirli aralıklarla kayıt altına alınmış ve bilgisayara aktarılmıştır.

2.2. Hesaplamalar (Data Processing)

Hava akışkanlı güneş kollektörleri güneşten gelen ışınımı yararlı ısıya dönüştüren bir çeşit ısı değiştiricilerdir. Güneşten gelen ışınım sonucunda güneş kollektörü tarafından kazanılan yararlı ısı (\dot{Q}_u) şu şekilde hesaplanmıştır [2, 7, 12];

$$\dot{Q}_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_c - T_g) \quad (1)$$

Güneş kollektörü tarafından kazanılan yararlı ısı, çalışma akışkanına taşınımıyla aktarılan ısıya eşittir.

$$\dot{Q}_u = h \cdot A_k \cdot (T_y - T_{ort}) \quad (2)$$

Test edilen kollektörler için ısı taşınım katsayısı şu şekilde hesaplanır [2, 5-7];

$$h = \frac{\dot{Q}_u}{A_k \cdot (T_y - T_{ort})} \quad (3)$$

Burada; T_y , yutucu yüzey sıcaklığı, T_{ort} ise akışkan olarak kullanılan havanın ortalama sıcaklığıdır ve kollektöre giriş ve çıkış sıcaklıklarının ortalaması alınarak elde edilmiştir. Havanın bütün termodinamik özellikleri ortalama sıcaklığa göre alınmıştır [2,7,12].

$$T_{ort} = (T_g + T_c)/2 \quad (4)$$

Isı taşınım katsayısı kullanılarak elde edilen ısı transfer miktarını gösteren Nusselt sayısı şu şekilde hesaplanmıştır [2, 6, 7];

$$Nu = \frac{h \cdot D_h}{k_{hava}} \quad (5)$$

Reynolds sayısı ise şu şekilde hesaplanır;

$$Re = \frac{u \cdot D}{\nu} \quad (6)$$

Deneylerde kullanılan ölçüm cihazları ve hesaplamalar sonucu elde edilen boyutsuz parametrelerin ölçüm belirsizliği tayininde Kline ve McClintock [17] tarafından geliştirilen metod kullanılmıştır. Ölçüm cihazları kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda meydana gelen ölçüm belirsizlikleri Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Ölçüm cihazları için belirsizlikler (Uncertainties for measuring devices)

Ölçüm cihazı	Belirsizlik	Birim
Isıl çiftler ile sıcaklık ölçümü	± 0,18	°C
Solarimetre ile ışınım şiddeti ölçümü	± 1,38	W/m ²
Anemometre ile akış hızı ölçümü	± 0,16	m/s
Basınç ölçer ile basınç farkı ölçümü	± 1,66	Pa

Ayrıca hesaplamalar sonucunda elde edilen boyutsuz parametreler içinde belirsizlik analizi yapılmıştır. Bu analizler yapılırken hesaplanan sonucu etkileyecek olan (ihmalller, kabuller vb.) parametreler göz önünde bulundurulmuş ve her biri hesaplama belirsizliği içerisine dahil edilmiştir. Reynolds sayıları ve Nusselt sayıları için ortalama ölçüm belirsizlikleri sırasıyla ± %9 ve ± %8 olarak tespit edilmiştir.

2.3. Taguchi Methodu (Taguchi Method)

Taguchi motodu, tasarlanan deney parametrelerini minimum sayıda deney yaparak analiz etmek için kullanılan bir tasarım yöntemidir [4, 13, 20]. Bu yöntem ile çalışma sonucunda elde edilen ölçüm sonuçları Sinyal/Gürültü (S/N) oranına dönüştürülür [20]. S/N oranı, sistemden elde edilmek istenen gerçek değer, deney tasarımı yapılırken dikkate alınmayan fakat deney sonucuna etki eden faktöre oranıdır. Burada, S sinyal faktörünü ifade ederken, N ise gürültü faktörünü ifade etmektedir ve birimi dB’dir [12, 13, 18, 19]. S/N oranı ne kadar artar ise sonuçta elde edilmek istenen ürünün kalitesi de o kadar artar. Bu sebeple sinyal değerinin artırılması ile birlikte gürültü değerinin de azaltılması amaçlanır [18-19]. Birçok S/N oranı hesaplama yöntemi mevcut iken bunlardan en yaygın olarak kullanılan üç tanesi, “En Büyük En İyi”, “En Küçük En İyi” ve “Nominal En İyi” yöntemleridir [20]. Bu çalışmada ısı transferinin maksimum olması amaçlandığı için bu hesaplama yöntemlerinden “En Büyük En İyi” olanı kullanılmıştır.

“En Büyük En İyi” S/N oranı için eşitlik;

$$S/N = -10 \left(\log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (7)$$

Burada, y_i : deney sonucu elde edilen verileri, n : deney sayısını ifade etmektedir.

2.4. Varyans Analizi (Analysis of Variance) (ANOVA)

Deney parametrelerinin optimizasyonunda çıktı değerlerini S/N oranına dönüştüren Taguchi metodu kullanılırken her bir deney parametresinin çıktı değerine ne kadar etki ettiğini tespit etmek için varyans analizi (ANOVA) kullanılır. Her bir deney parametresinin

sonuca olan yüzdelik etki miktarları (PCR) şu şekilde hesaplanır [12];

$$PCR = \left(\frac{SS_A - (V_e) \cdot (df_A)}{SS_T} \right) \cdot 100 \quad (8)$$

Burada SS_A , A parametresine ait kareler toplamı; V_e , hata varyansı; SS_T , toplam kareler toplamı; df_A ise A parametresinin serbestlik derecesidir.

Varyans analizinde parametrelerin sonuca olan etki miktarları değerlendirilirken yüzde katkı oranı (PCR) ile birlikte her bir parametreye ait F_{test} değerleri de kullanılabilir. PCR değerine benzer şekilde F_{test} değeri büyük olan parametrenin sonuca olan etki miktarı da büyüktür [12]. F_{test} şu şekilde hesaplanır;

$$F_{test} = \frac{V_A}{V_e} \quad (9)$$

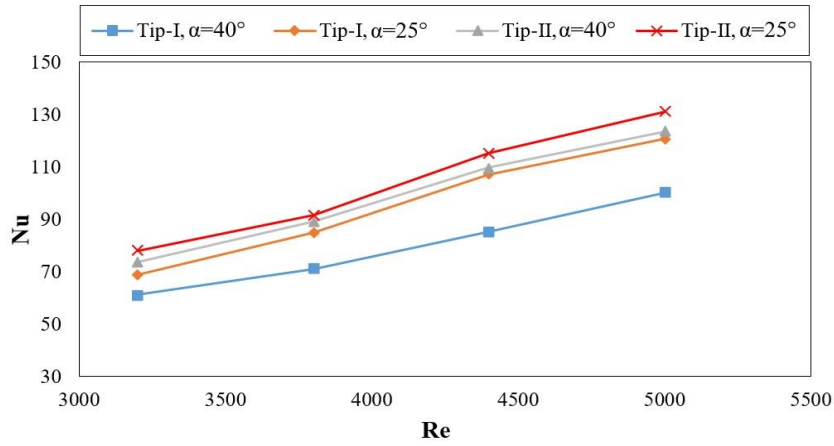
Burada V_A , A parametresinin varyansını, V_e ise, hata varyansını ifade etmektedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Yutucu yüzeyi üzerinde iki farklı tip kanatçık bulunan hava akışkanlı güneş kollektörlerinde, iki farklı eğim açısı ve dört farklı akışkan debisi için deneyler yapılmıştır. Kollektörler güneş ışınımını doğrudan alabilmesi için güney yönüne bakacak şekilde konumlandırılmış ve deneyler saat 09:00 ile 17:00 arasında birer saat aralıklarla gün boyunca sürdürülmüştür. Kollektörden elde edilen veriler kayıt altına alınmış ve kollektöre ait Nusselt sayısı değerleri Eşitlik 5 kullanılarak ışınım şiddetinin maksimum olduğu öğle saati olan 13:00 için hesaplanmıştır. Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi Şekil 4’de verilmiştir. Şekil 4 incelendiğinde, bütün deney koşulları için Re sayısının 3150 ile 5000 değeri arasındaki değişimine bağlı olarak Nu sayısı değerlerinin 61,1 ile 130,9 arasında değiştiği görülmektedir. Deneyler sonucunda en yüksek Nu değeri, Re sayısının maksimum değerinde, $\alpha=25^\circ$ eğim açısına sahip Tip-II kollektörden 130,9 olarak elde edilirken en düşük Nu değeri ise, $\alpha=40^\circ$ eğim açısına sahip Tip-I kollektörde en düşük Re sayısı için 61,1 olarak elde edilmiştir. Bütün deney tasarımlarında Re sayısının artışına bağlı olarak Nu sayısı değerleri artış göstermektedir. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen Nusselt sayısı değerlerine etki eden deney parametreleri, Reynolds sayısı, kollektör tipi ve kollektör eğim açısı olarak belirlenmiştir. Her bir deney parametresi için kullanılan semboller ile bu parametrelere ait seviyeler Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2. Deney parametreleri ve seviyeleri (Experimental parameters and levels)

Sembol	Parametreler	Seviyeler			
		1	2	3	4
A	Reynolds Sayısı (Re)	3150	3800	4400	5000
B	Kollektör Tipi	Tip-I	Tip-II	-	-
C	Eğim Açısı (α)	25°	40°	-	-



Şekil 4. Nu sayısının Re sayısı ile değişimi (Changes of Nu number with Re number)

Reynolds sayısı için dört farklı seviye belirlenirken kollektör tipi ve eğim açısı için ikişer seviye belirlenmiştir. Nusselt sayısını maksimum yapacak olan en iyi deney dizilimini elde etmek için Minitab 17 programı yardımı ile Taguchi metodu kullanılmıştır. L_8 ($4^1 \times 2^2$) dikey dizilimine sahip deney tasarımı Taguchi metodu ile oluşturulmuştur. L_8 deney dizimi sayesinde üç farklı parametre ve bu parametrelerin dört ve ikişer adet olan seviyeleri için gerekli olan 16 deney yerine 8 deney ile sonuca gidilmesi ve böylece daha az deney yaparak hem zamandan hem de maliyetten kazanım sağlanması amaçlanmıştır. Deneylerde kullanılan parametre dizilimi ve deney dizaynı Çizelge 3’de görülmektedir.

Çizelge 3. L_8 ($4^1 \times 2^2$) dikey dizilimi kullanılarak oluşturulmuş deney dizaynı (Experimental design using L_8 orthogonal array)

Deney No	A	B	C	Parametre Dizilimi
1	1	1	1	$A_1B_1C_1$
2	1	2	2	$A_1B_2C_2$
3	2	1	1	$A_2B_1C_1$
4	2	2	2	$A_2B_2C_2$
5	3	1	2	$A_3B_1C_2$
6	3	2	1	$A_3B_2C_1$
7	4	1	2	$A_4B_1C_2$
8	4	2	1	$A_4B_2C_1$

Taguchi metodu kullanılarak tasarlanan L_8 dikey dizilime karşılık gelen Nu sayısı değerleri ile Nu sayıları için Eşitlik 7 ile hesaplanmış S/N oranı değerleri Çizelge 4’de verilmiştir. Nu sayısının yüksek olması amaçlandığı için S/N oranı hesaplama yöntemleri içerisinde “En Büyük En İyi” seçeneği kullanılmıştır. Çizelge 4 incelendiğinde sekiz deney için S/N oranları hesaplandığında en düşük

S/N oranının birinci deney dizilimi olan $A_1B_1C_1$ için 36,75 dB olarak bulunduğu görülmektedir. En yüksek S/N oranı ise sekizinci deney dizilimi olan $A_4B_2C_1$ ’den 42,34 dB olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4. L_8 dikey dizilimi ve deney sonuçları (Nu) ile S/N oranı değerleri (L_8 orthogonal array for experimental results (Nu) with their S/N values)

Deney Numarası	Reynolds sayısı	Kollektör Tipi	Eğim Açısı	Nu Sayısı	S/N Oranı (dB)
1	3150	Tip-I	25°	68,8	36,75
2	3150	Tip-II	40°	73,7	37,35
3	3800	Tip-I	25°	84,7	38,56
4	3800	Tip-II	40°	89,0	38,98
5	4400	Tip-I	40°	85,1	38,60
6	4400	Tip-II	25°	115,1	41,22
7	5000	Tip-I	40°	99,9	39,99
8	5000	Tip-II	25°	130,9	42,34

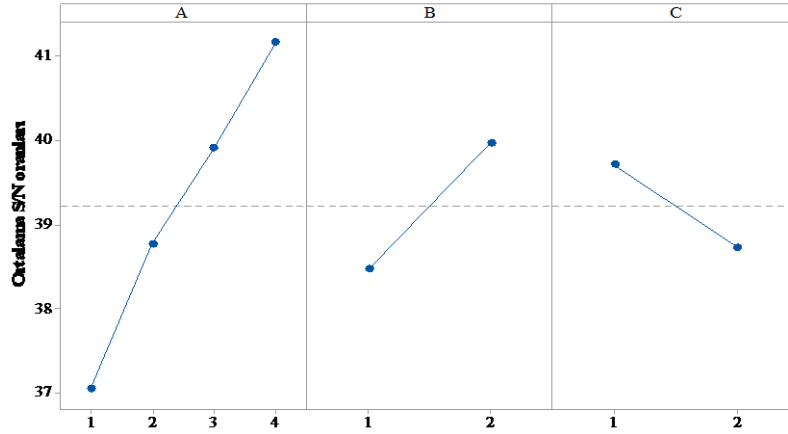
Deneyler sonucunda elde edilen Nu sayıları için en büyük en iyi hesaplama seçeneğine göre hesaplanmış S/N oranı değerlerinin her bir deney parametresi ve seviyesi için değerleri Çizelge 5’de sunulmuştur. Çizelge 5 incelendiğinde Re sayısının dört farklı seviyesi için S/N oranlarının 37,05 dB ile 41,17 dB arasında değişim gösterdiği görülmektedir. Re sayısına ait S/N oranı değerlerinin birinci seviyeden dördüncü seviyeye artış miktarı %11,1 olarak tespit edilmiştir. Re sayısının artışına bağlı olarak kollektörlerin Nu sayısı değerlerinin de artış gösterdiği anlaşılmaktadır. Re sayısının maksimum olduğu seviye için ısı transferi miktarı da maksimum olmaktadır. İkinci parametre olan kollektör

tipi için S/N değerlerine bakıldığında birinci seviye olan Tip-I kollektör için 38,47 dB değeri görülürken ikinci seviye olan Tip-II için 39,97 dB değeri görülmektedir. Yutucu yüzey üzerinde yarım silindirik şekilli kanatçıklar kullanılmasının ısı transferine etkisinin daha büyük olduğu anlaşılmaktadır. Kollektörlerin eğim açılarının $\alpha=25^\circ$ 'den 40° 'ye çıkartılması ile S/N oranı değerinin 39,72 dB değerinden 38,73 dB değerine düştüğü görülmektedir. Açı değerinin arttırılması ile yutucu yüzeye gelen güneş ışınları yatay olarak gelmekte ve bu sebeple de geri yansımalar daha fazla

parametre %18,08 ile kollektör tipi olur iken en düşük etki miktarına sahip parametre olarak ise %7,78 ile kollektör eğim açısı tespit edilmiştir. PCR değerleri için yapılan varyans analizinin hata miktarı %0,37 olarak elde edilmiştir. Hata miktarının düşük olması yapılan analiz güvenilirliğini arttırmıştır. Parametrelerin etki miktarları için ayrıca F_{test} değerleri de kullanılmaktadır. En yüksek F_{test} değeri 470,49 ile Re sayısına aitken en düşük F_{test} değeri ise 149,61 ile eğim açısı olmuştur. F_{test} değerlerine bakıldığında PCR değerlerini doğrulayan sonuçların elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 5. Nu sayısı için S/N oranları ve yüzde etki miktarları “En Büyük En İyi” (S/N responses and contribution ratios for Nu number “larger is better”).

Sembol	Parametre	Seviyeler				Fark (max-min)	Sıra	PCR (%)
		1	2	3	4			
A	Reynolds Sayısı	37,05	38,77	39,91	41,17	4,11	1	73,77
B	Kollektör Tipi	38,47	39,97	-	-	1,50	2	18,08
C	Eğim Açısı	39,72	38,73	-	-	0,99	3	7,38



Şekil 5. Nu sayısı için ortalama S/N oranları (Mean S/N ratio graph for Nu number)

olmaktadır. Buna bağlı olarak da ısı kazanımları ve ısı transferi eğim açısı düşük olan kollektöre göre daha düşük olmaktadır.

Her bir deney parametresi ve seviyeleri için ortalama S/N oranları Şekil 5’de verilmiştir. Nu sayısı için her bir parametrenin en yüksek olduğu S/N oranı değeri o parametre için en iyi seviyeyi belirlemektedir. Şekil 5 incelendiğinde ortalama S/N oranı değerlerinin, Re sayısı için dördüncü seviyede 41,14 dB, kollektör tipi için ikinci seviyede 39,97 dB ve kollektör eğim açısı için ise birinci seviyede 39,72 dB ile en yüksek değerlerini aldığı görülmektedir. Bu sonuçlara göre Nu sayısının en iyi olduğu deney dizilimi $A_4B_2C_1$ ($Re=5000$, Tip-II ve $\alpha=25^\circ$) olarak tespit edilmiştir.

Deney parametrelerinin kollektörlerin ısı transfer miktarına olan yüzde etki miktarlarının tespiti için varyans analizi yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda elde edilen PCR değerleri Çizelge 6’da sunulmuştur. Çizelge 6 incelendiğinde, Nu sayısı üzerinde etkili parametrenin %73,77 PCR değeri ile Re sayısı olduğu görülmektedir. Re sayısından sonra en etkili ikinci

En iyi deney dizilimi olan $A_4B_2C_1$ için elde edilen Nu sayısı değeri ile Minitab 17 programı ile Taguchi metodu kullanılarak elde edilen tahmini değer karşılaştırması Çizelge 7’de verilmiştir. Taguchi metodu kullanılarak tespit edilen $A_4B_2C_1$ deney dizilimi için tahmin edilen Nu değeri 130,65 olarak bulunmuştur. $A_4B_2C_1$ deney dizilimi için deneysel çalışma sonucunda tespit edilen Nu değeri ise 130,9’dur. Yapılan deneysel çalışma ile Taguchi metodu sonucu elde edilen sonuçlar birbiri ile uyum içerisindedir. L_8 dikey deney dizilimi sonucunda oluşturulan deney sıralamasında birinci deney dizilimi olan $A_1B_1C_1$ ($Re=3150$, Tip-I ve $\alpha=25^\circ$) için S/N oranı değeri 36,75 dB iken en iyi deney dizilimi olan $A_4B_2C_1$ ($Re=5000$, Tip-II ve $\alpha=25^\circ$) için S/N değeri 42,34 dB olarak hesaplanmıştır. En iyi dizilimi bulmak için kullanılan Taguchi yöntemi ile elde edilen Nu değeri başlangıç parametre dizilimine göre 5,59 dB daha yüksek olarak bulunmuştur. Optimizasyon sayesinde Nu değerlerine ait S/N oranlarında %12,5 iyileştirme elde edilmiştir.

Çizelge 6. Nu sayısı için ANOVA sonuçları (Results of ANOVA for Nu number)

	df	SS	V	F_{test}	P	PCR (%)
Reynolds Number (Re)	3	18,3317	6,11055	470,49	0,002	73,77
Kollektör tipi	1	4,4972	4,4972	346,26	0,003	18,08
Eğim Açısı (α)	1	1,9431	1,9431	149,61	0,007	7,78
Hata	2	0,026	0,01299			0,37
Toplam	7	24,7979				100,0

Çizelge 7. Nu sayısı için doğrulama deney sonuçları (Results of confirmations experiment for Nu number)

	Başlangıç Parametresi	Optimum parametre	
		Tahmin Edilen	Deney Sonucu
Seviye	$A_1B_1C_1$	$A_4B_2C_1$	$A_4B_2C_1$
Nusselt Sayısı	68,8	130,65	130,9
S/N Oranı (dB)	36,75	42,32	42,34

Başlangıç parametresine göre deney sonucunda elde edilen Nu sayısı iyileştirme miktarı: 5,59 dB.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, farklı deney parametrelerinin hava akışkanlı güneş kollektörü ısı transfer miktarına olan etkileri Taguchi metodu ile optimize edilmiştir. Ayrıca her bir parametrenin yüzde etki miktarları ANOVA yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar şu şekildedir;

- Isı transfer miktarının maksimum olması için gerekli olan parametre dizilimi $A_4B_2C_1$ (Re=5000, Tip-II ve $\alpha=25^\circ$) olarak tespit edilmiştir.
- ANOVA analizi sonuçlarına göre ısı transfer miktarını (Nu) en çok etkileyen parametre %73,77 ile Re sayısı olur iken en az etkileyen parametre ise %7,78 ile kollektör eğim açısıdır. Kollektör tipinin etki miktarı ise %18,08'dir. Re sayısının artırılması ile Nu sayısı değerleri önemli ölçüde artırılabilir.
- Taguchi metodu kullanılarak yapılan optimizasyon ile elde edilen sonuçlar ile deneysel çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve birbiri ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

A	Alan, m^2
c_p	Havanın özgül ısısı, $J/kg^\circ C$
D_h	Hidrolik çap, m
h	Isı taşınım katsayısı, $W/m^2^\circ C$
I	Işınım Şiddeti, W/m^2
k	Isı iletim katsayısı, $W/m^2^\circ C$
\dot{m}	Kütleli debi, kg/s
Nu	Nusselt sayısı
Re	Reynolds sayısı
\dot{Q}_u	Yararlı ısı, W
T	Sıcaklık, $^\circ C$
U	Hava hızı, m/s

ν Kinematik viskozite, m^2/s

ρ Yoğunluk, kg/m^3

Alt Simgeler (Subscripts)

g Giriş

ç Çıkış

k Kollektör

y Yüzey

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Kumar A., Saini R.P., Saini J.S., "A review of thermohydraulic performance of artificially roughened solar air heaters", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37: 100–122, (2014).
- [2] Acir A., Ata İ., Canlı M.E., "Investigation of effect of the circular ring turbulators on heat transfer augmentation and fluid flow characteristic of solar air heater", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 77: 45-54, (2016).
- [3] Lin W., Ma Z., "Using Taguchi-Fibonacci search method to optimize phase change materials enhanced buildings with integrated solar photovoltaic thermal collectors", *Energy*, 106: 23-37, (2016).
- [4] Kuo C.F.J., Su T.L., Jhang P.R., Huang C.Y., Chiu C.H., "Using the Taguchi method and grey relational analysis to optimize the flat-plate collector process with multiple quality characteristics in solar energy collector manufacturing", *Energy*, 36: 3554-3562, (2011).
- [5] Kotcioglu I., Cansiz A., Khalaji M.N., "Experimental investigation for optimization of design parameters in a rectangular duct with plate-fins heat exchanger by Taguchi method", *Applied Thermal Engineering*, 50: 604-613, (2013).
- [6] Yadav S., Kaushal M., Varun, Siddhartha, "Nusselt number and friction factor correlations for solar air heater duct having protrusions as roughness elements on absorber plate", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 44: 34–41, (2013).

- [7] Acir A., Ata İ., “A study of heat transfer enhancement in a new solar air heater having circular type turbulators”, *Journal of the Energy Institute*, 89: 606-616, (2016).
- [8] Chamoli S., Yu P., Kumar A., “Multi-response optimization of geometric and flow parameters in a heat exchanger tube with perforated disk inserts by Taguchi grey relational analysis”, *Applied Thermal Engineering*, 103: 1339–1350, (2016).
- [9] Bopche S.B., Tandale M.S., “Experimental investigations on heat transfer and frictional characteristics of a turbulator roughened solar air heater duct”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52: 2834–2848, (2009).
- [10] Celik N., Pusat G., Turgut E., “Application of Taguchi method and grey relational analysis on a turbulated heat exchanger”, *International Journal of Thermal Sciences*, 124: 85–97, (2018).
- [11] Ansari M., Bazargan M., “Optimization of flat plate solar air heater with ribbed surfaces”, *Applied Thermal Engineering*, 136: 356–363, (2018).
- [12] Acir A., Canlı M.E., Ata İ., 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).
- [13] Chamoli S. “A Taguchi approach for optimization of flow and geometrical parameters in a rectangular channel roughened with V down perforated baffles”, *Case Studies in Thermal Engineering*, 5: 59–69, (2015).
- [14] Sahin B., Demir A., “Performance analysis of a heat exchanger having perforated square fins”, *Applied Thermal Engineering*, 28: 621–632, (2008).
- [15] Sharma S.K., Kalamkar V.R., “Experimental and numerical investigation of forced convective heat transfer in solar air heater with thin ribs”, *Solar Energy*, 147: 277–291, (2017).
- [16] Pandey N.K., Bajpai V.K., Varun, “Experimental investigation of heat transfer augmentation using multiple arcs with gap on absorber plate of solar air heater”, *Solar Energy*, 134: 314–326, (2016).
- [17] Kline S.J., McClintock F.A., “Describing uncertainties in single sample experiments”, *Mechanical Engineering*, 75, 3–8, (1953).
- [18] Taguchi G., “Taguchi techniques for quality engineering”, *Quality Resources*, New York, (1987).
- [19] Güneş S., Manay E., Senyigit E., Ozceyhan V., “A Taguchi approach for optimization of design parameters in a tube with coiled wire inserts”. *Applied Thermal Engineering*, 31: 2568-2577, (2011).
- [20] Aghaie A.Z., Rahimi A.B., Akbarzadeh A., “A general optimized geometry of angled ribs for enhancing the thermo-hydraulic behavior of a solar air heater channel- A Taguchi approach”, *Renewable Energy*, 83: 47-54, (2015).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



Selection of excitation operating points of 10 MW HTS exciting double stator direct-drive wind generators having single and double polarity inner stator

Tek ve çift kutuplu iç statorlu olan 10 MW HTS tahrikli çift statorlu doğrudan tahrikli rüzgâr jeneratörlerinin uyarma çalışma noktalarının seçimi

Yazar(lar) (Author(s)): Ming CHENG¹, Xinfu NING², Xinkai ZHU³, Yubin WANG⁴

ORCID¹: 0000-0002-3466-234X

ORCID²: 0000-0002-3211-8017

ORCID³: 0000-0001-5399-8191

ORCID⁴: 0000-0002-6732-2464

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Cheng M., Ning X., Zhu X., Wang Y., “Selection of excitation operating points of 10 MW HTS exciting double stator direct-drive wind generators having single and double polarity inner stator”, *Politeknik Dergisi*, 23(2): 537-545, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.605750

Tek ve Çift Kutuplu İç Statorlu Olan 10 MW HTS Tahrikli Çift Statorlu Doğrudan Tahrikli Rüzgâr Jeneratörlerinin Uyarma Çalışma Noktalarının Seçimi

Araştırma Makalesi / Research Article

Ming CHENG^{1*}, Xinfu NING¹, Xinkai ZHU¹, Yubin WANG²

¹School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China

²College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Qingdao, China

(Geliş/Received : 16.08.2019 ; Kabul/Accepted : 28.01.2020)

ÖZ

Yüksek sıcaklık süper iletkenliği (HTS) tahrikli çift stator olan doğrudan tahrikli rüzgâr jeneratörü (HTS-DSDDG), çift stator yapısı kullanılarak soğutma sisteminin statik sızdırmazlığını ve akımın fırçasız aktarmasını eşzamanlı olarak sağlayabilmekte olduğu için açık deniz rüzgâr jenerasyonunun gelecek vadeden bir yöntemidir. Bu çalışmada, sırasıyla tek kutuplu uyarma ve çift kutuplu uyarma olarak belirlenmek olan, HTS bobininin iki çeşit yerleştirme stratejisi önerilmektedir. Üstelik, HTS bobininin uyarma çalışma noktalarını belirlemek için bu çalışmada HTS kablolarının tüketimi ile tek/çift kutuplu HTS-DSDDG'lerin hacmi arasındaki ilişki kantitatif olarak araştırılmaktadır. HTS bobinlerinin farklı yerleştirme stratejileri, uyarma çalışma noktalarının, jeneratör boyutlarının ve HTS kabloları tüketiminin farklarına neden olacağından dolayı tek ile çift kutuplu HTS-DSDDG elektromanyetik verimi, ağırlığı ve malzeme masrafı açısından karşılaştırılmaktadır. Sonuç olarak, çift kutuplu HTS-DSDDG'nin tek kutuplu HTS-DSDDG'den daha hafif ve daha düşük maliyetli olduğu çıkarılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Büyük ölçekli rüzgâr jeneratörü, HTS, çift stator, Çift statorlu, uyarma çalışma noktası.

Selection of Excitation Operating Points of 10 MW HTS Exciting Double Stator Direct-Drive Wind Generators Having Single and Double Polarity Inner Stator

ABSTRACT

The high temperature superconducting (HTS) exciting double stator direct-drive wind generator (HTS-DSDDG) is a promising approach for offshore wind generation, due to the fact that double-stator structure is employed to simultaneously realize stationary seal of the cooling system and brushless of current transfer. In this paper, two kinds of placement strategies of HTS coils are proposed, denoted as single-polarity excitation and double-polarity excitation, respectively. Furthermore, the relationship between the consumption of HTS wires and the volume of the single-/double-polarity HTS-DSDDGs is quantitatively investigated to determine the excitation operating points of HTS coils. Since the different placement strategies of HTS coils will lead to differences of the excitation operating points, as well as differences of generator size and HTS wires consumption, the single-/double-polarity HTS-DSDDGs are compared in terms of the electromagnetic performance, the weight and the material cost. Finally, the conclusion is drawn that the 10 MW double-polarity HTS-DSDDG is lighter and lower cost than the single-polarity one.

Keywords: Large-scale wind generator, HTS, double-stator, direct-drive, excitation operating point.

1. INTRODUCTION

In recent decades, wind power generation has become one of the most attractive and competitive methods of renewable power generation [1-4], of which offshore wind power generation is rapidly developing due to harvest wind resource and sufficient space in sea, and considered to play a major role in contributing to renewable power generation in the future [5,6]. At the end of 2018, the total global installed capacity of offshore wind power generation exceeded 23 GW, and it is projected to reach 100 GW in 2025 [7]. Generally, larger wind turbines can lead to the lower average Levelized

Cost of Energy (LCOE), so the larger power wind turbines are becoming a development trend of the offshore wind power generation [5]. In 2018, the average rated capacity of European newly-installed offshore wind turbines was 6.8MW, a 15% increase over 2017 [8], and this number is expected to increase to 8 MW by 2020 [9]. At present, the 10 MW or above wind turbine with acceptable size and weight is research hotpot in both industrial and academic communities [10,11]. However, wind turbines face many challenges and limitations with the capacity increase, one of which is the electromechanical conversion system, i.e. drive train of wind turbine.

There are three general technology routes employed in the drive train of wind turbines [11,12,13]: 1) A three-

*Sorumlu yazar (Corresponding Author)
e-posta: mcheng@seu.edu.cn

stage gearbox is combined with a high speed induction generator, i.e. Gear-drive train; 2) A single/two-stage gearbox is combined with a medium-speed synchronous generator, i.e. semi-direct-drive train; 3) A rotor is directly connected to a low-speed synchronous generator without the gearbox, i.e. direct-drive train. However, the numerous rotating parts and bearings in gearbox will result in its unreliability, and gearbox requires frequent maintenance, resulting in undesired downtime [13]. Since there are strict environmental restrictions at the offshore wind farms, Gearbox maintenance is costly, and gearbox failure will cause significant losses. In addition, the weight of the gearbox increases with the rated capacity of wind turbine, increasing the load on structural support. While the direct-drive train using the low-speed generator eliminates the gearbox from the turbine drive-train, offering the merits of lighter weight, lower maintenance cost, and higher reliability, compared with the geared-train and the semi-direct-drive train, it has become the preferable option for large offshore wind turbine [11]. Obviously, the low-speed generator is one of the most critical components of the direct-drive train. The electrically excited synchronous generator (EESG) and permanent magnet synchronous generator (PMSG) are the two main options for direct-drive trains. However, the size and weight of 10 MW low speed EESGs or PMSGs are very huge, which makes their construction, transportation and installation to be significantly difficult and cost rising, resulting in hardly meeting the requirement of the offshore wind generation [14]. Besides, the price of permanent magnets is subject to the risk of fluctuation. Luckily, the use of superconducting (SC) materials in low speed wind generators named as superconducting direct-drive synchronous generator (SCDDG), emerges as a promising solution for achieving reliable, lightweight, and higher power level (10 MW or beyond) wind turbine [15,16].

At present, lots of research on SCDDGs are being actively carried out [17-27]. In [18], various topologies of SCDDGs were reviewed. In [19], comparative assessment of Multi-Megawatt Class SCDDGs was made, showing that the economy of SCDDGs improves with the rating increase, they are superior to PM direct-drive generators (PMDDGs) when the rating is above 8 MW. However, the 10 MW existing conceptual SCDDGs face the challenges of rotating sealing of the cooling system or the brush-slip ring system for conducting large armature current, which probably results in the low reliability, manufacturing difficulty and high cost. In order to solve these problems faced by the existing conceptual SCDDGs, a 10 MW novel HTS exciting double stator direct-drive wind generator (HTS-DSDDG) was proposed to simultaneously realize stationary seal of the cooling system and brushless of current transfer, showing a promising prospect in the offshore wind generation [17].

The HTS winding used in HTS-DSDDG permits the achievement of much stronger magnetic loading than that of the EEDDG and PMDDG, bring the possibility of

smaller size and lighter weight. The existing design cases of SCDDGs indicate that the high cost of SC materials is a major factor of limiting the application of SCDDGs. Therefore, it is indispensable to study the relationship between the consumption of HTS material and the size of HTS-DSDDG, which is of great significance to reduce the cost of wind power generation. The consumption of HTS material is determined by the turn number and the size of HTS winding, while the size of HTS winding mainly depends on the geometry and the size of HTS-DSDDG. The turn number of HTS field winding and the magnitude of field current, i.e. the excitation operating point, affect the magnetic loading and power density of the generator, hence the geometry design of HTS-DSDDG must be coordinated with the excitation operating point to achieve a power rating of 10 MW. Generally, the higher excitation-MMF (multiply the turn number of HTS winding by the field current), the higher magnetic loading and the smaller the size of the generator, but this is limited by the saturation effect of magnetic material. Besides, the field current of HTS winding is limited by the magnetic field, which complicates the relationship between these variables. However, the problem can be simplified by fixing the cross-section of geometry of the generator. In this case, the magnetic field of HTS-DSDDG is substantially determined at a certain excitation-MMF, so the field current and the turn number of the HTS winding can be calculated. Different excitation operating points correspond to different field currents and HTS winding turns, different magnetic loading and power density of the generator, different active axial lengths of the generator, and different consumption of HTS materials. Therefore, the HTS material consumption and the size of HTS-DSDDG depend on the excitation operating point in the case of this paper.

In this paper, a method of determining the excitation operating point of the HTS-DSDDG is proposed, and based on this, two 10 MW conceptual HTS-DSDDGs with different placement strategies of HTS coils are analyzed and compared. In Section 2, the structure and operating principle of the HTS-DSDDG are discussed. In Section 3, the method of determining the excitation operating point of the HTS-DSDDG is described in detail using the finite element analysis (FEA). Then the electromagnetic performance, the weight and the material cost of the two conceptual HTS-DSDDGs are compared in Section 4. Finally, some conclusions are drawn in Section 5.

2. STRUCTURE AND OPERATING PRINCIPLE

2.1. Structure

The cross section of the single-/double-polarity HTS-DSDDGs are shown in Figure 1. It can be seen that the HTS-DSDDG mainly consists of an outer stator with copper armature winding, a sandwiched reluctance-rotor between two stators, and an inner stator with racetrack-shaped cryogenic dewars containing HTS coils, from the

outside to the inside. The main difference between the single-polarity and double-polarity HTS-DSDDG is the placement strategy of HTS coils on the inner stator. For the double-polarity one, there is one dewar on each inner-stator-tooth, and the polarities of the two HTS windings in adjacent dewars are opposite, as shown in Figure 1(a), in which the red arrows indicate N poles and the blue arrows indicate S poles. So two adjacent dewars combine an excitation pole-pair. While for the single-polarity one, the polarities of all HTS windings are the same, i.e., N poles or S poles, between which iron consequent poles are sandwiched, as shown in Figure 1(b), so one dewar and an adjacent iron pole combine an excitation pole-pair. Although the number of dewar of the single-polarity one is only half of that of the double-polarity counterpart, the equivalent pole-pair number of them are the same, i.e., equal to the number of the magnetic-block of rotor. However, since each inner-stator-slot contains two dewar edges in the double-polarity one, while only one dewar edge in the single-polarity one, the width of inner-stator-teeth of the double-polarity one is slightly smaller than that of the single-polarity one.

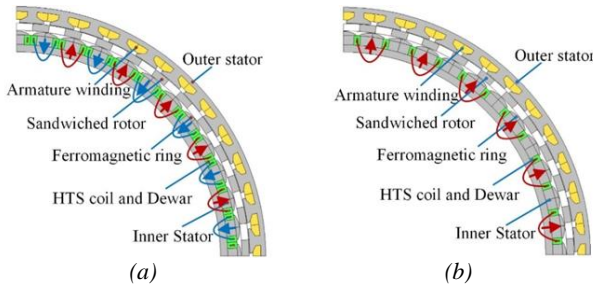


Figure 1. Cross section of the HTS-DSDDGs with different excitation structures: (a) double polarity, (b) single polarity.

2.2. Operating Principle

According to the airgap field modulation theory (AFMT) for electrical machines [28], the fundamental magnetic field excited by the HTS windings on inner stator will be modulated by the rotating sandwiched reluctance-rotor. Then abundant of rotating and stationary harmonics will be generated in the outer airgap after the modulation, of which the harmonics having the same order, rotating speed, and rotating direction as those of armature reaction can interact with each other to output constant electromagnetic torque. The corresponding number of pole pairs P_j and rotating speed n_j of the harmonics in the outer airgap can be obtained by:

$$P_j = |P_{HTS} - jN_{Fe}| \quad (1)$$

$$n_j = \frac{jN_{Fe}}{jN_{Fe} - P_{HTS}} n_r \quad (2)$$

where n_r is the rotor speed, N_{Fe} is the number of magnetic-block of rotor, and P_{HTS} is the pole-pair number of the fundamental magnetic field in the inner airgap, $j = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \infty$.

The existing research results show that the main effective harmonic corresponds to the case of $j = 1$. Therefore, the pole-pair number and the rotating speed of the main effective magnetic-field harmonic for the HTS-DSDDGs with 44-rotor-magnetic-block and 24-pole-pair of fundamental magnetic field, i.e., $N_{Fe} = 44$ and $P_{HTS} = 24$, can be derived as $P_1 = 20$ and $n_1 = 2.2n_r$. Hence the frequency f_1 of the EMF can be calculated by:

$$f_1 = \frac{n_1 P_1}{60} = \frac{2.2n_r \cdot 20}{60} = \frac{44n_r}{60} \quad (3)$$

3. SELECTION OF EXCITATION OPERATING POINT

The torque density of electrical machine is proportional to the magnetic loading B and the electrical loading A , meaning that the higher B or A , the smaller size and lighter weight for electrical machine. Although the use of HTS field coils in the HTS-DSDDG permits the achievement of much stronger excitation-MMF due to the high DC capacity of HTS coils without joule loss, the increase of the B is not linear with the increase of the excitation-MMF due to the saturation effect of magnetic material, such as silicon steel used in stator yoke or teeth. Therefore, when the saturation of silicon steel reach to a certain level, it would not be an effective method to continuously increase the torque density by continuously increasing the excitation-MMF to acquire a higher B , due to the fact that a lot of HTS wires will be needed to get a very little increase of torque density under the condition of high saturation. Besides, the maximum flux density perpendicular to the HTS coil will be increased as the increase of the excitation-MMF, resulting in the reduce of the critical engineering current of HTS coil and the increase of consumption of HTS wire, since the effect of the perpendicular flux density on the critical engineering current of HTS coil is very heavy. Generally, the higher perpendicular flux density, the lower critical engineering current. Hence, it is very important to determine a proper excitation operation point of the HTS coils for the HTS-DSDDG.

In this section, a selection method of excitation operating point is proposed, the specific steps are as follows:

- (1) The critical engineering current (I_{fmax}) and the turn number of per excitation pole-pair (N_f) is obtained under the different excitation-MMF per excitation pole-pair (F_c) by analyzing the maximum flux density around the HTS coil using the method of FEA. So, the relationship of the I_{fmax} , N_f , and F_c can be obtained.
- (2) The torque density of the HTS-DSDDG is compared under the different F_c with all geometric specifications fixed. Then the rotor axial length (l_{ap}) is adjusted to achieve an output power of 10 MW, and the $l_{ap}-F_c$ curves are obtained.
- (3) The consumption of the HTS wire per excitation pole-pair (l_{HTS}) can be obtained from the N_f of the step (1) and the specific geometric size under the

different F_c . Then the relationship of the I_{HTS} and l_{ap} can be obtained. Finally, the excitation operating point is determined from the l_{ap} - I_{HTS} curves.

For single-polarity HTS-DSDDG, there is one edge of HTS winding in each inner-stator-slot, while there are two for double-polarity HTS-DSDDG, as shown in Figure 2. This leads to two results: 1) The widths of inner-stator-teeth of the two generators are different, so are the saturations of inner-stator-teeth and the torque capacities. 2) When F_c are the same, the magnetic fields in HTS winding area are different, hence the I_{fmax} and N_f of the two structures are different. Therefore, the different characteristics of the magnetic field in HTS winding area and the torque capacity lead to the difference of the excitation operating points. In order to fairly compare the single-/double-polarity HTS-DSDDG in detail, the excitation operation points of them will be determined by the aforementioned method. The main design specifications of the two HTS-DSDDGs are listed in Table 1, and more specific design considerations are illustrated in [17].

In order to simplify the magnetic-field analysis around the HTS coils, some assumptions are given as follows:

- (1) The flux density distribution in each inner-stator-slot is the same, so the magnetic field analysis is conducted for only one inner-stator-slot, and eight indicated points are built around the HTS coil, namely, point 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, and 8 (p1, p2, p3, p4, p5, p6, p7, and p8), as shown in Figure 2. The flux density of each indicated point denotes the flux density of the corresponding zone near the HTS coil.
- (2) The field current distribution in the HTS coil is homogenous, whose distribution zone shown in Figure 2 is highlighted in red color. Since the effect of the perpendicular applied field on the critical engineering current of HTS coil is heavier than that of the parallel applied field, the absolute value of flux density of the indicated points will be regarded as perpendicular field for safety margin. At the same time, it is assumed that the maximum of the field current (I_{fmax}) in the HTS coil is determined by the maximum of flux density among the eight indicated points, according to the I_c - B_{\perp} curve at 30 K considering 30% safety margin, namely, the I_{fmax} - B_{\perp} curve, as shown in Figure 3, in which the I_c is the critical current of the Bi2223 in the condition of self-field and cooling temperature 30 K, and the I_c - B_{\perp} curve is provided by the manufacturer (Innova Superconductor Technology Co. Ltd). The reason of selecting the cooling temperature of 30 K is described in detail in [29].
- (3) The total length of the HTS wire is equal to that the pole-pair number of excitation winding multiplies the length of HTS wire per excitation pole-pair. And the length of HTS wire per excitation pole-pair is assumed to be approximately that the length of middle turn of HTS coil multiplies the turn number per excitation pole-pair.

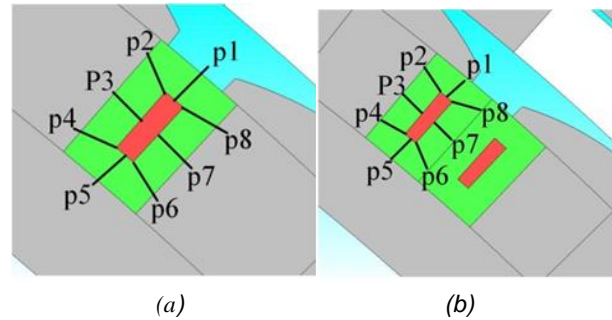


Figure 2. Eight indicated points around the HTS coil: (a) single-polarity, (b) double-polarity.

Table 1. The main design specifications of the HTS-DSDDG

Parameters	Symbol	Single-polarity	Double-polarity
Rated power (MW)	P_N	10	10
Rated rotating speed (r/min)	n_N	9.6	9.6
Rated torque (MN·m)	T_N	11	11
Line voltage of armature winding (Vrms)	V_N	4000	4000
phase current of armature winding (Arms)	I_N	2545	2545
Power factor	$\cos(\varphi)$	1	1
Number of cryogenic dewar	N_D	24	48
Armature winding configuration	-	3-phase	3-phase
Armature cooling method	-	forced air cooling	forced air cooling
Polarity of adjacent HTS field coils	-	same polarity	opposite polarity
Superconducting wire	-	Bi2223	Bi2223
Operation temperature of HTS coil (K)	T_{oper}	30	30
Width of inner-stator-teeth (mm)	b_{ist}	466	330

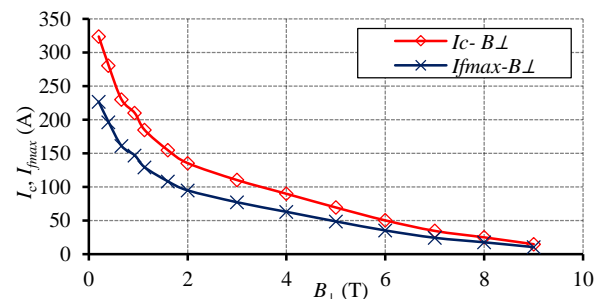


Figure 3. I_c - B_{\perp} curve of Bi2223 wire and I_{fmax} - B_{\perp} curve of HTS coil at the cooling temperature of 30 K.

In this section, the magnetic field analysis is studied by the FEA, it can be found that the magnitude of flux density at p1-p8 periodically changes with the rotor rotation, but the direction of which is almost unchanged.

Figure 4 shows the direct component and fundamental component of flux density at p1-p8 under the no-load condition with the $F_c = 250 \text{ kA}\cdot\text{t}$, it can be seen that the direct component of flux density at p1 is higher than that of the other points. Even if the value of the F_c changes, or the armature winding is fed by current, the flux density at p1 is always the biggest among the eight indicated points. So according to the aforementioned assumption (2), the maximum field current (I_{fmax}) in the HTS coil is mainly determined by the flux density at p1. The waveform of flux density at p1 is shown in Figure 5(a), it can be seen that the armature reaction will slightly affect the flux density variation. Figure 5(b) shows the variation of the maximum flux density at p1 (B_{p1max}) with F_c under the no-load and rated-load conditions, it can be seen that the flux density at p1 in the single-polarity one is approximately twice of that of the double-polarity one, meaning that the I_{fmax} in the HTS coil of double-polarity HTS-DSDDG will be much higher than that of the single-polarity HTS-DSDDG depending to the I_{fmax} - B_{\perp} curve as shown in Figure 3.

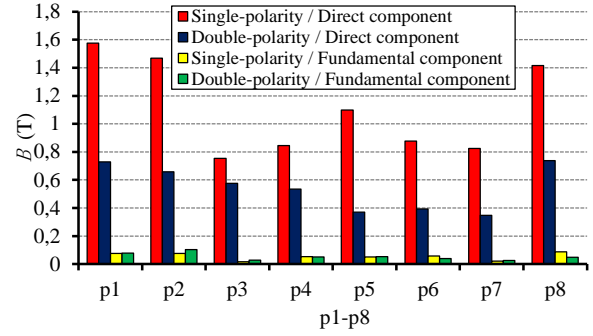


Figure 4. The direct component and fundamental component of flux density at p1-p8.

According to the above analysis, it can be found that the relationship curve between the I_{fmax} and the F_c can be derived from Figure 3 and Figure 5(a), as shown in Figure 6(a). the turn number per excitation pole-pair (N_f) can be calculated by

$$N_f = \frac{F_c}{I_{fmax}} \quad (4)$$

Hence the relationship curve between the N_f and the F_c can be obtained as well, as shown in Figure 6(b). It can be seen that more HTS wires will be needed in the single-polarity HTS-DSDDG than the double-polarity HTS-DSDDG in the identical F_c .

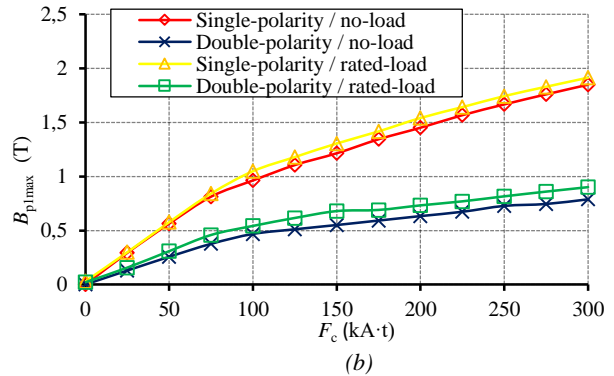
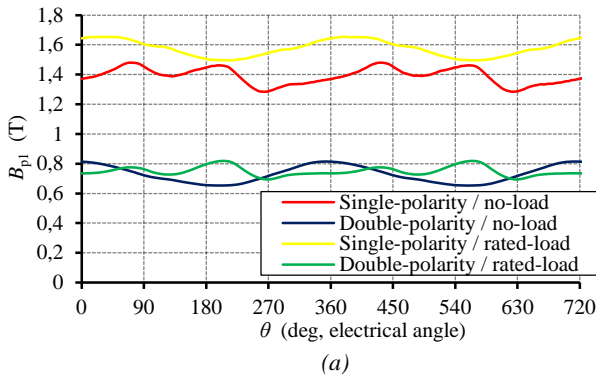


Figure 5. (a) Variation of flux density at p1 (B_{p1}) with the rotor position (θ , Elec. degree). (b) The variation of the maximum flux density at p1 (B_{p1max}) with the excitation-MMF per excitation pole-pair (F_c) under the no-load and rated-load conditions.

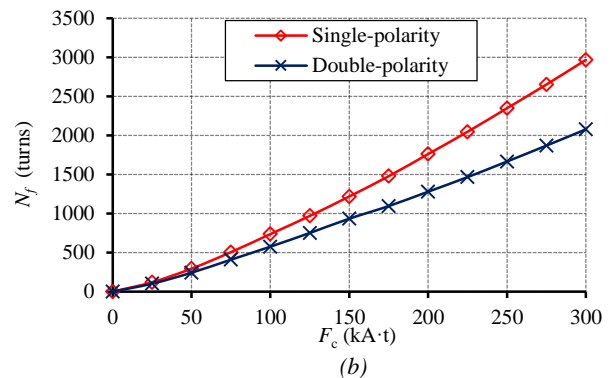
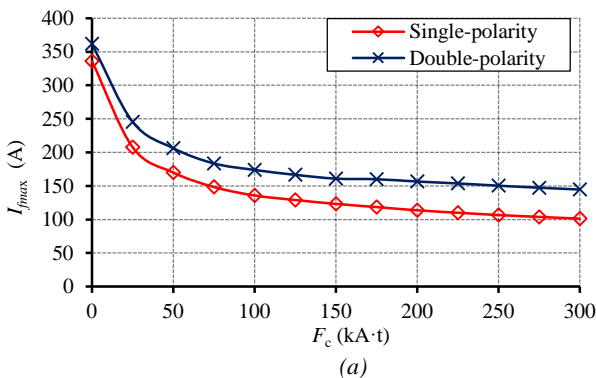


Figure 6. (a) Variation of the maximum field current in HTS coil (I_{fmax}) with the excitation-MMF per excitation pole-pair (F_c). (b) Variation of the turn number per excitation pole-pair (N_f) with the F_c .

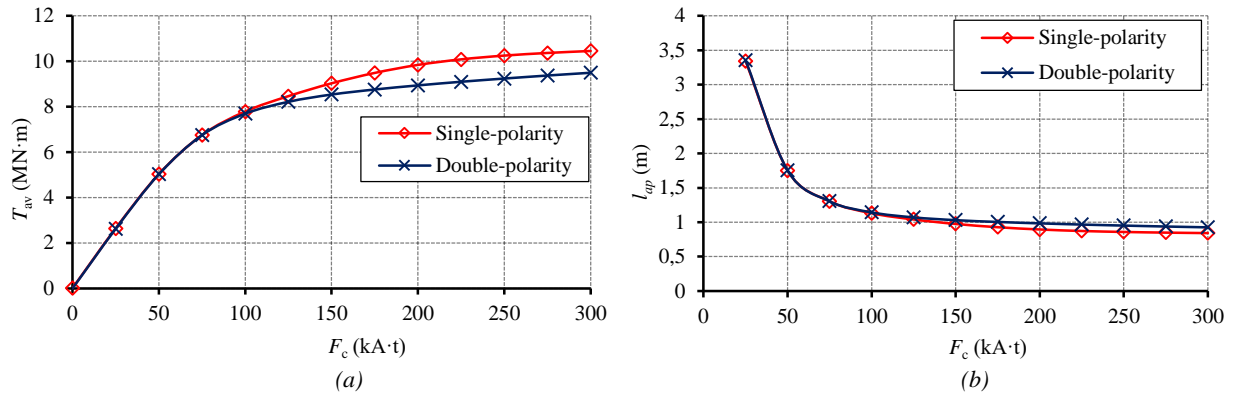


Figure 7. (a) Variation of the T_{av} with the F_c . (b) Variation of the l_{ap} with the F_c .

The relationship curve of the average electromagnetic torque (T_{av}) and the F_c are shown in Figure 7(a) at the rated load with rotor axial length of 800 mm. It can be seen that the T_{av} of the double-polarity DSDDG becomes lower than that of the single-polarity one when $F_c > 100$ kA·t, due to the fact that the width of inner-stator-teeth in the double-polarity one is relatively smaller than that of the single-polarity one, it prefers to become saturation to limit the flux density in the airgap. Then the rotor axial length (l_{ap}) is adjusted to achieve an output power of 10 MW at the different F_c , relationship curve between which is shown in Figure 7(b).

The scaled-down sample of the racetrack-shaped HTS coil is shown in Figure 8 [30], which consists of two semicircles and two line-segments. So the length of HTS wire per excitation pole-pair (l_{HTS}) is calculated by:

$$l_{HTS} = N_f \cdot (2\pi \frac{b_{mc}}{2} + 2l_{ap}) \quad (5)$$

where N_f is the turn number of per excitation pole-pair, b_{mc} is the width of middle turn of HTS coil.

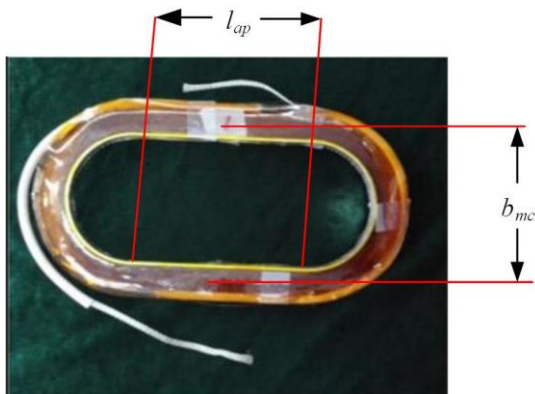


Figure 8. The scaled-down sample of the racetrack-shaped HTS coil.

Therefore, the relationship curve of the l_{HTS} and the l_{ap} can be derived from Figure 6(b), Figure 7(b), and Equation (5), as shown in Figure 9. It can be seen that the reduction of the l_{ap} is not linear with the increase of the l_{HTS} , there is a saturation between the l_{HTS} and the l_{ap} . At saturated region, it is difficult to reduce the volume of the

generators even with more quantities of HTS wires. Hence the l_{ap} - l_{HTS} curve provides a criterion for selecting the appropriate excitation operating points. From the perspective of wind generator cost, the optimal excitation operating point should make wind generator has the lowest cost. However, the consumption of HTS wires is mainly concerning about the cost of HTS material, while the volume of wind generator will affect the material cost, the manufacturing cost, the transportation cost, and the installation cost. Therefore, the excitation operating point should be determined by the l_{ap} - l_{HTS} curve and the specific production and application of the HTS-DSDDG for the objective of the lower cost.

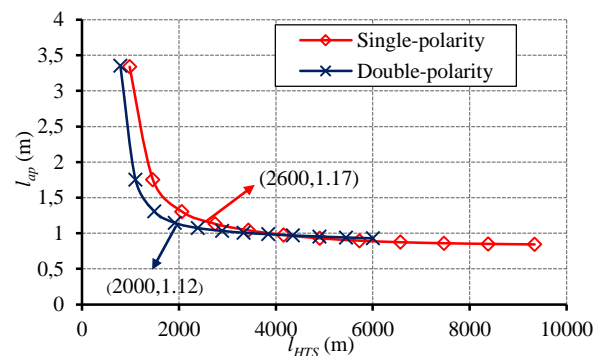


Figure 9. The relationship curve of the rotor axial length (l_{ap}) and the length of HTS wire per excitation pole-pair (l_{HTS}).

Table 2. The Selected excitation operating points for per excitation pole-pair

Parameter	Single-polarity	Double-polarity
F_c (kA·t)	95	105
I_{fmax} (A)	139	172
N_f (turns)	683	610
l_{ap} (mm)	1150	1130
l_{HTS} (m)	2571	2011

In order to roughly compare the single-/double-polarity HTS-DSDDGs, the excitation operating points are selected at where the l_{ap} - l_{HTS} curves are about to saturate, namely, point (2600,1.17) and (2000,1.12), corresponding to $F_c=95$ kA·t and 105 kA·t, respectively, as shown in Figure 9. To reduce the calculation error, the

l_{ap} will be slightly adjusted with fixed F_c to make the output power closer 10 MW. Finally, the excitation operating points of the single-/double-polarity DSDDGs are obtained, as listed in Table 2. It can be seen that the I_{fmax} , the l_{HTS} , and the l_{ap} of the double-polarity DSDDG is 23.7% higher, 21.8% lower, and 1.74% shorter than those of the single-polarity one, respectively.

4. COMPARISON OF THE TWO STRUCTURES

4.1. Comparison of Electromagnetic Performance

Since the excitation operating points of the single-/double-polarity HTS-DSDDGs are selected, their electromagnetic performance can be obtained and compared by FEA. Figure 10 illustrates the phase EMF waveforms under the no-load condition. It can be seen that both the EMF waveforms of single-/double-polarity HTS-DSDDGs are highly sinusoidal with amplitudes of approximate 3000 V, while the phase amplitudes of single-polarity HTS-DSDDG is 6.9 % higher than those of double-polarity HTS-DSDDG, probably due to its wider width of inner-stator-teeth compared to double-polarity HTS-DSDDG. The torque waveforms of the two generators at rated-load are shown in Figure 11. It can be found that both the two generators have the same T_{av} of 11 MN·m, while the torque ripple of single-polarity HTS-DSDDG is slightly larger than that of double-polarity of HTS-DSDDG.

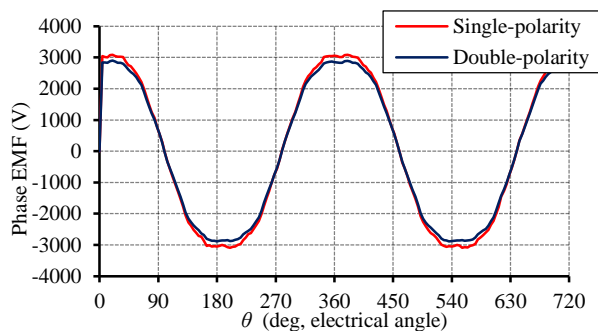


Figure 10. Phase EMF waveforms at no-load.

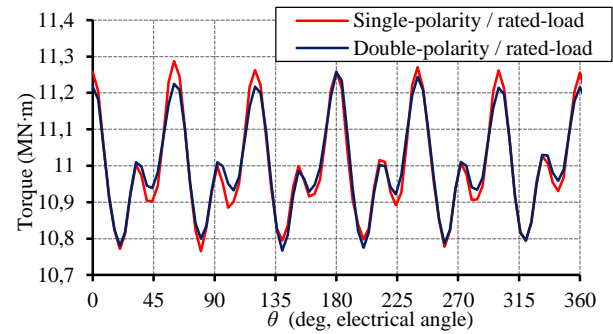


Figure 11. Torque waveforms at rated-load.

4.2. Comparison of Weight and Material Cost

After the selection of the excitation operating points, the volume and the HTS wire consumption of the two generators can be obtained as well, then their weights and material costs can be estimated and compared. The weight of the HTS-DSDDG include the structural and active materials masses, where the structural materials refer to rotor arm, stator arm, rotor cylinder, stator cylinder [31], and the active materials refer to copper, iron, dewar, HTS wires, cooling system. The material costs are determined by the masses and the unit costs. The masses and costs of dewar, cooling system and structural support are based on the reference of 10 MW MgB₂ SCDDG in [31].

The masses of the single-/double-polarity HTS-DSDDGs are presented in Table 3. It can be seen that the total masses of the single-/double-polarity DSDDGs are 461.6 tons and 437.9 tons, respectively, of which the structure support masses account for the largest proportion, 52.6 % and 54.2 % respectively, and the silicon steel masses are followed with 38.9 % and 36.6 %, respectively. Besides, it is worth noting that the total masses of the two generators are very close.

Referred to the current market price in China, the unit cost of materials used in the HTS-DSDDG are listed in Table 4. Then the material costs of the HTS-DSDDG components are obtained, as listed in Table 5. The total material costs of the single-/double-polarity DSDDGs are 2868.5 k\$ and 2835.3 k\$ respectively, of which the percentages of HTS wires are the maximum, 45.7 % and 37.5 %, respectively. Since the number of dewar in the double polarity HTS-DSDDG is double, its dewar cost is nearly twice of that of the single-polarity HTS-DSDDG. It can be seen that the total material cost of the double-polarity HTS-DSDDG is slightly lower than that of the single-polarity HTS-DSDDG, approximately 1.16 %.

Table 3. The masses of the single-/double-polarity HTS-DSDDGs

		Outer stator	Rotor	Inner stator	Copper windings	SC coil	Cooling system	Dewar	Structural support	Grand total
Single-polarity	Mass (ton)	61.8	26.9	90.9	25.6	8.3	1.8	3.6	242.8	461.6
	percentage	13.4%	5.8%	19.7%	5.5%	1.8%	0.4%	0.8%	52.6%	100%
Double-polarity	Mass (ton)	60.5	26.3	73.4	25.0	7.2	1.8	6.2	237.5	437.9
	percentage	13.8%	6.0%	16.8%	5.7%	1.6%	0.4%	1.4%	54.2%	100%

Table 4. The unit cost of materials

Material	Unit cost
Copper	11.6 \$/kg
Silicon steel	1.6 \$/kg
Structural steel	1.2 \$/kg
Bi-2223 wire	22 \$/m

Table 5. The material costs of the single-/double-polarity HTS-DSDDGs

		Outer stator	Rotor	Inner stator	Copper windings	SC coil	Cooling system	Dewar	Structural support	Grand total
Single-polarity	Material cost (k\$)	98.9	43.0	145.4	296.7	1361.7	233.0	398.5	291.3	2868.5
	percentage	3.4%	1.5%	5.1%	10.3%	47.5%	8.1%	13.9%	10.2%	100%
Double-polarity	Material cost (k\$)	96.8	42.1	117.4	290.3	1062.3	233.0	708.4	285.0	2835.3
	percentage	3.4%	1.5%	4.1%	10.2%	37.5%	8.2%	25.0%	10.1%	100%

5. CONCLUSION

In this paper, a method of selecting excitation operating point of HTS-DSDDG is proposed. The relationship of F_c , I_{fmax} , N_f , T_{av} , l_{ap} , l_{HTS} are quantitatively investigated, then the l_{ap} - l_{HTS} curves of single-/double-polarity HTS-DSDDG are obtained, which indicates the relationship between the HTS wires consumption and the volume of the generators, providing a criterion for selecting the optimal excitation operating point of the HTS-DSDDG to minimize the cost of wind generation. The different placement strategies of HTS coils lead to the different l_{ap} - l_{HTS} curves. In order to compare the two structures, the excitation operating points are selected at where the l_{ap} - l_{HTS} curves are about to saturate, then weight and material cost of the two HTS-DSDDGs are compared in detail. The comparison results reveal that the double-polarity 10 MW HTS-DSDDG has lighter weight and lower cost.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported in part by the NSFC under Project 51777216, in part by the Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province under Project KYCX18_0092, and in part by the State Scholarship Fund of China Scholarship Council under Grant 201806090179.

REFERENCES

- [1] Thang V. V., and Trung N. H., "Evaluating efficiency of renewable energy sources in planning micro-grids considering uncertainties", *Journal of Energy Systems*, 3(1): 14-25, (2019).
- [2] Naciri M., Aggour M., and Ahmed W. A., "Wind energy storage by pumped hydro station", *Journal of Energy Systems*, 1(1): 32-42, (2017).
- [3] Tan Z., Ngan H. W., Wu Y., et al., "Potential and policy issues for sustainable development of wind power in China", *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 1(3): 204-215, (2013).
- [4] Balat M., "A review of modern wind turbine technology", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 31(17): 1561-1572, (2009).
- [5] Bilgili M., Yasar A., and Simsek E., "Offshore wind power development in Europe and its comparison with onshore counterpart", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(2): 905-915, (2011).
- [6] Perveen R., Kishor N., and Mohanty S. R., "Off-shore wind farm development: Present status and challenges", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29: 780-792, (2014).
- [7] Global Wind Energy Council Report, "Global wind report 2018", April 2019.
- [8] The European Wind Association Report, "Offshore Wind in Europe – Key Trends and Statistics 2018", February 2019.
- [9] Roland Berger Strategic Consultants Report, "Offshore Wind Toward 2020-on the Pathway to Cost Competitiveness", April 2013.
- [10] Natarajan A., "An overview of the state of the art technologies for multi-MW scale offshore wind turbines and beyond", *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 3(2): 111-121, (2014).
- [11] Bensalah A., Benhamida M. A., Barakat G., et al., "Large wind turbine generators: State-of-the-art review", 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Alexandroupoli, Greece, 2205–2211, (2018).
- [12] Cheng M. and Zhu Y., "The state of the art of wind energy conversion systems and technologies: A review", *Energy Conversion and Management*, 88: 332-347, (2014).
- [13] McKenna R., Ostman v.d. Leye P., and Fichtner W., "Key challenges and prospects for large wind turbines", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53: 1212-1221, (2016).
- [14] Polinder H., Pijl F. F. A. van der., Vilder G.- de., et al. "Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 21(3): 725-733, (2006).
- [15] Fair R., Stautner W., Douglass M., et al., "Superconductivity for Large Scale Wind Turbines", General Electric - Global Research, United States, (2012).
- [16] Bray J. W., "Application of superconducting materials to power equipment", *Journal of Electronic Materials*, 24(12): 1767-1772, (1995).
- [17] Zhu X., and Cheng M., "Design and analysis of 10 MW class HTS exciting double stator direct-drive wind generator with stationary seal", *IEEE Access*, 7: 51129-51139, (2019).
- [18] Qu R., Liu Y., and Wang J., "Review of superconducting generator topologies for direct-drive wind turbines", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*,

- 23(3): 5201108-5201108, (2013).
- [19] Maples B., Hand M., and Musial W., "Comparative Assessment of Direct Drive High Temperature Superconducting Generators in Multi-Megawatt Class Wind Turbines", National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), (2010).
- [20] Marino I., Pujana A., Sarmiento G., et al., "Lightweight MgB₂ superconducting 10 MW wind generator", *Superconductor Science and Technology*, 29(2): 024005-024005, (2015).
- [21] Wang J., Qu R., Tang Y., et al., "Design of a superconducting synchronous generator with LTS field windings for 12 MW offshore direct-drive wind turbines", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(3): 1618-1628, (2016).
- [22] Cheng Y., Li D., Kong W., et al., "Electromagnetic design of a large-scale double-stator direct driving HTS wind generator", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 28(4): 1-5, (2018).
- [23] Abrahamsen A. B., Mijatovic N., Seiler E., et al., "Superconducting wind turbine generators", *Superconductor Science and Technology*, 23(3): 034019-034019, (2010).
- [24] Snitchler G., Gamble B., King C., et al., "10 MW class superconductor wind turbine generators", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 21(3): 1089-1092, (2011).
- [25] Xu Y., Maki N., and Izumi M., "Overview study on electrical design of large-scale wind turbine HTS generators", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 28(5): 1-5, (2018).
- [26] Lloberas J., Sumper A., Sanmarti M., et al., "A review of high temperature superconductors for offshore wind power synchronous generators", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38: 404-414, (2014).
- [27] Abrahamsen A. B., Magnusson N., Jensen B. B., et al., "Large superconducting wind turbine generators", *Energy Procedia*, 24: 60-67, (2012).
- [28] Cheng M., Han P., and Hua W., "General airgap field modulation theory for electrical machines", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(8): 6063-6074, (2017).
- [29] Wang Y., Feng Q., Li X., and Ma W., "Design, analysis and experimental test of a segmented-rotor high temperature superconducting flux-switching generator with stationary seal", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(11):9047-9055, (2018).
- [30] Wang Y., Yang G., Zhu X., Lin X., and Ma W., "Electromagnetic characteristics analysis of a high-temperature superconducting field-modulation double-stator machine with stationary seal", *Energies*, 11(5): 1269-1269, (2018).
- [31] Polinder H., "Final assessment of superconducting (SC) and pseudo direct drive (PDD) generator performance indicators (PI's)", DTU wind, FP7-ENERGY-2012-1-2STAGE, INNWIND.EU, Tech. Rep., Deliverable D3.44, (2017).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



Investigation of thermal comfort for bus passengers during a cooling test inside a climatic chamber

Klimatik odada yapılan bir soğutma testi sırasında otobüs yolcuları termal konfor değişiminin araştırılması

Yazar (Author): Üzeyir PALA

ORCID: 0000-0001-6231-0846

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Pala U., “Investigation of thermal comfort for bus passengers during a cooling test inside a climatic chamber”, *Politeknik Dergisi*, 23(2): 547-555, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.608597

Investigation of Thermal Comfort for Bus Passengers During a Cooling Test Inside a Climatic Chamber

Araştırma Makalesi/Research Article

Üzeyir PALA

Engineering Faculty, Industrial Engineering Department, Halic University, Turkey

(Geliş/Received : 21.08.2019 ; Kabul/Accepted : 27.01.2020)

ABSTRACT

In this current work, thermal comfort for a cooling process inside a bus was described in a combined theoretical and experimental form. The bus was heated to 40°C for 7 hours within climatic chamber and AC unit was turned on at the beginning of the test. Temperatures, humidity of air and air velocities were measured at certain points to observe effects of ambient conditions on passengers' thermal comfort and physiology. Human body was assumed to be one complete piece which is composed of mainly core and skin compartments. Transient Energy Balance Model by Gagge was used for calculation of changes in thermal conditions. Transient heat and mass transfer between bus interior environment and passenger bodies during cooling period were calculated by a mathematical model. Effects of fast transient conditions on either sensible or latent heat transfer from body, temperatures of core and skin, thermal discomfort and thermal sensation which are all factors for human ergonomics were investigated in detail. The aim in this study is to describe a testing and thermal comfort calculation methodology for assessment of thermal comfort of a bus AC system's cooling performance.

Keywords: Thermal comfort, thermal sensation, bus, cooling period, climatic chamber.

Klimatik Odada Yapılan Bir Soğutma Testi Sırasında Otobüs Yolcuları Termal Konfor Değişiminin Araştırılması

ÖZ

Bu çalışmada, otobüs yolcuları için bir soğutma testi sırasındaki ısı konfor değişimi teorik ve deneysel olarak ele alınmıştır. Otobüs iklimatik oda içinde 7 saat boyunca 40°C 'ye ısıtılmış ve AC ünitesi test başlangıcında açılmıştır. Ortam koşullarının yolcuların termal konforu ve fizyolojisi üzerindeki etkilerini gözlemlemek için sıcaklıklar, hava nemi ve hava hızları belirli noktalarda ölçülmüştür. İnsan vücudunun esas olarak gövde ve deri bölümlerinden oluşan tek bir parça olduğu varsayılmıştır. Isıl şartlardaki değişimlerin hesaplanmasında Gagge tarafından geliştirilmiş olan Geçici Enerji Dengesi Modeli kullanılmıştır. Soğutma testi sırasında otobüsün iç ortamı ile yolcular arasındaki geçici ısı ve kütle transferi matematiksel bir model ile hesaplanmıştır. Hızlı geçici koşulların, insan ergonomisi açısından önemli faktörler olan vücuttan duyulur veya gizli ısı transferi, vücut ve deri sıcaklıkları, termal rahatsızlık ve termal duyu üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu çalışmada amaç, bir otobüs AC sistemi soğutma performansının yolcuların termal konforu açısından değerlendirilebilmesi için bir test ve termal konfor hesaplama metodolojisi ortaya koymaktır.

Anahtar Kelimeler: Isıl konfor, ısı duyu, otobüs, soğutma testi, iklimatik oda.

1. INTRODUCTION

Thermal comfort is an important aspect in human factors engineering, i.e. ergonomics which is the science of refining the design of products to optimize them for better and easier human use. In this work, the system to refine and optimize is the AC system of a bus. For this reason, the results of all experimentation and computational efforts are to be checked at the end and the vehicle AC system is to be revised accordingly for a better thermal comfort sensation inside, which leads to comfortable use of buses for especially long distance travelers. This will also increase passenger's efficiency to do other activities during travelling like reading, doing

office work, communicating, etc. inside vehicle environment. Therefore, comfort of vehicle passengers inside is an important topic in automotive and thermal comfort models take care of thermal interactions in between.

Thermal comfort and physiological control mechanisms was first investigated by Gagge et al. (1971) (ASHRAE 1997). Thermal comfort models were afterwards evaluated by Doherty and Arens (1988) (ASHRAE, 1997) from physiological bases point of view. Parsons (1993) worked additionally on Human Thermal Environments (ASHRAE, 1989). Parsons (2000) has studied thermal environment effects on comfort, health and working efficiency. Jones (2002) has investigated thermal comfort models regarding their capabilities and limitations, compared several model outputs and at the

*Sorumlu yazar (Corresponding Author)
e-posta : uzeyirpala@halic.edu.tr

end demonstrated that there exist considerable differences among models' predictions. Different vehicular thermal comfort models developed were comprehensively reviewed to predict vehicular cabins' thermal comfort by Alahmer et al. (2011) in detail by use of different experimental techniques.

Guan et al. (2003a) examined experimentally human thermal comfort inside a car under highly transient conditions and used an acclimatized room for simulation of 16 typical environmental conditions. Guan et al. (2003b) discussed also thermal sensation modeling in another paper. Using environmental and personal input parameters they combined physiological and psychological factors in a mathematical model to investigate physiological responses. Alahmer et al. (2012) used Berkeley and Fanger models to analyze thermal sensation and comfort state inside vehicle cabins with relative humidity (RH) and temperature control.

A model of computation during both heating and cooling processes for mass and heat transfer between human and car interior was presented by Kaynakli et al. (2002). They based their model on body heat balance equation with additional empirical equations describing sweat rate and mean skin temperature. Kaynakli et al. (2003a) calculated all heat losses either sensible or latent, skin temperature and wettedness, PMV and PPD values by simulation. Kaynakli et al. (2003b) worked also on a computational thermal interactions model between body segments and their environment. In another work, Kaynakli et al. (2004) investigated thermal comfort for both heating and cooling processes for a car using heat balance equation in combination to empirical expressions for mean skin temperature and sweat rate and investigated thermal comfort inside a car during both heating and cooling processes. Finally, Kaynakli and Kilic (2005) studied experimentally, thermal interactions and thermal comfort inside a car during heating again. Transient heating effects on thermal comfort by changing temperature, air velocity and RH parameters for vehicle was investigated. Predictions obtained were compared with experimental results.

Kilic and Akyol (2009) studied experimentally together the parameters affecting thermal comfort in the environment for two different ventilation modes by using Gagge Model.

Pala (2014) investigated effects of a heating period for a bus inside a climatic room on thermal comfort by using Gagge's Transient Energy Balance Model for the analysis. In the study, a bus was instrumented to measure all necessary feet and head level temperatures as well as humidity and ambient temperature. An extreme, transient and non-uniform heat-up period of -20°C to $+20^{\circ}\text{C}$ in 90 minutes was applied until nearly steady-state conditions reached. Sensible (convection, conduction, radiation) and also latent heat transfer means were all taken into consideration during calculations. At the end of the work, Thermal Sensation and Thermal Discomfort Levels were

calculated depending on all measured parameters. In the study, body was taken as one complete piece.

Velt and Daanen (2017) determined the optimal internal temperature in an electric bus during a cool day necessary for thermal comfort of passengers, where energy efficiency is of prime importance as well.

The current paper is based on Gagge's Transient Energy Balance Model describing body heat balance, including also empirical equations to define mean skin temperature and sweat rate. Cooling process effects on passengers' thermal comfort were investigated in detail under transient conditions depending on temperature, RH, air velocity and passengers' clothing ensemble. A data acquisition system inside the room collected the data. Mathematical model was explained step by step in detail for future investigations.

2. MATERIAL and METHOD

HVAC system performance for a vehicle is measured with its ability to reach to an adjusted temperature level during cool-down, warm-up and regulation periods.

Air temperature, velocity of air over passenger bodies, mean radiant temperature and RH are the main environmental factors which are effective on thermal comfort. However, there are also subjective personal factors such as clothing, human metabolism and body weight. Due to these parameters and also thermal transients and non-uniformities, complex physiological thermoregulatory reactions may be observed in human body such as shivering, sweating and vascular constriction and dilation for control of blood flow.

A cool-down process from $+32^{\circ}\text{C}$ to $+25^{\circ}\text{C}$ in 60 minutes according to GBK (Gütegemeinschaft BusKomfort E.V.) Standard is a non-uniform and transient phase for passengers exposed to changes on temperature, air velocity and humidity.

Thermal comfort is more critical for long distance travelers; however such studies are usually found for buildings in the literature. Nevertheless, some directly related papers exist on these topics in automotive area, but they were mostly conducted on cars.

Thermal comfort parameters' investigation and definition of the testing and calculation methodology used for AC system development process of a bus is the main aim of this paper. With the help of the analytical model developed, it is possible to see how thermal sensation and discomfort curves vary under given conditions. Necessary optimizations for vehicle AC system can accordingly be done with further iterations.

A standard raw test data from $+32^{\circ}\text{C}$ down to $+25^{\circ}\text{C}$ within 60 minutes was used here. Room ambient temperature was kept constant at around $+40^{\circ}\text{C}$.

Test data does not include core and skin temperatures. Therefore, they were calculated starting from neutral levels (i.e. 33.7°C for skin and 36.8°C for core).

Opposite to a heating test, conduction heat transfer between passenger bodies and seats and back supports was not taken into consideration due to relatively lower temperature differences in between.

In this study, heat storages in body core and skin compartments were both considered according to Transient Energy Balance Model and MATLAB code was written for all calculations. The main reason for choosing this model is that, unlike other steady-state models, it has transient nature and considers heat storages in both body core and skin compartments.

The value of clothing ensemble was taken as 0,5clo for bus passengers assuming summer clothing during cooling test (ASHRAE 1989). The gender of the passengers was not taken into consideration during the study.

Either the human body was considered as monolithic or as a whole consisting of 16 parts as in Kaynakli et al. (2004), the resulting differences were studied in the

literature and it was determined that there were no significant differences between the two. The main difference here is mostly the local chilling of less clothed left and right feet and fibula regions of the body. However, the monolithic acceptance of the human body generally does not lead to a considerable error in the calculations and is in good agreement.

3. MATHEMATICAL MODELING

Human body interacts with its environment thermally and this can be expressed as follows for core and skin compartments separately according to Gagge Model:

$$S_{cr} = M - \widehat{W} - Q_{res} - Q_{cr,sk} \tag{1}$$

$$S_{sk} = Q_{cr,sk} - (Q_{cd} + C + R + E_{sk}) \tag{2}$$

Note that the meanings of all parameters in the equations are given in Nomenclature Table and the values for all constant parameters commonly used in the literature are given in Table 1.

Table 1. Constant Parameters Used for Calculations

Constant Parameter		Value	Dimension
<i>Ab</i>	Body surface area	1.751	m ²
<i>c_{p,a}</i>	Specific heat of air	1005	J/kg K
<i>c_{p,b}</i>	Specific heat of body	3470	J/kg K
<i>c_{p,bl}</i>	Specific heat of blood	4145	J/kg K
<i>fcl</i>	Ratio of clothed to nude body area	1,05	-
<i>hfg</i>	Heat of vaporization	2.43*10 ⁶	J/kg
<i>hr</i>	Irradiative heat transfer coefficient	4,7	W/m ² .K
<i>K</i>	Effective heat transfer coefficient between core and skin	5,28	W/m ² .K
<i>m</i>	Body mass	70	kg
<i>m_{res}</i>	Mass flow rate of air inhaled corresponding to 6L/min	0.0001296	kg/sec
<i>Mmet</i>	Standard metabolic heat production rate for a human body	131 W or 75 W/m ² (Olesen, 1982)	Watt or W/m ²
<i>ηe</i>	Evaporation efficiency	0,85	-
<i>ηcl</i>	Permeation efficiency of summer clothing	0,80	-
<i>nclo</i>	Clothing value	0,5	clo
<i>Qcd</i>	Heat transfer by conduction	0	J
<i>Rcl</i>	Thermal resistance of clothing for one clo	0,155	m ² KW
<i>T_{cr}</i>	Initial body core temperature	36,8	°C
<i>T_{ex}</i>	Temperature of exhaled air	35	°C
<i>T_{mildhcr}</i>	Core temperature border of mild hypothermia	35	°C
<i>T_{modhcr}</i>	Core temperature border of moderate hypothermia	32	°C
<i>T_{sevhcr}</i>	Core temperature border of severe hypothermia	28	°C
<i>T_{sk}</i>	Initial skin temperature	33,7	°C
<i>V</i>	Air velocity	0,35	m/s
<i>W</i>	Extetal work done	0	Watt
<i>W_{ex}</i>	Exhaled air humidity ratio	0,95	-

Instantaneous temperature changes are caused by heat storages both in body core and skin compartments and are expressed by:

$$\frac{dT_{cr}}{dt} = \frac{S_{cr} A_b}{(1-\alpha) m c_{p,b}} \tag{3}$$

$$\frac{dT_{sk}}{dt} = \frac{S_{sk} A_b}{\alpha m c_{p,b}} \tag{4}$$

where α is the ratio of skin weight to the weight of total body described by the formula:

$$\alpha = 0.0418 + \frac{0.745}{3600 \dot{m}_{bl} + 0.585} \tag{5}$$

Change in the core and skin temperatures can be calculated by two formulae below starting from their initial values.

$$T_{cr} = T_{cr} + 10 \left(\frac{dT_{cr}}{dt} \right) \tag{6}$$

and

$$T_{sk} = T_{sk} + 10 \left(\frac{dT_{sk}}{dt} \right) \tag{7}$$

During the test, measurement intervals were 10 seconds.

Heat losses through convection and irradiation from body to environment can be given as:

$$C + R = \frac{T_{sk} - T_o}{R_{cl} + 1 / [(h_c + h_r) f_{cl}]} \quad (8)$$

Operative temperature (T_o) in the above equation is given as:

$$T_o = \frac{h_r \bar{T}_r - h_c T_a}{h_r + h_c} \quad (9)$$

\bar{T}_r is body mean radiant temperature and it is empirically defined as:

$$\bar{T}_r = 0.94 T_a - 1.38 \quad (10)$$

h_c is the coefficient of convective heat transfer and given as:

$$h_c = 8.3 V^{0.6} \quad (11)$$

Sweating and natural diffusion of water through skin cause both latent heat losses from skin and it is calculated with the following formula:

$$E_{sk} = E_{rsw} + E_{dif} = \frac{w (P_{sk,s} - P_a)}{(R_{cl} / \eta_{cl} LR) + (1 / h_c f_{cl} LR)} \quad (12)$$

LR is Lewis ratio and it is the ratio of evaporative heat transfer coefficient divided by convective heat transfer coefficient.

$$LR = 15.15 \frac{(T_{sk} + 273.2)}{273.2} \quad (13)$$

Partial pressure of saturated water vapor at temperature of skin can be calculated as:

$$P_{sk,s} = 610.78 e^{\left(\frac{17.2694 T_{sk}}{T_{sk} + 238.3}\right)} \quad (14)$$

and partial pressure of water vapor in ambient air is calculated by:

$$P_a = \frac{RH}{100} P_{sk,s} \quad (15)$$

During respiration, body loses either sensible or latent heat through evaporation and convection of water vapor inside inhaled air through respiratory tract.

Heat losses by convection (C_{res}) and evaporation (E_{res}) due to respiration is given by:

$$Q_{res} = C_{res} + E_{res} = \dot{m}_{res} \frac{[c_{p,a} (T_{ex} - T_a) + h_{fg} (W_{ex} - W_a)]}{A_b} \quad (16)$$

The following expression gives heat transfer between core and skin:

$$Q_{cr,sk} = (K + c_{p,bl} \dot{m}_{bl}) (T_{cr} - T_{sk}) \quad (17)$$

Blood flow rate is given as:

$$\dot{m}_{bl} = \frac{1}{3600} \left(\frac{6.3 + 200 WSIG_{cr}}{1 + 0.5 CSIG_{sk}} \right) \quad (18)$$

where $WSIG_{cr}$ and $CSIG_{sk}$ can be expressed as:

$$WSIG_{cr} = T_{cr} - 36.8 \quad (19)$$

$$CSIG_{sk} = 33.7 - T_{sk} \quad (20)$$

Production of metabolic energy due to shivering can be calculated with the following empirical equation:

$$M_{shiv} = 19.4 CSIG_{sk} CSIG_{cr} \quad (21)$$

where $CSIG_{cr}$ is calculated from

$$CSIG_{cr} = 36.8 - T_{cr} \quad (22)$$

Total body heat production rate is then:

$$M = M_{met} + M_{shiv} \quad (23)$$

Sweat production rate per unit area of skin is calculated with the following empirical equation:

$$\dot{m}_{rsw} = 4.7 * 10^{-5} WSIG_b e^{\left(\frac{WSIG_{sk}}{10.7}\right)} \quad (24)$$

where $WSIG_b$ and $WSIG_{sk}$ are given by:

$$WSIG_b = T_b - 36.49 \quad (25)$$

$$WSIG_{sk} = T_{sk} - 33.7 \quad (26)$$

In the literature, mean body temperature T_b is given as:

$$T_b = \alpha T_{sk} + (1 - \alpha) T_{cr} \quad (27)$$

Polynomial expressions obtained with curve fit for T_a and RH parameters are as shown below.

$$\begin{aligned} T_a &= 3.752 * 10^{-28} t^8 - 1.195 * 10^{-23} t^7 + 1.569 \\ &* 10^{-19} t^6 - 1.101 * 10^{-15} t^5 + 4.497 * 10^{-12} t^4 \\ &- 1.100 * 10^{-8} t^3 + 1.641 * 10^{-5} t^2 - 0.016 t \\ &+ 39.680 \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} RH &= 2.522 * 10^{-51} t^{15} - 1.655 * 10^{-46} t^{14} + 4.875 \\ &* 10^{-42} t^{13} - 8.522 * 10^{-38} t^{12} + 9.838 * 10^{-34} t^{11} \\ &- 7.894 * 10^{-30} t^{10} + 4.512 * 10^{-26} t^9 - 1.851 \\ &* 10^{-22} t^8 + 5.414 * 10^{-19} t^7 - 1.106 * 10^{-15} t^6 \\ &+ 1.516 * 10^{-12} t^5 - 1.295 * 10^{-9} t^4 + 5.870 \\ &* 10^{-7} t^3 - 7.099 * 10^{-5} t^2 - 0.028 t \\ &+ 44,523 \end{aligned} \quad (29)$$

TSENS and DISC comfort prediction indices given by Gagge et al. are, on the other hand, expressed as follows:

$$\begin{aligned} TSENS &= \begin{cases} 0.4685(T_b - T_{b,c}) & \text{if } T_b < T_{b,c} \\ \frac{4.7\eta e(T_b - T_{b,c})}{T_{b,h} - T_{b,c}} & \text{if } T_{b,c} \leq T_b \leq T_{b,h} \\ 4.7\eta_e + 0.685(T_b - T_{b,h}) & \text{if } T_{b,h} < T_b \end{cases} \quad (30) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} DISC &= \begin{cases} 0.4685(T_b - T_{b,c}) & \text{if } T_b < T_{b,c} \\ \frac{4.7(E_{rsw} - E_{rsw,req})}{(E_{max} - E_{rsw,req} - E_{dif})} & \text{if } T_{b,c} \leq T_b \end{cases} \quad (31) \end{aligned}$$

Mean body temperature T_b is compared with the levels of upper and lower evaporation control temperatures.

$$T_{b,c} = (0.194/58.15) (M - \widehat{W}) + 36.301 \quad (32)$$

$$T_{b,h} = (0.347/58.15) (M - \widehat{W}) + 36.669 \quad (33)$$

E_{rsw} is heat loss due to sweat evaporation and given as:

$$E_{rsw} = \dot{m}_{rsw} h_{fg} \quad (34)$$

$E_{rsw,req}$ is the required E_{rsw} that assures thermal comfort and is given as:

$$E_{rsw,req} = 0.42 (M - \widehat{W} - 58.15) \quad (35)$$

A maximum total value of latent heat loss from skin by diffusion and sweating together is E_{max} and it is given by:

$$E_{max} = \frac{P_{sk,s} - P_a}{(R_{cl} / \eta_{cl} LR) + (1 / h_c f_{cl} LR)} \quad (36)$$

Note that, it is the case, where $w=1$ in Eqn. 12.

Body wet portion required for sweat evaporation can be expressed as:

$$w_{rsw} = E_{rsw} / E_{max} \tag{37}$$

Skin wettedness (w) can be calculated empirically by:

$$w = 0.06 + (0.94 E_{rsw} / E_{max}) \tag{38}$$

Evaporation by diffusion is given as:

$$E_{dif} = 0.06 (1 - w_{rsw}) E_{max} \tag{39}$$

Note that $(1 - w_{rsw}) = w_{dif}$

The scale for both Thermal Sensation and Discomfort indices is: (+5) : extremely hot and not bearable; (+4) : very hot; (+3) : hot; (+2) : warm; (+1) : slightly warm; (0) : **neutral**; (-1) : slightly cool; (-2) : cool, (-3) : cold; (-4) : very cold; (-5) : extremely cold and not bearable.

4. EXPERIMENTAL SETUP

The passenger compartment of a bus is relatively a big space in which there exist non-uniform, 3D, unsteady turbulent flows and variations of internal temperature during both cooling and heating processes. Therefore, due to serving for long distances with so many passengers, AC performance of a bus is crucial.

Capacities of cooling elements of the bus are:

1- AC Unit at the Roof = 35 kW (not tropical version)

2- Defroster AC Unit = 8 kW

Total vehicle cooling capacity = 43 kW

Window and aisle air exits from main air duct have openings with constant cross sections and are not adjustable. However service sets just over passenger heads are on the contrary adjustable depending on passengers' comfort needs.

Shape of air inlet/outlet nozzles together with their locations, average air flow rate over passengers, direction of ventilated air and distribution of passengers, etc. are all effective parameters for ventilation characteristic in a passenger bus. In this respect, a non-uniform internal air and temperature distribution under hot ambient conditions may cause sweating and therefore discomfort of the occupants inside.

The test was carried out with 54 seats, 3-axle bus. Air temperatures and velocities inside and relative humidity either inside or outside of the bus were all measured with proper sensor instrumentation. Types and points of measurements are shown in Figure 1. Air temperature measurements were also performed for head levels on the given locations. These values were then averaged in order to use for the rest of calculations.



Figure 1. Measurement Points on the Passenger Bus

A cooling data collected at every 10 seconds for all temperature and RH parameters was used in this thermal comfort investigation work. Outside RH data were measured additionally. The data was saved for 128 minutes, which is much longer than normal test duration of 60min. according to GBK Standards for cooling tests; however instead of required +32°C as the initial chamber temperature, +40°C was used and at the end cooling amount was observed as temperature difference. According to release condition of GBK Standard, a temperature difference of 7°C within 60min. must be achieved by means of bus AC system.

K Type thermocouples (Measurement range: -200°C - +1370°C; Accuracy: +/- 0.3°C; Resolution: 0,1°C) were used for temperature measurements and Rotronic HC2-S sensors (Measurement range: 0–100% relative humidity; Accuracy: 0.8%; Resolution: 0,01°C) were used for inside and outside RH measurements.

Air velocities were separately measured by Testo 435 Anemometer (Measurement range: 0–20 m/s; Accuracy: +/- 0.03 m/s + 4% of measurement value) and 0.35 m/s average air velocity value was used for calculations.

The experiment was conducted according to GBK Standard with the following conditions:

- Ambient temperature is +40°C (Normally start temperature is 32°C according to GBK Standard, but a temperature difference of 7°C within 60min. will be aimed for AC system release for 3-5 star certification).
- Vehicle shall wait min.7 hours under +40°C for homogeneous temperature distribution without engine running.
- RH inside the bus is tried to be kept constant starting from 40% RH at the beginning.
- Each passenger is simulated by 131W heat load and 25% humidification, i.e. 40gram/hour steam per person during the test. For each meter of bus length, 4 persons are taken into consideration for a 4 star seat layout.
- Doors and flaps opening to outside are all to be closed before starting the test and circulating mode is adjusted.
- Vehicle shall not move during the test; it is stationary.
- Temperature deviations of max. +/-3K between measured and set values are allowed and cannot be exceeded in the chamber.
- Acclimatized room should be equipped accordingly for measurements.
- Wind speed inside the chamber shall be 80 km/h during the test.
- Defrosting Unit of the vehicle is set at min. temperature value and runs with 100% fan speed.
- Defrost flaps shall be in circulation position.
- Cooling system is to be set to min. Tset value, i.e. maximum cooling performance.
- Service sets and nozzles must be all opened completely before the test in circulation mode.
- Engine rpm level shall be fixed to 1500 rpm during the test by using a special tool to fix it for a constant compressor operation.
- During cooling test max. 2 persons is allowed inside the bus.
- Testing time starts immediately after vehicle engine and then AC compressor is started.
- The temperature measurements for heads shall be performed at 150 cm height from vehicle ground level.
- The average of average temperatures of heads shall be the main evaluation criterion for complete vehicle.
- Test shall continue until steady-state condition is reached, which is longer than standard 60min. test.

Each heavy vehicle brand defines its own testing procedure and test set-up and they may differ to some extent in this respect. The test-setup and procedure used in this work were both standard and they served for comparison purposes among different vehicle AC System configurations only. Therefore one-to-one direct comparison according to different load drive cycle was intentionally ignored in this work.

Release Condition for a Passenger Bus:

The internal temperature of the bus must decrease from +32°C to +25°C within 60 minutes according to the main requirement by GBK for busses. This means that within 60min. of measurement time, a temperature decrease of 7°C must be achieved. Temperatures inside and outside of the vehicle were both around +40°C and RH value was around 41% at the beginning of the test and note that there was also a humidification inside the bus to simulate release of water vapor from passenger bodies.

5. RESULTS AND DISCUSSION

Initial temperature level within bus compartment was +40°C at the beginning of cooling test. Raw measurement data for all channels was collected with respect to independent time variable. The average head level temperatures were taken as internal temperature data of the vehicle for further calculations. Chamber temperature i.e. the ambient temperature of the bus was kept constant at around 40.2°C throughout the test.

In Figure 2 variations of internal temperature and RH inside the vehicle are shown together. Test data was normally longer, however only a regular portion of 7720 seconds was used as the test data. A minimum temperature level of 26°C was reached at the end of test time. After 60min. from test start, internal temperature of the bus was measured to be 28.8°C, which means that a

temperature decrease of 11.2°C from 40°C down to 28.8°C was achieved by means of bus AC system. This means that according to this temperature decrease result and considering GBK Standard, the bus cooling system can be released. Initial RH value was almost 41% and it varied around 47% especially to the end of cooling process. Multi degree polynomials were fit to the measured data with Eqns. 28 and 29 for further calculations in MATLAB.

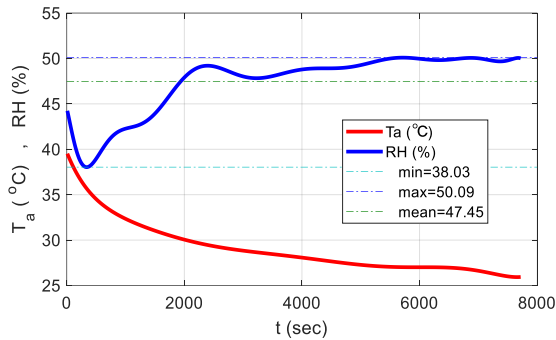


Figure 2. Bus Internal Temperature and RH inside the Bus

Heat loss through respiration is dependent directly on ambient temperature inside the vehicle and it is calculated by Eqn. 16. By continuously decreasing bus internal temperature, respiration heat loss decreases also due to decreasing temperature gradient. Min. respiration heat energy loss was 81.37, max. is 102.4 and the mean was 85.97 W/m².

In Figure 3 warm and cold signals from core, skin and complete body are observed. Skin cold signal exceeds 12°C as maximum value and 8.6°C as mean value. For $CSIG_{cr}$, a max. value of 0.1943°C was observed. A very small value of max. 0.0001376°C was measured for core warm signal ($WSIG_{cr}$). $WSIG_{sk}$ and $WSIG_b$ values were measured to be both zero.

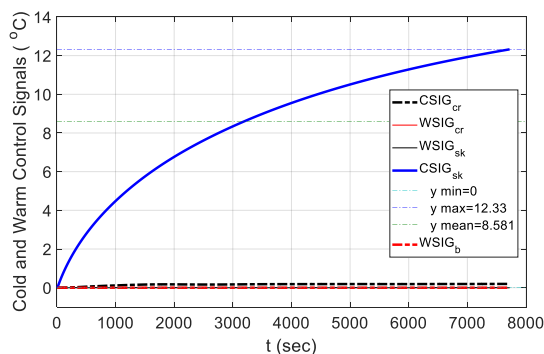


Figure 3. Control Signals (Cold and Warm)

Heat produced by body shivering, in addition to body constant metabolic heat production of 131 W/person, has a max value of 46.4 W/person.

As the internal temperature inside the bus and therefore skin temperature decreases, rate of blood flow between core and skin tends to stabilize to the end of the test. Its

max. value is 0.00175, min. value is 0.0002443 and the mean value is 0.0003846 kg/s.m².

Core and skin temperatures and blood flow in between calculated by Eqn. 18 are influential on energy flow between core and skin. The variation of this energy flow is shown in Figure 4. As expected, it increases continuously after test start. To compensate the heat loss due to decreasing ambient temperature, body generates heat within body core and this energy is transferred to the skin compartment. By decreasing internal bus temperature, it continues to increase and it exceeds normal metabolic heat generated by the body of 75W/m² which is equal to 131 W/person divided by total body surface area of 1.751m² of a person. The reason behind is normally due to shivering effect.

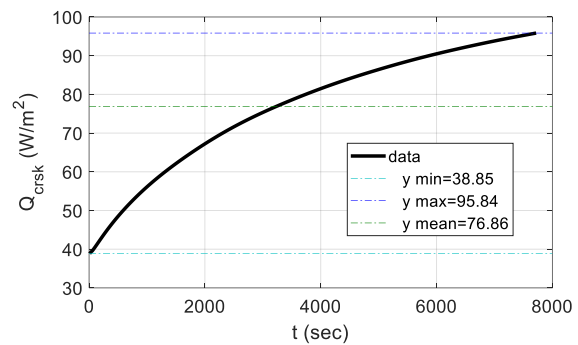


Figure 4. Heat Energy Flow between Core and Skin

Heat transfer by convection and radiation cumulatively decreases by decreasing bus internal temperature. A good reason behind this fact should be that the passengers have 0.5clo clothing and although bus internal temperature was 40°C at beginning of the test with relatively higher temperature gradient between bus ambient and skin temperature, this gradient decreases by time throughout the test. Its max. value is 189.2, min. value is 121.5 and the mean value is 142 W/m².

During test time bus internal temperature decreases continuously by cooling performance of AC system and therefore heat transfer through evaporation decreases as well. There is relatively small amount of heat loss here in comparison to heat losses through convection and radiation, as expected. Its max. value is 31.04, min. value is 13.89 and the mean value is 18.51 W/m².

Energy stored in core and skin compartments are respectively depicted in Figure 5. As seen from the graphs, equilibrium conditions are observed around zero level in both cases. It can be noted that body core experiences an extreme change at the beginning of the test to react sudden changes and then stabilizes around zero to the end. In case of the skin however, a relatively higher amount of energy is stored to compensate decreasing ambient temperature. As the bus internal temperature decreases by means of cooling, it stabilizes again around zero level due to energy balance of the body.

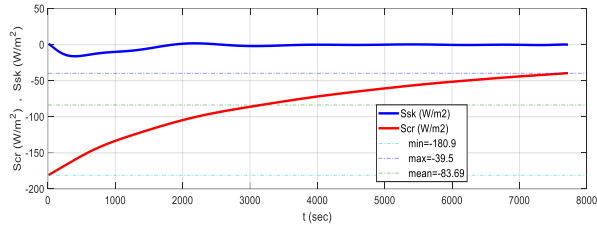


Figure 5. Heat Energy Stored in the Body Core and in the Skin

As a human physiology rule, body keeps core temperature always at $T_{cr}=36.8^{\circ}\text{C}$ constant level with relatively small variations which is a thermoregulatory function. During complete cooling process, there is a maximum decrease of 0.19°C in core temperature from its neutral value. Core temperature is calculated as always above mild, moderate and severe hypothermia temperature limits. These physiologically accepted levels are in turn 35°C , 32°C and 28°C . Skin temperature however decreases relatively much more due to directly being exposed to ambient conditions as observed in Figure 6. According to the mathematical model, decrease in skin temperature is bigger than 12°C .

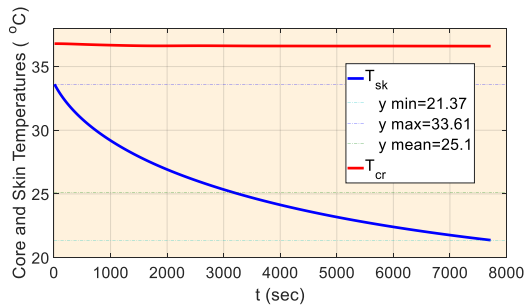


Figure 6. Temperatures of Skin and Core

Mean, low, high body control temperature levels are given in Figure 7. It is seen that a decline of $> 12^{\circ}\text{C}$ in the skin temperature causes also a related decline in body mean temperature as well according to Eqn. 27.

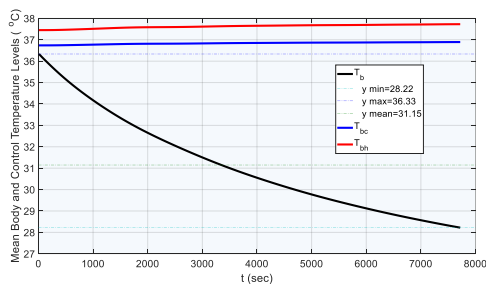


Figure 7. Body Control Temperature Levels (Low, Mean and High)

In Figure 8, a comparison of all heat losses by radiation, convection, respiration and evaporation is shown together. Heat loss under these test conditions is observed mostly by convection and radiation, then by respiration and then by finally evaporation through skin. Min. total

heat loss is 216.9, max. is 313.2 and the mean is 246.5 W/m^2 .

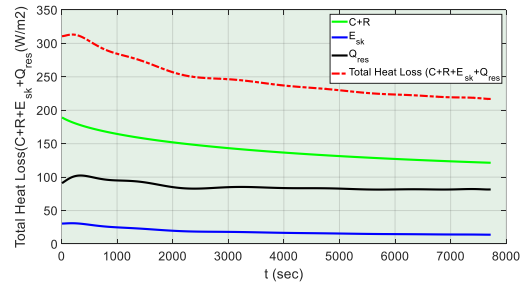


Figure 8. Total Heat Losses as overall (C+R+Qcd+Qres+Esk)

Certain boundary conditions in the data set led TSENS and DISC graphs to be the same exactly as observed in Figure 9.

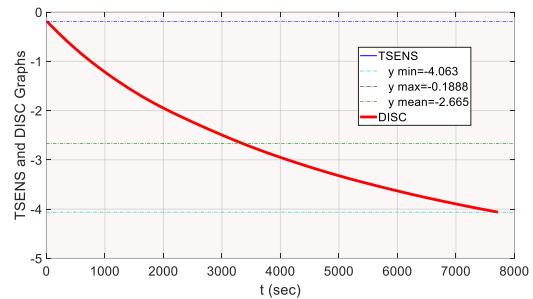


Figure 9. Thermal Discomfort and Thermal Sensation Graph

At the beginning of the test, body starts with neutral thermal comfort feeling since we start the analysis with neutral core and skin temperatures. TSENS starts with -0.19 which is a negative value, but as the hot environment is experienced by the body of bus passenger right at the beginning and skin temperature decreases more than 12°C down to 21.37°C , it falls down until -4.063 till to the test end. Considering only the final TSENS or DISC value, this is a thermal sensation scale between cold-very cold with 0.5clo summer clothing. However, when considering the average index value of -2.665 throughout the test duration, it can easily be concluded that the passengers inside the vehicle experienced a thermal sensation between cool and cold as overall.

6. CONCLUSIONS

A description of thermal comfort during a cooling process inside a bus in a climatic chamber was studied here in a combined theoretical and experimental form. A similar situation may occur normally during ride conditions of busses between cities in our daily lives in summer seasons.

In Pala (2014) study, the heating performance of the vehicle from -20°C to $+20^{\circ}\text{C}$ and the thermal comfort of the passengers were investigated. In this study however the cooling performance of the vehicle and the thermal comfort of the passengers are investigated. In this

respect, both studies complement each other because they deal with completely opposite cases.

Effects of changing internal temperature, AC cooling capacity, clothing ensemble, RH, average air velocity, etc. can directly be checked by means of MATLAB algorithm iterations already developed for this purpose. In case if any problem detected in the cooling system design at the end of testing phase, HVAC design and testing team can analyze and accordingly detect where and how to make the required revisions, improve the system and retest it for thermal comfort validation for a better passenger ergonomics inside the vehicle.

In the literature, no other holistic study suitable for product design benchmarking was found which details the method step by step in terms of cooling test in buses.

Human body was taken as one complete piece instead of 16 sedentary pieces for a good approximation for these types of works where we have dynamic ambient and also difficult experimental conditions.

The current study provides a standard test and computation model for bus cooling system design and test engineers in order to assess a bus AC system performance and it is also valid either for heating or regulation tests.

There seems to be no need to measure skin and core temperatures for cooling test in Transient Energy Balance Model, because neutral temperatures can easily be used for calculations.

$T_b < T_{b,c}$ is always satisfied in cooling test as observed also in Figure 7. For this reason, the first option of index equations (Eqns. 30 and 31) of $TSENS = DISC = 0.4685(T_b - T_{b,c})$ if $T_b < T_{b,c}$ was always satisfied. Therefore TSENS and DISC graphs were calculated to be exactly the same. Important changes in thermal sensation calculation results could be expected, when the second and the third options of TSENS index formula was also used depending on testing conditions. This would probably lead to a completely different TSENS and DISC graph; however such a situation did not occur during the current test.

It can be noted that minus TSENS and DISC values found here may be similar to some heating test results with minus temperature degrees. However, this could be possible considering that clothing ensemble is completely different in each case. For winter heating test clothing ensemble is normally taken as 1.5clo, whereas for summer cooling test clothing ensemble is taken as 0.5clo; which directly affects all calculation results.

REFERENCES

- [1] Alahmer A, Mayyas A, Mayyas A.A, Omar M.A, Shan D., "Vehicular thermal comfort models; a comprehensive review", *Applied Thermal Engineering*, 31: 995-1002, (2011).
- [2] Alahmer A, Omar M, Mayyas A.R, Qattawi A., "Analysis of vehicular cabins' thermal sensation and comfort state, under relative humidity and temperature control, using Berkeley and Fanger models", *Building and Environment*, 48: 146-163, (2012).
- [3] Doherty T.J, Arens E., "Evaluation of the physiological bases of thermal comfort models", *ASHRAE Transaction*, 94 (Part 1): 1371-1385, (1988).
- [4] Gagge A.P, Stolwijk J.A.J, Nishi Y., "An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response", *ASHRAE Transaction*, 77(1): 247-262, (1971).
- [5] Guan Y, Hosni M.H, Jones B.W, Giolda T.P., "Investigation of human thermal comfort under highly transient conditions for automotive applications- Part 1: Experimental design and human subject testing implementation", *ASHRAE Transaction*, 109: 885-897, (2003a).
- [6] Guan Y, Hosni M.H, Jones B.W, Giolda T.P., "Investigation of human thermal comfort under highly transient conditions for automotive applications-Part 2: Thermal sensation modeling", *ASHRAE Transaction*, 109: 898-907, (2003b).
- [7] Jones B.W., "Capabilities and limitations of thermal models for use in thermal comfort models", *Energy Building*, 34: 653-659, (2002).
- [8] Kaynakli O, Unver U, Kilic M., "Simulation of thermal comfort heating and cooling periods in an automobile compartment", *Proceedings of the Automotive Technologies Congress*, 24-26 June, Bursa, Turkey: 127-135 (in Turkish), (2002).
- [9] Kaynakli O, Unver U, Kilic M., "Calculation of thermal comfort zones with the ambient parameters", *Proceedings of the First International Exergy, Energy and Environment Symposium*, 13-17 July, Izmir, Turkey: 769-773, (2003a).
- [10] Kaynakli O, Unver U, Kilic M., "Evaluating thermal environments for sitting and standing posture", *Int. Com. Heat and Mass Transfer*, 30 (8): 1179-1188, (2003b).
- [11] Kaynakli, O., Pulat, E., Kilic, M., "Thermal comfort during heating and cooling periods in an automobile", *Heat and Mass Transfer*, 41: 449-458, (2004).
- [12] Kaynakli O, Kilic M., "An investigation of thermal comfort inside an automobile during the heating period", *Applied Ergonomics*, 36: 301-312, (2005).
- [13] Kilic M, Akyol S.M., "The effects of using different ventilation modes during heating periods of an automobile", *J. of Thermal Science and Technology*, 29-1: 25-36, (2009).
- [14] Pala U, Oz H.R., "An investigation of thermal comfort inside a bus during heating period within a climatic chamber", *Applied Ergonomics*, 48: 164-176, (2015).
- [15] Parsons K.C., "Human Thermal Environments", Taylor & Francis Ltd., London, UK., (1993).
- [16] Parsons K.C., "Environmental ergonomics: a review of principles, methods and models", *Applied Ergonomics*, 31: 581-594, (2000).
- [17] Velt K.B, Daanen H.A.M., "Optimal bus temperature for thermal comfort during a cool day", *Applied Ergonomics*, 62: 72-76, (2017).



Endüstriyel kontrol sistemlerine (scada) yönelik siber terör saldırı analizi

Cyber terror attack analysis for industrial control systems (scada)

Yazar(lar) (Author(s)): Esra SÖĞÜT¹, O. Ayhan ERDEM²

ORCID¹: 0000-0002-0051-2271

ORCID²: 0000-0001-7761-1078

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Söğüt E., Erdem O. A., “ Endüstriyel kontrol sistemlerine (scada) yönelik siber terör saldırı analizi”, *Politeknik Dergisi*, 23(2): 557-566, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.562570

Endüstriyel Kontrol Sistemlerine (SCADA) Yönelik Siber Terör Saldırı Analizi

Araştırma Makalesi / Research Article

Esra SÖĞÜT , O. Ayhan ERDEM*

Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü , Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye

(Geliş/Received : 09.05.2019 ; Kabul/Accepted : 31.07.2019)

ÖZ

Denetleyici Kontrol ve Veri Toplama Sistemleri veya Endüstriyel Kontrol Sistemleri, önemli görülen kritik altyapıların kontrolünü sağlayan sistemlerdir. Kritik altyapılara yönelik gerçekleştirilen ataklar, siber terör atakları olarak değerlendirilir. Bu kritik altyapıların siber terör ataklarına karşı güvenliğinin sağlanması ve işleyişinin devamlılığı büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada kritik altyapılardan gaz boru hattı kontrol sistemine ait bir veri kümesi kullanılmaktadır. Veri kümesinde, mevcut SCADA protokollerinden Modbus protokolüne yönelik Command Injection, Reconnaissance and DoS (Denial of Service) gibi kategorilerde çeşitli ataklar gerçekleştirilmiştir. Böylece atak uygulanan ve atak uygulanmayan durumların sahip olduğu davranışların incelenmesi, değerlendirilmesi ve atak tespitinin yapılabilmesi hedeflenmektedir. Bunun için veri kümesi üzerinde çeşitli algoritmalar ile veri madenciliği yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen analiz sonuçlarına göre en doğru sınıflandırma oranının Random Tree algoritması ile sağlandığı görülmüştür. Bu algoritmaya ait analiz sonuçları incelenerek siber terör atak davranışları belirlenmiş ve böylece siber terör atak tespitinin gerçekleştirilmesi için ilgili alana önemli bir katkı sunulmuştur. Denetleyici Kontrol ve Veri Toplama Sistemlerinin veya Endüstriyel Kontrol Sistemlerinin siber güvenliğinin sağlanması için bu tür çalışmaların daha fazla yapılması ve yeni veri kümelerinin üretilerek kullanıma sunulması gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler: Scada, eks, modbus, siber terör, siber saldırı.

Cyber Terror Attack Analysis for Industrial Control Systems (SCADA)

ABSTRACT

Supervisory Control and Data Acquisition Systems or Industrial Control Systems are the systems that control the critical infrastructures that are considered important. Attacks against critical infrastructures are considered as cyber terror attacks. Continuity of the operation of these critical infrastructures and ensuring the security of these critical infrastructures against cyber terror attacks are great importance. In this study, a data set of the gas pipeline control system, which is one of the critical infrastructures, is used. In the data set, several attacks were performed in the categories such as command injection, reconnaissance and denial of service for Modbus protocol which is one of the existing SCADA protocols. In this way, it is aimed to investigate and evaluate the behaviors of attacked and non-attacked situations. In addition, it is aimed to detect the attack. For this purpose, data mining method has been used with various algorithms on the data set. According to the analysis results, the most accurate classification rate is provided by Random Tree algorithm. By analyzing the results of this algorithm, cyber terror attack behaviors were determined and thus, an important contribution was made to the field of cyber terror attacks. In order to ensure cyber security of Supervisory Control and Data Acquisition Systems or Industrial Control Systems, such studies need to be carried out further and new data sets should be produced and put into use.

Keywords: Scada, ics, modbus, cyber terror, cyber attack.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Denetleyici Kontrol ve Veri Toplama Sistemleri/ Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) veya Endüstriyel Kontrol Sistemleri

(EKS), kritik altyapı olarak kabul edilen birçok sistemi izler ve kontrol eder. Elektrik, su, gaz gibi kaynakların üretimi, iletimi ve dağıtımı için oluşturulan sistemler kritik altyapılar olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, Ulusal Siber Güvenlik Stratejisi ve 2013-2014 Eylem Planı'na (Türkiye) göre "Ulaşım, enerji, haberleşme, finans, sağlık, su yönetimi, kritik kamu hizmetleri" gibi yapılar da kritik altyapılar olarak belirlenmiştir [1].

Gelişen teknolojiye bağlı olarak kritik altyapılarda kullanılan SCADA veya EKS'ler de gelişmekte ve

kullanım alanları artmaktadır. Kritik altyapılara yönelik gerçekleştirilen ataklar, sistemlerin çalışmasına zarar verebilir, işleyişi yavaşlatabilir, sistemi kısmen veya tamamen durdurabilir. Bu sistemlerin güvenliği öncelikli konular arasında yer almaktadır [2]. Bu şekilde meydana gelen ataklar, siber terör atakları olarak değerlendirilebilmektedir. Siber terör ataklarının yaşanması durumunda, kritik altyapı sistemleri hizmet edemez hale gelebilir ve bağlı bulunan diğer sistemler de olumsuz şekilde etkilenebilir. Ulusal ve uluslararası boyutlarda kullanılan bu sistemlerin güvenliği ve siber terör ataklarından korunması giderek önemli konular haline gelmektedir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, Morris ve arkadaşlarının EKS için yeni bir siber atak veri kümesi oluşturduğu görülmüştür. Daha sonra, oluşturulan bu veri

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

kümesi genel kullanıma sunulmuştur [3]. Başka bir çalışmada, Shang ve arkadaşları EKS için saldırı tespit sistemlerini incelemiş ve sistemlerde kullanılan Modbus TCP haberleşmesi için yeni bir kural önermişlerdir [4]. Bhatia ve arkadaşları ise Modbus protokolünün saldırılara açık olduğunu belirtmiş ve saldırı tespit sistemlerine yönelik karşılaştırmalar yapmışlardır [5]. Hindy ve arkadaşları SCADA tarafından kontrol edilen bir su dağıtım sistemine ait veri kümesi üzerinde çalışarak belirledikleri ataklara karşı anomali tespitleri yapmışlardır. DoS, Spoofing veya algılayıcı arızaları gibi çeşitli ataklara göre senaryolar oluşturmuşlar ve anomali durumuna göre uyarı mekanizması geliştirmişlerdir [6]. Sugwon ve Myongho, SCADA için saldırı tespit sistemleri ile ilgili incelemeler yapmıştır. Sistemlerde anormal hareketlilik kontrolü için ağ trafiği desenlerinin oluşturulması gerektiğini söylemişlerdir [7]. Kang ve arkadaşları tarafından SCADA sistemlerine yönelik siber tehditler tartışılmış ve bu tehditler detaylandırılarak çizelge halinde sunulmuştur. Kimlik ihlali, zaman veya mantık bombaları, araya girme saldırıları, DoS, virüsler, terörizm, sabotaj, Spoofing gibi birçok tehdit çizelgede yer almaktadır [8]. Dell tarafından yayınlanan bir raporda ise SCADA'ya yönelik gerçekleştirilen saldırı metotlarına değinilmiştir. Buna göre komut enjeksiyonu, kodlar, çapraz-site istekleri, kriptoloji, izinler, yetkisiz alanlar, kaynak yönetimi gibi çeşitli metotlar SCADA'yı ilgilendirmektedir [9].

Deney düzeneği oluşturan Jung ve arkadaşları Modbus seri protokolü üzerinde çalışmışlardır. İç ağ yapısında Siniffing atağı gerçekleştirilmiş ve meydana gelen durum izlenmiştir. Bu atağa yol açan zafiyeti ortadan kaldırmak için pakete ait Rx ve Tx değerlerinin izlenmesinin gerekli olduğu belirtilmiştir [10]. Deney düzeneği kullanan başka bir çalışmada Korkmaz ve arkadaşları SCADA sisteminde bazı ataklar gerçekleştirerek statik ve dinamik veri elde edilebileceğini göstermişlerdir. Bu ataklar Man in the middle, Local DNS Poisoning, DoS, Malicious Software Injections, Firmware Modification Attack, Process Network Malware Injection ataklarıdır [11]. Başka bir deney düzeneği çalışmasında Hahn ve arkadaşları, SCADA protokollerinden olan DNP3 ve IEC 61850 protokolleri üzerindeki zafiyetlere odaklanmışlardır. Gereksiz port ve servis kullanımı, varsayılan hesap bilgilerinin güncellenmemesi gibi zafiyetler ele alınarak sisteme müdahale edilmiş ve başarılı olunmuştur. Bunun için rölenin yeniden yapılandırılması, DoS atağı, alarmlara müdahale edilmesi, yanlış alarm üretilmesi gibi ataklar gerçekleştirilmiştir. Varsayılan hesap bilgilerinin değiştirilmesi ve gereksiz şekilde açık bulunan portların kapatılması gerektiği vurgulanmıştır [12].

SCADA veya EKS'lere yönelik siber terör ataklarının incelenmesi tüm dünyada önem arz etmektedir. Özellikle kritik altyapıların siber terör ataklarından korunması, toplum yaşamının ve süreç işleyişlerinin kolaylıkla sürdürülebilirliği açısından vazgeçilemez hale gelmektedir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, SCADA veya EKS güvenliği için ataklar ele alınmış, saldırı tespit

sistemleri incelenmiş, zafiyetler araştırılmış, çeşitli ataklar gerçekleştirilmiş ve sisteme müdahale etmek için deneyler yapılmıştır. Bu çalışmada ise veri kümesi üzerinde çeşitli algoritmalar kullanılarak veri madenciliği yapılacak ve atak davranışları analiz edilecektir. Ayrıca atak tespiti yapılmaya çalışılacak ve literatüre SCADA veya EKS odaklı siber terör ataklarından korunması için yeni bir bakış açısı sunulacaktır.

Çalışmada Morris ve arkadaşlarının oluşturduğu veri kümesi kullanılmaktadır [3]. Bu veri kümesi ile ilgili bilgiler dördüncü bölümde verilmektedir. Veri kümesi kullanılarak SCADA veya EKS'lere yönelik yapılan saldırılar farklı niteliklere göre değerlendirilip analiz edilmektedir. Bunun için Waikato Üniversitesi tarafından açık kaynak olarak dağıtılan ve Java ile geliştirilen bir veri madenciliği programı olan WEKA ile veri madenciliği yapılmaktadır. Veri madenciliğinde kullanılan ağaç tabanlı Decision Stump, Hoeffding Tree, J48, Random Tree ve REP Tree algoritmaları Çapraz Doğrulama (Cross-Validation) yöntemi ile analiz edilmektedir. Kullanılan algoritmalar ve veri madenciliği ile ilgili bilgiler dördüncü bölümde yer almaktadır. Bu algoritmalar atak yapılan ve yapılmayan veri kümesi üzerinde sınıflandırma yapmakta ve buna göre en doğru sınıflandırma oranı Random Tree algoritması (%84,0049) ile sağlanmaktadır. Elde edilen değerler analiz edilerek veri kümesi öznelikleri arasında ilişkiler kurulmaktadır. Ayrıca siber güvenliğinin sağlanması için çıkarımlarda bulunulmaktadır. SCADA veya EKS'ler için siber güvenliğinin sağlanmasına yönelik yol gösterici bir çalışma yapılması hedeflenmektedir.

Çalışma altı bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde genel bilgilerin ve daha önce yapılan çalışmaların sunulduğu giriş bulunmaktadır. İkinci bölümde siber terör ve üçüncü bölümde SCADA sistemleri hakkında bilgiler verilmektedir. Sonraki bölümde çalışmanın metodolojisi hakkında bilgiler verilmektedir. Beşinci bölümde gerçekleştirilen analiz hakkında bilgiler verilmektedir. Diğer bölümde ise elde edilen deneysel sonuçlar sunulmaktadır. Son bölümde sonuç yer almaktadır.

2. SİBER TERÖR VE SCADA SİSTEMLERİ (CYBER TERROR AND SCADA SYSTEMS)

Siber terör ve SCADA sistemleri bu bölümde ele alınmaktadır.

2.1. Siber Terör (Cyber Terror)

Terörist faaliyetlerinin gerçekleştirilmesi için siber dünyanın kullanılması, siber terör kavramının ortaya çıkmasını sağlamıştır. Siber terörün uluslararası alanda genel kabul gören bir tanımı yoktur. Genel olarak siber terör, kritik öneme sahip ulusal altyapılara (enerji, ulaşım, haberleşme gibi) bilgisayar ağlarını kullanarak zarar vermeyi veya bu altyapıları tamamen kullanılmaz hale getirmeyi amaçlayan saldırılar biçiminde kendini göstermektedir [13,14].

Siber terörün gerçekleştirme amaçları genel olarak devlet tarafından korunan telekomünikasyon, ulusal güvenlik ağları gibi yapılarda yer alan bilgilerin elde edilmesi,

değiştirilmesi veya terörist eylemlerinde kullanılmasıdır. Ayrıca siber terör, siyasal bir amaç için insanlara zarar vermeyi veya acı çektirmeyi de hedeflemektedir. Geleneksel terörden farklı olarak siber terör bazı özelliklere sahiptir. Bunlar siber terör yöntemlerinin kullanılması, siber terör saldırısının gerçekleştirilme sebepleri, saldırıyı düzenleyen bilincili olarak bilgi teknolojilerini kullanması şeklinde sıralanabilir. Siber terör saldırıları, geleneksel terör saldırılarına göre daha ölümcül düzeyde tehlikeler taşıyabilmektedir [15,16]. Morris ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada siber ataklar geliştirilmiş, gaz boru hattı kontrol sistemine bu ataklar uygulanmış ve sistemin tepkisine göre bir veri kümesi elde edilmiştir [3]. Gaz boru hattı gibi kritik altyapılara yönelik gerçekleşen ataklar siber terör atakları olarak kabul edilebilmektedir. Bu ataklar, çalışmada siber terör atakları olarak değerlendirilmekte ve veri madenciliği ile analiz edilmektedir.

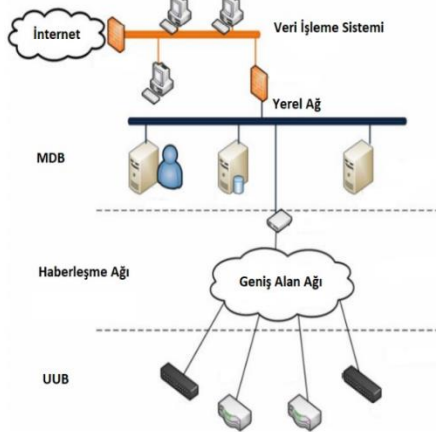
2.2. SCADA Sistemleri (SCADA Systems)

SCADA veya EKS'ler kritik altyapıları izler ve denetler. Gaz boru hatları, enerji santralleri, demiryolları, su arıtma tesisleri ve daha birçok sistem kritik altyapı olarak değerlendirilmektedir. Bu sistemlerin çoğu geçmişte tüm ağlardan bağımsız ve izole edilmiş şekilde çalışmaktaydı. Son zamanlarda ise internet ve kurumsal ağlarla birlikte çalışır hale getirildi. Bu durum beraberinde güvenlik kaygılarını da getirmektedir. Bu sistemlerde bir güvenlik açığının olması sistemin uzaktan ele geçirilmesini ve kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Böyle bir durum ise bireysel veya toplumsal olarak insanların hayatına zarar verebilecek sorunların ortaya çıkmasına sebep olabilir [17].

SCADA veya EKS'lerin sahip olduğu özelliklere bu bölümde değinilmektedir. Temel bileşenler ve kullanılan protokoller, siber güvenlik için dikkat edilmesi gereken konuları oluşturmaktadır.

2.2.1. Temel bileşenler (Basic components)

SCADA veya EKS temel bileşenleri 3 bölümden oluşmaktadır. Bunlar; Merkezi Denetleyici Birimi (MDB)/Master Terminal Unit, Uzak Uç Birimleri (UUB)/Remote Terminal Unit ve haberleşme ağıdır. Bu temel bileşenlere Veri İşleme Sistemi de eklenebilir. Bileşenler Şekil 1.'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Temel bileşenler (Basic components) [18,19]

MDB, sistemdeki sunucuların veya bilgisayarların ana sunucuya bağlantı halinde olmasını ve haberleşmeyi sağlamaktadır. Grafiksel ara yüz bu bölümde bulunmaktadır. UUB'lerden gelen veriler toplanır ve ara yüzde bu veriler gösterilir. UUB ise sistem tarafından izlenen cihazlardan oluşmaktadır. Algılayıcıların ve modüllerin izlenmesi ve kontrol edilmesi bu bölümde gerçekleştirilmektedir. Programlanabilir Mantık Denetleyicileri (Programmable Logic Controller) bu bölümde yer almaktadır. Sistemde haberleşmeyi hızlandırmak ve daha akıllı UUB elde etmek için gerekli işlemlerin hepsi SCADA veya EKS haberleşme ağı üzerinden gerçekleştirilir. Haberleşme için radyo, telefon hattı, mikrodalga, uydu, kablo, fiber optik veya özel protokoller kullanılmaktadır [19-22]. Haberleşme ağı üzerinde Modbus protokolü kullanılarak üretilen veri kümesi çalışmada kullanılmaktadır [3].

2.2.2. Haberleşme protokolleri (Communication protocols)

SCADA veya EKS temel bileşenleri arasında iletişim sağlamak için özel haberleşme protokolleri kullanılmaktadır. En çok kullanılan haberleşme protokolleri şunlardır [17-20]:

- Modbus
- DNP3
- Profinet
- EthernetIP
- ControlNet
- Foundation Fieldbus
- Profibus

Çalışmada Modbus protokolü ile ilgili veriler kullanılmaktadır. Modbus, 1979 yılında tasarlanmış ve otomasyon alanında bir standart haline gelmiş bir haberleşme protokolüdür. İstemci-sunucu mimarisinde seri hat üzerinde çalışmakta ve iki katman içermektedir. Bu protokol geliştirilmekte ve birçok sistem tarafından desteklenmektedir. Modbus Seri ve Modbus TCP olarak iki farklı Modbus türü bulunmaktadır [18].

3. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

Bu çalışmada kullanılan veri kümesi, bir SCADA sistemine ait seri hat üzerindeki Modbus protokolünden alınmıştır. Bu veri kümesi, Morris ve arkadaşları tarafından gaz boru hattı kontrol sisteminden elde edilmiştir [3].

Veri kümesindeki her örnek, yük taşıma (payload) bilgileriyle birlikte ağ trafik bilgilerini de içerir. Ağ bilgisi, sisteme izinsiz giriş yapıldığında bunun tespiti için bir iletişim şekli sağlar. Bilgi teknolojileri ağlarının aksine, SCADA veya EKS'ler sabit ağ topolojilerine sahiptir ve düğümler arasındaki işlemler tekrarlı ve düzenlidir. Bu sabit davranış, anormal hareketliliği tespit etmek için atak tespit sistemlerine kolaylık sağlamaktadır. Yük taşıma bilgileri gaz boru hattının durumu, ayarları ve parametreleri hakkında bilgi sağlar. Bu değerler sistemin nasıl performans gösterdiğini

anlamak ve sistemin sınırlarını aşan durumları veya sistemin kritik bir durumda olup olmadığını tespit etmek için çok önemlidir [3,17].

3.1. Veri Kümesi (Data Set)

Veri kümesinde toplam 274,628 örnek vardır. Veri kümesindeki her satır, öznelik olarak adlandırılan birden çok sütun içerir [3,17]. Veri kümesine ait 10 adet öznelik ve atakların yer aldığı sonuç özneliği bu çalışmada kullanılmaktadır. Çalışmada kullanılan öznelikler ve her özneliğe ait açıklamalar Çizelge 1’de gösterilmektedir. İlk öznelik olan adres, Modbus köle cihazın istasyon adresini içerir. İstasyon adresi, her ana ve köle cihaza atanan benzersiz bir sekiz bitlik değerdir. Adres, yöneticinin komutları ilettiği köleyi ve yanıt veren köleyi tanımlamak için kullanılır. Modbus protokolü, tüm köle cihazların tüm ana işlemleri alacağı şekilde yapılandırılmıştır. İkinci öznelik olan fonksiyon, fonksiyon kodunu içerir. Gaz boru hattında kullanılan fonksiyon kodları okuma ve yazma komutları olarak 256 farklı fonksiyon kodu olasılığı bulundurmaktadır. Bu durum kodların kötü amaçlı kullanımına sebep olabilmektedir.

Çizelge 1. Öznelik listesi (Attribute list)

No	Öznelik	Açıklama
1	adres	Modbus köle cihazının istasyon adresi (20 adet)
2	fonksiyon	Modbus fonksiyon kodu
3	uzunluk	Modbus çerçevesinin uzunluğu
4	kazanç	PID kazancı
5	devir süresi	PID devir süresi
6	sistem şıkları	Sistem şıkları; otomatik, manuel, kapalı
7	kontrol şeması	Kontrol şeması; pompa, solenoit
8	pompa	Pompa kontrolü; açık, kapalı
9	solenoit	Tahliye vanası kontrolü; açık, kapalı
10	komut yanıtı	Komut, cevap
11	sonuç	Atak sınıfları (8 adet)

Uzunluk özneliği, Modbus çerçevesinin uzunluğunu gösterir. Fonksiyon koduna benzer şekilde, Modbus çerçevesinin uzunluğu her komut veya yanıt sorgusu için sabittir. Saldırı tespitinde, belirli bir uzunlukta olmayan çerçeveler kolayca anormal olarak algılanır.

Kazanç özneliği ise PID (Proportional Integral Derivative, Oransal Integral Türevsel Denetleyici Kontrol Döngüsü) kontrol cihazını ayarlamak için kullanılan değerlerden biridir. Bu değere göre hesap yapıp hata oranı saptanır. Bu oranı en aza indirmek için PID denetleyicisi, tahliye vanasını açar/kapatır veya pompayı açar/kapatır. Böylece kazanç elde edilmeye çalışılır.

Gaz boru hattı en düşük seviyede, basınç algılayıcısıyla birlikte pompa ve solenoit olarak iki çalıştırıcı içerir. Bunlar denetim kontrolleri tarafından ayarlanan basıncı korumak için ve sistemin fiziksel işlemini kontrol etmek için kullanılır. Pompa ve solenoit kontrolünde açık ve kapalı olarak iki fonksiyon vardır ve sadece manuel olarak çalışırlar.

Gaz boru hattının üç ana sistem şıkkı vardır: Otomatik, manuel, kapalı. Sistem otomatik şık üzerindeyken, denetleme kontrolleri tarafından karar verilen basıncı korumak için iki kontrol şeması vardır. İlk pompa şıkkıdır ve borudaki basıncı ayar noktasında tutmak için pompayı açıp kapatır. İkincisi, basıncı ayarlamak için bir tahliye vanasının açıldığı ve kapatıldığı solenoit şıkkıdır. Sistem şıkkı ayrıca operatörün pompayı ve solenoiti manuel olarak kontrol etmesini sağlayan manuel şık da olabilir.

Komut yanıtı özneliği, bir atak tespit sisteminin komutlar ve cevaplar arasındaki farkı öğrenmesine izin vermek için kullanılmaktadır.

Bu veri kümesi hem normal durum (atak uygulanmayan) hem de farklı siber terör atak örneklerinin uygulandığı verileri içermektedir. Veri kümesinde 214580 adet atak uygulanmayan ve 60048 adet atak uygulanan örnekler bulunmaktadır. Sonuç olarak, sisteme karşı 7 farklı atak sınıfı geliştirilmiş ve bunlar uygulanmıştır. Bu 7 farklı atak sınıfları, normal sınıf ve bu sınıfların her birine ait örnek sayısı Çizelge 2’de yer almaktadır.

Çizelge 2. Atak sınıfları (Attack classes)

No	Atak Sınıfı	Örnek Sayısı
0	Normal	214580
1	Naive Malicious Response Injection (NMRI)	7753
2	Complex Malicious Response Injection (CMRI)	13035
3	Malicious State Command Injection (MSCI)	7900
4	Malicious Parameter Command Injection (MPCI)	20412
5	Malicious Function Code Injection (MFCI)	4898
6	Denial of Service (DoS)	2176
7	Reconnaissance (R)	3874

Command injection atakları, malicious state command injection (MSCI), malicious parameter command injection (MPCI) ve malicious function code injection (MFCI) ataklarını içerir.

Response injection atakları iki tür davranış gösterir. Birincisi, normal operasyonda bulunmayan ve kural dışı davranışa sahip olan naive malicious response injection (NMRI) atağıdır. Bu atak türü genellikle kötü niyetli saldırganların fiziksel sistem süreci hakkında bilgi sahibi olmadığında ortaya çıkar. İkincisi ise complex malicious response injection (CMRI) atağıdır. Bu atak türü, belirli

normal davranışları taklit eden saldırıları tasarlamak için durumu ve fiziksel süreç bilgilerini kullanır.

Bir sonraki atak kategorisi reconnaissance (R) atağıdır. Bu ataklar, pasif bilgi toplamak veya bir aygıttan sistem hakkındaki bilgiyi zorla almak için tasarlanmıştır. Elde edilecek bilgi, ağ bilgilerini (durum adresi, uzunluk vb.) veya cihaz özelliklerini (model numarası, iletişim protokolü, üretici vb.) içerebilir.

Denial of service (DoS) atakları, kontrol ve süreç arasındaki iletişimi engellemeye çalışır. Bu, kablosuz ağların kesilmesiyle veya ağ protokollerinin kötüye kullanılmasıyla yapılabilir.

3.2. Veri Madenciliği ve Karar Ağaçları (Data Mining and Decision Trees)

Veri madenciliği, var olan verinin işlenmesi ve kullanıma uygun olacak şekilde sonuçlar elde edilmesidir. Veri madenciliği ile farklı yöntemler kullanılarak farklı işlemler gerçekleştirilebilir. Veriye en uygun modeli sağlamak için farklı algoritmalar seçilir. Veri madenciliğinde kullanılan modeller tahmin edici ve tanımlayıcı modeller olarak iki grupta incelenmektedir [23,24].

Çalışmada veri madenciliği için WEKA kullanılmaktadır. Veri hazırlama, sınıflandırma, regresyon, kümeleme, birleşme kuralları madenciliği ve görselleştirme için çeşitli araçlar içerir [25]. WEKA, siber atak tespiti alanındaki birçok çalışmada belirli algoritmaların performansını test etmek için kullanılmaktadır [17].

Çalışmada tahmin edici modeller altında bulunan sınıflama yöntemine ait karar verici algoritmalar ağaç tabanlı olanlar kullanılmaktadır. Karar Ağaçları olarak adlandırılan bu algoritmalar, siber atakların tespitinde sıklıkla kullanılmakta ve veri setleri üzerinde uygulanmaktadır. Bu sebeplerden dolayı çalışmada bu algoritmalar tercih edilmiştir. Decision Stump, Hoeffding Tree, J48, Random Tree ve REP Tree algoritmaları çalışmada kullanılmaktadır.

Veri kümesi üzerinde bu algoritmalar ile çalışılarak analizler yapılmaktadır. Atak olmayan ve atak olan durumların doğru sınıflandırılması için algoritmalar tek tek uygulanmaktadır. Yapılan analizlere göre her algoritma için sınıflandırma oranı elde edilmekte ve birbirine göre kıyaslamaları yapılmaktadır. Buna göre en doğru sınıflandırma oranına Random Tree algoritması sahip olmuştur. Bu oranlar Çizelge 3'te verilmektedir.

Çalışmada, en yüksek doğru sınıflandırma oranına sahip olan Random Tree algoritmasının analiz sonuçları üzerinde durulmaktadır. Bu algoritma analizine göre, düzensizlik matrisi elde edilmiş ve hesaplamalar yapılarak doğruluk yüzdesine ulaşılmıştır. Ayrıca, atak olmayan ve atak olan durumların diğer özneliklere göre değişimleri de incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

4. ANALİZ (ANALYSIS)

Kullanılan algoritmalar ve elde edilen analiz sonuçlarına bu bölümde yer verilmektedir.

4.1. Algoritmaların Sınıflandırma Oranlarının Karşılaştırılması (Comparison of Algorithms and Classification Rates)

Veri analizi Decision Stump, Hoeffding Tree, J48, Radom Tree ve REP Tree algoritmaları Çapraz Doğrulama yöntemine göre uygulanmaktadır. Veri kümesi üzerinde uygulanan algoritmaların sınıflandırma yüzdelerinin ve sınıflandırma örnek sayılarının birbirlerine göre karşılaştırılmaları Çizelge 3'te gösterilmektedir.

Çizelge 3. Analiz sonuçları ve karşılaştırmalar (Analysis results and comparisons)

Algoritmalar	Doğru Sınıflandırılan Örnek Sayısı	Yanlış Sınıflandırılan Örnek Sayısı	Doğruluk Yüzdesi (%)
Decision Stump	214580	60048	78.1348
Hoeffding Tree	227065	47563	82.6809
Random Tree	230701	43927	84.0049
REP Tree	230391	44237	83.8920

Çalışmada, algoritma analizleri için sıklıkla kullanılan Çapraz Doğrulama yöntemi tercih edilmektedir. Bu yöntemde K katsayısı bulunmakta ve K-kere işlem gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada K katsayısı 10 olarak seçilmektedir. Her adımda veri kümesinin 1/10'u kadar, daha önce test için kullanılmamış veri parçası test için kullanılmaktadır. Geri kalan kısmı ise eğitim için kullanılmaktadır. Böylece 10 defa farklı test kümesi olacak şekilde eğitim ve sınıflandırma işlemi gerçekleşecektir. Algoritmalar bu yöntemle göre analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar birbirlerine göre kıyaslanmıştır. Buna göre sınıflandırma doğruluk oranının en yüksek olduğu algoritma Random Tree algoritması olarak belirlenmiştir.

4.2. Random Tree Algoritması İçin Düzensizlik Matrisi (Irregularity Matrix for Random Tree Algorithm)

Algoritma analiz sonuçlarında elde edilen düzensizlik matrisi Şekil 2.'de gösterilmektedir.

	a	b	c	d	e	f	g	h	<-- classified as
213900	0	0	153	480	0	47	0	0	a = 0
7753	0	0	0	0	0	0	0	0	b = 1
13035	0	0	0	0	0	0	0	0	c = 2
5286	0	0	2534	78	0	2	0	0	d = 3
14974	0	0	23	5409	0	6	0	0	e = 4
0	0	0	0	0	4898	0	0	0	f = 5
1948	0	0	15	15	0	198	0	0	g = 6
40	0	0	0	0	72	0	3762	0	h = 7

Şekil 2. Random Tree algoritması için düzensizlik matrisi (The irregularity matrix for the random tree algorithm)

Şekil 2’de atak sınıflarına harfler verilerek matris oluşturulmuştur. Buna göre;

- Normal durum (atak yaşanmayan)
- NMRI atağının uygulandığı durum
- CMRI atağının uygulandığı durum
- MSCI atağının uygulandığı durum
- MPCI atağının uygulandığı durum
- MFCI atağının uygulandığı durum
- DoS atağının uygulandığı durum
- R atağının uygulandığı durumlar gösterilmektedir.

Şekil 2’ye göre;

214580 adet “normal” değerli test verisinin 213900 tanesi “normal”, 153 tanesi “MSCI”, 480 tanesi “MPCI” ve 47 tanesi “DoS” olarak tahmin edilmiştir.

7753 adet “NMRI” değerli test verisinin hepsi “normal” olarak tahmin edilmiştir.

13035 adet “CMRI” değerli test verisinin hepsi “normal” olarak tahmin edilmiştir.

7900 adet “MSCI” değerli test verisinin 5286 tanesi “normal”, 2534 tanesi “MSCI”, 78 tanesi “MPCI”, 2 tanesi “DoS” olarak tahmin edilmiştir.

20412 adet “MPCI” değerli test verisinin 14974 tanesi “normal”, 23 tanesi “MSCI”, 5409 tanesi “MPCI”, 6 tanesi “DoS” olarak tahmin edilmiştir.

4989 adet “MFCI” değerli test verisinin hepsi “MFCI” olarak tahmin edilmiştir.

2176 adet “DoS” değerli test verisinin 1948 tanesi “normal”, 15 tanesi “MSCI”, 15 tanesi “MPCI”, 198 tanesi “DoS” olarak tahmin edilmiştir.

3874 adet “R” değerli test verisinin 40 tanesi “normal”, 72 tanesi “MFCI”, 3762 tanesi “R” olarak tahmin edilmiştir.

4.3. Random Tree Algoritması İçin Doğruluk Yüzdesi (Accuracy Percentage for Random Tree Algorithm)

Düzensizlik matrisine göre;

$213900+2534+5409+4898+198+3762=230701$ adet veri Random Tree algoritması ile oluşturulan modele göre doğru sınıflandırılmıştır.

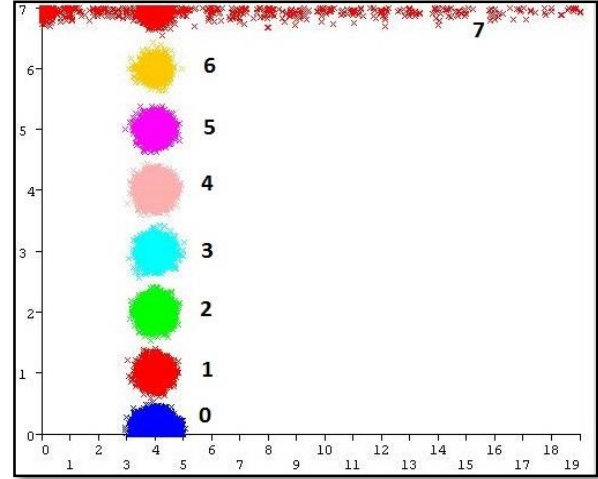
$78+23+40=141$ adet veri yanlış sınıflandırılmıştır.

Buna göre doğruluk sınıflandırma yüzdesi Eş.1’deki gibi hesaplanmıştır;

$$\text{Doğruluk yüzdesi} = \frac{230701}{[230701+(7753+ 13035+ 5286+14978+194+40+153+480+47+78+2+23+6+15+15+72)]} \times 100 = \%84,0049 \quad (1)$$

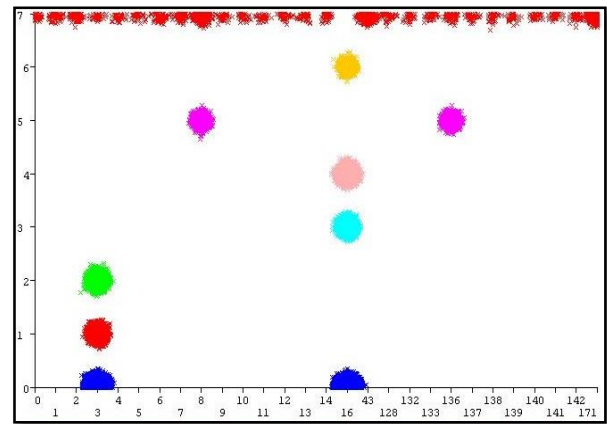
4.4. Random Tree Algoritması İçin Özniteliklerin Değerlendirilmesi (Evaluation of Attributes for the Random Tree Algorithm)

Random Tree algoritması sonuçları bu bölümde görsel olarak sunulmaktadır. 11. sırada yer alan sonuca göre diğer 10 öznitelik değerlendirilmektedir. Analiz sonuçları ayrıntılı olarak incelenerek veri kümesine göre yorumlar yapılmaktadır. Çizelge 2’de belirtildiği üzere sonuca ait 8 durum bulunmaktadır. Analiz sonuçlarında bu 8 durum renkli olarak ve rakamla belirtilerek de görülmektedir.



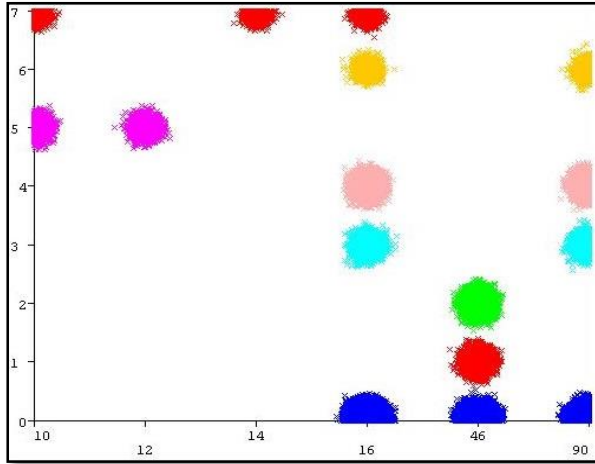
Şekil 3. Sonuç ile adres ilişkisi (Address relationship with result)

Şekil 3’te sonuç ile adres öznitelikleri arasındaki ilişkinin görseli yer almaktadır. Burada 7 farklı saldırı durumlarına (7,6,5,4,3,2,1 etiketlerine) ve normal duruma (0 etiketine) göre (toplam 8 durum), 20 adet adres değerinin değişimi görülmektedir. Buna göre sistemde 7. durum olan R atağı oluştuğunda, Modbus köle cihazının tüm istasyon adresleri ataktan etkilenmektedir. Diğer ataklarda ve normal durumda bir adet adres (4 etiketine sahip adres) etkilenmektedir.



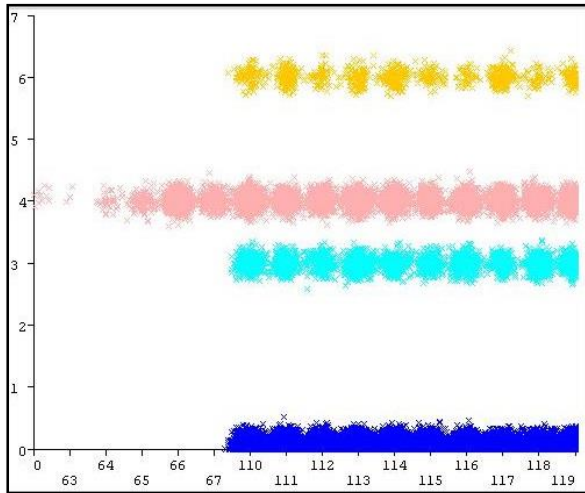
Şekil 4. Sonuç ile fonksiyon ilişkisi (Function relation with result)

Şekil 4'te sonuç ile fonksiyon öznelikleri arasındaki ilişkinin görseli yer almaktadır. Burada 7 farklı saldırı durumlarına ve normal duruma göre 28 adet Modbus fonksiyon kodu değerinin değişimi görülmektedir. Buna göre sistemde 7. durum olan R atığı gerçekleştiğinde tüm kodlar ataktan etkilenmektedir. MFCI atağında ise 2 adet kod (8 ve 136 etiketlerine sahip kodlar) etkilenmektedir. MSCI, MPCI, DoS, NMRI ve CMRI atakları normal durum gibi davranmaktadır. Bu durumlarda 2 adet kod (3 ve 16 etiketlerine sahip kodlar) etkilenmektedir.



Şekil 5. Sonuç ile uzunluk ilişkisi (Length relationship with result)

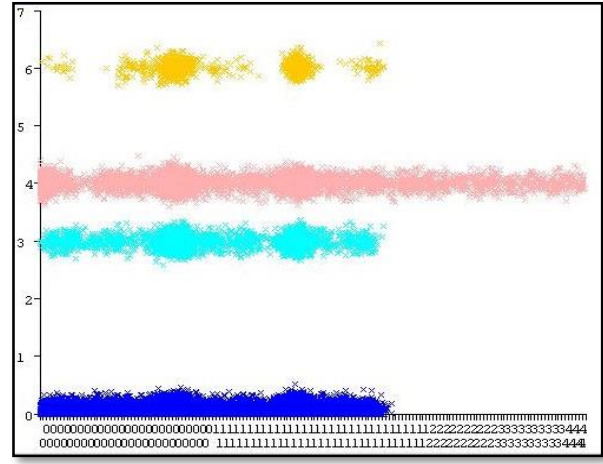
Şekil 5'te sonuç ile uzunluk öznelikleri arasındaki ilişkinin görseli yer almaktadır. Burada 7 farklı saldırı durumlarına ve normal duruma göre, 6 adet uzunluk değerinin değişimi görülmektedir. Buna göre sistemde 5 farklı atak türü görüldüğünde, Modbus paketinin büyüklüğü normal durumdaymış gibi davranmaktadır. Bunların dışındaki MFCI ve R atakları gerçekleştiğinde farklı paket büyüklükleri bu ataklardan etkilenmektedir.



Şekil 6. Sonuç ile kazanç ilişkisi (Gain relationship with result)

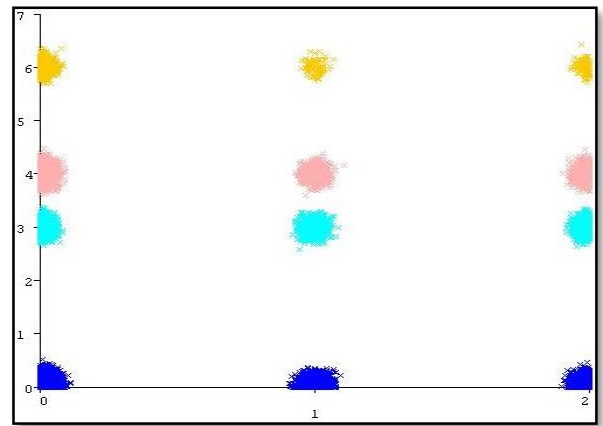
Şekil 6'da sonuç ile kazanç öznelikleri arasındaki ilişkinin görseli yer almaktadır. Burada 7 farklı saldırı durumlarına ve normal duruma göre 16 adet kazanç

değerinin değişimi görülmektedir. Buna göre 4 farklı atak türünün de (R, MFCI, CMRI, NMRI) yaşandığı durumda PID kazancı görülmemektedir. PID, Mevcut sistem ile amaçlanan sistem durumları arasındaki farkın hesaplanmasını sağlamaktadır. Geri kalan 3 atak türü (DoS, MPCI, MSCI) yaşandığında meydana gelen PID kazancı normal durum ile yaklaşık olarak aynıdır. Bunların içinde yer alan MPCI atağı yaşanması durumunda elde edilen PID kazanç değer aralığı daha geniştir.



Şekil 7. Sonuç ile devir süresi ilişkisi (Cycle time relationship with result)

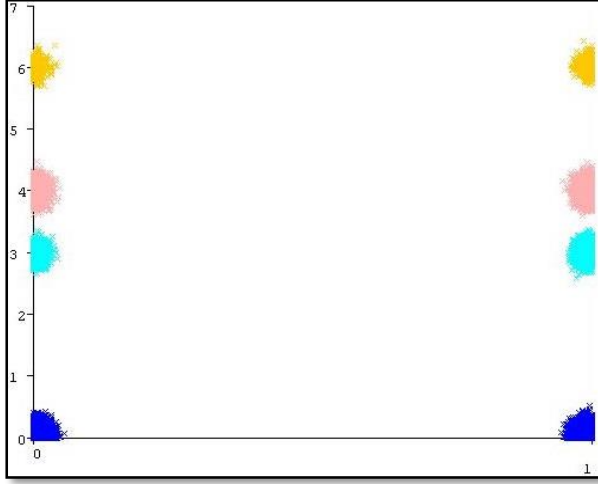
Şekil 7'de sonuç ile devir süresi öznelikleri arasındaki ilişkinin görseli yer almaktadır. Burada 7 farklı saldırı durumlarına ve normal duruma göre 162 adet devir süresi değerinin değişimi görülmektedir. Buna göre 4 farklı atak türünün (R, MFCI, CMRI, NMRI) yaşanması durumunda PID devir süresi ile ilgili bilgi üretilmemektedir. Geri kalan 3 farklı atak türü (DoS, MPCI, MSCI) yaklaşık olarak normal durum ile aynı davranışa sahiptir. Bunların içinde yer alan MPCI atağı oluştuğunda PID devir süresi değer aralığı daha geniştir. Bu görsel üzerinden elde edilen sonuçlar, daha önce incelenen sonuç ile kazanç ilişkisine benzer sonuçlar içermektedir.



Şekil 8. Sonuç ile sistem şıkları ilişkisi (System mode relationship with result)

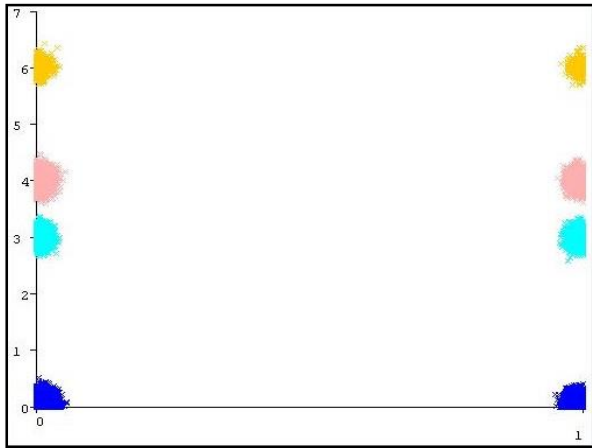
Şekil 8'de sonuç ile sistem şıkları öznelikleri arasındaki ilişkinin görseli yer almaktadır. Burada 7 farklı saldırı

durumlarına ve normal duruma göre 3 adet sistem şıkkı değerinin değişimi görülmektedir. Buna göre 4 farklı atak türünün (R, MFCI, CMRI, NMRI) yaşanması durumlarında, sistem şıklarının hiçbiri görülmemektedir. Geri kalan 3 farklı atak türünde (DoS, MPCI, MSCI) ise sistem şıklarının değerleri normal durum ile aynı şekilde davranmaktadır.



Şekil 9. Sonuç ile kontrol şeması ilişkisi (Control scheme relation with result)

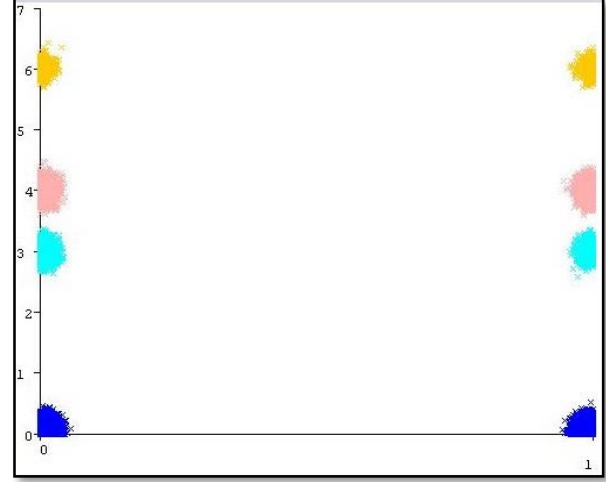
Şekil 9'da sonuç ile kontrol şeması öznitelikleri arasındaki ilişkinin görseli yer almaktadır. Burada 7 farklı saldırı durumlarına ve normal duruma göre 2 adet kontrol şeması değerlerinin değişimi görülmektedir. Buna göre 3 farklı atak türü (DoS, MPCI, MSCI) yaklaşık olarak normal durum ile aynı davranışı sergilemektedir. Diğer 4 farklı atak türünün (R, MFCI, CMRI, NMRI) yaşanması durumunda ise kontrol şeması bilgisi sistemde görülmemektedir. Daha önce incelenen sonuç ile sistem şıkları ilişkisine benzer sonuçlar görülmektedir.



Şekil 10. Sonuç ile pompa ilişkisi (Pump relationship with result)

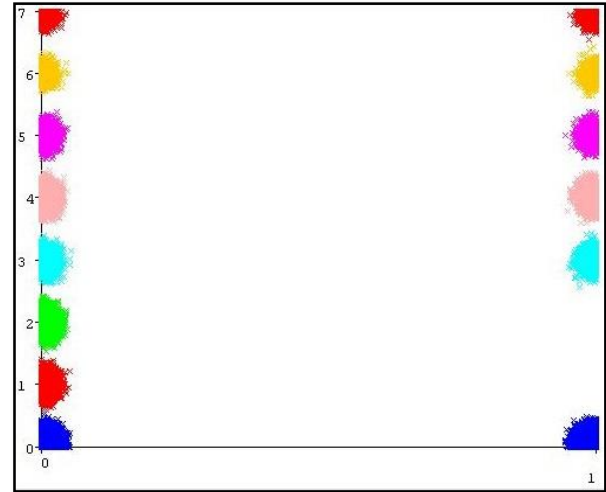
Şekil 10'da sonuç ile pompa öznitelikleri arasındaki ilişkinin görseli yer almaktadır. Burada 7 farklı saldırı durumlarına ve normal duruma göre 2 adet pompa değerlerinin değişimi görülmektedir. Buna göre 4 farklı atak türünün (R, MFCI, CMRI, NMRI) yaşanmasında da

pompa kontrolü yapılmamaktadır. Geri kalan 3 farklı atak türünde (DoS, MPCI, MSCI) ise pompa kontrolü, normal durum ile aynı şekilde yapılmaktadır. Bu sonuçlar, daha önce incelenen sonuç ile sistem şıkları ilişkisine ve sonuç ile kontrol şeması ilişkisine benzer sonuçlar içermektedir.



Şekil 11. Sonuç ile solenoit ilişkisi (Solenoid relationship with result)

Şekil 11'de sonuç ile solenoit öznitelikleri arasındaki ilişkinin görseli yer almaktadır. Burada 7 farklı saldırı durumlarına ve normal duruma göre 2 adet solenoit değerinin değişimi görülmektedir. Buna göre 3 farklı atak türünün (DoS, MPCI, MSCI) yaşanması durumunda yapılan kontrol normal durum ile aynıdır. Geriye kalan 4 farklı atak türünün (R, MFCI, CMRI, NMRI) yaşanması durumunda ise tahliye vanası kontrolü yapılmamaktadır. Bu görsel dahil olmak üzere incelenen son dört ilişki görseli benzer sonuçlar sergilemektedir.



Şekil 12. Sonuç ile komut yanıtı ilişkisi (Command response relationship with result)

Şekil 12'de sonuç ile komut yanıtı öznitelikleri arasındaki ilişkinin görseli yer almaktadır. Burada 7 farklı saldırı durumlarına ve normal duruma göre 2 adet komut yanıtı değerinin değişimi görülmektedir. Buna göre cevap gönderilmesi seçeneği (0 numaralı etiket),

tüm atak türleri için normal durum gibi davranmaktadır. 2 farklı atak türü (CMRI, NMRI) yaşanması durumunda komut gönderilmesi seçeneği (1 numaralı etiket) görülmektedir. Diğer atak türlerinde ise normal durum ile benzerlik görülmektedir.

5. DENEYSSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

Bu çalışmada kritik altyapılardan gaz boru hattı kontrol sistemine yönelik gerçekleştirilen atakların yer aldığı veri kümesi analiz edilmiştir. Ayrıca SCADA veya EKS'lere yönelik meydana gelen siber terör atakları ele alınmıştır. Bu atakların davranışları ve normal durum ile farklılığı incelenmiştir. Bunun için çeşitli algoritmalar kullanılmış ve veri madenciliği yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre en yüksek doğru sınıflandırma oranına Random Tree algoritması sahip olmuştur. Bu algoritmanın çıktıları ayrıntılı şekilde incelenmiştir.

Veri kümesinde yer alan 6 farklı atak türü, 10 adet özneliğe göre değerlendirilmiştir. Ayrıca, normal durum ile benzerlik gösteren davranışlar da incelenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlara bu bölümde yer verilmektedir.

7 numaralı Reconnaissance atacağı gerçekleştiğinde:

- Modbus köle cihazının istasyon adreslerinin tümü ve Modbus fonksiyon kodlarının tümü etkilenmektedir.
- Farklı Modbus paket büyüklükleri etkilenmektedir.
- Komut-cevap gönderilmesi, normal (atak görülmeyen) durumla aynı davranışı göstermektedir.
- PID kazancı, PID devir süresi, sistem şıkkı, kontrol şeması, pompa ve solenoit öznelikleri etkilenmemektedir.

6 numaralı Denial of Service atacağı gerçekleştiğinde:

- 10 adet öznelik için normal durumla aynı davranışlar gösterilmektedir.

5 numaralı Malicious Function Code Injection atacağı gerçekleştiğinde:

- Modbus fonksiyon kodlarından 2 tanesi etkilenmektedir.
- Farklı Modbus paket büyüklükleri etkilenmektedir
- Modbus köle cihazının istasyon adresleri ve komut-cevap gönderilmesi, normal durumla aynı davranışı göstermektedir.
- PID kazancı, PID devir süresi, sistem şıkkı, kontrol şeması, pompa ve solenoit öznelikleri etkilenmemektedir.

4 numaralı Malicious Parameter Command Injection atacağı gerçekleştiğinde:

- PID Kazancı ve PID devir süresi değer aralıkları, normal duruma göre daha geniş şekilde etkilenmektedir.
- Diğer 8 adet öznelik için normal durumla aynı davranışlar gösterilmektedir.

3 numaralı Malicious State Command Injection atacağı gerçekleştiğinde:

- 10 adet öznelik için normal durumla aynı davranışlar gösterilmektedir.

2 numaralı Complex Malicious Response Injection atacağı gerçekleştiğinde:

- Modbus köle cihazının istasyon adresleri, Modbus fonksiyon kodları ve Modbus paket büyüklükleri normal durumla aynı davranışı göstermektedir.
- Komut-cevap gönderilmesinde ise cevap değeri normal durumla aynıyken komut durumu herhangi şekilde etkilenmemektedir.
- Diğer 6 öznelik etkilenmemektedir.

1 numaralı Naive Malicious Response Injection atacağı gerçekleştiğinde:

- Modbus köle cihazının istasyon adresleri, Modbus fonksiyon kodları ve Modbus paket büyüklükleri normal durumla aynı davranışı göstermektedir.
- Komut-cevap gönderilmesinde ise cevap değeri normal durumla aynıyken komut durumu herhangi şekilde etkilenmemektedir.
- Diğer 6 öznelik etkilenmemektedir.

Elde edilen sonuçlara göre, Denial of Service ve Malicious State Command Injection atakları her öznelik için normal durumla aynı şekilde davranmaktadır. Complex Malicious Response Injection ve Naive Malicious Response Injection atakları benzer şekilde hareket etmektedir. En fazla etkiyi Reconnaissance atacağı gerçekleştirmektedir.

6. SONUÇ (RESULTS)

Bu çalışmada kullanılan veri kümesinde, mevcut SCADA protokollerinden Modbus için Command Injection, Reconnaissance ve Denial of Service gibi kategorilerde çeşitli ataklar gerçekleştirilmiştir. Bu veri kümesi kullanılarak SCADA veya EKS'lere yönelik atak yapılan ve atak yapılmayan durumlar farklı niteliklere göre değerlendirilip analiz edilmektedir. Bunun için Decision Stump, Hoeffding Tree, J48, Random Tree ve REP Tree algoritmaları veri madenciliği yapılarak kullanılmaktadır. En doğru sınıflandırma oranına Random Tree Algoritması sahip olduğu için bu algoritma sonuçları ayrıntılı olarak incelenmektedir. Siber terör ataklarının davranış analizleri ve atak tespiti üzerinde çalışılarak ilgili alana katkı sağlanması amaçlanmaktadır. SCADA atak tespiti sistemi araştırmalarında kullanılmak üzere yeni veri kümeleri sağlanmalıdır. Bunun için de bu tür saldırıların SCADA sistemlerine karşı uygulanması gereklidir. Bu konuda yapılacak çalışmalar SCADA güvenliğinin sağlanması için gereklidir.

Gelecekteki çalışmalar için farklı veri kümeleri elde edilerek siber terör atak davranış analizleri daha kapsamlı olarak gerçekleştirilecektir. Ayrıca elde edilen sonuçlar birbirlerine göre kıyaslanacak ve böylece çalışma alanı daha da genişletilecektir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] TC Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, "Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, ulusal siber güvenlik stratejisi ve 2013-2014 eylem planı", **TC Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı**, Ankara, (2013).
- [2] Ijure V. M., Laughter S. A., Williams R. D., "Security issues in scada networks", **Computers & Security**, 25(7): 498-506, (2006).
- [3] Morris, T., Thornton, Z., Turnipseed, I., "Industrial control system simulation and data logging for intrusion detection system research", **The 7th Annual Southeastern Cyber Security Summit**, Huntsville, 1-6, (2015).
- [4] Shang, W. L., Li, L., Wan, M., Zeng, P., "Security defense model of Modbus tcp communication based on zone/border rules", **International conference on network security and communication engineering**, Hong Kong, 1-8, (2014).
- [5] Bhatia, S., Kush, N., Djamaludin, C., Akande, J., Foo, E., "Practical Modbus flooding attack and detection", **The Twelfth Australasian Information Security Conference**, New Zeland, 57-65, (2014).
- [6] Hindy H., Brosset D., Bayne E., Seam A., Bellekens X., "Improving SIEM for critical scada water infrastructures using machine learning", **Computer Security**, Springer, Cham, 2018.
- [7] Hong, S., Lee, M., "Challenges and direction toward secure communication in the SCADA system", **The 8th Annual Communication Networks and Services Research Conference**, Montreal, 381-386, (2010).
- [8] Kang, D., Lee, J., Kim, S., Park, J., "Analysis on cyber threats to scada systems," **Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific**, Seoul, 1-4, (2009).
- [9] Dell, "Dell security annual threat report", **Dell**, Round Rock, (2015).
- [10] Jung, S., Song, J. G., Kim, S., "Design on scada test-bed and security device", **International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering**, 3(4): 75-86, (2008).
- [11] Korkmaz E., Dolgikh A., Davis M., Skormin V., "Industrial control systems security testbed", **The 11th Annual Symposium on Information Assurance**, Albany, (2016).
- [12] Hahn, A., Kregel, B., Govindarasu, M., Fitzpatrick, J., Adnan, R., Sridhar, S., Higdon, M. "Development of the powercyber scada security testbed", **The Sixth Annual Workshop on Cyber Security and Information Intelligence Research**, USA, (2010).
- [13] Söğüt, E., Erdem, O. A., "A review of research studies on cyber terror", **Applying Methods of Scientific Inquiry Into Intelligence, Security, and Counterterrorism**, IGI Global, Hershey, 2019.
- [14] Kurnaz, İ., "Siber güvenlik ve ilintili kavramsal çerçeve", **Cyberpolitik Journal**, 1: 62-83, (2017).
- [15] Hekim, H., Başbüyük, O., "Siber suçlar ve türkiye'nin siber güvenlik politikaları", **Uluslararası Güvenlik ve Terörizm Dergisi**, 4(2): 135-158, (2017).
- [16] Yılmaz, S., "Türkiye'nin iç güvenlik yapılanmasında değişim ihtiyacı", **Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi**, 21(3): 17-40, (2012).
- [17] Turnipseed, I., "A new scada dataset for intrusion detection system research", **Master's Thesis**, Mississippi State University, Electrical and Computer Engineering, (2015).
- [18] Özbilen, A., "TCP/IP tabanlı dağıtık endüstriyel denetim sistemlerinde güvenlik ve çözüm önerileri", **Doctoral Thesis**, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2012).
- [19] TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, "Kontrol sistemleri-scada", **TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Yayınları**, EK/2012/524, Ankara, (2012).
- [20] Erkek, İ., "Modbus temelli scada sistemlerinin siber güvenliği için yeni bir yaklaşım", **Master's Thesis**, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2012).
- [21] Shahzad, A., Musa, S., Aborujilah, A., Irfan, M., "The scada review: system components, architecture, protocols and future security trends", **American Journal of Applied Sciences**, 11(8): 1418-1425, (2014).
- [22] McDonald, J. D., "Developing and defining basic scada system concepts", **The 37th Rural Electric Power Conference**, Kansas City, 1-5, (1993).
- [23] Kökver, Y., "Veri madenciliğinin nefroloji alanında uygulanması", **Master's Thesis**, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2012).
- [24] Özarslan, S., "Öğrenci performansının veri madenciliği ile belirlenmesi", **Master's Thesis**, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, (2014).
- [25] Witten, I. H., Frank, E., Hall, M. A., "Data mining: practical machine learning tools and techniques", **Morgan Kaufmann**, ISBN-10: 0128042915, Cambridge, (2016).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



The effect of turbulence model and nanofluid on fluid flow and heat transfer in a narrow rectangular duct

Dar dikdörtgensel bir kanalda türbülans modelinin ve nanoakışkanın ısı transferine ve akışkan akışına etkisinin sayısal olarak incelenmesi

Yazar(lar) (Author(s)): Edaviye Sare AKBAY¹, Berkay DERELİ², Oguz TURGUT³

ORCID¹: 0000-0003-0000-8662

ORCID²: 0000-0001-6888-5923

ORCID³: 0000-0001-5480-1039

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Akbay E. S., Dereli B. and Turgut O., “The effect of turbulence model and nanofluid on fluid flow and heat transfer in a narrow rectangular duct”, *Politeknik Dergisi*, 23(2): 567-579, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.589390

The Effect of Turbulence Model and Nanofluid on Fluid Flow and Heat Transfer in a Narrow Rectangular Duct

Araştırma Makalesi / Research Article

Edaviye Sare AKBAY, Berkay DERELI, Oguz TURGUT*

Gazi University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering & Clean Energy Research and Application Center (TEMENAR), Maltepe, Ankara, Turkey

(Geliş/Received : 09.07.2019 ; Kabul/Accepted : 06.09.2019)

ABSTRACT

The effect of type of turbulence model and nanofluid on the heat transfer and fluid flow in a horizontal narrow rectangular duct is numerically studied under constant wall heat flux boundary condition. Numerical study is carried out using ANSYS Fluent 17.0 software. Examined parameters are the type of turbulence model, the type of nanofluid, the volume fraction of nanoparticle in nanofluid, and the Reynolds number. Three different $k-\epsilon$ and four different $k-\omega$ turbulence models are employed. Aluminum oxide Al_2O_3 -water and copper oxide CuO -water are used as nanofluids. Volume fractions of nanoparticles used are 0%, 0.1%, 0.5%, 1%, 2% and 4%. Reynolds number changes from 3×10^3 to 50×10^3 . Results showed that $k-\omega$ standard turbulence model with low Reynolds number correction gives better result. It is seen that both the type and the volume fraction of nanoparticle in nanofluid affect heat transfer and pressure drop. Using Al_2O_3 and CuO nanoparticles in water increases thermal performance. It is found that the performance factor of CuO -water nanofluid is better than that of Al_2O_3 -water nanofluid. It is seen that using turbulent fully developed flow correlations derived for circular ducts may end up with incorrect results for the flow in two-dimensional rectangular duct.

Keywords: Computational fluid dynamics (CFD), turbulent flow, nanofluid, heat source, numerical analysis.

Dar Dikdörtgensel Bir Kanalda Türbülans Modelinin ve Nanoakışkanın Isı Transferine ve Akışkan Akışına Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi

ÖZ

Türbülans modelinin ve nanoakışkanın, yatay dar dikdörtgen bir kanaldaki ısı transferi ve akışkan akışı üzerindeki etkisi duvarda sabit ısı akısı sınır koşulu altında sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal çalışma ANSYS Fluent 17.0 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İncelenen parametreler türbülans modeli tipi, nanoakışkan tipi, nanoakışkanın hacim fraksiyonu ve Reynolds sayısıdır. Üç farklı $k-\epsilon$ ve dört farklı $k-\omega$ türbülans modeli kullanılmıştır. Nanoakışkan olarak alüminyum oksit Al_2O_3 -su ve bakır oksit CuO -su kullanılmıştır. Kullanılan nanopartiküllerin hacim fraksiyonları %0, %0,1, %0,5, %1, %2 ve %4'tür. Reynolds sayısı 3×10^3 'den 50×10^3 'e değişmektedir. Sonuçlar, düşük Reynolds düzeltmeli $k-\omega$ standart türbülans modelinin daha iyi sonuç verdiğini göstermiştir. Nanoakışkanın hem tipinin hem de hacim fraksiyonunun ısı transferini ve basınç düşüşünü etkilediği görülmüştür. Su içerisinde Al_2O_3 ve CuO nanoparçacıklarının kullanılması ısı performansını artırmıştır. CuO -su nanoakışkan performans faktörünün Al_2O_3 -su nanoakışkanından daha iyi olduğu görülmüştür. Dairesel kesitli kanallar için türetilen türbülanslı tam gelişmiş akış korelasyonlarının iki boyutlu dikdörtgen kanallar için kullanılmasının yanlış sonuçlar verebileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), türbülanslı akış, nanoakışkan, ısı kaynağı, sayısal analiz.

1. INTRODUCTION

The correlations obtained for turbulent flow in a circular duct are used for noncircular ducts using hydraulic diameter. However, cross-sectional shape of a duct affects the flow and heat transfer characteristics. Therefore, using these correlations may give up to 35% higher values than real duct results [1,2]. Also, the type of fluid affects flow and heat transfer characteristics. In order to increase heat transfer rate, nanoparticles such as

Al_2O_3 , CuO , TiO_2 etc. are used in base fluids like ethylene glycol, oil, water etc.

Forced convection heat transfer and fluid flow in two-dimensional rectangular ducts draw attention owing to its wide applications in many industrial systems such as nuclear reactors, heat exchangers, and electronic cooling systems.

Fully developed turbulent flow with two-dimensional heat transfer through solar air heater with protrusion wires was analyzed by Prasad and Saini [3]. Average Stanton number and average friction factor expressions

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : oturgut2006@gmail.com

were given. Yuan et al. [4] examined fully developed laminar air flow between two parallel plates with circular ribs at the upper and lower walls with a constant temperature. It was stated that using ribs on the walls increases both Nusselt number and pressure drop. Valencia et al. [5] studied unsteady laminar air flow in a two-dimensional duct with square ribs at constant temperature boundary condition. It was observed that ribs significantly affect the flow and heat transfer characteristics. Chaube et al. [6] numerically and experimentally investigated turbulent air flow using different viscous models in a two-dimensional rectangular duct having ribs on the bottom surface under constant heat flux thermal boundary condition. It was found that ribs significantly enhance heat transfer. Three-dimensional turbulent water flow in a ribbed duct was numerically investigated by Bayraktar et al. [7] using Reynolds stress turbulence model. Authors stated that ribs used on the surface of duct affect friction coefficient. Sohankar [8] numerically investigated two-dimensional turbulent flow and heat transfer in a channel with ribs in staggered arrangement. Results show that heat transfer is significantly affected by turbulent Prandtl number. Ahmed et al. [9] investigated two-dimensional laminar flow of nanofluids using ethylene glycol as base fluid in a triangular duct with vortex generator. It was found that nanofluid increases Nusselt number. Yadav and Bhagoria [10] numerically analyzed two-dimensional turbulent flow and heat transfer along solar air heater with circular ribs. It was stated that relative roughness pitch increases thermohydraulic performance parameter. Yadav and Bhagoria [11] numerically studied two-dimensional CFD analysis of turbulent flow along a solar air heaters that have different shapes of square-sectioned ribs on the absorber plate. It was stated that relative roughness height affects flow friction, heat transfer and thermohydraulic performance parameter. Jhariya et al. [12] numerically investigated two-dimensional turbulent flow and heat transfer in a solar air heater with semi-circular ribs placed on the upper wall. Authors found that heat transfer increases with increasing relative roughness pitch. Albojamal et al. [13] numerically investigated two-dimensional laminar flow in a wavy duct using Al_2O_3 -water and CuO -water nanofluids. It was found that particle volume fraction in nanofluid increases heat transfer. Turgut and Arslan [14] studied laminar air flow in a two-dimensional duct with staggered fins. Authors concluded that using fins on the surfaces of duct is not advantageous for two-dimensional periodically fully developed laminar flow. Mahanand et al. [15] conducted a numerical study to survey two-dimensional heat transfer along solar air heater with semi-circular ribs. It

was found that roughness increases heat transfer and friction factor. Sahu et al. [16] investigated turbulent air flow in the two-dimensional duct with triangular protrusions located in the heated lower wall. It was concluded that using triangular protrusions causes higher heat transfer and pressure drop.

It is seen that there is a lack of information about which turbulence model gives the best results, how the type of nanofluid affects the turbulent flow and heat transfer characteristics in a narrow rectangular duct, and whether the correlations obtained for a circular cross-sectional duct can be used for fluid flow in a narrow rectangular duct. Therefore, the effect of turbulence model and the type of nanofluid on fluid flow and heat transfer characteristics in a two-dimensional duct are investigated numerically under constant heat flux boundary condition. Four different k - ω turbulence models (k - ω standart and k - ω SST turbulence models with and without low Reynolds number correction) and three different k - ε turbulence models (k - ε RNG, k - ε standart, k - ε realizable) are used. Heat transfer and fluid flow are examined using two different nanofluids (Al_2O_3 -water and CuO -water). The novelty of this study is the comparison of the results of different turbulence models and determining the appropriate turbulence model for the flow in a narrow rectangular duct. Another novelty of this study is the comparison of the performance parameters of Al_2O_3 -water and CuO -water nanofluids. In addition, whether the correlations obtained for a circular duct can be used for fluid flow in a narrow rectangular duct using hydraulic diameter is the another novelty of this study.

2. METHODS AND ANALYSIS

2.1. Governing Equations

In this study, two-dimensional turbulent flow in the rectangular duct is considered. Geometrical shape of two-dimensional smooth duct is shown in Figure 1. Coordinate axis used in this study is also shown in Figure 1. Fluid flows in the x -direction. The duct is divided into two sections i.e. entry section and test section. In Figure 1, H is the duct height and taken as 0.020 m. L_1 and L_2 are the lengths of the entry and test sections, respectively. The lengths of the entry section L_1 and test section L_2 are chosen more than ten times of hydraulic diameter to provide hydrodynamically and thermally fully developed flow conditions. Entry section is used to obtain hydrodynamically fully developed conditions at the inlet of the test section. Constant heat flux boundary condition is applied to the walls of the test section. Hydraulic diameter D_h is taken as $D_h=2H$. L_1/D_h and L_2/D_h are taken as 25 and 37.5, respectively.

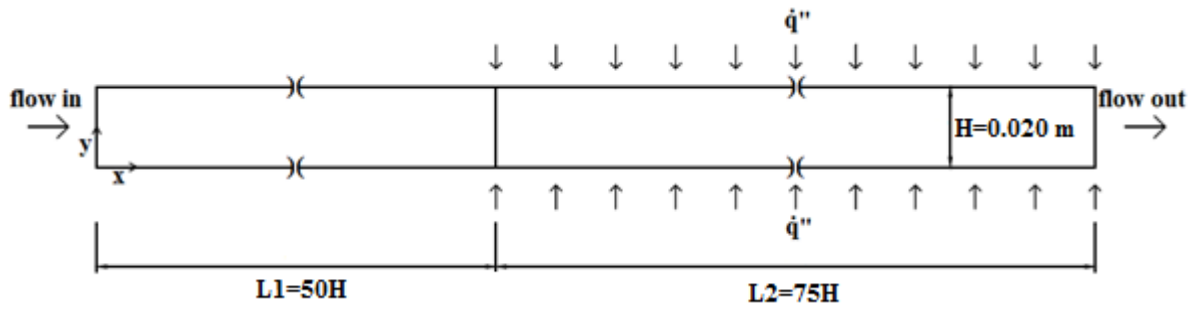


Figure 1. Schematic of two-dimensional smooth duct

Two-dimensional numerical analysis is performed assuming steady state, incompressible, Newtonian fluid with negligible viscous dissipation, and buoyancy effects. Governing equations are the continuity, momentum, energy, and turbulence model equations. These equations are given as below;

Continuity equation;

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0$$

Momentum equation;

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\rho u_i' u_j' \right) \tag{2}$$

Energy equation;

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \tag{3}$$

where k_{eff} is the effective thermal conductivity. The equations given above are solved together with the equations of turbulence model. Average Reynolds stress $(-\rho u_i' u_j')$ in momentum equation and turbulent heat flux $\rho u_j T$ in energy equation are expressed by a suitable turbulence model. The Reynolds stress is expressed as follows

$$-\rho u_i' u_j' = -\rho \frac{2}{3} k \delta_{ij} + \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \tag{4}$$

2.2. Turbulence Models

Turbulence models used are the three types of $k-\epsilon$ turbulence models (standard, RNG and realizable) and four types of $k-\omega$ turbulence models (standard and SST with and without low Reynolds number correction) in ANSYS Fluent 17.0 [17].

Standard $k-\epsilon$ turbulence model

Transport equations for standard $k-\epsilon$ turbulence model proposed by Launder and Spalding [18] are given as

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \rho u_i' u_j' \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \rho \epsilon \tag{5}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] - C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \rho u_i' u_j' \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \tag{6}$$

Here, σ_ϵ and σ_k point out the turbulent Prandtl numbers for ϵ and k , respectively. μ_t is the turbulent (eddy) viscosity and computed as

$$\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \epsilon \tag{7}$$

Model constants are: $C_{1\epsilon}=1.44$, $C_{2\epsilon}=1.92$, $C_\mu=0.09$, $\sigma_\epsilon=1.3$ and $\sigma_k=1.0$.

RNG $k-\epsilon$ turbulence model

Transport equations for RNG $k-\epsilon$ turbulence model are as follows [19]

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \rho u_i' u_j' \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \rho \epsilon \tag{8}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\epsilon \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] - C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \rho u_i' u_j' \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - C_{2\epsilon}^* \rho \frac{\epsilon^2}{k} \tag{9}$$

where $C_{2\epsilon}^* = C_{2\epsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1-\eta/4.38)}{1+0.012\eta^3}$ with $\eta = Sk / \epsilon$,

$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$. μ_t is the turbulence viscosity and determined from Eq. (7) with $C_\mu=0.0845$. Model constants are $C_{1\epsilon}=1.42$, $C_{2\epsilon}=1.68$, $\alpha_k=\alpha_\epsilon=1.393$, $\sigma_\epsilon=1.3$ and $\sigma_k=1.0$.

Realizable k-ε turbulence model

Transport equations for k and ε in realizable k-ε turbulence model are given as [20]

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \rho u_i u_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \rho \epsilon \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \epsilon - \rho C_2 \epsilon^2 / (k + \sqrt{v \epsilon}) \quad (11)$$

Here, $C_1 = \max[0.43, \eta / (\eta + 5)]$ with $\eta = S k / \epsilon$ and

$S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$. μ_t is the eddy viscosity and computed from

Eq. (7) with $C_\mu = 1 / (4.04 + A_s k U^* / \epsilon)$,

$$U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \Omega_{ij} \Omega_{ij}}, \quad A_s = \sqrt{6} \cos \varphi, \quad \Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right),$$

$$\varphi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6} W), \quad W = S_{ij} S_{jk} S_{ki} / S^3, \quad \bar{S} = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}},$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right). \quad \text{The model constants are } C_2 = 1.9,$$

$$\sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.2.$$

Standard k-ω model

ANSYS Fluent uses the Wilcox [21] k-ω model as standard k-ω model, and transport equations are given as

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \rho u_i u_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \rho \beta_i^* f_\beta^* k \omega \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] - \alpha \frac{\omega}{k} \rho u_i u_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \rho \beta f_\beta \omega^2 \quad (13)$$

where σ_k and σ_ω represent the turbulent Prandtl numbers for k and ω, respectively. μ_t is the turbulent viscosity and computed from

$$\mu_t = \alpha^* \rho k / \omega \quad (14)$$

where $\alpha^* = \alpha_\infty^* \left(\frac{0.024 + Re_t / 6}{1 + Re_t / 6} \right)$, $Re_t = \frac{\rho k}{\mu \omega}$ and $\beta = 0.072$.

In Eq. (12), $\beta_i^* = \beta_\infty^* \left(\frac{4/15 + (Re_t/8)}{1 + (Re_t/8)} \right)$ and

$$f_\beta^* = \begin{cases} 1 & \chi_k \leq 0 \\ \frac{1 + 680 \chi_k^2}{1 + 400 \chi_k^2} & \chi_k > 0 \end{cases} \quad \text{with } \chi_k = \frac{1}{\omega^3} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}.$$

In Eq. (13), $\alpha = \frac{\alpha_\infty}{\alpha^*} \left(\frac{0.024 + Re_t / 2.95}{1 + Re_t / 2.95} \right)$ and

$$f_\beta = (1 + 70 \chi_\omega) / (1 + 80 \chi_\omega) \quad \text{with } \chi_\omega = \frac{\Omega_{ij} \Omega_{jk} S_{ki}}{(\beta_\infty^* \omega)^3},$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad S_{ki} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right).$$

In the high Reynolds number form of standard k-ω model, $\alpha^* = \alpha_\infty^* = 1$, $\alpha = \alpha_\infty = 1$ and $\beta_i^* = \beta_\infty^*$. Model constants are $\sigma_k = 2.0$, $\sigma_\omega = 2.0$, $\beta_\infty^* = 0.09$.

Shear-stress transport (SST) k-ω model

ANSYS Fluent uses the SST k-ω model developed by Menter [22]. The SST k-ω model is based on both the standard k-ω model and the standard k-ε model. Transport equations for SST k-ω model are given as

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \rho u_i u_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \rho \beta^* k \omega \quad (15)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] - \frac{\alpha}{v_t} \rho u_i u_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \rho \beta \omega^2 + D_\omega \quad (16)$$

where μ_t is the turbulent viscosity and is computed as

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max[\alpha^*, SF_2 / a_1 \omega]} \quad (17)$$

where $\alpha^* = \alpha_\infty^* \left(\frac{0.024 + Re_t / 6}{1 + Re_t / 6} \right)$ with $Re_t = \frac{\rho k}{\mu \omega}$,

$S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$, $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$. In the high Reynolds

number form of SST k-ω model $\alpha^* = \alpha_\infty^* = 1$. In Eqs. (15) and (16), σ_k and σ_ω are the turbulent Prandtl numbers for k and ω, respectively, and computed from $\sigma_k = 1 / (F_1 / \sigma_{k,1} + (1 - F_1) / \sigma_{k,2})$ and

$\sigma_\omega = 1 / (F_1 / \sigma_{\omega,1} + (1 - F_1) / \sigma_{\omega,2})$. The blending functions

F_1 and F_2 are given by $F_1 = \tanh(\varphi_1^4)$ and $F_2 = \tanh(\varphi_2^2)$ with

$$\varphi_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_{\omega^+} y^2} \right],$$

$$D_{\omega^+} = \max \left[2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right],$$

$$\varphi_2 = \max \left[2 \frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right].$$

y is the distance to the next surface. In Eq. (15), $\beta^* = \beta_i^* = 0.09 \left(\frac{4/15 + (\text{Re}_t/8)^4}{1 + (\text{Re}_t/8)^4} \right)$. In

Eq. (16), $\alpha = \frac{\alpha_{\infty}}{\alpha^*} \left(\frac{1/9 + \text{Re}_t/2.95}{1 + \text{Re}_t/2.95} \right)$ with

$$\alpha_{\infty} = F_1 \alpha_{\infty,1} + (1 - F_1) \alpha_{\infty,2},$$

$$\alpha_{\infty,1} = \beta_{i,1} / \beta_{\infty}^* - \kappa^2 / \sigma_{\omega,1} \sqrt{\beta_{\infty}^*},$$

$$\alpha_{\infty,2} = \beta_{i,2} / \beta_{\infty}^* - \kappa^2 / \sigma_{\omega,2} \sqrt{\beta_{\infty}^*}, \quad \kappa = 0.41.$$

In the high Reynolds number form $\alpha = \alpha_{\infty} = 1$. In Eq. (16),

$$\beta = \beta_i = F_1 \beta_{i,1} + (1 - F_1) \beta_{i,2} \quad \text{and}$$

$$D_{\omega} = 2(1 - F_1) \rho \frac{1}{\omega \sigma_{\omega,2}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}.$$

Model constants;

$$\sigma_{k,1} = 1.176, \quad \sigma_{\omega,1} = 2.0, \quad \sigma_{k,2} = 1.0, \quad \sigma_{\omega,2} = 1.168, \quad a_1 = 0.31, \quad \beta_{i,1} = 0.075, \quad \beta_{i,2} = 0.0878.$$

2.3. Boundary Conditions

The governing equations given above are solved using suitable boundary conditions at the boundaries of the computational domain given in Figure 1. In order to save time and memory, entry section and test section are solved separately. Firstly, entry section is solved. At the inlet ($x=0$), fluid enters the entry section at a uniform velocity. No-slip boundary condition is applied to the walls of the entry section for velocity. The pressure outlet boundary condition of ANSYS Fluent 17.0 is used at the outlet of the entry section, at $x=L1$. The values of variables are recorded in a file. After entry section, the test section is solved. The values read from this file are given as input at the inlet, at $x=L1$, of the test section. Fluid at the inlet of the test section is assumed at a uniform and constant temperature, i.e. $T_i = 293.15\text{K}$. No-slip boundary condition is assumed at the walls of the test section for velocity. Constant heat flux boundary condition, $\dot{q}'' = 1000\text{W/m}^2$, is applied to the walls of the test section. At the outlet of the test section, i.e. at $x=L1+L2$, pressure outlet boundary condition of ANSYS Fluent 17.0, i.e. zero gradient for all variables, is applied.

For inlet and outlet boundary conditions, turbulent kinetic energy k [23], turbulent dissipation rate ε [17] and specific dissipation rate ω [17] are computed, respectively, as

$$k = 0.005 U_i^2 \tag{18}$$

$$\varepsilon = C_{\mu}^{0.75} k^{1.5} / 0.07 D_h \tag{19}$$

$$\omega = k^{0.5} / C_{\mu}^{0.25} 0.07 D_h \tag{20}$$

Here, $C_{\mu} = 0.09$.

2.4. Numerical Method

ANSYS Fluent 17.0 software is used for numerical analysis. Grid (mesh) independence study is conducted in order to reach the correct results. Average Nusselt number and average Darcy friction factor values are calculated for comparison at different mesh numbers. Mesh number is changed between 74,021 and 468,961. Grid optimization study is carried out for the highest Reynolds number, which is $\text{Re} = 5 \times 10^4$. Fine mesh is generated near the walls, at the inlet and at the outlet. Coarse mesh is used away from the walls, inlet section and outlet section. The value of y^+ is about unity. Mesh is generated using ANSYS Meshing. Typical mesh distribution in computational domain is shown in Figure 2a. As seen in Figure 2a, quadrilateral cells are created in the computational domain, and a non-uniform grid distribution is used. Inflation layers are used near the walls to capture the near wall parameters. Four different meshes are generated from the coarse element size, 74,021, to the fine element size, 468,961. Typical calculated average Nusselt number and average Darcy friction factor values are given in Figure 2b as a function of mesh number for RNG $k-\varepsilon$ turbulence model. It is seen that the values of Nusselt number and Darcy friction factor almost remain constant after a certain mesh number. That is, the mesh number after which Nusselt number and Darcy friction factor do not change significantly is taken as optimum mesh number. According to Figure 2b, second mesh whose mesh number is 137,784 is chosen as optimum mesh. Calculations are conducted for other Reynolds numbers using this optimum mesh.

Second order upwing scheme is used for discretization of continuity, momentum, energy, and turbulence equations. SIMPLE algorithm is selected for pressure-velocity coupling. Solution is lasted for the residuals of pressure, velocity, $k-\varepsilon$ or $k-\omega$ turbulence terms, and energy until 1×10^{-6} .

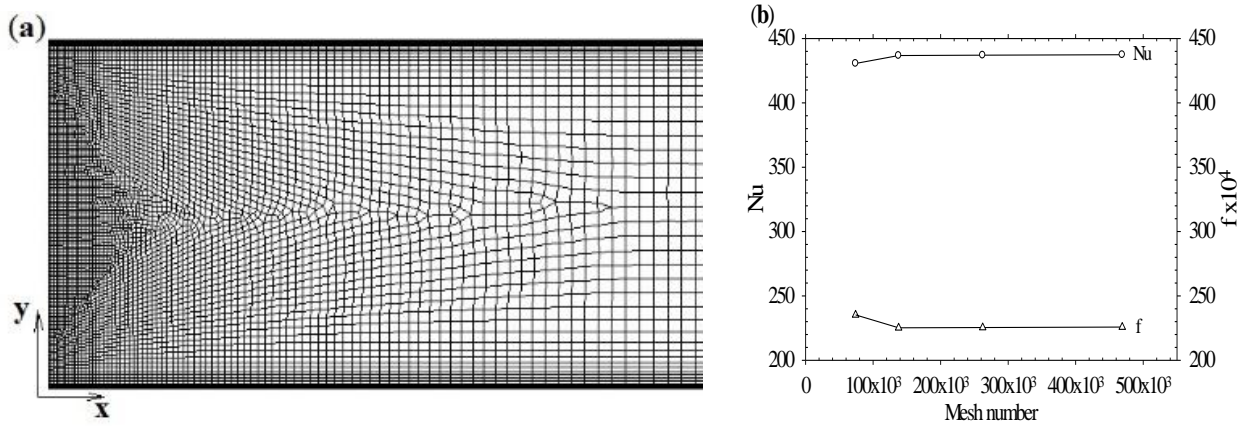


Figure 2. (a) Schematic view of mesh, (b) Nusselt number and Darcy friction factor versus mesh number

2.5. Calculated Parameters and Properties of Nanofluids

Reynolds number based on inlet velocity and hydraulic diameter is calculated as

$$Re = \rho U_i D_h / \mu \quad (21)$$

where ρ is the fluid density, U_i is the inlet velocity, D_h is the hydraulic diameter ($D_h=2H$), and μ is the dynamic viscosity of the fluid. Reynolds number varies from 3×10^3 to 5×10^4 . Local Darcy friction factor and local Nusselt number are calculated, respectively, as

$$f_x = 8\tau_{w,x} / \rho U_i^2 \quad (22)$$

$$Nu_x = \dot{q}'' D_h / ((T_w - T_b)_x K) \quad (23)$$

Average Darcy friction factor f and average Nusselt number Nu are computed, respectively, as

$$f = 2\Delta P D_h / L_2 \rho U_i^2 \quad (24)$$

$$Nu = \frac{\dot{q}'' D_h}{(T_w - T_b) K} = \frac{h D_h}{K} \quad (25)$$

Here ΔP is the pressure loss along the duct, L_2 is the test section length, \dot{q}'' is the wall heat flux, T_w and T_b are the wall and fluid bulk mean temperatures, respectively.

Water is used as base fluid while Al_2O_3 and CuO are used as nanoparticles. Density ρ [13, 24-28], dynamic viscosity μ [27], specific heat c_p [24, 28-29] and thermal conductivity K [25-26, 30] of nanofluids are calculated, respectively, as follows

$$\rho_{nf} = (1-vof)\rho_{bf} + (vof)\rho_p \quad (26)$$

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} (1 + 2.5 \cdot vof) \quad (27)$$

$$c_{p,nf} = (1-vof) \cdot c_{p,bf} + vof \cdot c_{p,p} \quad (28)$$

$$K_{nf} = K_{bf} \frac{K_p + 2K_{bf} - 2(K_{bf} - K_p) \cdot vof}{K_p + 2K_{bf} + 2(K_{bf} - K_p) \cdot vof} \quad (29)$$

In Eqs. (26-29), subscripts nf, bf and p indicate the nanofluid, base fluid and particle, respectively. vof is the volume fraction of nanoparticle in nanofluid. Physical properties of water are given in Table 1 at the temperature

Table 1. Physical properties of base fluid and nanoparticles

	ρ (kg/m ³)	μ (kg/m·s)	c_p (J/kg·K)	K (W/m·K)
Water	998	1002×10^{-6}	4182.0	0.598
Al_2O_3	3880	-	773	36
CuO	6500	-	535.6	20

293.15K [31-34].

3. RESULTS AND DISCUSSION

Typical local Nusselt number and local Darcy friction values are plotted in Figures 3a and b, respectively, at different Reynolds numbers for k- ϵ realizable turbulence model and vof=0%, i.e. for pure water. It is seen that local values of Nusselt number and Darcy friction factor begin with a high value, decrease along the duct, and approach to the constant value, i.e. fully developed value. Results indicate that Nusselt number increases with increasing Reynolds number while friction factor decreases. Turbulent fully developed Nusselt number and Darcy friction factor correlations derived for fluid flow in a circular duct are given in Table 2 [31].

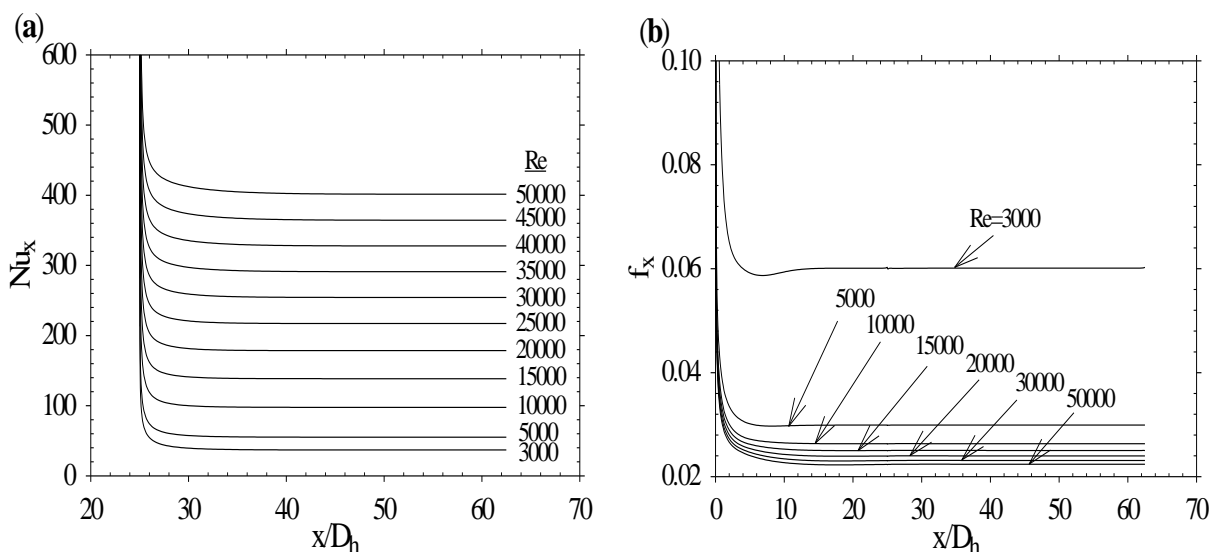


Figure 3. Local Nusselt number (a) and local Darcy friction factor (b) along the duct

Table 2. Fully developed correlations for Nu and f

$Nu_{fd} = \frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1+12.7(f/8)^{0.5}(Pr^{2/3}-1)}$	for $2300 \leq Re \leq 5 \times 10^6$	Gnielinski	(30)
$Nu_{fd} = 0.023Re^{0.8} Pr^{0.4}$	for $Re \geq 1 \times 10^4$	Dittus-Boelter	(31)
$Nu_{fd} = 0.023Re^{0.8} Pr^{1/3}$	for $Re \geq 1 \times 10^4$	Colburn	(32)
$f_{fd} = 0.316Re^{-0.25}$	for $Re \leq 20 \times 10^3$	Moody	(33)
$f_{fd} = 0.184Re^{-0.20}$	for $Re \geq 20 \times 10^3$	Moody	(34)
$f_{fd} = (0.790 \ln Re - 1.64)^{-2}$	for $3 \times 10^3 \leq Re \leq 5 \times 10^6$	Petukhov	(35)

For all turbulence models studied, the fully developed Nusselt number and Darcy friction factor values are plotted in Figures 4a and b, respectively, as a function of Reynolds number for water at $\nu_{of}=0\%$. Fully developed Nusselt numbers and Darcy friction factors obtained from equations given in Table 2 are also shown in Figures 4a and b. Now, attention is firstly given to Figure 4a, which shows the fully developed Nusselt number values. It is seen that Nusselt number increases with increasing Reynolds number, as expected. Results show that the turbulence model which gives the closest value with the fully developed correlations given in Table 2 is the $k-\omega$ standard turbulence model with low Reynolds number correction. In addition, the fully developed correlation which gives the closest value with the values obtained from turbulence models is the Gnielinski equation, Eq. (30). At $Re=50 \times 10^3$, Gnielinski, Dittus-Boelter and Colburn equations give about 13, 24 and 33%,

respectively, less values than the $k-\omega$ standard turbulence model with low Reynolds number correction. In other words, it is seen that using the correlations obtained for circular ducts may give incorrect results up to 33% for the flow in a two-dimensional rectangular duct. Similarly, $k-\omega$ standard with low Reynolds number correction, $k-\omega$ SST with low Reynolds number correction, $k-\epsilon$ realizable, $k-\epsilon$ standard, $k-\omega$ standard, $k-\omega$ SST, and $k-\epsilon$ RNG turbulence models give about 15, 21, 22, 24, 25, 27 and 57.8%, respectively, higher values than the Gnielinski equation, Eq. (30), at $Re=50 \times 10^3$. When the results of $k-\omega$ standard turbulence model with low Reynolds number correction and Gnielinski equation are compared, it is seen that the results are in harmony with each other.

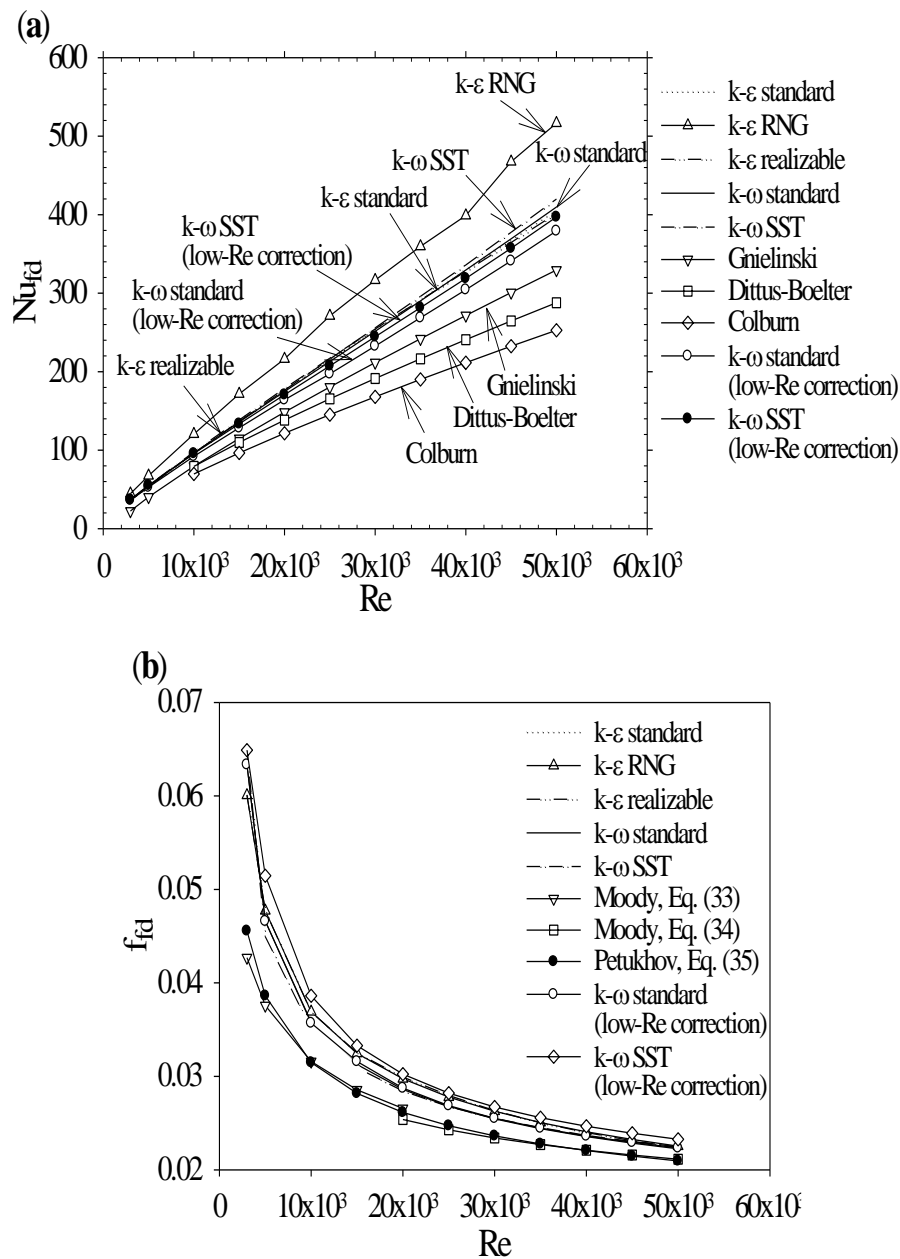


Figure 4. Fully developed Nusselt number (a) and Darcy friction factor (b) versus Reynolds number for different turbulence models

With regard to Figure 4b, which gives the fully developed Darcy friction factor values as a function of Reynolds number, results show that Darcy friction coefficient decreases with increasing Reynolds number, as expected. It is also seen that friction coefficient values for all cases are approximately the same. At $Re=50 \times 10^3$, Darcy friction factor value for k- ω standard turbulence model with low Reynolds number correction is about 6% higher than that of Moody, Eq. (34), and Petukhov, Eq. (35), equations. That is, Darcy friction factor for k- ω standard turbulence model with low Reynolds number correction agrees with the literature results.

After validation of the numerical study and choosing the best turbulence model, which is the k- ω standard

turbulence model with low Reynolds number correction, Al_2O_3 -water and CuO-water nanofluids in duct are investigated numerically using k- ω standard turbulence model with low Reynolds number correction. Results are given for the Reynolds number changing between 3×10^3 and 50×10^3 and volume fraction of nanoparticle ranging from 0 to 4%.

Figures 5a and b compare the variation of average heat transfer coefficient as a function of Reynolds number at different volume fractions of nanoparticles, vof, for Al_2O_3 /water and CuO/water nanofluids, respectively. Results show that volume fraction of nanoparticles in nanofluid and Reynolds number affect heat transfer coefficient. It is seen that heat transfer coefficient

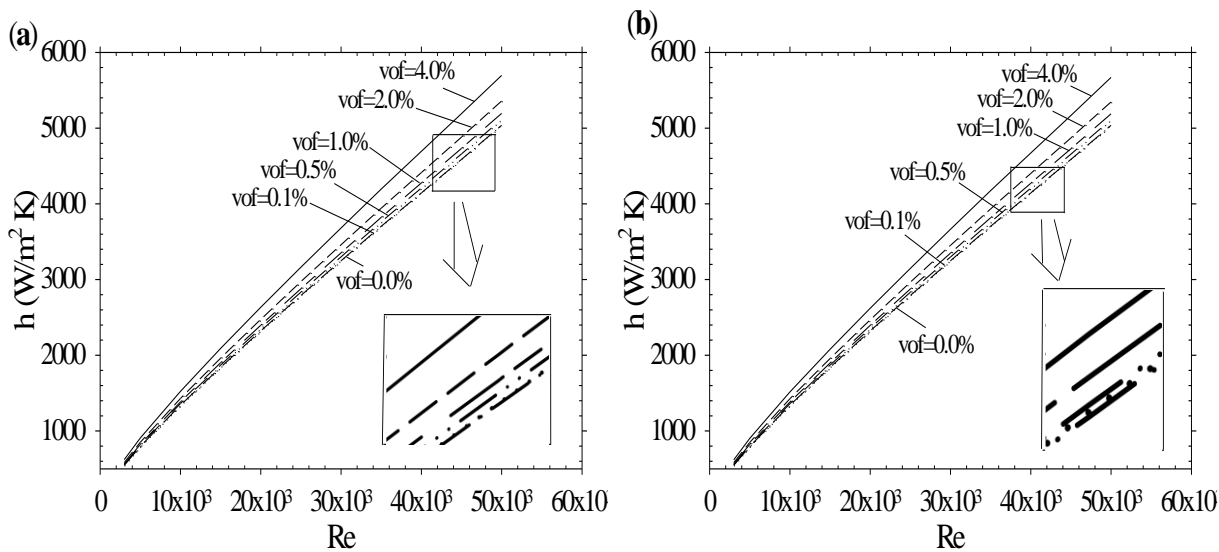


Figure 5. Average heat transfer coefficient versus Reynolds number for Al₂O₃/water nanofluid (a) and CuO/water nanofluid (b)

increases with increasing volume fraction of nanoparticle in nanofluid and Reynolds number for both nanofluids. That is, heat transfer coefficient increases with increasing Reynolds number at a given volume fraction of nanoparticle. It can be interpreted as that thermal boundary layer thickness decreases with increasing Reynolds number. Decreasing thermal boundary layer thickness results in increasing heat transfer. Also, heat transfer coefficient increases with increasing volume fraction of nanoparticle at a given Reynolds number. At $Re=50 \times 10^3$, heat transfer coefficient increases 13.1 and 12.6% for Al₂O₃-water and CuO-water nanofluids, respectively, when volume fraction of nanoparticle changes from 0 to 4%.

In order to see the effect of Reynolds number on convection heat transfer coefficient, average convection heat transfer coefficient is plotted in Figures 6a and b as

a function of volume fraction of nanoparticle for Al₂O₃/water and CuO/water nanofluids, respectively. It is seen that two nanofluids show similar behavior. As seen in Figure 6, convection heat transfer coefficient increases with increasing nanoparticle in base fluid at a given Reynolds number for both nanofluids. It is also seen that convection heat transfer coefficient increases with increasing Reynolds number at a given volume fraction of nanoparticle in nanofluids. Figure 6a shows that heat transfer coefficient increases about 13.1% for Al₂O₃-water nanofluid when volume fraction of nanoparticle in nanofluid changes from 0 to 4% at Reynolds number $Re=50 \times 10^3$. With regard to Figure 6b, it is seen that changing of nanoparticle volume fraction of CuO-water nanofluid from 0 to 4% results in 12.6% enhancement in heat transfer coefficient at Reynolds number $Re=50 \times 10^3$. When the heat transfer coefficient

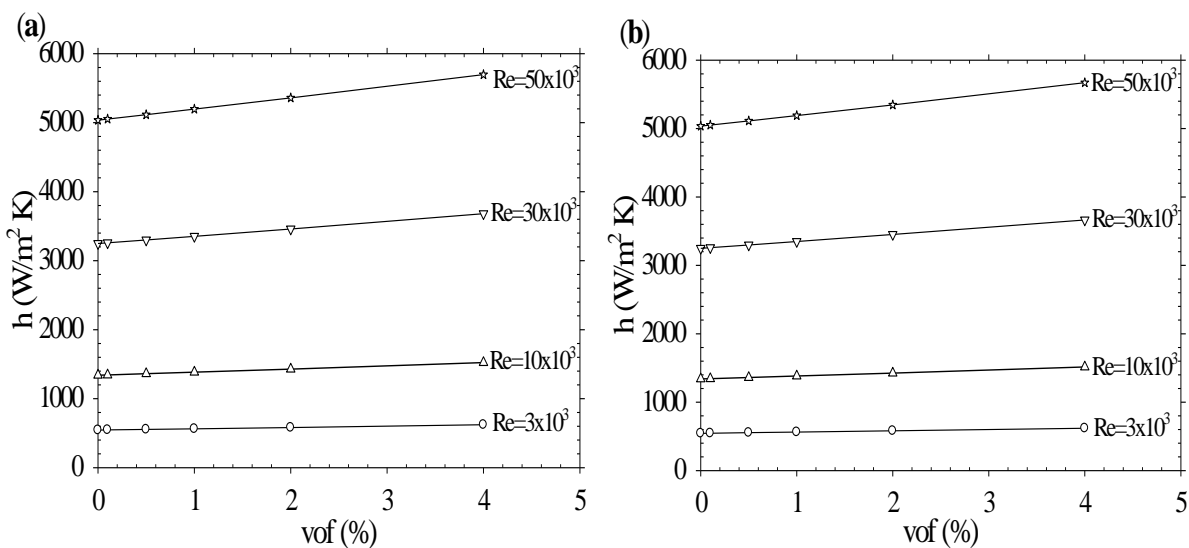


Figure 6. Average heat transfer coefficient versus vof for Al₂O₃/water nanofluid (a) and CuO/water nanofluid (b)

values of Al₂O₃-water nanofluid and CuO-water nanofluid are compared, it is seen that Al₂O₃-water

when the volume fraction of CuO/water nanofluid increases from 0 to 4% at a given Reynolds number. It is

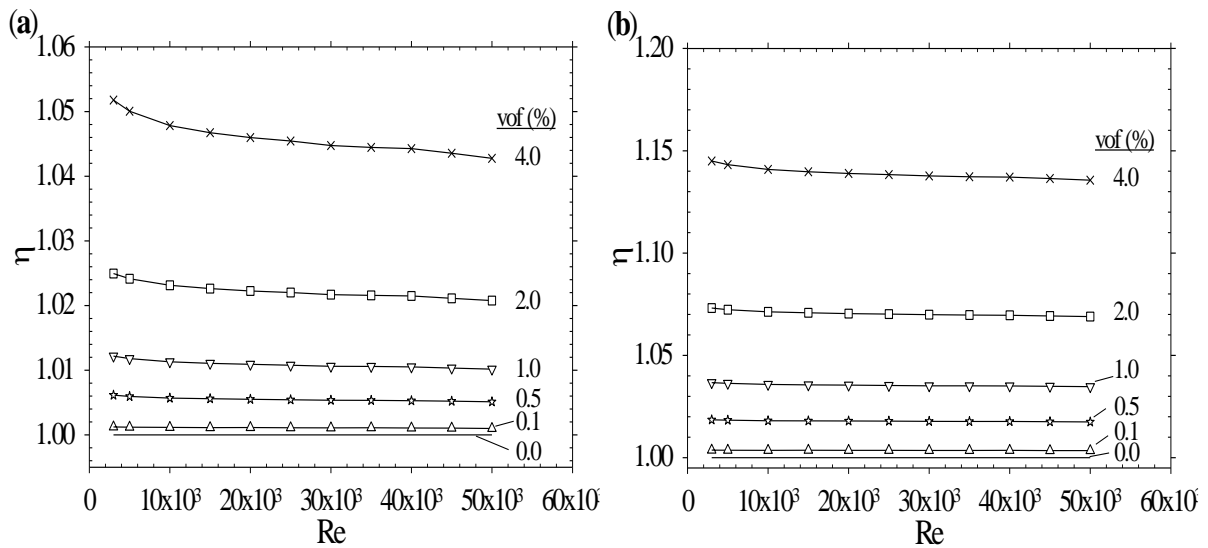


Figure 7. Performance factor for Al₂O₃/water nanofluid (a) and CuO/water nanofluid (b)

nanofluid gives higher heat transfer coefficient than CuO-water nanofluid at a given Reynolds number and volume fraction of nanoparticle.

seen that pressure loss for Al₂O₃/water nanofluid is greater than that of CuO/water nanofluid.

Results show that both heat transfer coefficient and

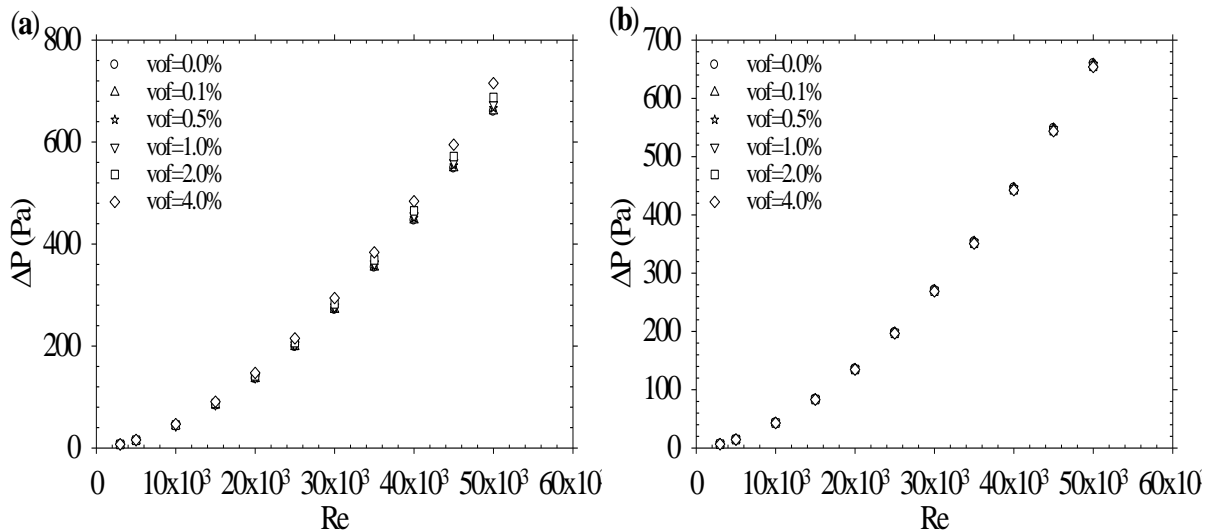


Figure 8. Pressure loss versus Re for Al₂O₃/water nanofluid (a) and CuO/water nanofluid (b)

To see the pressure loss along duct, pressure losses for Al₂O₃/water and CuO/water nanofluids are given in Figures 7a and b, respectively, as a function of Reynolds number at different volume fractions of nanoparticle. Figure 7 shows that pressure loss increases with increasing Reynolds number for both nanofluids. In addition, it is seen that pressure loss for Al₂O₃/water nanofluid increases with increasing volume fraction at the same Reynolds number. At Re=50x10³, pressure loss increases about 9% when volume fraction of Al₂O₃/water nanofluid increases from 0 to 4%. However, Figure 7b indicates that pressure loss does not change significantly

pressure loss increase when nanoparticle is added into base fluid. Increasing heat transfer is a desirable effect while increasing pressure loss in duct is an undesirable effect. Therefore, it is necessary to decide whether the use of Al₂O₃ and CuO nanoparticles in the water is appropriate or not. Performance factor, i.e. effective efficiency, gives the relationship between thermal and hydraulic characteristics of the nanofluid, and it is given as [35-37]

$$\eta = (h_{nf} / h_{bf}) / (\Delta P_{nf} / \Delta P_{bf}) \quad (36)$$

It is significant to calculate this value to see the effect of using nanoparticle in base fluid, water. The value of performance factor must be greater than 1.0 to apply nanoparticle addition to water. Thus, performance factor is calculated using Eq. (36) and plotted as a function of Reynolds number in Figures 8a and b for $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{water}$ and CuO/water nanofluids, respectively, at different nanoparticle volume fractions. It is seen that performance factor increases with increasing nanoparticle volume fraction for both nanofluids. It is also seen that performance factor decreases with increasing Reynolds number at a given nanoparticle fraction. As can be seen from Figures 8a and b, performance factor value is greater than unity. Thus, it can be said that the amount of heat transfer enhancement overcomes pressure loss, i.e. pumping power. In other words, Al_2O_3 and CuO nanoparticle addition into water can be applied to increase heat transfer in a narrow rectangular duct. In addition, results show that CuO -water nanofluid has better thermal performance compared to Al_2O_3 -water nanofluid.

4. CONCLUSION

Heat transfer and fluid flow characteristics of Al_2O_3 -water and CuO -water nanofluids are numerically examined for turbulent flow in a two-dimensional rectangular duct. Numerical study is carried out using ANSYS Fluent 17.0 software. Three versions of k - ε and four versions of k - ω turbulence models of ANSYS Fluent 17.0 are used. Nanoparticle volume fraction in the range of 0-4.0% and Reynolds number changing from 3×10^3 to 50×10^3 are the examined parameters. Constant heat flux $\dot{q}'' = 1000 \text{ W/m}^2$ boundary condition is applied to the walls of the duct. Results show that k - ω standard turbulence model with low Reynolds number correction gives the closest result compared to literature. It is seen that heat transfer increases with increasing both volume fraction of nanoparticles and Reynolds number. Pressure drop enhances with enhancing both nanoparticle volume fraction and Reynolds number as well. Results show that Al_2O_3 -water nanofluid gives higher heat transfer coefficient than that of CuO -water nanofluid. In addition, Al_2O_3 -water nanofluid has higher pressure loss in duct than that of CuO -water nanofluid. When the performance factor of Al_2O_3 -water and CuO -water nanofluids are compared, it is seen that CuO -water nanofluid has better performance factor than that of Al_2O_3 -water nanofluid. Thermal performance factor is greater than 1.0 for all Reynolds numbers and for all nanofluid fractions for two nanofluids. It can be said that Al_2O_3 and CuO nanoparticles can be added in water to increase the performance of water. It is seen that turbulent fully developed correlations derived for circular ducts may give incorrect results up to 33% for the flow in a two-dimensional rectangular duct.

NOMENCLATURE

D_h	Hydraulic diameter (m)
f	Average friction factor (-)
h	Average heat transfer coefficient ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$)
H	Height of duct (m)
k	Turbulence kinetic energy (m^2/s^2)
k_{eff}	Effective thermal conductivity ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)
K	Thermal conductivity ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)
L	Length of duct (m)
Nu	Average Nusselt number (-)
P	Average pressure (Pa)
ΔP	Pressure drop along duct (Pa)
\dot{q}''	Heat flux (W/m^2)
Re	Reynolds number (-)
T	Temperature (K)
u_i	Average velocity in the i -direction (m/s)
u_j	Average velocity in the j -direction (m/s)
U_i	Inlet velocity (m/s)
u'_i	Fluctuating velocity component in i -direction (m/s)
u'_j	Fluctuating velocity component in j -direction (m/s)
vof	Volume concentration (-)
x_i	Coordinate system (m)

Greek Letters

δ_{ij}	Kronecker delta, -
ε	Turbulent dissipation rate ($\text{J/kg}\cdot\text{s}$)
η	Thermohydraulic performance parameter (-)
μ	Dynamic viscosity ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$)
μ_t	Turbulent (eddy) viscosity ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$)
ρ	Density (kg/m^3)
σ_k	Turbulent Prandtl numbers for k (-)
σ_ε	Turbulent Prandtl numbers for ε (-)
τ	Shear stress on the wall (Pa)
ω	Specific dissipation rate (m^2/s^2)

Subscripts

b	Bulk
bf	Base fluid
fd	Fully developed
nf	Nanofluid
x	Local
w	Wall

REFERENCES

- [1] Kakac S., Shah R.K. and Aung W., "Handbook of single-phase convective heat transfer", Wiley, USA, (1987).
- [2] He S. and Gotts J.A., "Calculation of friction coefficients for noncircular channels", *ASME Journal of Fluids Engineering*, 126: 1033-1038, (2004).
- [3] Prasad B.N. and Saini J.S., "Effect of artificial roughness on heat transfer and friction factor in a solar air heater", *Solar Energy*, 41: 555-560, (1988).
- [4] Yuan Z.X., Tao W.Q. and Wang Q.W., "Numerical prediction for laminar forced convection heat transfer in parallel-plate channels with streamwise-periodic rod disturbances", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 28: 1371-1387, (1998).
- [5] Valencia A., Martin J.S. and Gormaz R., "Numerical study of the unsteady flow and heat transfer in channels

- with periodically mounted square bars”, *Heat and Mass Transfer*, 37: 265-270, (2001).
- [6] Chaube A., Sahoo P.K. and Solanki S.C., “Analysis of heat transfer augmentation and flow characteristics due to rib roughness over absorber plate of a solar air heater”, *Renewable Energy*, 31: 317–331, (2006).
- [7] Bayraktar S., Bayraktar M. and Vardar N., “Numerical investigation of a water flow in a rib-roughened channel by using Reynolds stress model”, *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 22 (5): 331-339, (2008).
- [8] Sohankar A., “Heat transfer and fluid flow through a ribbed passage in staggered arrangement”, *Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Mechanical Engineering*, 34 (5): 471-485, (2010).
- [9] Ahmed H.E., Mohammed H.A. and Yusoff M.Z., “Heat transfer enhancement of laminar nanofluids flow in a triangular duct using vortex generator”, *Superlattices and Microstructures*, 52: 398-415, (2012).
- [10] Yadav A.S. and Bhagoria J.L., “A CFD based heat transfer and fluid flow analysis of a solar air heater provided with circular transverse wire rib roughness on the absorber plate”, *Energy*, 55: 1127–1142, (2013).
- [11] Yadav A.S. and Bhagoria J.L., “Modeling and simulation of turbulent flows through a solar air heater having square-sectioned transverse rib roughness on the absorber plate”, *The Scientific World Journal*, ID 827131, (2013).
- [12] Jhariya K., Ranjan R. and Paswan M.K., “A CFD based performance analysis of heat transfer enhancement in solar air heater provided with transverse semi-circular ribs”, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 4: 4528-4537, (2015).
- [13] Albojamal A., Hamzah H., Haghighi A. and Vafai K., “Analysis of nanofluid transport through a wavy channel”, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 72: 869-890, (2017).
- [14] Turgut O. and Arslan K., “Periodically fully developed laminar flow and heat transfer in a 2-D horizontal channel with staggered fins”, *Thermal Science*, 21: 2443-2455, (2017).
- [15] Mahanand Y., Abhijit M. and Khamari D.S., “CFD analysis of semi-circular rib roughened solar air heater”, *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*, 8: 251-262, (2018).
- [16] Sahu M.K., Pandey K.M. and Chatterjee S., “Numerical investigation of thermal-hydraulic performance of channel with protrusions by turbulent cross flow jet”, *AIP Conference Proceedings*, 1966:020021, (2018).
- [17] “ANSYS Fluent 17.0 Theory Guide”, *ANSYS Inc*, (2016).
- [18] Launder B.E. and Spalding D.B., “Lectures in mathematical models of turbulence”, *Academic Press*, London, England, (1972).
- [19] Yakhot V. and Orszag S.A., “Renormalization group analysis of turbulence I basic theory”, *Journal of Scientific Computing*, 1: 1-51, (1986).
- [20] Shih T.H., Liou W.W., Shabbir A., Yang Z. and Zhu J., “A new k-ε eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows”, *Computers Fluids*, 24: 227-238, (1995).
- [21] Wilcox D.C., “Turbulence modeling for CFD”, *DCW Industries*, Inc. La Canada, California, (1998).
- [22] Menter F.R., “Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications”, *AIAA Journal*, 32: 1598-1605, (1994).
- [23] Rokni M., “Numerical investigation of turbulent fluid flow and heat transfer in complex ducts”, *Doctoral thesis*, Lund University, Lund Institute of Technology, (1998).
- [24] Pak B.C. and Cho Y.I., “Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles”, *Experimental Heat Transfer*, 11: 151-170, (1998).
- [25] Ababaei A., Arani A.A.A. and Aghaei A., “Numerical investigation of forced convection of nanofluid flow in microchannels: effect of adding micromixer”, *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 10: 1759-1772, (2017).
- [26] Pourfattah F., Motamedian M., Sheikhzadeh G., Toghraie D. and Akbari O.A., “The numerical investigation of angle of attack of inclined rectangular rib on the turbulent heat transfer of water-Al₂O₃ nanofluid in a tube”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 131-132: 1106-1116, (2017).
- [27] Amanuel T. and Manish M., “Investigation of thermohydraulic performance of triple concentric-tube heat exchanger with CuO/water nanofluid: Numerical approach”, *Heat Transfer Asian Research*, 97: 974-995, (2018).
- [28] Moraveji M.K., Barzegarian R., Bahiraei M., Barzegarian M., Aloueyan A. and Wongwises S., “Numerical evaluation on thermal-hydraulic characteristics of dilute heat-dissipating nanofluids flow in microchannels”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 135: 671–683, (2019).
- [29] Moldoveanu G.M. and Minea A.A., “Specific heat experimental tests of simple and hybrid oxide-water nanofluids: proposing new correlation”, *Journal of Molecular Liquids*, 279: 299-305, (2019).
- [30] Hamilton R.L. and Crosser O.K., “Thermal conductivity of heterogeneous two component systems”, *Industrial & Engineering Chemical Fundamentals*, 1: 187–191, (1962).
- [31] Cengel Y.A. and Ghajar A.J., “Heat and mass transfer; fundamentals and applications”, 4th edn., *McGraw Hill*, New York, (2011).
- [32] Praveen A., Babu P.S. and Mamilla V.R., “Analysis on heat transfer in nanofluids for Al₂O₃/water”, *International Journal of Advanced Scientific Research and Technology*, 2: 134-140, (2012).
- [33] Arzani H.K., Arzani H.K., Kazi S.N. and Badarudin A., “Numerical study of developing laminar forced convection flow of water/CuO nanofluid in a circular tube with a 180 degree curve”, *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, 10: 795-802, (2016).
- [34] Kezzar M., Nafir N., Tabel I. and Khanetout A., “A new analytical investigation of natural convection of non-Newtonian nanofluids flow between two vertical flat plates by the generalized decomposition method (GDM)”, *Journal of Thermal Engineering*, 4: 2490-2508, (2018).

- [35] Pakdaman M.F., Akhavan-Behabadi M.A. and Razi P., "An experimental investigation on thermo-physical properties and overall performance of MWCNT/heat transfer oil nanofluid flow inside vertical helically coiled tubes", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 40: 103–111, (2012).
- [36] Ahmed H.E., Yusoff M.Z., Hawlader M.N.A., Ahmed M.I., Salman B.H. and Kerbeetf A.Sh., "Turbulent heat transfer and nanofluid flow in a triangular duct with vortex generators", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 105: 495-504, (2017).
- [37] Boukerma K. and Kadja M., "Convective heat transfer of Al₂O₃ and CuO nanofluids using various mixtures of water-ethylene glycol as base fluids", *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 7: 1496-1503, (2017).



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



Evaluation of applicability of thermophotovoltaic system in combi boiler

Yazar(lar) (Author(s)): Barış İŞYARLAR¹, Tayfun MENLİK²

ORCID¹: 0000-0002-7798-4680

ORCID²: 0000-0003-0970-6600

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): İşyarlar B., Menlik T., “Evaluation of applicability of thermophotovoltaic system in combi boiler”, *Politeknik Dergisi*, 23(2): 581-586, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.631730

Evaluation of Applicability of Thermophotovoltaic System in Combi Boiler

Araştırma Makalesi / Research Article

Barış İŞYARLAR^{1*}, Tayfun MENLİK²

¹Vocational School of Technical Sciences, Department of Electricity and Energy, Ordu University, Turkey

²Faculty of Technology, Department of Energy Systems, Gazi University Turkey

(Geliş/Received : 10.05.2019 ; Kabul/Accepted : 23.07.2019)

ABSTRACT

In this study, thermophotovoltaic (TPV) system components are examined and introduced, and theoretically, it is given information about the applicability of the system in a combi boiler. The latest developments in the components of the TPV system, heat source, emitter, filter and TPV cell, are explained. Also, the study state how the TPV system should be integrated into a combi boiler. It is estimated that the TPV system integrated into the combi boiler can produce 36.96 kWh per month in the case that it has 2% electrical efficiency. The study is stated that the higher TPV system electric power output can be achieved if the emitter, the filter and the TPV cell are matched in harmony with each other in the combi boiler, the distances of these components and the emitter-filter dimensions are arranged. Thus, a standard family in Turkey can be supplied a certain amount of monthly energy demand. Also, it is explained in the study the issues that should be taken into consideration when this system is integrated into the combi boiler.

Keywords: Thermophotovoltaic, combi boiler, electrical generation.

1. INTRODUCTION

In today's world, fossil fuels are widely used. Unless there is a change in the policies followed, it is clear that these fuels will be depleted in a short period for reasons such as technological developments and population growth. In 2018, 37.3% of Turkey's electricity generation was obtained from coal, 29.8% from natural gas, 19.8% from hydropower, 6.6% from wind, 2.6% from solar energy, 2.5% from geothermal and 1.4% from other sources [1]. Turkey imports 99.3% of its natural gas demand [2]. To use the imported natural gas more efficiently, it is more appropriate to design natural gas-consuming devices following this purpose.

In Turkey, combi boilers are widely used as the individual heating system. The aim of this study is

heating a house during the winter months, the electricity demand of the house can also be supplied.

2. THERMOPHOTOVOLTAIC SYSTEM

Thermophotovoltaic systems are systems that convert heat energy into electricity. The TPV system consists of four main components to convert heat energy into electricity. These components; heat source, emitter, filter and TPV cell [3-5]. The components of the TPV system in figure 1 are shown [6, 7].

2.1. Heat Source

In TPV systems, any heat source with the operating temperature above 1000 °C can be used. In the literature, TPV systems operating at low temperatures are also available [5, 8-10]. For example, Xu has prepared a

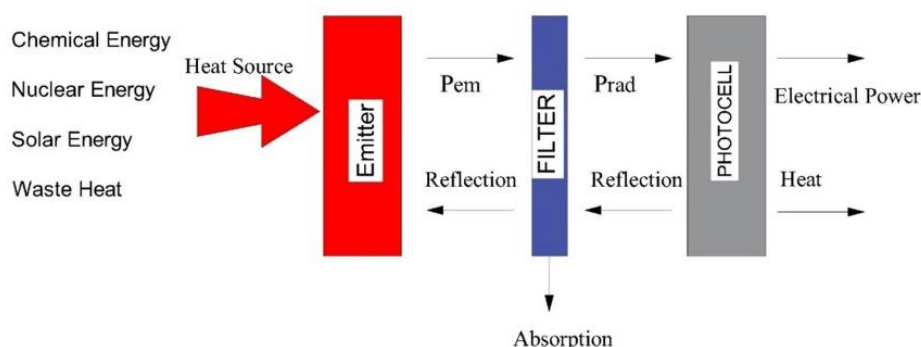


Figure 1. The components of the TPV system (P_{em} : Radiant power of emitter, P_{rad} : Radiation power)

theoretically to show that the thermophotovoltaic system can be integrated into a combi boiler. In this way, while

dissertation on the thermal change of a system consisting of an emitter with an emitter temperature ranging from 76.85 °C to 276.85 °C and a photovoltaic (PV) material [11].

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : isyarlar@odu.edu.tr

2.2. Emitter

It is not appropriate to apply the electromagnetic radiation from a heat source directly to the TPV cell. Instead of applying electromagnetic radiation directly, the use of a selective emitter is beneficial for several reasons. The heat sources used in TPV systems have a temperature in the range of 1000-1500 °C. Also, TPV cells can absorb photons with only energy above the band gap (E_g : band gap energy). Because of this, only a certain part of the radiation radiated can be converted into electrical energy. A selective emitter must be used to increase system efficiency. For example, a black body at 1526.85 °C radiates only 6% of the radiation power of the silicon TPV cell having a band gap energy of 1.1 eV. One way to increase the radiation power above the band gap energy is to use a selective emitter that ideally radiates these photons above the band gap energy. But photons with low band gap energy cause an increase in the temperature of the TPV cell continuously. An increase in the temperature of TPV cell reduces cell efficiency. Emitters applied in TPV systems are also used to prevent unnecessary absorption, which reduces cell efficiency. Emitters carry out this process by preventing the introduction of sub-band gap photons into the TPV cell. Reflective coatings and filters are used to reflect sub-band gap photons into the emitter. Some of these photons that are reflected in the emitter by reflectors and filters are again absorbed by the emitter. Then, it is radiated again these photons having energies above the band gap of TPV cell [7, 12].

Increasing the TPV system efficiency according to TPV cell selection depends on the ideal temperature of the emitter. To increase the electrical efficiency of the system, the power density of the system must also be increased. One way to increase power density is to increase the emitter temperature. The other way is the size of the emitter surface area. The surface area of the emitter should be optimized to maximize power density [13-15]. The ideal temperature of the emitter for different cells of the TPV is given in table 1 below [13].

Table 1. The ideal temperature of the emitter for different cells of TPV

TPV cell	E_g (eV)	The ideal temperature of the emitter (K)
InGaAs	0.55	1285
GaSb	0.72	1682
Si	1.1	2570

Selective emitters are generally made of ceramic oxides. The elements commonly used as emitters are ytterbium, erbium, holmium and neodymium. In TPV systems, it is used in broad-band emitters like silicon carbide [12,16]. Many emitters, both selective and broad-band, have been investigated for TPV systems. Photonic crystals and materials, solidified Al_2O_3 - $Yb_3Al_5O_{12}$ eutectics, new meta-materials such as anti-reflection coated tungsten, enable to the strengthening of the selective emitters and precisely to be controlled the properties of electromagnetic waves [17-20].

2.3. Filter

Most of the radiated photons have lower energies than the band gap of the TPV cell for broad-band radiation. Therefore, these photons with low energy cannot be converted into electricity by the TPV cell. To increase TPV system efficiency and prevent unnecessary heating of the TPV cell, it is necessary to send these photons back to the emitter. System efficiency with a suitable filter may be increased. Many different filters are used in the TPV cells. These are interference, plasma, photonic crystal, tandem filters [6, 7, 16, 17, 19, 21].

2.4. Thermophotovoltaic Cells

TPV cell is the component that converts photons sent by the emitter into electricity. Using a semiconductor material with a low band gap energy is crucial for electricity generating because it can absorb more photons [8]. For this reason, it is more appropriate to choose a semiconductor material with low band gap energy in TPV systems. The cells used in TPV systems are described below.

Silicon (Si): If the silicon with a band range energy of 1.1 eV is matched with a selective emitter that indicates the same radiation as ytterbium oxide (Yb_2O_3), it is suitable for use in TPV systems. Si cells are relatively inexpensive compared to low-band cells such as gallium antimonide (GaSb). Also, a significant advantage of these cells is that they are commercially available in large quantities. [4, 6, 7, 22].

Germanium (Ge): Germanium is a band gap energy of 0.66 eV. TPV system with the Germanium cell, when matched with erbium oxide (Er_2O_3) emitter, provides higher spectral efficiency than the spectral efficiency which would be attained by matching a silicon cell with Yb_2O_3 emitter [6, 7].

Silicon germanium (SiGe): SiGe is used as a double compound in TPV systems. This compound allows adjusting the band gap energy depending on germanium content [6,7].

Gallium antimonide (GaSb): GaSb cell with a band gap energy of 0.72 eV and the ability to operate under high

radiation intensity can be preferred in TPV systems. On the other hand, GaSb cells have a high cost and should be considered in the use of TPV systems of these cells as they cause toxicity at high temperatures [7, 23].

In TPV systems, binary compound materials such as gallium arsenide (GaAs), indium phosphite (InP) and indium arsenide (InAs) are used, and also ternary or quaternary compound materials such as InGaAsSb, AlGaAsSb, InAsSb, InGaSb, InGaAs, $CuInGaSe_2$ and InAsSbP [3, 5-7].

3. THEORETICAL INVESTIGATION OF THERMOPHOTOVOLTAIC SYSTEM IN COMBI BOILER

One of the most important advantages of a thermophotovoltaic system is that the components forming the system can be easily applied to the combustion chamber. As a result of the application of this system to the combustion chamber, TPV systems having a power density between 300 mW/cm² and about 1 W/cm² are included in the literature. Another advantage of a thermophotovoltaic system is that there are no mechanical components in the system. For this reason, the sounds and vibrations of this system are very low [3, 7, 24].

In recent years, many research groups have made prototypes related to the thermophotovoltaic system. The efficiency of TPV systems of these groups varies between 0.04% and 24%. Prototypes of these groups can produce electricity ranging from 10 W to 3 kW [25]. A research group in Canmet made the TPV prototype for residential heating. This prototype has a GaSb cell. This system is deemed to be suitable for residential heating because of the high power density [18].

The study indicating the comparison of TPV system electricity generation with conventional electricity

The combi boiler examined in this study is the Buderus Logamax Plus GB062. Characteristics of the Buderus Logamax Plus GB062 combi boiler are given in table 2 [28]. The combi boilers with a maximum heating power of 24 kW in the individual apartments are widely used in Turkey. The Buderus Logamax Plus GB062 brand with a maximum heating power of 24 kW was preferred in this study as it is easily accessible on the official website. It should be noted that the TPV system can be integrated into the Buderus Logamax Plus GB062 combi boiler stated in the study, as well as other combi boilers with a maximum heating power of 24 kW.

The performance results of the TPV boiler system are given in table 3 [27]. When the table is examined, it is seen that there is 158 W electrical power output and 1.86% electrical efficiency with 8.5 kW fuel input. According to these results, the electrical energy required by the Buderus Logamax Plus GB062 combi boiler even in the minimum heating power can be achieved with 1.86% efficiency. Furthermore, it is understood that 246.4 W electric power output and 2% electrical efficiency is obtained with 12.3 kW fuel input when the table is examined again. Consequently, it is foreseen that the combi boiler will provide a higher power density at the maximum heating power and therefore higher electrical power output.

Table 2. Characteristics of the Buderus Logamax Plus GB062 combi boiler

Technical characteristics	
Minimum heating power (80/60°C)	6.7 kW
Maximum heating power (80/60°C)	23 kW
Minimum heating power (40/30°C)	7.3 kW
Maximum heating power (40/30°C)	24.1 kW

generation methods is given in [26]. In terms of the cost of electricity generation, the analyzed system suggests that it could be competitive with conventional electricity generation methods in 2003.

There are many combi boiler products in the market, and these products are designed and manufactured in different heat power. The combi boilers need different

The monthly electricity demand of a family in terms of the minimum standard of living in Turkey is about 230.4 kWh [29]. When table 3 is considered, it is produced 0.2464 kW electricity with a TPV system which has 2% electrical efficiency. Assuming that this combi boiler functions 5 hours a day (during the heating season), the monthly electricity generation of the TPV system integrated into the combi boiler is $0.2464 \times 5 \times 30 = 36.96$

Table 3. The performance results of the TPV boiler system

Fuel input power (kW)	Electric power output (W)	Electrical efficiency of the system (%)
8.5	158.0	1.86
10.1	175.2	1.73
11.7	209.6	1.79
12.3	246.4	2.00

amounts of electric energy to perform their functions. For example, a combi boiler with 12-20 kW thermal output power needs to 100-120 W of electrical energy to perform its function. Therefore, less than 1% TPV system efficiency is sufficient for such a combi boiler needing to 100-120 W electrical energy [7, 27].

kWh. This combi boiler can supply a certain amount of the electrical energy demanded by a family in Turkey. In this case, it can be supplied with higher electricity generation when provided more heating power. Following this purpose, the desired electric power output can be increased if the emitter, the filter and the TPV cell are appropriately matched to each other, the distances of

these components and the dimensions of the emitter-filter are properly adjusted. Thus, a family's monthly electric energy demand in Turkey will be supplied.

A combustion chamber design is important for the TPV system applied in a combi boiler. In existing combi boilers, combustion chambers are designed as a cylindrical or rectangular prism. To integrate the TPV system into these combustion chambers and to provide the desired efficiency of this system, the system components must be well designed. Also, it should be noted that the efficiency of TPV cells decreases with increasing temperature. Therefore, TPV cells placed in the combustion chamber must be properly cooled to

In this study, the TPV system design applied to the combi boiler which has the rectangular combustion chamber is shown in Figure 3. The TPV system can be integrated by optimizing as shown in Figure 3 without any changes to the combustion chamber of the combi boiler. Also, the reflectors are placed on the upper and lower parts of the TPV system integrated into the combi boiler. The use of these reflectors may be useful for more photon absorption [31].

5. DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Combi boilers are widely used for an individual heating system the housings in Turkey. When taken into account

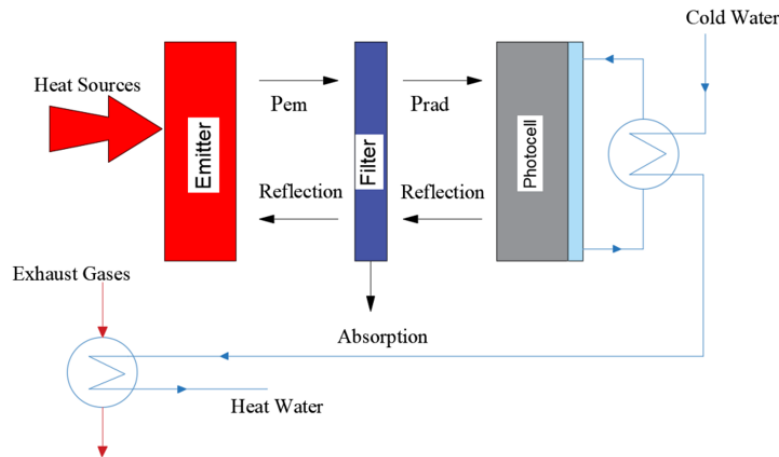


Figure 2. Cooling of the TPV cell

provide the desired efficiency [30]. An example to cool the TPV cell is given in Figure 2 [25]. However, it will not be appropriate to use this cooling system in the combi boilers. There are two reasons for this. The first reason; it is necessary to continuously use cooling water from an external source. The second reason; the structure of

the size of the combi boiler sector in Turkey and that this sector will continue to grow, it should be considered that TPV systems may have large market potential in the combi boilers.

The application of the present TPV system in a combi boiler has high cost and low system efficiency. However,

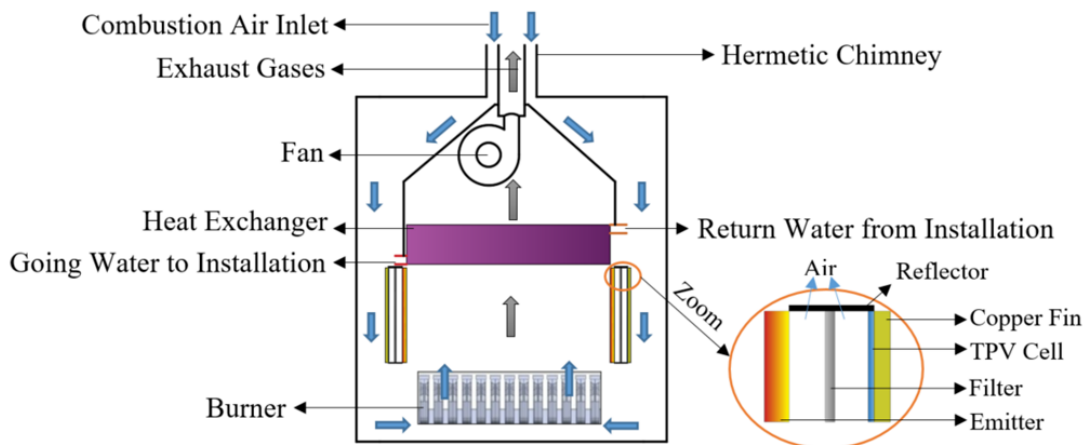


Figure 3. The drawing of the TPV system integrated into the combi boiler

existing combi boilers needs to be changed to implement the system. Therefore, it will not be economical to choose this cooling method.

these problems can be overcome by appropriately matching the emitter-filter-TPV cell as well as the low-cost system components and by optimizing the distances

of these matched system components with each other and with the heat source. By arranging the thickness of the TPV system components and their distances, and by using different TPV system components, it should be attempted to obtain the highest TPV system efficiency at a reasonable cost.

In an attempt to reduce the cost of a TPV system in the combi boiler, a TPV system with a silicon cell can be used. Because silicon cells are already used in PV cells to generate electricity from solar energy. In other words the usage area is wide. However, it cannot absorb low energy photons because silicon has a wide band gap compared to other semiconductors used TPV cells. Therefore, its efficiency may be low compared to TPV cells with a lower band gap. If it is desired to have more efficiency of the TPV system, costly TPV cells with a lower-band gap such as GaSb, Ge, and InGaAsSb should be used.

According to After Sales Services Regulation of the Republic of Turkey Ministry of Trade, the service life of a combi boiler is 15 years [32]. However, the service life of a combi boiler given in the regulation may change due to factors such as its operating time, whether its periodic maintenance is performed during the year or not. It should be taken into account that the service life of a combi boiler having a TPV system may be changed because it requires a continuous operation to provide the above-mentioned electricity generation.

In addition to these, it should be investigated how the performance of the heat exchanger (see Fig. 3) will be affected by the addition of the TPV system to the combustion chamber. If the TPV system is properly integrated into the combi boiler with a maximum heating power of 24 kW, this combi boiler will supply 36.96 kWh part of a family's monthly electricity demand in Turkey.

Given the above-mentioned information, the TPV system can be applied properly to the combi boiler stated in this study.

REFERENCES

- [1] <https://www.enerji.gov.tr/trTR/Sayfalar/DogalGaz>, (2019).
- [2] <http://www.tpao.gov.tr/?mod=sektoredair&contID=43>,(2019).
- [3] Mao L., and Ye H., "New development of one-dimensional Si/SiO₂ photonic crystals filter for thermophotovoltaic applications", *Renewable Energy*, 35(1): 249-256, (2010).
- [4] Sansoni P., Fontan, D., Francini F., Jafrancesco D., Gabetta G., Casale M., and Toniato G., "Evaluation of elliptical optical cavity for a combustion thermophotovoltaic system" *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 171: 282-292, (2017).
- [5] Heide, J.V.D., "Thermophotovoltaics", Elsevier, 603-618, (2012).
- [6] Bitnar B., Durisch W., and Holzner R., "Thermophotovoltaics on the move to applications", *Applied Energy*, 105: 430-438, (2013).
- [7] Daneshvar H., Prinja R., and Kherani N. P., "Thermophotovoltaics: Fundamentals, challenges and prospects", *Applied Energy*, 159: 560-575, (2015).
- [8] Alipoor A., and Saidi M. H., "Numerical study of hydrogen-air combustion characteristics in a novel micro-thermophotovoltaic power generator", *Applied Energy*, 199: 382-399, (2017).
- [9] Datas A., and Vaillon R., "Thermionic-enhanced near-field thermophotovoltaics", *Nano Energy*, 61: 10-17, (2019).
- [10] Silva-Oelker G., Jerez-Hanckes C., and Fay P., "High-temperature tungsten-hafnia optimized selective thermal emitters for thermophotovoltaic applications", *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 231: 61-68, (2019).
- [11] Xu Y., "A Study of Thermal Exchange in a Thermophotovoltaic (TPV) System at Moderate Temperature", *Doctoral dissertation*, University of Nevada, Las Vegas, (1998).
- [12] Bitnar B., Durisch W., Mayor J. C., Sigg H., and Tschudi H. R., "Characterisation of rare earth selective emitters for thermophotovoltaic applications", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 73(3): 221-234, (2002).
- [13] Gentillon P., Southcott J., Chan Q. N., and Taylor R. A., "Stable flame limits for optimal radiant performance of porous media reactors for thermophotovoltaic applications using packed beds of alumina", *Applied Energy*, 229: 736-744, (2018).
- [14] Shoaie E., "Performance assessment of thermophotovoltaic application in steel industry" *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 157: 55-64, (2016).
- [15] Wu H., Kaviani M., and Kwon O.C., "Thermophotovoltaic power conversion using a superadiabatic radiant burner", *Applied Energy*, 209: 392-399, (2018).
- [16] Bermel P., Ghebrehirhan M., Chan W., Yeng Y.X., Araghchini M., Hamam R., and Johnson S. G., "Design and global optimization of high-efficiency thermophotovoltaic systems", *Optics Express*, 18(103): A314-A334, (2010).
- [17] Zeyghami M., Stefanakos E., and Goswami, D. Y., "Development of one-dimensional photonic selective emitters for energy harvesting applications", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 163: 191-199, (2017).
- [18] Lau J. Z. J., Bong V. N. S., and Wong B. T., "Parametric investigation of nano-gap thermophotovoltaic energy conversion", *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 171: 39-49, (2016).
- [19] Kim J. M., Park K. H., Kim D. S., Hwang B. Y., Kim S. K., Chae H. M., and Kim Y. S., "Design and fabrication of spectrally selective emitter for thermophotovoltaic system by using nano-imprint lithography", *Applied Surface Science*, 429: 138-143, (2018).
- [20] Chen X. L., Tian C. H., Che Z. X., and Chen T. P., "Selective metamaterial perfect absorber for infrared and 1.54 μm laser compatible stealth technology", *Optik*, 172: 840-846, (2018).
- [21] Binidra K., Miloua R., Khadraoui M., Kebbab Z., Bouzidi A., and Benramdane N., "Spectral control in thermophotovoltaic systems by optimized one-dimensional photonic crystals", *Optik*, 156: 879-885, (2018).

- [22] Durisch, W. and Bitnar B., “Novel thin film thermophotovoltaic system”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(6): 960-965, (2010).
- [23] Meharrar F. Z., Belfar A., Aouad I., Giudicelli E., Cuminal Y., and Ait-Kaci H., “Analysis of the GaSb-p+/GaSb-p/GaSb-n+/GaSb-n structure performances at room temperature, for thermo-photovoltaic applications”, *Optik*, 175: 138-147, (2018).
- [24] Barbieri E. S., Spina P. R., and Venturini M., “Analysis of innovative micro-CHP systems to meet household energy demands”, *Applied Energy*, 97: 723-733 (2012).
- [25] Ferrari C., Melino F., Pinelli M., Spina P. R., and Venturini M., “Overview and status of thermophotovoltaic systems”, *Energy Procedia*, 45: 160-169, (2014).
- [26] Palfinger G., Bitnar B., Durisc W., Mayor J. C., Grützmacher D., and Gobrecht J., “Cost estimates of electricity from a TPV residential heating system”, *In AIP Conference Proceedings* ,653(1): 29-37, (2003).
- [27] Qiu K., and Hayden A. C. S., “Implementation of a TPV integrated boiler for micro-CHP in residential buildings”, *Applied Energy*, 134: 143-149, (2014).
- [28] https://www.buderus.com/ocsmedia/optimized/full/o378404v272_TR_Buderus_LogamaxPlusGB02_210x297_Brosur.pdf, (2019).
- [29] Kocaman B., “The Importance of Choosing the Tariff in the Use of Electronic Meter”, *BEU Journal of Science*, 1(1): 59-65, (2012).
- [30] Royne A., Dey C. J., and Mills D. R., “Cooling of photovoltaic cells under concentrated illumination: a critical review”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 86(4):, 451-483, (2005).
- [31] Kostić L. T., Pavlović T. M., and Pavlović Z. T., “Optimal design of orientation of PV/T collector with reflectors”, *Applied Energy*, 87(10): 3023-3029, (2010).
- [32] http://www.mevzuat.gov.tr/Metin.Aspx?MevzuatKod=7.5.19783&MevzuatIlisk_i=0&sourceXmlSearch=sat%C4%B1%C5%9F%20sonras%C4%B1, (2019)



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



The effect of organic waste potential of Mersin province on biogas energy production

Mersin ilinin organik atık potansiyelinin biyogaz enerji üretimine etkisi

Yazar(lar) (Author(s)): Bekir YELMEN¹, Metin DAĞTEKİN², M. Tarık ÇAKIR³

ORCID¹: 0000-0001-7655-530X

ORCID²: 0000-0002-1397-1725

ORCID³: 0000-0002-0107-594X

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Yelmen B., Dağtekin M. ve Çakır M.T., “Mersin ilinin organik atık potansiyelinin biyogaz enerji üretimine etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 23(2): 587-595, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.645309

Mersin İlinin Organik Atık Potansiyelinin Biyogaz Enerji Üretimine Etkisi

Araştırma Makalesi / Research Article

Bekir YELMEN^{1*}, Metin DAGTEKİN², Tarık M. ÇAKIR³

¹Adana Büyükşehir Belediyesi, Çevre Koruma Kontrol Dairesi Bşk., AAT, Türkiye

²Çukurova Üniversitesi, Ceyhan Meslek Yüksekokulu, Türkiye

³T.C.Sağlık Bakanlığı, TUSEB, Türkiye

(Geliş/Received : 11.04.2019 ; Kabul/Accepted : 06.06.2019)

ÖZ

Bu çalışmanın amacı; Mersin ilinde bitkisel, hayvansal, mutfak ve endüstriyel arıtma çamuru tesislerinden elde edilen organik atıkların mevcut durumu ve biyogaz enerji üretim potansiyelini belirlemek ve konuya ilişkin yerel ölçekte sürdürülebilir çözümler oluşturmaktır. Çalışmada hayvan ve bitkilere ait veriler Mersin İl Tarım ve Orman Müdürlüğünden, mutfak ve endüstriyel atıklara ilişkin veriler ise Mersin Büyükşehir Belediyesinden alınmıştır. Çalışma sonucunda, Mersin ilinde hayvansal, bitkisel, mutfak ve arıtma çamuru tesisinde üretilen günlük organik madde miktarının 16801.48 ton olduğu ve bu atıklardan üretilen biyogaz miktarının 557432.47 m³, metandan üretilen elektrik enerjisi ise 2619.93 MWh olarak elde edilebilecektir. Organik atıklardan üretilen elektrik miktarının %57'si hayvan gübresinden %33'ü arıtma çamurundan, %6'sı mutfak atıklarından ve %4'ü de tarımsal atıklarından elde edilebilecektir. Mersin ili için elektrik üretiminde hayvan gübresi ve arıtma çamurunun içerdiği organik madde bakımından önemli potansiyele sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, kurulacak biyogaz tesislerinin işletmelere ticari değer katkısı da sağlayabilecektir.

Anahtar Kelimeler: Biyogaz, enerji, organik atık, Mersin.

The Effect of Organic Waste Potential of Mersin Province on Biogas Energy Production

ABSTRACT

In this study is to determine the current status of organic wastes obtained from plant, animal, kitchen and industrial sewage sludge plants in Mersin province and to generate biogas energy production potential and to create sustainable solutions at the local level. Data on animals and plants were obtained from Mersin Provincial Directorate of Agriculture and Forestry and data on kitchen and industrial wastes were obtained from Mersin Metropolitan Municipality. As a result of this study, the daily organic matter produced in animal, vegetable, kitchen and sewage sludge plant in Mersin province is 16801.48 tons and the amount of biogas produced from these wastes is 557432.47 m³ and the electricity generated from methane is 2619.93 MWh. The amount of electricity produced from organic wastes; 57% can be obtained from animal manure, 33% from treatment sludge, 6% from kitchen waste and 4% from agricultural waste. In Mersin province, it has been determined that animal manure and sewage sludge have significant potential in terms of organic matter. In addition, the biogas facilities to be established will provide commercial value contribution to the enterprises.

Keywords: Biogas, energy, organic waste, Mersin.

1. INTRODUCTION

Nowadays, with the increase in population, energy needs to be produced in a level sufficient to meet basic human needs. The development of technology simplifies community life and increases average energy consumption. This situation leads to an increase in energy production and consumption in the world. In the near future, fossil energy resources, which are used extensively in meeting the energy requirements, will be unable to meet the needs of human beings and consequently, energy problems will be experienced. Excessive use of fossil fuels, which cover a large portion of our energy consumption, causes environmental pollution. Nowadays, the closure of the energy deficit, the solution of environmental problems, the struggle

against global warming and sustainable development necessitates the orientation to renewable energy resources[1]. However; The amount of wastes generated in direct proportion with the increasing world population and the need for energy are constantly increasing. Due to the negative environmental impact of the wastes generated, the necessity of disposal and the decrease in fossil energy sources and the increasing energy deficit increase the use of existing resources more efficiently and demand for renewable energy sources[2]. The industrialization process, which is one of the major factors in the growth of a developing and rapidly growing country, has gained momentum in recent years. With the increase in population, the countries' need for energy is increasing. In order to meet this need, electrical energy is produced by various methods. Conventional electric power generation systems; consumption of natural resources can lead to negative consequences that cannot

*Sorumlu yazar (Corresponding Author)
e-mail : byelmen@yahoo.com.tr

be repaired from an environmental perspective. With the awareness of environmental protection, renewable energy sources gain great importance and develop rapidly. Although Turkey's potential of renewable energy sources at a level that can meet the entire energy needs of the country, and investments necessary information in this regard is quite insufficient. The search for renewable energy sources has increased significantly in recent years in order to meet the increasing energy demand. Biogas production from organic wastes is considered as an alternative source. The use of organic wastes in biogas production demonstrates effective waste management in both waste disposal and energy recovery from waste [3]. Evaluation of solid residues as biomass is only one of these methods. Countries with high agricultural potential create opportunities for biogas, biogas, biodiesel and bioethanol. The extremely limited reserves of energy resources have increased the demand for renewable energy sources for biogas production and biogas use. In most developed countries, biogas can be produced from organic wastes to meet various energy needs. Although fossil fuels are exhausted in the near future; Turkey has all extremely rich source of environmentally friendly biomass energy. Biogas production from biomass energy sources; It is a vital resource for sustainable agriculture and economic independence. Anaerobic treatment of the organic portion of domestic solid waste is particularly common in Europe in terms of renewable energy recovery and stabilization of waste. The treatment of the organic part of the solid waste by anaerobic biological methods is a very attractive treatment alternative. Significant advances in anaerobic reactor technology gained momentum after the 1950s [4]. An integrated (integrated) waste management is provided as a result of the combined treatment of the organic part of the domestic solid wastes and the different organic waste types in airless digesters [5]. Nowadays, due to the decrease in fossil fuels, it may cause an energy deficit and increase in energy prices in the near future. In addition, when environmental problems arising from plant and animal wastes are taken into consideration, it has been seen with the studies that it is of great importance to bring solutions to these problems in terms of sustainable development. Biomass energy conversion systems are one of the most environmentally acceptable solutions for agricultural and animal wastes. With these systems; organic wastes produce both organic and fertilizer with high energy and nutritional value [6,7,8]. Materials used in biogas production; all organic waste such as trees, corn, wheat crops, mosses, fruit and vegetable waste disposed from the houses are animal feces. The remaining liquid-solid fraction after biogas production is considered as fertilizer. The microbiological evaluation of wastes containing organic matter is important in terms of both preventing environmental pollution and producing clean energy [9]. The world average electricity consumption per capita in the entire 2376 kWh / year, while the average in Turkey 1281 kWh / year is around [10]. In Turkey, about 65 MTEP / year of organic waste

and 11.05 MTEP / year has the potential animal waste [11]. Only 60% of these wastes can be used for energy production. Turkey's annual energy consumption of the energy obtained from waste is known that this corresponds to about 22-27's% [11]. On average, 15% of the world's energy consumption is used in developing countries, and 43% of the energy consumption is obtained from biomass [11]. In developed and developing countries, industrial wastes, animal wastes and agricultural wastes are widely used as raw materials in renewable energy production. In particular, the production of electrical energy from biogas technology gas engines has expanded the use of this technology [12]. In a study on the availability of biogas energy in the Thrace Region, the data of State Institute of Statistics, Provincial Directorates of Agriculture and Meteorology Directorates were used. Using these data, the number and size of enterprises, number of animals, estimated annual fertilizer production amount, estimated annual biogas production amount with Energy values of Edirne, Kırklareli and Tekirdağ provinces were determined. [13]. In a study on the biogas potential and cost analysis of Elazığ province, Elazığ province was divided into 3 sub-regions and the number of animals and crop production in these regions were determined. Using these statistical data, the amount of wet and dry fertilizer that can be obtained, the amount of biogas production, the amount of energy that can be obtained and economic values have been determined [14]. In a study on the biomass potential of 15 provinces in the Eastern Anatolia Region, biomass formation, biomass sources and properties were revealed and the usability of biomass technology in this region and biomass potential and equivalent energy were estimated [15]. The annual and total recoverable biomass energy potential of Turkey is estimated to be 32.6 and 17.2 MTEP (Million Tons Equivalent Petroleum) respectively [16]. Animal, kitchen, agricultural and wastewater treatment sludge plant wastes of Ankara province were taken into consideration and biogas production amount was calculated from these wastes. As a result of the calculation, the theoretical biogas energy value that can be produced from organic wastes is 277 348 m³ / day animal wastes, 515 220 m³ / day wastewater treatment sludge, 38 493 m³ / day agricultural wastes; 160 380 m³ / day are kitchen wastes [17]. In a study conducted in Russia, the biogas potential of the produced wastes was studied. Annual waste, methane and fertilizer potential was calculated by calculating the agricultural industry wastes. In addition, the potential that can be obtained from municipal solid wastes, waste water sludge and garbage storage areas has been determined [18]. As of the end of 2006, it has a total generation capacity of 1100 MW in approximately 3500 biogas plants in Europe. Today, only about 4300 biogas plants are operated in Germany, Denmark and Austria [19]. The biogas potential of Bulgaria has been studied. For this purpose, existing biogas plants, biogas production opportunities and raw material opportunities were determined. After the country's raw material

opportunities were divided into 7 regions, biogas production potential was calculated by considering the literature values [20]. In countries such as Denmark, Germany and Sweden, more central and farm-type units have been established. There are many biogas plants in Latin America, India, China and Nepal with a volume of 3-10 m³[21-22]. In Greece, the waste potential, municipal waste, industrial waste and agricultural waste was tried to be determined.

Calculating agricultural wastes in tons, farm manure wastes in m³ / year, municipal and sewage wastes in tons, the country was divided into 10 regions and mapped the waste potential [23]. The biogas potential of the US state of Illinois was studied. Using the statistical data of the country, the main fields with energy production potential such as dairy and poultry holdings, garbage storage areas and related enterprises were determined. The estimated energy range and total energy potential that can be obtained from these areas have been determined [24]. An exemplary biogas plant is shown in Figure 1.

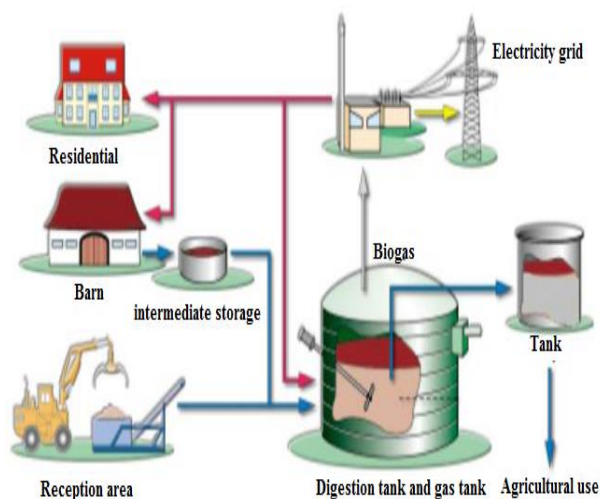


Figure 1. Example of a biogas plant

The aim of this study is to determine the current state of organic wastes to be obtained from plant, animal, kitchen and domestic / urban sewage sludge plants in Mersin Province and to determine sustainable potential on the local scale by determining the biogas energy production potential.

2. MATERIAL and METHOD

Located between 39°56'0,109" north latitude and 32°51'35,07" east longitude in the south of the Mediterranean, Mersin Province has a surface area of 15 853 km² and a population of 1 814 468 [25].

There are Adana in the east of Mersin province, Antalya in the west, Niğde, Konya and Karaman provinces in the north and Mediterranean Sea in the south. Mersin province consists of a total of 13 districts (Akdeniz, Anamur, Aydıncık, Bozyazı, Çamlıyayla, Erdemli, Gülnar, Mezitli, Mut, Silifke, Tarsus, Toroslar and Yenişehir) (Figure 2) [26]. In order to determine biogas production potential of organic wastes of Mersin province, data on animals and plants were obtained from Forestry Directorate; data on kitchen and industrial wastes were obtained from Mersin Metropolitan Municipality.



Figure 2. Mersin province map

2.1. Determination of Animal Wastes

Animal wastes are known as cattle, horses, sheep, goats, chickens, pigs and slaughterhouse wastes as well as wastes generated by processing animal products. In this study, only organic fertilizers produced from cattle, sheep, goats and chickens are considered. The amount of fertilizer produced daily varies according to the type of animals. Acceptance value of wet manure to be produced from animals, number of animals and amount of wet manure production are given in Table 1 [27,28].

Table 1. Number of animals and amount of wet manure produced in Mersin province

Species Animal	Number of animals (pcs)	Wet Manure production (Ton / year-animal)	Wet Manure production (Ton / year)
Bovine (cattle, adult)	115506	3,6	415821,6
Ovine (sheep, goat)	1370420	0,7	959294
Poultry (chicken)	27413431	0,022	603095,5
Total	28899357		1978211,1

The total number of animals (bovine, ovine and poultry) in Mersin province is 28899357 and the amount of wet manure produced from these animals is 1978211.1 tons. Total wet fertilizers produced; 48,49% of them are ovine, 30,49% of them are poultry and 21,02% of them are bovine.

2.2. Determination of Agricultural Waste Potential

Located in the center of the fertile soil of Çukurova, Mersin has a total agricultural production area of 3696380 da. 55% of this production area is cultivated in

field, 36% in fruits and 9% in vegetables [29]. For this reason, in this study, the data of the commonly produced crops (corn, cotton, wheat rye peanut, soybean, oat etc.) were taken into consideration in determining the agricultural waste potential. In the study, plant organic wastes were calculated by multiplying the planting area of the cultivated plants and the amount of organic waste to be produced in the unit area (Table 2). The spatial yield of the amount of organic waste was obtained from Mersin Provincial Directorate of Agriculture and Forestry [28].

Table 2. Amount of organic waste obtained according to the plant type planted in Mersin province

Plant	Sowing area (da)	Amount of organic waste (kg / ha)	Amount of organic waste (ton)
Sunflower	22367	227	5077,309
Cotton	52216	496	25899,136
Soybean	84543	347	29336,421
Peanut	9824	206	2023,744
Wheat+Barley+Rye+Oats	978714	190	185955,660
Corn plant	133069	881	117233,789
Total	1 280 733		365526,059

As shown in the table, the amount of organic waste obtained from planting in 1 280 733 da area is 365526,059 tons. 50.88% of the total organic wastes obtained were wheat + barley + rye + oats, 32.07% corn, 8.03% soybean plant, 7.09% cotton, 0.55% peanuts and 1.39% sunflower plant constituted.

2.3. Determination of Kitchen Waste

Today, almost all of the organic wastes that are consumed at home go to garbage. These wastes, which are thrown away in cities or rural areas, bring some problems to the environment such as take up space and bad smells. However, the use of these organic wastes, which are disposed of in landfills, in proper production in gas production, can contribute to both the environment and the household budget [30].

In the theoretical determination of the amount of kitchen waste, it is accepted that 1 kg of waste is produced per person per day and that organic waste constitutes 60% of this waste [31]. Accordingly, since the population of Mersin is 1 814 468 according to the latest statistical data, the amount of organic waste produced from kitchen waste was calculated as 1 088,68 tons per day.

2.4. Determination of Wastewater Treatment Sludge

Waste water; It consists of water contaminated by industrial, urban, agricultural and other uses and whose properties have been partially changed. Since wastewater treatment sludge contains high amounts of organic matter, nutrients and pathogenic bacteria, it is important to treat wastewater. Its thermal value depends on the type of sludge and the amount of organic matter it contains. The amount of gas per person in the domestic wastewater treatment plant varies between 15-22 liters / day. The methane percentage of the gas produced is 65% and the energy value is 22.4 MJ / m³ [32]. A large part of the

sludge entering the decanter in the wastewater treatment plant is water and the amount of Dry Matter (ADM) is between 1-5% [33]. Municipal treatment plants generally convert 100 liters of sewage water into 1-2 liters of sludge. The remaining part formed by the removal of pollutants from the water is waste sludge. Unlike other organic wastes, these wastes are difficult and costly to be destroyed [34]. Studies have reported that the biogas yield per 1 tonne sludge is in the range of 10-30 m³. In the study, waste sludge (ADM) was calculated by taking 3% of the amount of water entering the daily wastewater treatment plant. In the study, capacities of wastewater treatment sludge facilities taken from Mersin Metropolitan Municipality are given in Table 3 [29]. The total amount of waste processed per day in the wastewater treatment plant is 309719 m³. The amount of sludge (ADM) produced by these plants can be calculated as 9291.6 m³ per day.

Table 3. Capacity of wastewater treatment plants in Mersin province

Wastewater Treatment Plant	Capacity (m ³ /day)
Karaduvar Wastewater Treatment Plant	189 523
Tarsus Wastewater Treatment Plant	61 272
Erdemli Wastewater Treatment Plant	21972
Kargıpınarı Wastewater Treatment Plant	6000
Atakent Wastewater Treatment Plant	6800
Silifke Wastewater Treatment Plant	21000
Narlıkuyu Package Wastewater Treatment Pl.	500
Bozyazı Wastewater Treatment Plant	2652
Total	309 719

In this study, biogas yield value of wastes used in the calculation of biogas potential of organic wastes to be produced from animal, plant, kitchen and wastewater treatment plant for Mersin province is given in Table 4. The electrical energy value to be produced from the biogas is taken as 4.7 kW / m³ (Since the energy value of the biogas in 65% methane content is approximately 22.4 MJ / m³, 1 m³ biogas is approximately equivalent to 4.7 kWh electrical energy) [35,36,37]

Table 4. Biogas yield values of some organic wastes

Organic matter	Biogas yield (m ³ / ton)	References
Bovine manure	33	[38,37]
Ovine manure	58	[27,37]
Poultry manure	78	[27,37,39]
Agriculturalwastes	20	[37,39]
Kitchen waste	30	[40,37]
Sewage sludge	20	[41,37]

2.5. Basic Parameter Acceptances

The energy production potential of animal feces was investigated in this study. Each type of feces has a changing energy potential depending on its physical and chemical properties. In the calculations, the assumptions regarding the solid and organic solids content and methane gas production potential depending on the types of animal wastes are summarized in Table 5., Table 6. and Table 7.

Table 5. Acceptance of solid(S) and volatile solids(VS) value of animal wastes

Waste Type	Solid %	Volatile S. %	Reference
Bovine (cattle, adult)	19	90	Laboratory Analysis
Ovine (sheep, goat)	28	80	Laboratory Analysis
Poultry (chicken)	44	89	Laboratory Analysis

Table 6. Unit methane gas potential value acceptance of animal wastes

Waste Type	Unit Methane Potential (m ³ CH ₄ / ton VS)	Reference
Bovine (cattle, adult)	220	Lab. Analysis
Ovine (sheep, goat)	200	Lab. Analysis
Poultry (chicken)	256	Lab. Analysis

Table 7. Unit methane gas potential value acceptance of agricultural wastes

Waste Type	Unit Methane Potential (m ³ CH ₄ / ton VS)	Reference
Wheat	295,2	Laboratory Analysis
Corn plant	250,9	Laboratory Analysis
Barley	351,9	Laboratory Analysis
Rye	273,6	Laboratory Analysis
Oat	290,5	Laboratory Analysis

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

The amount of biogas production obtained from organic wastes of Mersin province and the amount of electricity production potential to be produced from methane gas are given in Table 8 and Figure 3. The amount of biogas production obtained from organic wastes of Mersin province and the percentage ratio of electricity production potential to be produced from methane gas are given in Figure 4.

As shown in Table 8 and Figure 4, the total amount of organic waste of Mersin province is calculated as 16801.48 tons per day. 55% of the calculated value consists of sewage sludge, 32% animal manure, approximately 7% kitchen wastes and 6% agricultural wastes. In the study, 557432.47 m³ of biogas and 2619.93 MWh of electricity were generated from a total of 16801.48 tons of organic waste per day. 57% of the total amount of electricity generated daily from organic wastes was obtained from animal manure, 33% from sludge, 6%

Table 8. Electricity potential that can be produced from biogas and methane produced due to organic wastes of Mersin Province

Organic waste	Amount of organic waste (ton / day)	Amount of biogas (m ³ / day)	Electricity production(Methane) (MWh /day)
Animal fertilizers	5419,76	318911,27	1498,88
Agriculturalwastes	1001,44	20028,8	94,14
Sewage sludge	9291,6	185832	873,41
Kitchen waste	1088,68	32660,4	153,5
Total	16801,48	557432,47	2619,93

from kitchen wastes and 4% from agricultural wastes. In other words, approximately 90% of the total amount of electricity generated is obtained from animal manure and wastewater sludge plants. Since sewage sludge and animal manure have high organic potential, these wastes seem to have a significant impact on electricity generation. It is seen that the amount of organic waste produced in the water treatment sludge facility in Mersin Province is about 2-9 times higher than the other wastes. This shows how important the municipal sewage sludge plant is for electricity generation. In addition, although the amount of organic waste from the wastewater sludge plant is about 1.71 times the amount of organic matter of animal manure; in terms of the amount of biogas produced, it is about 1.71 times the amount of biogas

obtained from wastewater treatment sludge of animal manure. Therefore, it has been confirmed that the high organic matter content of animal wastes is effective in increasing biogas production and production efficiency of the Plant. Nowadays, especially with the increasing environmental risks of organic wastes and their economic and social effects added, the management of these wastes gains importance day by day. Therefore, in the evaluation of these wastes having such high energy potential; duty areas of municipalities are becoming more and more important. The reason that the amount of biogas produced in the plant is lower than the theoretically calculated biogas production may be due to the chemical composition of the sludge, the process difference or the inability to use it effectively

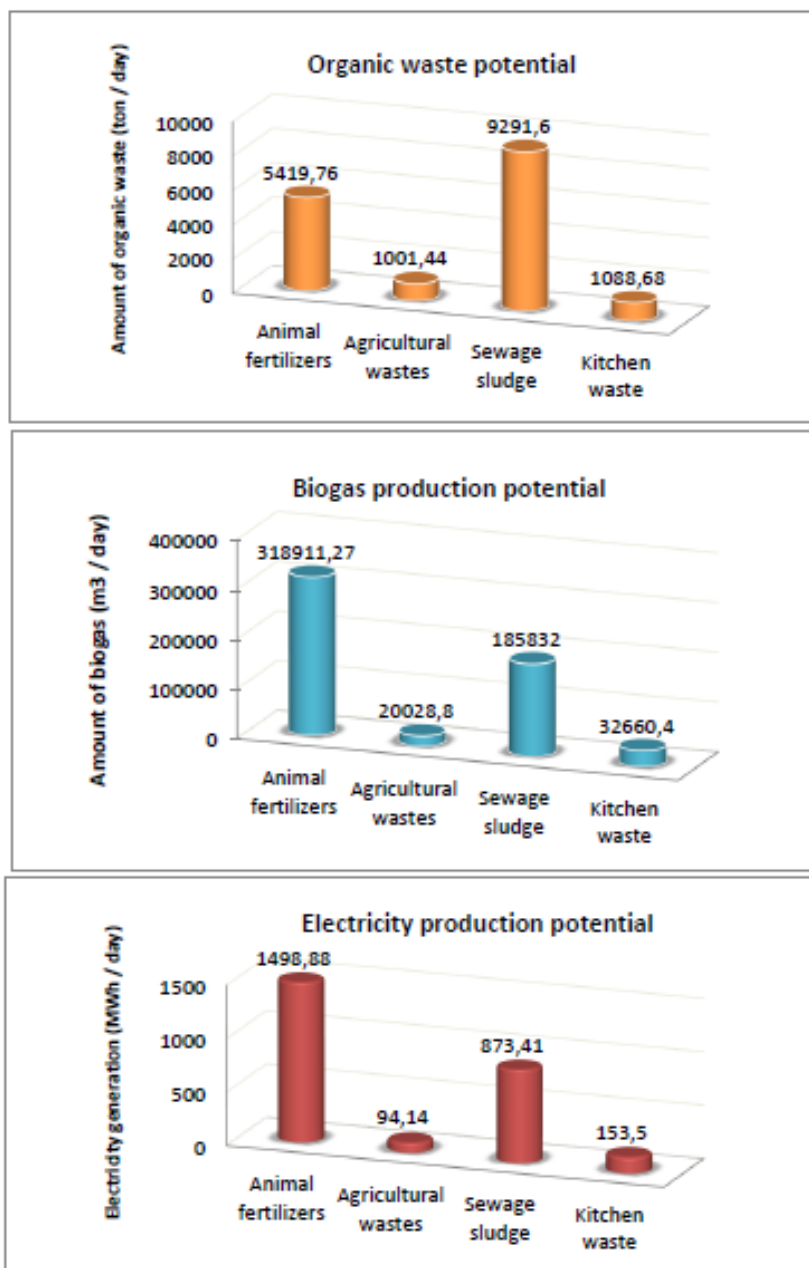


Figure 3. Electricity production amounts from organic waste, biogas and methane in Mersin

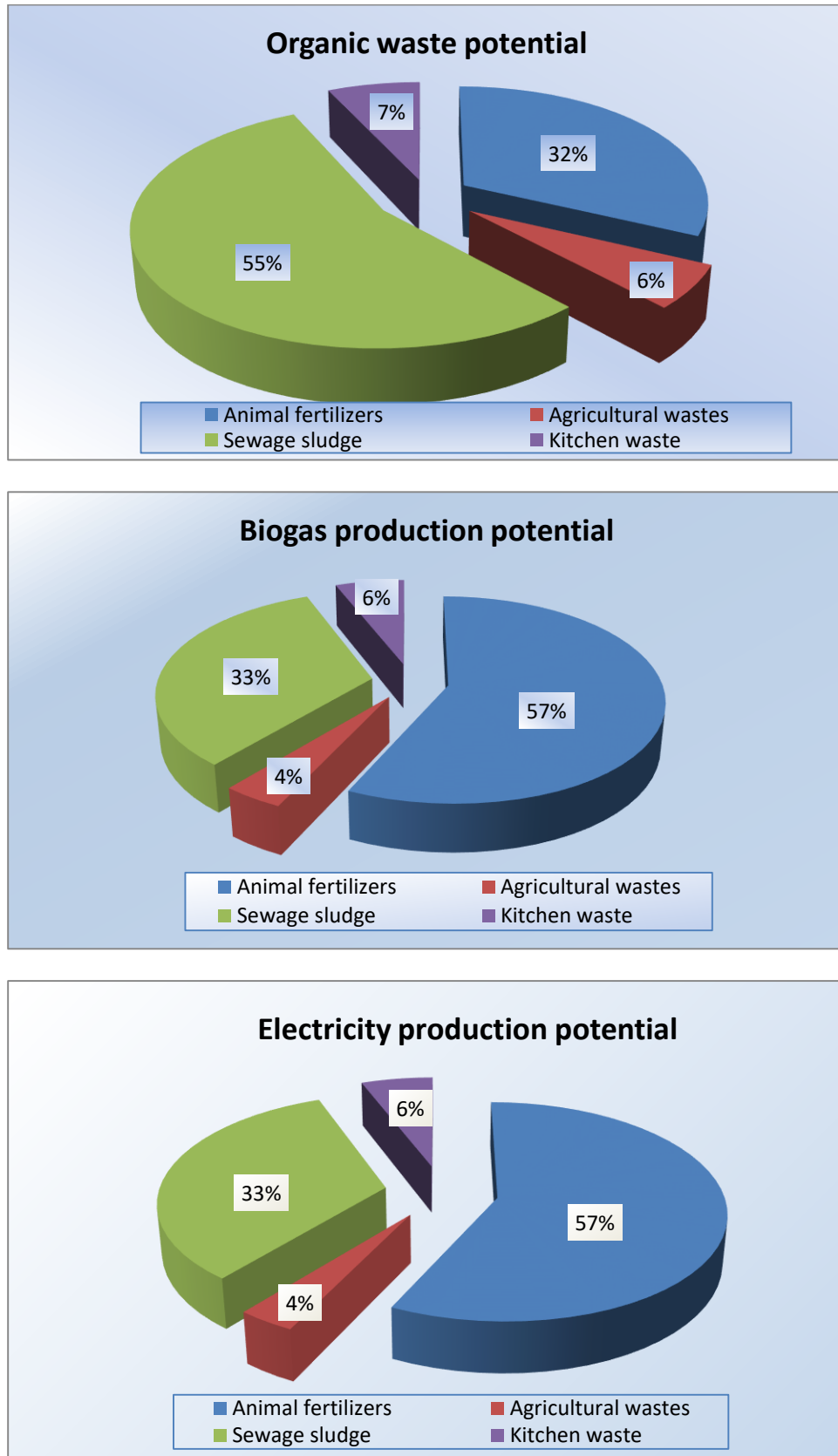


Figure 4. Electricity generation rates of organic waste, biogas and methane in Mersin

4. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

The rapid increase in demand for energy has led to the need to find new energy sources. Biogas has an important place among renewable energy sources due to its potential, social and economic benefits. The results of the study conducted to determine the current state of organic wastes to be obtained from plant, animal, kitchen and industrial sewage sludge plants in Mersin province and its effect on biogas energy production can be summarized as follows; Produced in animal, vegetable, kitchen and sewage sludge facility in Mersin province; The amount of organic matter per day is 16801.48 tons and the amount of biogas produced from these wastes is determined as 557432.47 m³ and the electricity generated from methane is 2619.93 MWh. 55% of the organic matter wastes obtained from the wastes are treatment sludge, 32% are animal manure, 7% are kitchen wastes and 6% are agricultural wastes. The amount of electricity generated from these organic wastes is; 57% of the electricity produced was obtained from animal manure, 33% from sludge, 6% from kitchen wastes and 4% from agricultural wastes. In the electricity generation for Mersin province; It has been determined that animal manure and sewage sludge have significant potential in terms of organic matter. In addition to protecting the environment, electricity and heat are obtained; will contribute to the region economically and will reveal new research topics. Thus, maximum benefits can be obtained in terms of economic, social and environmental-public health. The rapid increase in population and industrialization in Mersin province causes many environmental problems. This has caused the region's need for energy to increase. To meet this need, the use of biogas to be produced from sewage sludge, animal manure and plant wastes within the boundaries of the region will provide positive gains in terms of decreasing the need for traditional electric power generation systems and protecting natural resources and environment. Animal manure and waste sludge with high organic potential; mixing and treating wastes of low organic content in the region, such as domestic, industrial and plant residues; With the contribution it provides to waste management, it can be considered that it can contribute to the more effective operation of the treatment plant by increasing the utilization capacity of the treatment plant. Today, biogas technology is an important factor for renewable energy production, which enables organic wastes, which cause environmental problems and threaten human health, to make them harmless and to be used in energy generation. In order to evaluate this biogas potential for Mersin province as soon as possible, alternative projects suitable for the region should be produced. In the projects to be carried out, it may be effective to provide the producers with technical information about the gains of the biogas plant and to provide incentives for the installation of the plant. In addition, since the installation of the biogas plant constitutes an important investment cost, if these problems are overcome by the producers, energy

recovery and environmental risks will be reduced and the sector and the regional industry will be able to make significant technological gains. In addition, it contributes to sustainable development, greenhouse gas reduction and environmental protection through the use of renewable energy sources by providing economic contribution to regional agriculture and animal husbandry. While minimizing the environmental impact of animal wastes with the applied technologies; it is possible to obtain energy and to benefit from the fertilizer properties of animal wastes.

REFERENCES

- [1] Karayılmazlar S., Saracoglu N., Çubuk Y. and Kurt R., "Biomass Power in Turkey Evaluation of production", *Bartın Journal of the Faculty of Forestry*, 13(19): 63-75, (2011).
- [2] Tınmaz Köse E., "Determination and Digital Mapping of Biogas Energy Potential of Animal Manures in Thrace Region", *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 23(6): 762-772, (2017).
- [3] Mao C., Feng Y., Wang X. and Ren G., "Review on Research Achievements of Biogas from Anaerobic Digestion", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45: 540-555, (2015).
- [4] McCarthy P.L., "One hundred years of anaerobic digestion, anaerobic Digestion", *Amsterdam : Elsevier Biochemical Press BV*, 3-22, (1981).
- [5] Hartmann H., Angelidaki I. and Ahring B. K., "Co-digestion of The Organic Fraction Municipal Waste With Other Waste Types, In: Biomethanization of The Organic Fraction Municipal Waste", *J.Mata- Alvarez (ed.), IWA Publishing, London, UK*, (2002).
- [6] Baban A., Timur H., Ciliz N., Olgun H. And Akgun F., "Back of Poultry and Barn Fertilizers" *Final Project of TUBITAK-MAM*, (2001).
- [7] Mature H., Dogru M. And Hovvarth C. R., "Use of Solid Wastes in Energy Conversion and Gasifiers", *IV. National Installation Engineering Congress and Exhibition*, (1999).
- [8] Bayram A., "Pirina as a Renewable Energy Source : Production, properties and evaluation", *Renewable Energy Resources Symposium*, 106-112, (2001).
- [9] Coskun T., Manav N., Debik E., Binici M.S., Tosun C., Mehmetli E. and Baban A., "Anaerobic Digestion of Cattle Wastes", *Journal of Engineering and Natural Sciences Journal of Engineering and Science*, *Sigma* 3: 1-9, (2011).
- [10] Kumbur H., Ozer Z., Ozsoy D.Y. and Hunter D.E., "The climate of Turkey in Comparison of Potential Environmental Effects of Traditional and Renewable Energy Sources", *III. Renewable energy Resources Symposium*, 7, (2001).
- [11] Başçetinçelik A., Ozturk A. And Karaca C., "Türkiye of Agricultural Biomass for Power Generation Facilities", *IV. New and Renewable Energy Resources Symposium*, Website. (Date of access. 05.05.2011). http://www.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/32590c74a229a9f_ek.pdf?dergi=563

- [12] Sozer S. and Yaldız O., “ A Research on Biogas Production from Bovine Fertilizer and Whey Mixtures” *Akdeniz University Faculty of Agriculture Department of Agricultural Machinery*, 19(2):179-183, (2006).
- [13] Toruk F. and Eker B., “Usability of Biogas Energy in Thrace Region”, *II. Renewable Energy Resources Symposium*, 1-6, (2003).
- [14] Akbulut A. and Dikici A., “Biogas potential and cost analysis of Elazığ Province”, *Firat University, Eastern Anatolia Research Center*, 36-41, (2004).
- [15] Koçer N. and Ünlü A., “Biomass Potential and Energy Production of the Eastern Anatolia Region”, *Center, Eastern Anatolia Research*, 175-181, (2007).
- [16] Öztürk M. and Yüksel Y.E., “Energy structure of Turkey for sustainable development”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53: 1259–1272, (2016).
- [17] Şenol H., Elibol E.A., Açıkel Ü. and Şenol M., “ Main Organic Waste Sources of Biogas Production in Ankara”, *BEU Journal of Science*, 6(2): 15-28, (2017).
- [18] Kalyuzhnyi S., “Energy Potential of Anaerobic Digestion of Wastes Produced in Russia Via Biogas and Microbial Fuel Cell Technologies”, *IUPAC, Pure and Applied Chemistry*, 80(10): 2115–2124, (2008).
- [19] Güç A., “ Biogas Production from Cattle Waste and Evaluation of Environmental Effects for Uşak Province”, *Master Thesis, Ege University, Department of Solar Energy*, 5-10, (2010).
- [20] Dimitrova D., Georgiev K., Cheriyska I., Garvanska S.M. and Kolev N., “Biogas Potential in Bulgaria. Summary Report”, *Project: BiG>East (EIE/07/214), Institute of Soil Science Nikola Poushkarov*, (2009).
- [21] Türker M., “ Anaerobic biotechnology : Turkey and on worldwide trends”, *Cevkor Foundation Publications*, (2008).
- [22] Meyer - Aurich A., Schattauer A., Hellebrand HJ., Klauss H., Plöchl M. and Berg W., “Impact of uncertainties on greenhouse gas mitigation potential of biogas production from agricultural resources”, *Renewable Energy*, 37: 277-284, (2012).
- [23] Konstantinos S., “Biogas Potential in Greece”, Summary Report”, *Project : BiG>East (EIE/07/214) WP 2.8 Deliverable 2.2, Centre for Renewable Energy Sources (CRES)*, (2009).
- [24] Haefke C., “Biogas-to-Energy Potential in Illinois. U.S. DOE Midwest Clean Energy Application Center”, *10th Annual Conference on Renewable Energy from Organics Recycling Des Moines, October 18- 20, Iowa, USA*. http://www.chpcentermw.org/pdfs/101810_Haefke2.pdf
- [25] GDM., “Republic of Turkey Ministry of Agriculture, Forestry General Directorate of Meteorology”, <https://www.mgm.gov.tr/?il=Mersin>, (2018).
- [26] Anonymous., <https://www.gezilecekyerler.biz/aydinlik-nerede-hangi-sehirde/>, (2018).
- [27] Ilgar R., “A Study on the Determination of Çanakkale Biogas Potential According to Animal Presence”, *Doğu Geography Journal*, 21 (35), 89-106.:<<http://e-dergi.atauni.edu.tr/ataunidcd/article/view/5000119975>>.
- [28] MAF., “Republic Of Turkey Ministry Of Agriculture And Forestry”, *Mersin Directorate of Provincial Agriculture And Forestry*. <https://mersin.tarimorman.gov.tr/#>, (2018).
- [29] TSI., “ Turkey Statistical Institute of the Republic of Turkey ”, *Statistics by Subject, Agriculture*, <http://www.tuik.gov.tr/UstMenu.do?metod=kategorist> (Accessed :27.02 2019).
- [30] Dağ Ö., “Biogas Production Project for Domestic Wastes”.<http://ozgurdag4941.blogspot.com.tr/2014/12/ev-atiklarindan-biyogaz-uretim-projesi.html?m=1> (Accessed : 01.02.2019).
- [31] Anonymous., “Environment and urban ministry”, *2011. Report on the Technical-Economic Principles of the Suluova Biogas Plant, Turkish - German Biogas Project*, Ankara, (2011).
- [32] Köse T. E., “ Determination and Digital Mapping of Biogas Energy Potential of Animal Manures in Thrace Region”, *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 23(6): 762-772, (2017).
- [33] Anonymous., “Biogas Production from Sewage Sludge and Energy Saving”, <https://www.yenienerji.info/proje/aritma-camurundan-biyogaz-uretimi-ve-enerji-tasarrufu>, (2017).
- [34] Yiğit K.S., Gündüz M., Şerit G., Yeğin M., Saraç M., Bayram İ., Bostan Ü. and Pir H., “Biogas Production and Energy Savings From Waste Water Treatment Sludge”, *Kocaeli and İZAYDAS ISU study report, Turkey*, (2011).
- [35] Acaroğlu M., “ Alternative Energy Sources ”, *Nobel Publication*, No: 1253, 609, Ankara, (2007).
- [36] Kaya D., “Evaluation of the Use of Domestic Sewage Sludge in Biogas Production”, *ICCI – International Energy and Environment Fair and Conference*, (2010).
- [37] Şenol H., Elibol E.A., Açıkel Ü. and Şenol M., “Main Organic Waste Sources of Biogas Production in Ankara”, *BEU Journal of Science*, 6(2): 15-28, (2017).
- [38] Öztürk, H. H., “ Renewable Energy Resources and Usage”, *Technical Publishing*, 367, Ankara, (2008).
- [39] Aybek A., Üçok S., Bilgili M.E. and İspir, M., “Determination of Biogas Energy Potential of Some Agricultural Wastes in Kahramanmaraş Province”, *UU Journal of the Faculty of Agriculture*, 29(2): 25-37, (2015).
- [40] Anonymous., “ South Aegean Development Agency”, *South Aegean Renewable Energy Working Report*, Pamukkale, Denizli, (2011).
- [41] Koçar G., Eryaşar A., Ersöz Ö., Arıcı Ş. and Durmuş A., “Biogas Technologies”, *Ege University Press*, Izmir, (2010).