



İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Arastırma Makaleleri / Research Article
EFDURNA, Goncağıl KOZ, Nevrin GENÇ
Türkiye'de Omurlu Tamamlama Lastiklerin Yönetiminde En Uygun Bertaraf Seçeneğinin PROMETHEE ve Bulanık PROMETHEE Yöntemi ile Belirlenmesi
Determination of The Most Suitable Disposal Option in The Management of End of Life Tires in Turkey by PROMETHEE and Fuzzy PROMETHEE Method.
Gökhan BARY SAĞCANLI, Alper GÖVİL, İsmail Ems PARIKAR
Göçme Yükü Eksikindeki Köprü Kemeri'nin Yapısal Davranışı
The Structural Behavior of Bridge Arches Under Collapse Load.
Adife Seyda YARGIÇ
Kavak Ağacı Kabuğu Esaslı Sorbentlerin 2' Tam Faktöriyel Deneysel Tasarımı Kullanılarak Boyamada Gideriminde Değerlendirilmesi ve %Giderim Etkinliğinin İstatistiksel Analizi
Evaluation of Poplar Tree Based Sorbents in Dye Uptake via 2' Full Factorial Experimental Design and Statistical Analysis of %Removal Efficiency.
Fatih BAYRAM
Derin Öğrenme Tabanlı Otomatik Plaka Tanıma
Automatic License Plate Recognition Based on Deep Learning
Yörük KAÇIROĞLU, Meryem KAYA ÖNÇÜ
Başaklı Robotların Yürüme Stratejileri Üzerine Bir Literatür Taraması
A Literature Review on Walking Strategies of Legged Robots.
İbrahim ULUTÜRK, Mustafa YURDAKULU, Yusuf Tansel İÇ
Akisyonatik Tasarım Yöntemi ile Yenilenebilir Ürün Geliştirilmesi
Development of an Innovative Product Using Axiomatic Design Methodology.
Ömer MUTLUŞU, Rukiye ERTAN
Nokta Direnc Kaynak Yöntemi ile Alüminyum ve Titanyum Alaşımı Sacların İF Çelik Saclarla Kaynak Kabilyetinin Araştırılması
Investigation of the Welding Capability of Aluminum and Titanium Alloy Sheets with IF Steel Sheets by Resistance Spot Welding Method.
Berkan ERGENE, Bekir YALÇIN
Finite Element Analyzing of the Effect of Crack on Mechanical Behavior of Honeycomb and Re-entrant Structures
Çatlağı Re-entrant ve Balpeneği Yapıların Mekanik Davranışlarına Etkisinin Sonlu Eleman Analizi
Kaam TOPRAK, Kıvıncılda Ekin ÖZDRAĞOĞU
Performance Analysis of Thermal Storage Assisted Cooling Tower with Night Cooling
Ternal Depolama Destekli Soğutma Kulesinin Gece Soğutması Performans Analizi.
Abdullah İNSAL
Aşınkın Motorlarda Paralel Hızalama Hatalarının Entropi Analizi ile İncelenmesi
Investigation of Parallel Misalignment Faults of Induction Motor by Using Entropy Analysis.
Sema AYDOĞDU, Senem KURAMA, Erhan AKAY, Kubra GÜLÇAN
α-SiAlON Seramiklerin Optik Özelliklerinin İki Aşamalı Yüksek Enerjili Oğütme Yöntemi Kullanılarak Geliştirilmesi
Enhancing the Optical Properties of α-SiAlON Ceramics Using Two-Stage High Energy Milling Method.
Kemal KOCYİĞİT, Serdar DOĞAN, AKBAS
Çatlağ İçeren Bir Çerçeve Taçyeci Sistemin Zorlanması Tıneşim Analizi
Foreed Vibration Analysis of a Cracked Frame.
Bircan EKİT TASTAY, İlhan KARŞI DURUKAN, Mehmet ATES
Chlorella Sp. ve Daphnia Magna Üzerinde Demir Oksit Nanopartiküllerinin Ekotoksikite Çalışması
Ecotoxicity Study of Iron Oxide Nanoparticles on Chlorella Sp. and Daphnia Magna.
Ferah KILIÇ
Rende ve Dölmeli Kırkıztar (Raphanus sativus) Kuruma Kinetiğinin Belirlenmesi ve Enerji Analizi
Determination of Kinetics of Drying Grated and Sliced Red Radish (Raphanus sativus) and Energy Analysis.
Zahra TEZELNER, Hasan BAL
Three Group Classification Problem Approach Based on Fuzzy Goal Programming
Bulanık Hedef Programlama Tabanlı Üç Gruplu Sınıflandırma Problemi Yaklaşımı
Mehmet İsmail SARI, İsmail SAHİN
Dijital İnsan Modelleme Tabanlı Ergonomik Analiz: Ortaokul Öğrencileri İçin Ayarlanabilir Okul Mobilyası Tasarımı
Ergonomic Analysis Based on Digital Human Modeling: Adjustable School Furniture Design for Secondary School Students.
Gökhan YILKESKİ, Ahmet Naci METE, Alihan ALKAYA
PID Parametrelerinin LQR ve GA Tabanlı Optimizasyonu: Sıvı Seviye Kontrol Uygulaması
LQR and GA Based PID Parameter Optimization: Liquid Level Control Application.
Erkan KEKİLİK, Murat HOSOZ
Karşılaştırılması Üzerine Deneysel Performanslarının Karşılaştırılması
Comparison of the Experimental Performance of Round and Flat Tube Automobile Radiators for Various Coolants
Habil ERGİL, Saifullah YAŞARIN
Melz Güç Sistemlerinde Zaman Gecikmesinin Kararlılık Analizi
Time Delay Margins Computation for Stability of Hybrid Power Systems
Habil KARAKOÇ
Toz Metal Al7075-B2C3Si3N4 Kompozit Malzemelerin Üretimi ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi
Production of Powder Metal Al7075-B2C3Si3N4 Composite Materials and Investigation of Wear Properties
Hüseyin Gökak ÖZSOY
3B Modelleme Programlarının Endüstri Tasarımında Kullanım Açısından Değerlendirilmesi
Evaluation of 3D Modeling Programs For Industrial Design Use.
Levent KILIÇ
Sıvı Enerji Yönetim Sistemlerinde Endüstri 4.0 ve Nesnelere İnterneti Uygulanması
Industry 4.0 and Internet of Things Implementation at Sıvı Enerji Management System.
Can CİVİL Hakan ERCAY
Çelik Sektöründe Güvenirli Üretim ve Örnek Bir Uygulama: S355JR (EN 10025-2) Çeliği Akma ve Kopma Dayanımı Güvenirli Analizi
Reliable Production in Steel Industry and a Case Study: Reliability Analysis of Yield and Tensile Strength of S355JR (EN 10025-2) Steel.
Abu CELLEBI
Deformation and Microstructural Analysis of Fiber Laser and TIG Welding of Thin Ti6Al4V Sheet by Coordinate Measurement Machine (CMM)
İnsan Tabanlı Sistemlerin Fiber Laser ve TIG Kaynaklı Sistemlere Karşılaştırılması (CMM) ile Deformasyonun ve Mikroskop Analizinin Yapılması
İbrahim KARADUMANER, Tuğba ÇORLU, Mehmet ABİLİDRİM, Ayhan ATES, Selma ACAR
SiO2 ve Zn3Sb2O8 Sensörlerinin Yüksek NO Gaz Konsantrasyonuna Algılama Özellikleri
Low Concentration NO Gas Detection of SiO2 and Zn3Sb2O8 Sensors.
Ömer BAYRAKTAR, Abdülmecit GÜLDAŞ
Quadrotor İme ve Tok Katayollarının Optimizasyonu ve Matlab-Simulink ile Simülasyonu
Optimization of Quadrotor's Thrust and Torque Coefficients and Simulation with Matlab-Simulink.
Zafer CİNGİZ, Ferhan KATIRCIOĞLU, Yusuf ÇAY, Ahmet KOLİP
Buhar Soğutma Soğutma Sistemlerinde R22 Alternatif Soğutucu Akışkanlarının Termodinamik Analizi
The Thermodynamic Analysis of the Refrigerants Alternative to R22 in the Vapor Compression Refrigeration System
Levent AYDIN, Serdar KÜÇÜK, Oğuz ÇAKIR
Hesaplanabilir Akışkanlar Dinamiği Simülasyonlarına Dayalı Hastaya Özel Kardiyovasküler Hastalık Modellemesi: Torakik Arterin Segmentasyonu ve Hemodinamik Modeli
Patient Specific Cardiovascular Disease Modeling Based on the Computational Fluid Dynamics Simulations: Segmentation and Hemodynamic Model of a Thoracic Artery
Seçkin KARASU, Zehra SARAC
Güç Kalitesi Bozulmalarının Hilbert-Huang Dönüşümü, Genetik Algoritma ve Yapay Zeka Makine Öğrenmesi Yöntemleri ile Sınıflandırılması
Classification of Power Quality Disturbances with Hilbert-Huang Transform, Genetic Algorithm and Artificial Intelligence/Machine Learning Methods.
Engin ÖZBAS
Güney Enerji Termoelektrik Jenaratöründe Pasif Soğutmanın Deneysel İncelenmesi
Experimental Investigation of Passive Water Cooling in Solar Heating Thermoelectric Generator
İlhan ŞİMŞEK, Doğan ŞİMŞEK, Dursun ÖZYÜREK
Yarı Katı Kalıplama Yöntemi ile Üretilen Farlı Miktarlarda SiC Takviyeli A356 Matritli Kompozit Malzemelerin Aşınma Performansının İncelenmesi
Investigation of Wear Performance of Different Amounts of SiC Reinforcements A356 Matrix Composite Materials Produced by Semi-Solid Process Method
Hattice ÇETİN, Emel ARCAKLIĞOĞLU, Rukiye ÇETİN
Soğuk Haddelenme Montaj Sürecinin Verimliliğinin Artırılması
Increase in Efficiency of Cold Rolling Mill Erection Process.
Günay ÖZBAY, Erkan Sami KOKTEN
Modeling of Bio-Oil Production by Pyrolysis of Woody Biomass: Artificial Neural Network Approach
Olası Büyük Ölçekli Biyoyal Üretim Modellemesi: Yapay Sinir Ağları Yaklaşımı
Tuğçe Busra YUKSEL, Ugur AYBARC, Ömer ERTUGRUL
Effects of Stirring Duration and Casting Temperature on Ultrasonic Assisted Stir Casting of Al/AlSi6 Matrix Composites
Al/AlSi6 Matrix Kompozitlerin Ultrason Destekli Karışım ve Döküm ile Üretiminde Karşıtama Stresi ve Döküm Sağaklığına Etkileri
Halil İbrahim VARIYENLİ, Ataollah KHANLARI
Analizinin Çevresel Etkileri Üzerine Konvensional ve Konsantrasyonlu Çubuklu Buhar Üreticileri Kullanılarak
Analyzing the Environmental Effects of Conventional and Concentrating Tube Boilers Using Natural Gas.
Abdül Muhsin YILMAZ, Fatma SOĞLU, Erhan AKŞAN, Burak DİKİCİ
PEO Kaplamalara CuO Nanopartikül İavesinin Korozyon Davranışına Etkisi
The Effect of CuO Nanoparticles Addition to PEO Coatings on Corrosion Behavior
Senai Emrah ASLAV, Tayfun DEDE
2007-2018 Türk Deprem Yönetmeliklerinde Yapı Elemanları Çıkarma Senaryoları ve Bina Periyotlarının Karşılaştırılması
In Turkish Earthquake Seismic Codes 2007-2018 Comparison of Building Elements Extraction Scenarios and Building Periods.
Emre AVCI, Ayhan ÖZÇİFTÇİ, Abdullah ELEN
Ses Komutları ile Media Player Kontrolü İçin Bir Uygulama
An Application to Control Media Player with Voice Commands
Selma AKÇAY, Ünal AKDAĞ
Dişey Düz bir Levhaya Periyodik Salınımın İstisna Transferine Etkisi
Effect on Heat Transfer of Periodic Oscillations of a Vertical Flat Plate
Aytegin Çiğdem SEFEROĞLU, Mehmet Tevfik SEFEROĞLU, Muhammet Vefa AKPINAR, Muhammet ÇELİK
Plant-mix Temele Tabakası Yapımında Kazanma Asfaltı Kaplama (RAP) Malzemesi Kullanımı ve Ekonomik Analizi
Economic Analysis of the Use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Materials in Plant-Mix Base Courses
Mehmet Cüneyd FETVACI
Profil Kaydırma Silindirik Evolvent
Diği Çarkların Matematik Modellemesi
Mathematical Modelling of Profile-Shifted Cylindrical Involute Gears
Dündü KARAR, Kanat Burak BOZDOĞAN, Erdinc KESKİN
Çerçeve Sistemleri Yapı Zemin Etkileşimli Serbest Titreşim Analizi
Free Vibration Analysis of Frame Systems with Soil Structure Interaction
Yaruz KAPLAN, Abdülhak YILDIRIM, Sinan AKSÖZ
Nirokarburizasyon Sonrası Oksidasyon İşletiminde AISI 4140 Çeliğinin Tribolojik Özelliklerine Etkisi
The Effect of Oxidation Process After Nitrocarburization on Tribological Properties of AISI 4140 Steel
Valouad NAJJARI, Amin MIRZAPOUR
Investigating of the Best Location of Solar Plants in Turkey by Different Multiple Decision Methods
Farukhan ÜSTENSOY, Sadık YILDIZ, Erhan NARCAN YILMAZ, H. Hüseyin SAVAN, Mustafa BURUNKAYA, Cemal YILMAZ, Mithat BULUT
Autonomous Operation of Microgrid and Minimization of Fault in Case of Failure in High-Voltage Lines
Yüksek Gerilimli Hatlardaki Arızalarda Mikroşebekelerin Otomatik Çalışması ve Arızanın Minimizasyonu
Yasin GENÇ, Sinem UZUN, Adem AÇIR
VVER-1000 Nükleer Güç Reaktörlerinde Kritiklik ve Bağlı Güç Yoğunluk Dağılımının İncelenmesi
Investigation of Criticality and Relative Power Density Distribution in VVER-1000 Nuclear Power Reactor
Sibel Akkaya OY, Osman GÜRDAL, Serdal ARSLAN
Finite Element Analysis of the Inductance and Magnetic Field in the Permanent Magnet Spherical Motor
Caner GÜL, Serhat MUTFA, Hülya DİRİMLİ
Ti6Al4V Alaşımı Üzerine Sol-Jel Yöntemi ile Yapılan Hidroksiapatit Kaplamalarda Oksalik Asitli Korozyon Dayanımına Etkisi
The Effect of Oxalic Acid on Corrosion Resistance of Hydroxyapatite Sol-Gel Coated Ti6Al4V Alloys
Müge KARADAG
Yarı Hipربولik Kostimlektik Manifolddar Üzerine Bir Not
A Note on Nearly Hyperbolic Cosymplectik Manifolds
İhsan KÜRELLİ, Mustafa ALTINOK
İncelenmesi Üzerine Yapılan Yapısal Analiz
Investigation of Bonding Performance of Polyurethane (PUR) Based Adhesives to Different Climate Conditions
İhsan KÜRELLİ, Mustafa ALTINOK, Elif Rabia USAL
Endüstriyel Sandalye Tasarımında Estetiklik ve Dayanıklılık Optimizasyonu
Aestheticity and Durability Optimization in Industrial Chair Design
Kerem KILIÇ, Cevdet SÖĞÜTLE
Doğal Yalıtımın Ağaç Malzemesi Üzerine Bazı Verniklerin Parlaklık Değerlerinin Belirlenmesi
Determination of the Gloss Values of Some Vernishes Applied on the Natural Aged Wood

POLİTEKNİK DERGİSİ - JOURNAL OF POLYTECHNIC VOLUME / CİLT 23 NUMBER / SAYI 4 ARALIK / DECEMBER 2020

Journal of Polytechnic  
POLİTEKNİK DERGİSİ

VOLUME / CİLT 23 NUMBER / SAYI 4 DECEMBER / ARALIK 2020





# Politeknik Dergisi

## Journal of Polytechnic

Sahibi / Owner  
**Prof. Dr. Musa YILDIZ**  
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 EDITÖRLER/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  
**Dr. Öğr. Üyesi Ehsan NOROOZİNEJAD FARSANGİ**, Kerman Graduate University of Technology

### YAYIN DANIŞMA KURULU/EDITORIAL ADVISORY BOARD

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



<b>Cilt / Volume : 23</b>	<b>Sayı / Issue : 4</b>	<b>Aralık / December : 2020</b>
<p>Politeknik Dergisi Gazi Üniversitesi tarafından yılda <b>dört sayı</b> olarak yayınlanmaktadır / Journal of Polytechnic has been published <b>four issues</b> per year by Gazi University.</p>		

<b>BU SAYIYA (CİLT 23 SAYI 4) KATKI VEREN HAKEMLER (REVIEWERS)</b>			
A. Tamer ERTÜRK (2 kez)	Fatih Emre BORAN ( 2 kez)	Muhammed TAŞOVA	Süreyya MERİÇ PAGANO
Adnan SÖZEN ( 3 kez)	Fatih YAPICI	Murat ÇOLAK	Ş. Ulaş ATMACA
Ali AMİNİ	Ferhat GÜL	Murat Emre KARTAL	Şenol ALTAN
Ali İhsan ÇANAKOĞLU	Ferhat UÇAR	Murat KARACASU	Talat KÖRPİNAR
Ali İSSİ	Filiz BORAN	Murat Tolga ÖZKAN ( 2 kez)	Tansel TUNÇAY
Ali KASAL	Gül Didem BATUR SİR	Musa ATAR (2 kez)	Tayfun MENLİK
Ali Rıza KALELİ	Gürcan ATAKÖK	Musa YILDIRIM	Uğur CALIGULU ( 2 kez)
Alper CALAM	Hakan POLATCI	Mustafa ALTIN	Uğur GÜVENÇ
Apdulmutalip ŞAHİNASLAN	Halil İbrahim KURT	Mustafa AYDIN	Volkan Soner ÖZSOY
Atilla Gençer DEVECİOĞLU	Harun ARTUNER	Mustafa Bahadır ÖZDEMİR	Yaşar ŞEN
Ayfer PEKER	Hasan HASIRCI	Mustafa BOZDEMİR	Zafer CİVELEK
Aziz Barış BAŞYİĞİT	Hasan Hüseyin CİRİTCİOĞLU	Nazlı Gülüm MUTLU	Zahide BAYER OZTÜRK
Batıkan Erdem DEMİR	Hayrettin DÜZCÜOĞLU	Nermin DEMİRKOL	Zeki Yağız BAYRAKTAROĞLU
Birdal ŞENOĞLU	Hülya BAYRAK	Nihat DÖNGEL	
Can ÇINAR	Hüseyin POLAT	Nihat IŞIK	
Cemal KOÇAK	Hüseyin Rıza BÖRKLÜ	Nihat ÖZTURK	
Cengiz ELDEM	İnan ÜNAL	Nizamettin KAHRAMAN	
Daver ALİ	İsmail EKMEKÇİ	Numan Behlül BEKTAŞ	
Derya İDE	İsmail Serkan ÜNCÜ	Onur ERTUĞRUL	
Dilek ÜNAL	Kanat Burak BOZDOĞAN	Ömer ASAL	
Dilşad ENGİN	Kerim ÇERİNKAYA	Ramazan BAYINDIR	
Duygu İPCİ	Koray ŞAFAK	Ramazan SELVER	
Elif KANDEMİR	Lütfü NAMLI	Sabri KOCER	
Emin Sertaç ARI	Mehmet EKER	Sadettin ŞAHİN	
Emin YILDIRIZ	Mehmet İsmail GURSOY	Selçuk ALP	
Emine KEMİKLİOĞLU	Mehmet ÖZKAYMAK	Sercan SERİN	
Ergün NART	Meral ÖZARSLAN YATAK	Sertaç SEYİTOĞLU	
Erkan DURSUN	Metin KAPIDERE	Sezgin KAÇAR	
Ertan ÖZEN	Metin YURDDAŞKAL	Sinem ÇEVİK	
Eyyup GERÇEKÇİOĞLU	Miguel LANÇA	Süleyman Sungur TEZCAN	
<b>Yazışma Adresi / Correspondence Address :</b>			
<p>Politeknik Dergisi Editörlüğü Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Tanıtım ve Yayın Müdürlüğü 06500 Teknikokullar ANKARA –TÜRKİYE</p>			
<p><b>Tel : 0312-202 34 12</b> <b>Fax : 0312-212 00 59</b> <b>Elektronik Posta Adresi / e-mail : politeknik@gazi.edu.tr</b></p>			
<p>Teknik Sorumlu / Technical Manager: <b>Dr. Erdem ÇİFTÇİ</b></p>			
<p>Dizgi / Compositor: <b>İdris ÖZÇELİK</b></p>			
<b>e - ISSN : 2147-9429</b>			





POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Türkiye’de ömrünü tamamlamış lastiklerin yönetiminde en uygun bertaraf seçeneğinin PROMETHEE ve bulanık PROMETHEE yöntemi ile belirlenmesi

*Determination of the most suitable disposal option in the management of end of life tires in Turkey by PROMETHEE and Fuzzy PROMETHEE method*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Elif DURNA<sup>1</sup>, Goncağül KOZ<sup>2</sup>, Nevim GENÇ<sup>3</sup>

*ORCID<sup>1</sup>:* 0000-0003-4478-2967

*ORCID<sup>2</sup>:* 0000-0001-5092-2271

*ORCID<sup>3</sup>:* 0000-0002-6185-1090

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Durna E., Koz G. ve Genç N., “Türkiye’de ömrünü tamamlamış lastiklerin yönetiminde en uygun bertaraf seçeneğinin PROMETHEE ve bulanık PROMETHEE yöntemi ile belirlenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 915-927, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.591100



# Türkiye’de Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Yönetiminde En Uygun Bertaraf Seçeneğinin Bulanık PROMETHEE Yöntemi ile Belirlenmesi

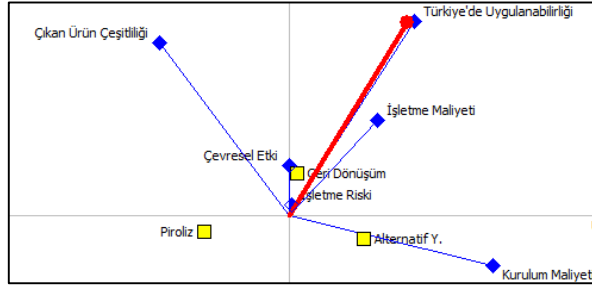
Determination of the Most Suitable Disposal Option in the Management of End of Life Tires in Turkey by PROMETHEE and Fuzzy PROMETHEE Method

## Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Ömrünü tamamlamış lastiklerin (ÖTL) yönetiminde alternatif bertaraf metotlar değerlendirilmiştir./ Alternative methods have been evaluated for the management of end of life tires
- ❖ Alternatif yöntem, çok kriterli karar verme süreci olan bulanık PROMETHEE ile belirlenmiştir./ The alternative method is determined by fuzzy PROMETHEE, a multi-criteria decision making process.
- ❖ Alternatif yöntemler arasında geri dönüşüm alternatifi en uygun yöntem olarak belirlenmiştir. / Among alternative methods, recycling has been determined as the most appropriate method.

## Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada ömrünü tamamlamış atık lastiklerin yönetimi için direkt geri dönüşüm, piroliz ve alternatif yakıt olarak değerlendirme alternatifleri değerlendirilmiştir. Alternatifler çevresel etki, işletme riski, kurulum maliyeti, işletme maliyeti, elde edilen ürün çeşitliliği ve Türkiye’de uygulanabilirlik kriterleri ile değerlendirilmiştir. / In this study, Direct recycling, pyrolysis and alternative fuel usage alternatives are evaluated for the management of end of life tires. Alternatives were evaluated with the criteria of environmental impact, operating risk, installation cost, operating cost, resulting product diversity and applicability in Turkey.



Şekil. GAIA düzlemi / Figure. GAIA plane

## Amaç (Aim)

Çalışmada bulanık PROMETHEE yöntemi ile Türkiye için en uygun ömrünü tamamlamış lastik yönetim metodu belirlenmesi amaçlanmıştır. / The aim of the study was to determine the most suitable end of life tire management method for Turkey with fuzzy PROMETHEE method.

## Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Sözel ifadeler bulanık sayılara çevrilerek Visual PROMETHEE yazılımı ile analiz edilmiştir. / linguistic expressions are translated into fuzzy numbers and analyzed with Visual PROMETHEE software.

## Özgünlük (Originality)

Ömrünü tamamlamış atık lastiklerin yönetimi için en uygun alternatif metot, sosyal, çevresel ve ekonomik kriterlerin birlikte değerlendirilmesi ile belirlenmiştir. / The most appropriate alternative method for end of life tires has been determined by evaluating social, environmental and economic criteria together.

## Bulgular (Findings)

Tüm kriterler birlikte dikkate alındığında metotların tercih edilebilirlik sıralaması geri dönüşüm>alternatif yakıt olarak kullanma>piroliz şeklinde belirlenmiştir. / When all the criteria were taken into account together, the preferability ranking of alternatives was determined as recycling>using as alternative fuel>pyrolysis, respectively.

## Sonuç (Conclusion)

Her bir kriter eşit ağırlıkta değerlendirildiğinde en uygun metot olarak geri dönüşüm alternatifi belirlenmiştir. / When each criterion is evaluated equally, recycling alternative has been determined as the most suitable method.

## Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.



# Türkiye’de Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Yönetiminde En Uygun Bertaraf Seçeneğinin PROMETHEE ve Bulanık PROMETHEE Yöntemi ile Belirlenmesi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Elif DURNA\*, Goncağül KOZ, Nevim GENÇ**

Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye  
(Geliş/Received : 12.07.2019 ; Kabul/Accepted : 10.09.2019)

## ÖZ

Sürdürülebilir bir atık yönetim yaklaşımının ekonomik, sosyal ve çevresel unsurların tümüne hizmet edebilmesi gerekir. Bu çalışmada atık lastiklerin yönetiminde direkt geri dönüşüm, piroliz ve alternatif yakıt olarak değerlendirme alternatifleri değerlendirilmiştir. Sayılan bu alternatif metotlardan Türkiye için en uygun yöntem, çok kriterli karar verme süreci olan PROMETHEE (preference ranking organization method for enrichment evaluations) ve bulanık PROMETHEE yöntemi ile belirlenmiştir. En uygun alternatifin belirlenmesi için belirlenen 4 karar vericinin alternatif yöntemleri, çevresel etki, işletme riski, kurulum maliyeti, işletme maliyeti, elde edilen ürün çeşitliliği ve Türkiye’de uygulanabilirlik açısından değerlendirilmeleri istenmiştir. Karar vericilerin bu değerlendirme kriterlerine verdikleri cevaplar 5 noktalı karar ölçeği ve bulanık sayılar ile ifade edildikten sonra Visual PROMETHEE yazılımı ile çözümlenmiştir. Sonuçlara göre PROMETHEE ve bulanık PROMETHEE çözümlenmeleri PROMETHEE I ve II analizleri dikkate alındığında alternatiflerin geri dönüşüm>alternatif yakıt olarak kullanım>piroliz şeklinde aynı tercih sıralamaları vermişlerdir, ancak PROMETHEE Rainbow analizinde alternatiflere etki eden pozitif ve negatif kriterlerde farklılıklar göstermiştir. Dilsel ifadelerin bulanık PROMETHEE ile daha hassas ifade edildiği düşünüldüğünden yukarıdaki analizlerine ek olarak GAIA görsel analizi ve GAIA web analizi gerçekleştirilmiştir. GAIA analizi ile, (i) geri dönüşüm alternatifinin çevresel etkiler, işletme riski, Türkiye’deki uygulanabilirliği ve işletme maliyeti açısından, (ii) piroliz alternatifinin ürün çeşitliliği açısından, (iii) alternatif yakıt olarak kullanma alternatifinin kurulum maliyeti açısından uygun olacağı belirlenmiştir. Sonuç olarak en uygun alternatifinin geri dönüşüm alternatifi olduğu ve bu alternatifinin tercih edilebilirliğinde sadece kurulum maliyeti kriterinin negatif yönde etki ettiği belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Çok kriterli karar verme, PROMETHEE, ömrünü tamamlamış lastik, geri dönüşüm, alternatif yakıt, piroliz.

## Determination of the Most Suitable Disposal Option in the Management of End of Life Tires in Turkey by PROMETHEE and Fuzzy PROMETHEE Method

### ABSTRACT

A sustainable waste management approach should be able to serve all economic, social and environmental aspects. In this study, direct recycling, pyrolysis and alternative fuel usage alternatives were evaluated in the management of waste tires. The most suitable of these alternative methods for Turkey was determined using PROMETHEE (preference ranking organization method for enrichment evaluations), and fuzzy PROMETHEE, multi-criteria decision processes. To determine the most appropriate alternative, 4 decision makers were asked to evaluate alternatives in terms of environmental impact, operating risk, installation cost, operating cost, generated product diversity and applicability in Turkey. These evaluation criteria of decision makers were expressed with 5 point decision scale and fuzzy numbers and analyzed with Visual PROMETHEE software. According to the results, when the PROMETHEE I and II analysis of PROMETHEE and fuzzy PROMETHEE approaches were taken into consideration, the same order of alternatives was found as recycling> use as alternative fuel> pyrolysis. However, the PROMETHEE Rainbow analysis of the two approaches showed differences in positive and negative criteria affecting alternatives. GAIA visual analysis and GAIA web analysis were performed in addition to the above analyzes since linguistic expressions were thought to be expressed more sensitive with fuzzy PROMETHEE. It has been determined from GAIA visual analysis, (i) recycling alternative would be appropriate in terms of environmental impacts, operating risk, applicability in Turkey, and operating cost (ii) pyrolysis alternative would be appropriate in terms of the product diversity (iii) use as alternative fuel alternative would be appropriate in terms of installation cost. As a result, it is determined that the most suitable alternative is the recycling alternative and only the installation cost criterion has a negative effect on the preferability of this alternative.

**Keywords:** Multi criteria decision making, PROMETHEE, end of life tire, recycling, alternative fuel, pyrolysis.

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta elif.durna@kocaeli.edu.tr

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Otomotiv sektörünün ülkemiz ve dünya ekonomisinde önemli bir payı olup lastik üretim sektörü de otomotiv sektöründen doğrudan etkilenmektedir. Lastik üretimine paralel olarak ömrünü tamamlamış lastiklerin (ÖTL) bertarafı/ yönetimi de önemli bir sorun olarak ortaya çıkmıştır. Dünyadaki en büyük çevre sorunlarından biri, otomotiv lastiklerinin atıklarının nihai olarak bertarafıdır [1]. Ülkemizde T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın, 25 Kasım 2006 tarihinde Resmi Gazete'de yayınlanan 26357 sayılı "Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliğinde", ÖTL, faydalı ömrünü tamamladığı belirlenerek araçtan sökülün orijinal veya kaplanmış, bir daha araç üzerinde lastik olarak kullanılmayacak durumda olan ve üretim esnasında ortaya çıkan ıskarta lastikleri" olarak tanımlanmaktadır [2]. ÖTL'ler gelişmiş güzel depolanma durumunda sivrisinekler için bir üreme alanı sağlayarak sivrisinek kaynaklı hastalıkların yayılmasını kolaylaştırırken önemli miktarda hava kirliliği (yanma durumunda), toprak kirliliği ve son olarak, yüzey ve yeraltı suyu kirlenmesine neden olurlar. Lastikler yandığında, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CO ve PAH'lar gibi önemli miktarda hava kirletici maddeleri ve As, Cd, Ni, Zn, Hg, Cr ve Va gibi ağır metaller ortaya çıkar [3,4]. Avrupa Birliğinde (AB) ÖTL yönetimi için çeşitli yasal mevzuatlar ve yönergeler incelendiğinde, ÖTL'lerin çöp alanlarında depolanması 2003 yılından itibaren yasaklanmış olup, 2006 yılına kadar boyutlarının azaltılarak depolanmasına izin verilmiş, 2006 yılından itibaren ise, ÖTL'lerin çöp toplama alanlarında depolanmasına hiçbir şekilde izin verilmemiştir. [5,6]. Ülkemizde ilgili yönetmelik ile birlikte ÖTL'lerin yönetiminde gerekli düzenlemelerin ve standartların sağlanması amaçlanmıştır. ÖTL Kontrolü Yönetmeliğine göre lastik üreticilerinin her yıl ürettikleri lastiğin bir kısmını geri toplamaları ve bertaraf edilmesi için çeşitli kurumlara vereceklerini taahhüt etmeleri gereklidir. Lastik üreticilerinin toplaması gereken bu miktarlar 2007'de % 30, 2008'de % 35, 2009'da % 40, 2010'da % 45 ve 2011'de % 50 olacak şekilde belirlenmiştir [7,2]. Dünyada her yıl 17 milyon ton kadar ÖTL oluşmakta olup Türkiye'de bu miktar yıllık 180.000–300.000 ton civarındadır [8]. Bu rakam 2008 yılı verilerine göre AB ülkelerinde 3,2 milyon ton civarındadır ve 2030 yılına kadar lastik kullanımının yaklaşık % 20 oranında artacağı tahmin edilmektedir [9,10,11]. "Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliği ve Uygulamaları 2018" raporuna göre, 2017 yılında toplanması gereken ÖTL miktarı 236660 ton, geri toplanabilen ÖTL miktarı ise ancak 184313 ton olmuştur. Bu miktarın LASDER tarafından toplanan kısmı 163000 ton olup LASDER'in 2018 yılında topladığı ÖTL miktarı ise 178133 tondur. Toplanan bu miktarın 100000 tonu malzeme geri kazanımına, 16133 tonu pirolitik yağ kazanımına, 62000 tonu da enerji amaçlı çimento sektörüne ek yakıt olarak kazandırılmıştır [8,12]. ÖTL yönetiminde bertaraf seçenekleri kullanım amacına ve maliyete göre değişmekte olup, genel olarak uygulanan yöntemler şu şekilde sıralanabilir [5].

- Geri dönüştürme
- Yeniden kullanma
- Depolama
- Enerji/malzeme geri kazanımı

Türkiye'de ihraç edilen ve yeniden kaplanan miktarlar hariç 2008 yılında üretilen 200000 ton atık lastiğin %15'inin enerji geri kazanımında, %20'sinin inşaat sektörü veya malzeme geri kazanımında ve %60'ının depolama alanlarında ve diğer bertaraf yöntemleri ile giderildiği bildirilmiştir [10].

Atık lastiklerin değerlendirilmesinde çözüm aranırken çevreye zarar vermeyen tekniklerin kullanılması, hammaddeye dönüşüm sağlanması, ekonomik ve yaygın kullanıma uygun olması, kurulan endüstrilere zararın minimum seviyede tutulması ve elde edilen ürünün ticari değerinin olması gibi durumlar göz önünde bulundurulmalıdır [7].

Bu çalışmada ÖTL yönetiminde artan atık miktarı, çevresel ortamlarda oluşturdukları zararlar ve ekonomik değeri olan ikincil maddelere dönüştürülebilme potansiyeli göz önüne alınarak en uygun olabilecek alternatif belirlenmiştir. Dünyada yaygın olarak kullanılan doğrudan değerlendirme (geri dönüşüm), piroliz ve alternatif yakıt olarak kullanma yöntemleri ele alınmıştır. En uygun yöntemin belirlenmesi aşamasında çok kriterli karar verme yaklaşımlarından olan bulanık PROMETHEE (preference ranking organization method for enrichment evaluations) yöntemi kullanılmıştır.

## 2. ATIK LASTİK YÖNETİMİNDE ALTERNATİF YÖNTEMLER (ALTERNATIVE METHODS IN WASTE TIRE MANAGEMENT)

### 2.1. Doğrudan ve Malzeme Olarak Değerlendirme / Geri Dönüşüm (Direct and Evaluation As Material / Recycling)

Günümüzde atık yönetiminin çevresel ve ekonomik olarak sürdürülebilirliğinin sağlanması için uygulanan atık yönetim hiyerarşisi sırasıyla, atığı kaynağında önleme, oluşumunu azaltma, tekrar kullanma, geri dönüşüm, atıktan enerji geri kazanımı ve bertaraf şeklindedir. Lastik üç boyutlu yapıya sahip bir çeşit polimer olup, doğal veya sentetik kauçuk, vulkanizasyon ajanı, dolgu maddesi olarak karbon siyahı ve patlamaya dayanıklı lastik ajanı gibi aramid lif ve vulkanizasyon aktivatörü olarak çinko oksit gibi katkı maddelerinden oluşmaktadır [13]. Bir otomobil lastiğinde %47 kauçuk, %21,5 karbon siyahı, %16,5 metal, %5,5 tekstil, %1 çinko oksit, %1 kükürt ve %7,5 katkı malzemeleri bulunmaktadır [14]. Lastikler ve diğer kauçuk ürünleri üretilip kullanıldığından beri hurda ya da kullanılmış lastik parçaları problem teşkil etmiştir. Kauçuk, dayanıklılığı ve yüksek miktarda tüketici sonrası ve üretim atığı nedeniyle büyük bir sorundur. Dünyada üretilen kauçuğun %10'u üretim sırasında, kalan kısım ise birkaç yıl içinde ömrünü tamamlayarak atık haline gelmektedir. Araç lastikleri ise bu atıklar içerisinde en büyük kısmı kaplamaktadır.



ÖTL'ler doğrudan değerlendirmeye tabi tutulduklarında hiçbir işleme tabi tutulmadan olduğu gibi kullanılırlar. ÖTL'ler iskelelerde, park alanlarında, yollarda, toprak dolgularında kullanılabilirdiği gibi kaplanıp yeni lastik üretiminde de kullanılabilirler [5, 10]. ÖTL'ler ayrıca mekanik parçalama ile çeşitli boyutlarda granül haline getirilerek, spor pistlerinde, çocuk oyun alanlarında ve bazı malzemelerin elastikliyini arttırmak için kullanılmaktadır [15].

ÖTL'lerin %80 lik bölümü malzeme geri kazanım amacıyla kullanılmaktadır [10]. Geri dönüşüme giren lastiklerden kauçuk granül, çelik tel ve tekstil parçacıkları elde edilmektedir. Ömrünü tamamlamış lastikler lastik öğütücü makinelerde kırılarak kauçuk ve çelik parçalara ayrıldıktan sonra çelik teller mıknatıslı bantlarda kauçuk ile ayrıştırılır. Bir geri dönüşüm tesisi; Hurda tel çekme makinesi, lastik şeritleme makinesi, parçalayıcı, kırma makinesi, aspiratörlü seperatör, kalibre makinesi, toz siklonu ve aspiratörü ekipmanlarından oluşmakta olup 1000 kg/sa kapasiteli bir tesis için 2019 yılı kurulum maliyetinin ülkemizde 1.330.000 TL olduğu, geri dönüşüm sonucu elde edilen ürünlerin satış fiyatlarının ise: Granül kauçuk (1-3 mm boyutlu)1-0,75 TL/kg, çelik tel 0,25-0,30 TL/kg, elek altı malzeme (sıfır tozu) 1,20 TL/kg olduğu belirlenmiştir. Bu yöntemde ince kırıntı kauçuğun arka arkaya öğütme işlemi sırasında ortaya çıkan toz emisyonu sorun teşkil etmektedir. Sıfır tozu adı verilen ve en ince hali bile değerlendirilen bu toz da maddi kaynak sağlamaktadır. Kişisel koruyucu donanımların kullanılması ile işçi sağlığı ve iş güvenliği sağlanabilir.

## 2.2. Piroliz (Pyrolysis)

Atık lastiklerin hammadde olarak değerlendirilmesinde piroliz prosesinin önemli bir yeri vardır. Piroliz, organik maddelerin oksijensiz ortamda 500 – 800 °C'de, gaz, katı veya sıvı ürünlere dönüştürülmesi prosesidir. Pirolizde gerekli olan ısı miktarı, organik maddenin kimyasal yapısını bozacak ve yeni kimyasal maddelerin oluşumunu sağlayacak seviyede olmalıdır. ÖTL'lerin pirolizinden elde edilen ürünler pirolitik yağlar, karbon siyahı, çelik tel ve yanıcı gazlar olarak sıralanabilir [16]. Piroliz prosesinde gaz, sıvı ve katı ürün dağılımı proses sıcaklığı ve reaksiyon süresine göre değişmektedir. Bu ürünlerin özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Pirolizden elde edilen ürünler farklı alanlarda kullanılmaktadır [5];

**Karbon Siyahı:** Kullanım alanı çok geniştir. Lastik üretiminde kauçuğa karıştırılır ve kablo, konveyör bant, hortum, paspas, siyah poşet, araba yedek parçaları, ısı yalıtım, kauçuk malzemelerde boya maddesi, taban malzemesi ve plastik üretiminde kullanılmaktadır

**Pirolitik Yağ:** Geri dönüştürülen lastiğin cinsine göre lastik miktarının 43%-45%'i oranında pirolitik yağ elde edilir. Pirolitik yağ mazot eşdeğeri bir üründür. Yakıt olarak, kullanılmaktadır [18].

**Çelik Hurda Tel:** Pirolize giren lastik ağırlığının % 10 miktarı kadar hurda çelik tel elde edilmekte olup hurdacılara ve haddehanelere satılmaktadır.

**Çizelge 1.** Atık lastiğin pirolizinden elde edilen ürünler (Products from pyrolysis of waste tires) [17]

Ürün	Bileşim	Isıl değer
Gaz	Düşük kükürt içerikli hidrokarbon karışımı	19-45MJ/m <sup>3</sup>
Sıvı	Aromatik yağlar	42 MJ/kg
Katı	Karbon siyahı	28-33MJ/kg

**Yanıcı Gaz:** Piroliz işlemi sonrasında yoğunlaştırılmayan gazdır. Sistemde gerçekleştirilen piroliz işlemi ile %8-%10 oranında yanıcı gaz elde edilmesi beklenmektedir. Piroliz gazı doğal gaz ile karşılaştırılabilir nitelikte bir üründür [19].

Tayvan'da 36000 ton/yıl kapasiteli lastik piroliz tesisinde 13320 ton/yıl piroliz yağı, 12240 ton/yıl karbon siyahı, 5760 ton/yıl piroliz gazı, 4680 ton/yıl çelik elde edilmiştir. Geri dönüştürülmüş karbon siyahı ve piroliz yağın karbon ayak izleri 0,518 ve 0,311 kg CO<sub>2</sub>/kg olarak verilmiştir. Bu değerler taze ürünle karşılaştırıldığında sadece üçte birini oluşturduğu belirlenmiştir [20]. Bu açıdan değerlendirildiğinde karbon ayak izinin azaltılmasında uygun bir yöntem olarak düşünülebilir.

Piroliz prosesi, piroliz reaktörü, yoğunlaştırma kuleleri, çelik ayırma ve karbon siyahı ünitelerinden oluşmakta olup 100 kg/saat kapasiteli bir tesisin kurulum maliyeti 2019 yılı için 4.729.000 TL olarak belirlenmiştir. Elde edilen ürünlerin Ülkemizdeki satış fiyatları şu şekildedir: mazot eşdeğeri 1500 TL/ton, karbon siyahı 550 TL/ton, çelik tel 350 TL/ton, yanıcı gaz 5 TL/m<sup>3</sup> olduğu belirlenmiştir.

Piroliz sürecinden elde edilen yağlar, ülkemizde Atık Yağların Kontrolü Yönetmeliği'ne göre 1. sınıf atık yağ kategorisine girmektedir [21]. Üretilen yağ, lisanslı firmalara geri dönüşüm için verilmektedir. Elde edilen ürünün atık sınıfına girmesi ise piroliz tesislerine ek bir yasal yükümlülük getirmiştir. Bu durum piroliz tesislerinin yaygınlaşmasını negatif yönde etkilemektedir.

Pirolizden kaynaklanabilecek önemli çevresel riskler; elde edilen yağın dökülmesi, oluşan tozların işçi sağlığı ve çevre üzerinde olumsuzlukları sayılabilmektedir. Piroliz atmosfer kirliliğine sebep olmaz. Sıvı sızdırmaz kaplar kullanılarak sıvı yakıtların sızıntısı önlenebilir. Piroliz sistemi yangın riski olan bir sistemdir ve bu da önemli bir sorun teşkil etmektedir. Ancak pirolizin ekonomik faydaları oldukça dikkate değerdir: Metaller, sıvı hidrokarbonlar, karbon ve elemental sülfür gibi ikincil ham materyaller ekonomik getirisi olan ürünlerdir [19]. Piroliz yöntemi diğer geri kazanım yöntemlerine göre tesis kurulumu açısından daha pahalı ve daha zahmetli olduğu gibi, daha yüksek enerji maliyeti gerektiren bir yöntemdir. Ancak prosenin sürekliliği sağlanabilirse geri kazanım tekniği ve ekonomisi itibarı ile verimli bir yöntem olduğu düşünülebilir [10].

Piroliz diğer yakma ve gazlaştırma prosesleri ile karşılaştırıldığında ise düşük yatırım ve işletme maliyeti gibi bazı avantajlara sahiptir. Bu yüzden atık lastik bertarafında umut verici bir yöntem olarak değerlendirilmektedir [13].

### 2.3. Alternatif Yakıt Olarak Değerlendirme (Evaluation as Alternative Fuel)

Alternatif yakıt olarak değerlendirme ÖTL yönetimi için bir diğer alternatif olabilir. Benzersiz kalorifik değere (29-39 MJ/kg) sahip olan lastik atıkları özellikle çimento endüstrilerinde ve kağıt fabrikalarında alternatif yakıt olarak kullanılabilir. Atık lastiklerin yaklaşık %90'i organik maddeden ibarettir. Bu yüzden yakıt kaynağı olarak kullanılabilir niteliktedirler [22]. Yapılan çalışmalar %95 kömür ve %5 doğranmış lastik karışımı kullanılması durumunda CO ve NOx emisyonlarında önemli bir oranda azalma olduğunu göstermiştir [23]. Atık lastiğin 700 °C de yakılması sonucu emisyon değerleri incelendiğinde NOX içeriğinin 94-110 mg/g olduğu belirlenmiştir [24]. Bugün ülkemizde toplam yakıt içinde %40 oranında ÖTL kullanılmaktadır. ÖTL nin yanması sonucu enerji geri kazanımının yanı sıra silika ve çelik telin geri kazanımı da sağlanmaktadır [5].

Lastikler buhar kazanları ve çimento endüstrilerinde bütün halinde ve boyutları küçültülerek yoğun olarak kullanılmaktadır. Ülkemizde ÖTL, LASDER tarafından lastik üreticilerinden imha bedeli karşılığında alınmaktadır. Çimento fabrikaları ise bir bedel karşılığında LASDER'den ÖTL almaktadırlar. 2019 yılı itibarı ile 30'un üzerinde lisanslı geri kazanım firması bulunmaktadır ve en az 15 çimento fabrikası ÖTL'leri alternatif yakıt olarak kullanmaktadır [5]. Çimento fabrikaları doğranmış ve doğranmamış lastikleri ortalama olarak (5-10 cm boyutu için) 110-300 TL/ton ve 150-200 TL/ton arasında değişen fiyatlarda almaktadırlar. Atık lastiklerin alternatif yakıt olarak kullanılması yöntemi, lastik üreticileri için ekipman gereksinimi olmadığından ekonomik açıdan cazip bir seçenek olarak görülmektedir. Lastiklerin yakılması ile elektrik ve buhar üretilebilmektedir ancak önemli bir hava kirliliği oluşturacağından, etkili bir hava kirliliği kontrol ekipmanı kurulması gerekmektedir. Lastiğin ısı değeri kömüre göre daha yüksek olsada lastikler yakıldığında ortaya çıkan kükürt, azot dioksitler, PAH'lar ve diğer uçucular için emisyon kontrol cihazları kurulması gereklidir [5]. Lastiklerin ve çeşitli yakıtların emisyon miktarları Çizelge 2'de verilmiş olup lastiğin yaydığı emisyonun doğal gazdan fazla ve kömür ile yakın bir değer olduğu görülmektedir.

Lastik 850 °C de yakıldığında yaklaşık 80000 mg/kg benzen, 65000 mg/kg metan, yanısıra 5000 mg/kg civarında naftalin, piren, fenantren ve yaklaşık 2000 mg/kg stiren, floren, bifenil oluşur. Aynı sıcaklıkta piroliz işlemi sonrası çıkan emisyonlar ise yaklaşık 10000 mg/kg piren, 5000 mg/kg naftalin, 4000 mg/kg fenantren ve 4000 mg/floren şeklindedir [25].

**Çizelge 2.** Lastik ve çeşitli yakıtların ısı değerleri ve emisyon miktarları (Thermal values and emissions of tires and various fuels) [5]

Yakıt türü	Isıl değer (MJ/kg)	Emisyon değeri (kg CO <sub>2</sub> /ton)
Odun	10,2	1122
Kömür	27	2430
Doğal gaz	39	1989
Motorin	46	3220
Lastik*	32	2270

(\*): 1 ton ÖTL=1 ton iyi kalite kömür=0,7 ton fuel oil [8]

### 3. PROMETHEE VE BULANIK PROMETHEE YÖNTEMLERİ İLE KARAR VERME SÜRECİ (DECISION MAKING PROCESS WITH PROMETHEE AND FUZZY PROMETHEE METHODS)

PROMETHEE Brans ve Vincle (1985) tarafından ortaya konulan ve Brans ve ark. (1986) tarafından geliştirilen birçok kriterli karar verme yöntemidir.

PROMETHEE çok kriterli analizlerde kullanılan diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında oldukça basit bir sıralama metodu anlayışı ve uygulamasıdır. Sonlu alternatifler dizisinin çoklu ya da birbiriyle çelişen kriterleri olan problemlere iyi adapte edilmiştir [26]. a ve b olarak kabul edilen iki alternatifin kriterler bakımından karşılaştırılması yapılırken bir P fonksiyonu tercih edilir. Bu fonksiyon 0-1 aralığında değişen bir tercih derecesi içinde, belirli bir kriter bazında değerlendirilen iki alternatif arasındaki farkı açıklamaktadır. Bu P fonksiyonun genel gösterimi denklem 1'deki gibi ifade edilir.

$$P_j(a, b) = \begin{cases} 0, & f(a) \leq f(b) \\ p[f(a) - f(b)], & f(a) > f(b) \end{cases} \quad (1)$$

Seçilen tercih fonksiyonu ile alternatifler, kriter temelinde ikili olarak karşılaştırılır. PROMETHEE 'nin temel adımları aşağıdaki gibidir [26, 27, 28, 29].

Adım 1: Her bir kriter için Brans (1982) tarafından belirlenmiş olan 6 adet tercih fonksiyonundan bir tanesi seçilir.

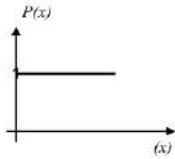
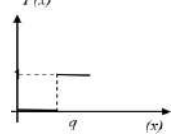
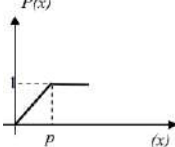
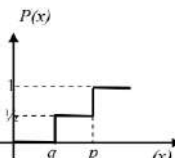
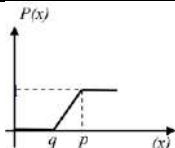
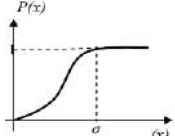
Adım 2: Adım 1 ile belirlenen tercih fonksiyonu ile alternatiflerin ikili karşılaştırmaları yapılarak her alternatif için tercih indeksi denklem 2'deki eşitlik ile belirlenir.

$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^n w_j \times P_j(a, b) \quad (2)$$

Burada w<sub>j</sub> kriterin önem ağırlığını, n ise değerlendirme faktörü sayısını ifade eder.



**Çizelge 3.** PROMETHEE 'nin genelleştirilmiş tercih fonksiyonları (PROMETHEE's generalized preference functions ) [30].

Tip	Parametre	Fonksiyon	Grafik, P(x)
Birinci Tip (Olağan)	-	$p(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases}$	
İkinci Tip (U-tipi)	q	$p(x) = \begin{cases} 0, & x \leq q \\ 1, & x > q \end{cases}$	
Üçüncü Tip (V-tipi)	p	$p(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ \frac{x}{p}, & 0 \leq x \leq p \\ 1, & x > p \end{cases}$	
Dördüncü Tip (Seviyeli)	q,p	$p(x) = \begin{cases} 0, & x \leq q \\ \frac{1}{2}, & q \leq x \leq p \\ 1, & x > p \end{cases}$	
Beşinci Tip (Lineer)	q,p	$p(x) = \begin{cases} 0, & x \leq q \\ \frac{x-q}{p-q}, & q < x \leq p \\ 1, & x > p \end{cases}$	
Altıncı Tip (Gaussian)	σ	$p(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ -x^2/2\sigma^2 \\ 1 - e, & x > 0 \end{cases}$	

Adım 3: Her alternatif için a alternatifi için pozitif (denklem 3) ve negatif akımlar (denklem 4) belirlenir.

$$\Phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \in A} \pi(a, b) \quad (3)$$

$$\Phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \in A} \pi(b, a) \quad (4)$$

Pozitif akım bir alternatifin diğer alternatifler üzerinde nasıl bir üstünlük sağladığını gösterirken negatif akım o alternatife diğer alternatiflerin nasıl bir üstünlük sağladığını ifade eder. Dolayısıyla,  $\Phi^+(a)$  ne kadar büyük ise ve  $\Phi^-(a)$  ne kadar küçük ise alternatif o kadar üstün konuma gelir.

Adım 4: Hesaplanan pozitif ve negatif akımlar ile PROMETHEE I kısmi sıralama ve PROMETHEE II net sıralama gerçekleştirilir. a alternatifi ile b alternatifi arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde olacaktır [31].

(a),(b)'den üstündür;

$$\begin{cases} \Phi^+(a) > \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) < \Phi^-(b) \\ \Phi^+(a) > \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) = \Phi^-(b) \\ \Phi^+(a) = \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) < \Phi^-(b) \end{cases} \quad (5)$$

(a),(b)'den farksızdır;

$$\begin{cases} \Phi^+(a) > \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) < \Phi^-(b) \\ \Phi^+(a) > \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) = \Phi^-(b) \\ \Phi^+(a) = \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) < \Phi^-(b) \end{cases} \quad (6)$$

(a) ile (b) karşılaştırılmaz;

$$\begin{cases} \Phi^+(a) > \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) > \Phi^-(b) \\ \Phi^+(a) < \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) < \Phi^-(b) \end{cases} \quad (7)$$

PROMETHEE metodu sahip olduğu avantajlarına rağmen, girdilerin genellikle karar vericilerin düşünce ve tecrübelerine dayanması ve dilsel ifadelerle ifade edilmesi gereken durumların getirdiği belirsizlik açısından bir dezavantaja sahiptir. Bu belirsizliğin ortadan kaldırılması amacıyla PROMETHEE metodunun bulanık sayılarla birlikte geliştirilmiş versiyonu olan Bulanık PROMETHEE ortaya çıkmıştır. Yöntemin amacı, daha hassas ve daha belirgin sonuçlar elde edebilmektir. Bulanık PROMETHEE yöntemi, PROMETHEE yöntemindeki tüm işlemler bulanıklaştırılarak gerçekleştirilir; sadece kriter ağırlıkları ve tercih fonksiyonundaki tercih eşikleri kesin sayı olarak kalır. Bu çalışmada karar vericiler tarafından belirlenen dilsel ifadeler öncelikle 5 noktalı değerlendirme ölçeği kullanılarak PROMETHEE yaklaşımı ile değerlendirilmiştir. Bulanık PROMETHEE özellikle dilsel ifadelerin yer aldığı problemlerin çözümünde daha hassas sonuçların elde edilmesi için kullanıldığından üçgensel bulanık sayılar kullanılarak ayrıca bulanık PROMETHEE çözümü yapılmıştır.

#### 4. METOT (METHOD)

Çalışmada atık lastik yönetiminde uygulanabilecek üç alternatif yöntem, geri dönüşüm, piroliz ve alternatif yakıt olarak kullanım ele alınmıştır. Yöntemin seçiminde etkili olan kriterler ise çevresel etki, işletme riski, kurulum maliyeti, çıkan ürün çeşitliliği, Türkiye’de uygulanabilirlik ve işletme maliyeti olarak belirlenmiştir.

Alternatiflerin değerlendirilmesi için 4 karar verici tercih edilmiştir. Karar vericiler, lastik sektöründe görev yapan iki uzman kişi, konu üzerinde uzman bir öğretim üyesi ve İşyerinde Mühendislik Eğitimi lastik sektöründe tamamlamış bir çevre mühendisinden oluşmaktadır. Bu çalışmada ömrünü tamamlamış lastiklerin bertaraf alternatifinin belirlenmesi probleminin çözümünde öncelikle 5 noktalı değerlendirme ölçütü kullanılarak PROMETHEE yaklaşımı kullanılmıştır. Karar vericilerin kriter bazında öznel ve dilsel ifadeleri kullanıldığından 5 noktalı değerlendirme ölçeği yerine bulanık sayıların kullanılmasının çözümü daha hassas elde edileceği düşünülmüştür ve bulanık PROMETHEE çözümü yapılmıştır. Çalışmada Li (1999) tarafından önerilen beş dilsel değişkenin benimsendiği üçgensel bulanık sayı karşılıkları kullanılmıştır (Çizelge 4).

**Çizelge 4.** Dilsel ifadelerle karşılık gelen bulanık sayılar ve 5 noktalı ölçek (Linguistic expressions and corresponding fuzzy numbers and 5 point scale) [32].

Dilsel ifadeler	Bulanık sayı karşılığı	5 noktalı ölçek
Çok Kötü	(0;0;0,25)	1
Kötü	(0;0,25;0,50)	2
Orta	(0,25;0,50;0,75)	3
İyi	(0,50; 0,75;1,00)	4
Çok İyi	(0,75;1,00;1,00)	5

**Çizelge 5.** Alternatiflerin karar vericilere göre 5 noktalı ölçek ile puanları (Scores of alternatives with 5-point scale according to decision makers)

Alternatif	Karar Verici	Çevresel Etkisi	İşletme Riski	Kurulum Maliyeti	Çıkan Ürün Çeşitliliği	Türkiye’de Uygulanabilirlik	İşletme Maliyeti
Geri Dönüşüm	k1	5	3	2	4	5	5
	k2	5	3	3	5	4	5
	k3	5	3	4	5	5	4
	k4	4	4	3	4	4	4
	Ortalama	4,75	3,25	3	4,5	4,5	4,5
Piroliz	k1	3	2	1	5	2	4
	k2	4	1	2	5	2	4
	k3	3	1	2	5	2	3
	k4	1	2	1	4	2	2
	Ortalama	2,75	1,5	1,5	4,75	2	3,25
Alternatif yakıt	k1	3	3	5	3	3	5
	k2	3	2	5	3	5	5
	k3	2	2	5	2	4	5
	k4	2	3	3	1	4	3
	Ortalama	2,5	2,5	4,5	2,25	4	4,5

PROMETHEE ve bulanık PROMETHEE çözümlemesi Visual PROMETHEE yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. PROMETHEE çözümü için karar vericilerin dilsel ifadeleri 5 noktalı ölçeğe göre puanlanıp, her kriter için ortalamaları alınmıştır ve bu şekilde veri girişi yapılmıştır. Bulanık PROMETHEE çözümlemesi için ise karar vericilerin dilsel ifadeleri bulanık sayılarla ifade edilerek kriter bazında ortalamaları alınıp durulaştırma işlemi yapılmıştır. (a,b,c) olarak ifade edilen üçgensel bir bulanık sayının durulaştırma işlemi denklem 8’e göre yapılmıştır [33].

$$D = \frac{a+7b+c}{12} \quad (8)$$

Burada D durulaştırılmış değeri ifade etmektedir.

PROMETHEE çözümlemesi için 5 noktalı puanlamayla oluşturulan karar vericilerin cevaplarının ortalamalı Çizelge 5’deki gibidir.

Çalışmadaki karar vericilerin alternatifleri kriter bazında değerlendirmeleri sonucunda oluşturulan bulanık sayılar, bu sayıların ortalamaları ve durulaştırılmış değerleri ise Çizelge 6’da gösterilmiştir. Çizelgelerdeki k1,k2,k3,k4 4 adet karar vericiyi, D ise durulaştırılmış değerleri ifade etmektedir. Alternatiflerin kriterlere göre puanını temsil eden bu değerler ile PROMETHEE ve bulanık PROMETHEE çözümlemeleri Visual PROMETHEE yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Çözümleme yapılırken her kriterin önem derecesi aynı olarak kabul edilmiş ve her kriter derecesi maximum olacak biçimde ayarlanmıştır. Ayrıca tercih fonksiyonu olarak, tercihin bir kriter açısından ortalamanın üstünde değere sahip alternatiflerden yana kullanılmak istendiği, ancak bu değer altındaki değerlerin de ihmal edilmek istenmediği tercih fonksiyonu olan üçüncü tip (V tipi) tercih fonksiyonu seçilmiştir.



**Çizelge 6.** Karar vericilerin değerlendirmelerine karşılık gelen bulanık sayılar, ortalamaları ve durulaştırılmış halleri (Fuzzy numbers, averages and clarified states corresponding to decision-makers' evaluations)

		Çevresel Etki			İşletme Riski			Kurulum Maliyeti			Çıkan Ürün Çeşitliliği			Türkiye'de Uygulanabilirlik			İşletme Maliyeti		
Geri Dönüşüm	k1	0,75	1	1	0,25	0,5	0,75	0	0,25	0,05	0,5	0,75	1	0,75	1	1	0,75	1	1
	k2	0,75	1	1	0,25	0,5	0,75	0,25	0,5	0,75	0,75	1	1	0,5	0,75	1	0,75	1	1
	k3	0,75	1	1	0,25	0,5	0,75	0,5	0,75	1	0,75	1	1	0,75	1	1	0,5	0,75	1
	k4	0,5	0,75	1	0,5	0,75	1	0,25	0,5	0,75	0,5	0,75	1	0,5	0,75	1	0,5	0,75	1
	Ort.	0,68	0,94	1	0,31	0,56	0,81	0,25	0,5	0,64	0,625	0,88	1	0,63	0,88	1	0,63	0,88	1
	DF	<b>0,6875</b>			<b>0,4218</b>			<b>0,3656</b>			<b>0,6458</b>			<b>0,6458</b>			<b>0,6458</b>		
Pirroliz	k1	0,25	0,5	0,8	0	0,25	0,05	0	0	0,25	0,75	1	1	0	0,25	0,5	0,5	0,75	1
	k2	0,5	0,75	1	0	0	0,25	0	0,25	0,5	0,75	1	1	0	0,25	0,1	0,5	0,75	1
	k3	0,25	0,5	0,8	0,5	0,75	1	0	0,25	0,5	0,75	1	1	0	0,25	0,5	0,25	0,5	0,75
	k4	0	0	0,3	0	0,25	0,05	0	0	0,25	0,5	0,75	1	0	0,25	0,5	0	0,25	0,5
	Ort.	0,25	0,44	0,7	0,125	0,31	0,34	0	0,125	0,38	0,688	0,94	1	0	0,25	0,4	0,31	0,56	0,81
	DF	<b>0,3333</b>			<b>0,2208</b>			<b>0,1041</b>			<b>0,6875</b>			<b>0,1781</b>			<b>0,4218</b>		
Alternatif Yakıt	k1	0,25	0,5	0,8	0,25	0,5	0,75	0,75	1	1	0,25	0,5	0,75	0,25	0,5	0,8	0,75	1	1
	k2	0,25	0,5	0,8	0	0,25	0,5	0,75	1	1	0,25	0,5	0,75	0,75	1	1	0,75	1	1
	k3	0	0,25	0,5	0	0,25	0,5	0,75	1	1	0	0,25	0,5	0,5	0,75	1	0,75	1	1
	k4	0	0,25	0,5	0,25	0,5	0,75	0,25	0,5	0,75	0	0	0,25	0,5	0,75	1	0,25	0,5	0,75
	Ort.	0,125	0,38	0,6	0,125	0,38	0,63	0,63	0,875	0,94	0,125	0,31	0,56 2	0,5	0,75	0,9	0,63	0,88	0,94
	DF	<b>0,2812</b>			<b>0,2812</b>			<b>0,6406</b>			<b>0,2395</b>			<b>0,5572</b>			<b>0,6406</b>		

## 5. BULGULAR (RESULTS)

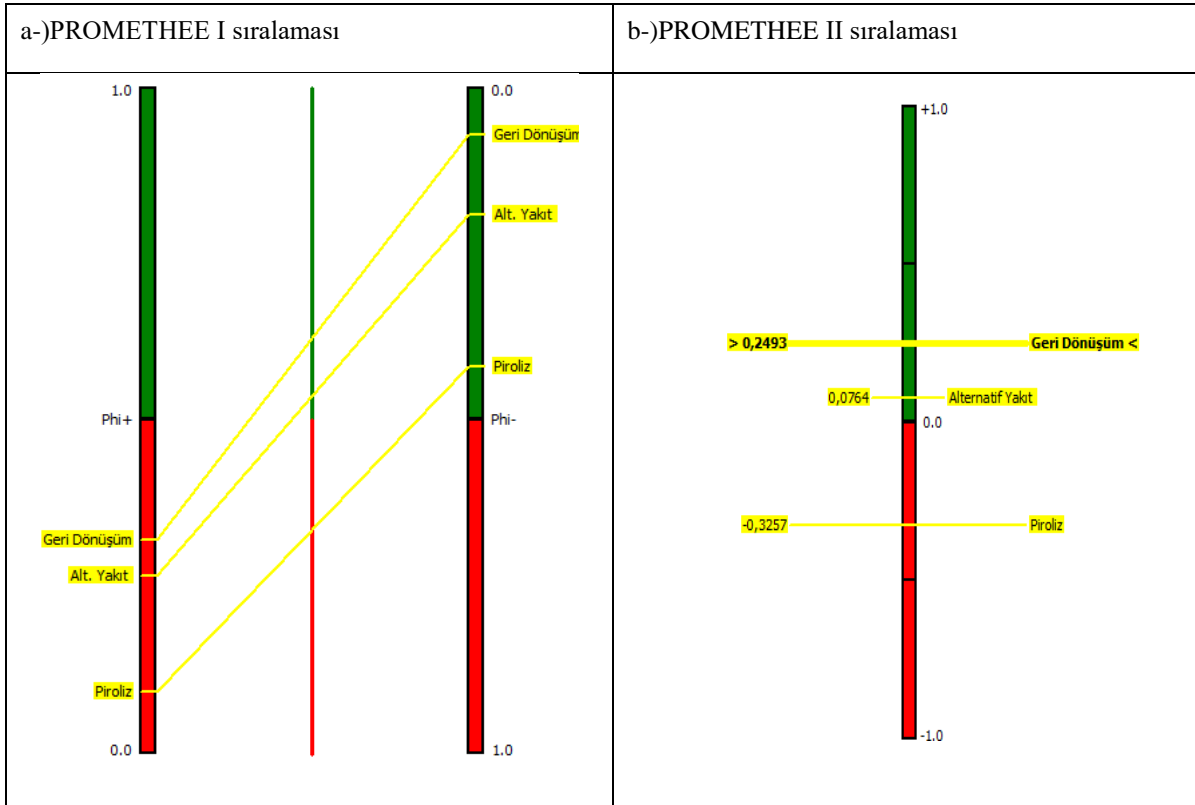
### 5.1. PROMETHEE I Kısmi Sıralama ve PROMETHEE II Net Sıralama (PROMETHEE I (Partial Sorting) and PROMETHEE II Net Sorting)

PROMETHEE I kısmi sıralaması yapılırken her bir alternatif için +1 ile -1 arasında, pozitif ve negatif akımlar hesaplanmaktadır. Pozitif akımlar bir alternatifin diğerlerine olan üstünlüğünü gösterir. PROMETHEE II'de, ise pozitif ve negatif akımların farkı ile ortaya çıkan net akımlar ile daha net bir sıralama elde edilir. PROMETHEE II'de 0 ile +1 arasında yer alan alternatifler sıralamada daha önlerde yer alacak alternatiflerdir.

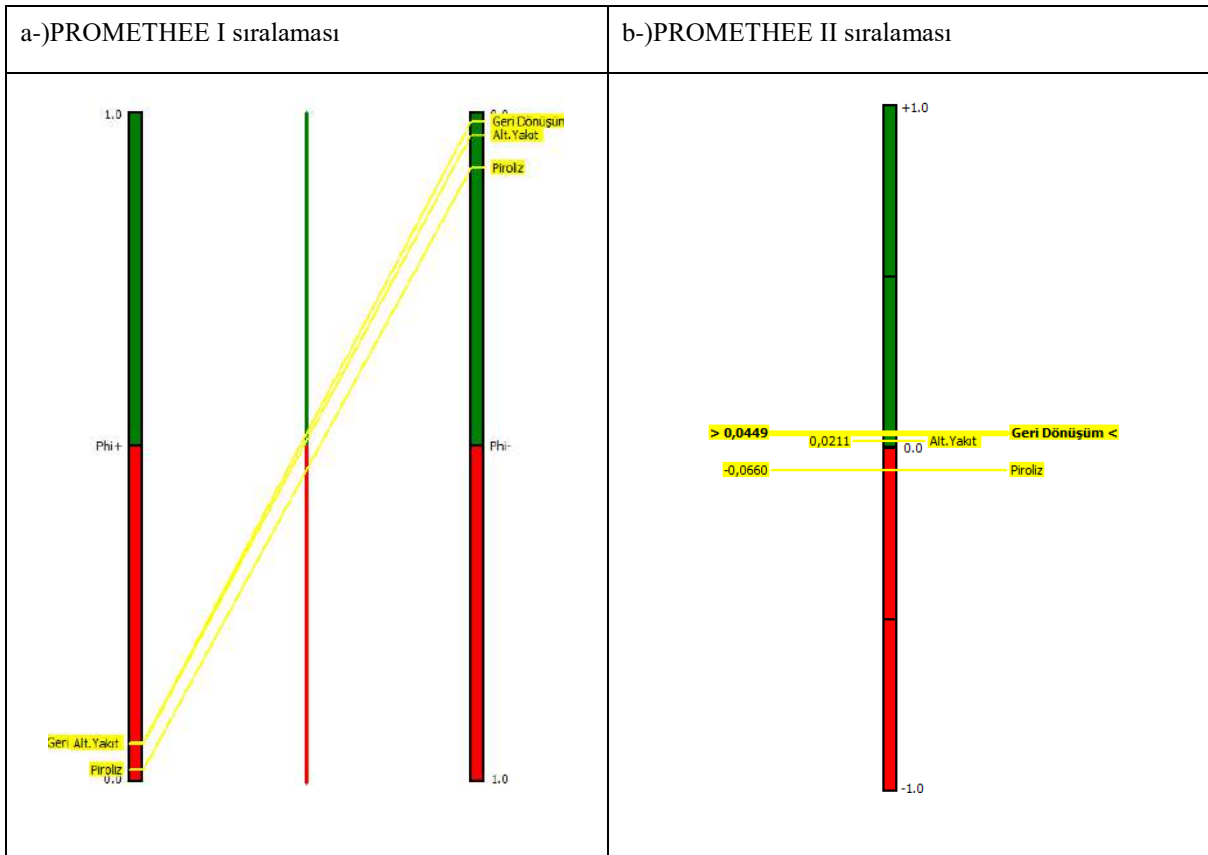
5 noktalı ölçeklendirme ile gerçekleştirilen PROMETHEE I ve II sıralamaları Şekil 1'de, bulanık sayılar ile gerçekleştirilen bulanık PROMETHEE I ve II sıralamaları ise Şekil 2'de verilmiştir. PROMETHEE ve bulanık PROMETHEE analiz sonuçlarında pozitif akımlara bakıldığında en iyi alternatifler geri dönüşüm ve alternatif yakıt olarak kullanma alternatiflerinin olduğu belirlenmiştir. Bu iki alternatif her iki çözümlemeye de

birbirine yakın değerler almıştır. Pirroliz alternatifi ise diğer alternatiflere göre daha düşük pozitif akım değeri almıştır. PROMETHEE I sıralamasında negatif akımlar alternatifin diğer alternatifler tarafından nasıl bastırıldığını ve ne ölçüde zayıf kaldığını göstermektedir. Bir alternatifin negatif akım değeri ne kadar küçük ise o kadar tercih edilebilir. Şekil 1 ve 2'ye bakıldığında geri dönüşüm ve alternatif yakıt olarak kullanma alternatifleri 0'a daha yakın değerler almıştır. Geri dönüşüm alternatifi negatif akımlarda alternatif yakıttan daha tercih edilebilir olmuştur. Pirroliz alternatifi ise 1'e daha yakın akım değeri olarak negatif akımlara göre de en az tercih edilen alternatif olmuştur. PROMETHEE ve bulanık PROMETHEE analizlerinde alternatiflerin sıralaması değişmemiş ancak bulanık PROMETHEE analizi ile daha hassas analiz sonuçlarının elde edilebileceği net skor akım değerlerine bakılarak söylenebilir.

PROMETHEE I ve II analizi ile alternatiflerin net sıralaması Geri dönüşüm - Alternatif yakıt olarak kullanım - Pirroliz şeklinde olmuştur.



Şekil 1. 5 noktalı ölçeklendirme ile gerçekleştirilen PROMETHEE analizinde PROMETHEE I kısmi ve PROMETHEE II net sıralaması (PROMETHEE I partial and PROMETHEE II net ranking in PROMETHEE analysis performed with 5-point scaling)



Şekil 2. Bulanık PROMETHEE analizinde PROMETHEE I kısmi ve PROMETHEE II net sıralaması (PROMETHEE I partial and PROMETHEE II net ranking with fuzzy PROMETHEE analysis)

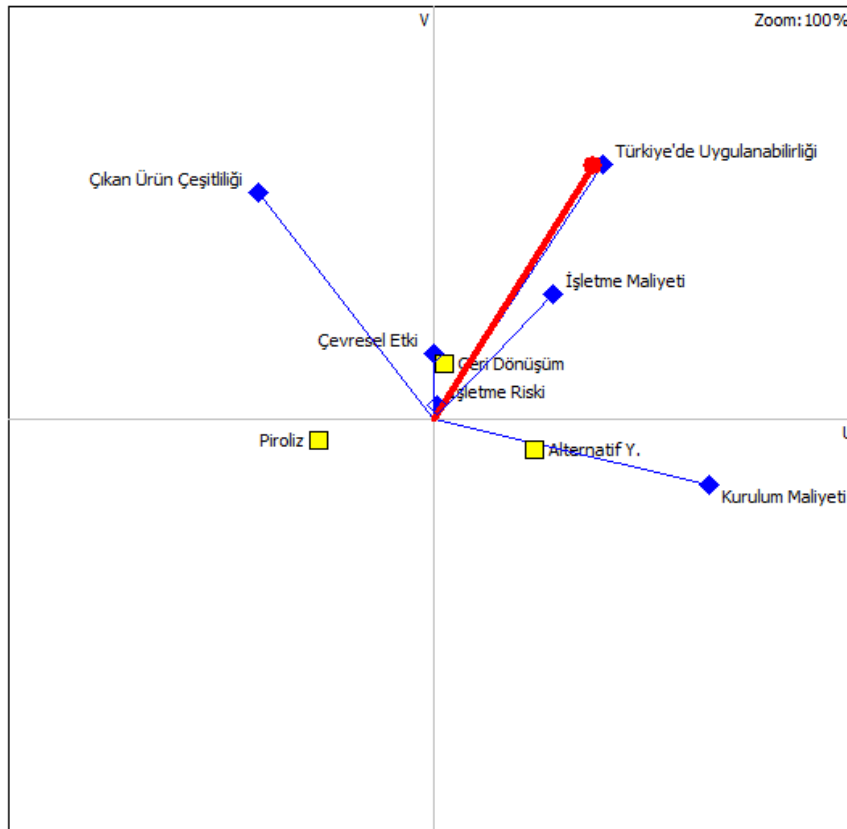
## 5.2. GAIA Görsel Analizi (GAIA Visual Analysis)

GAIA düzlemi, PROMETHEE sonuçlarının bir uzantısı olarak görsel ve etkileşimli bir prosedürle gösterimini ifade eder [29]. GAIA düzlemi üzerinde alternatifler nokta, kriterler de vektör olarak gösterilmektedir. Ayrıca kırmızı vektör ile gösterilen karar çizgisi karar vericiye en uygun alternatifleri işaret etmektedir. Bu çizgiye yakın olan alternatifler kabul edilebilirdir. Kriterlere yakın olan alternatifler, ele alınan kriter için öncelikli olarak tercih edilmesi gereken alternatifleri belirtmektedir. Bu çalışmada GAIA düzlemi bulanık PROMETHEE analizi için gerçekleştirilerek Şekil 3'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi optimum karar yönünde geri dönüşüm alternatifi yer almaktadır ve bu durum PROMETHEE II'nin sıralama sonuçları ile uyumludur. Çıkan ürün çeşitliliği, Türkiye'de uygulanabilirlik ve kurulum maliyeti kriterlerini gösteren vektörler uzun olduğu için, bu kriterlerin alternatifi belirlemede ayrıştırıcı özelliği olduğunu ve karar çubuğunu etkilemedeki öneminin fazla olduğunu göstermektedir. Eğer kriterlerin ayrıştırma gücü az ise kriter vektör uzunluğu kısa olacaktır. Aynı istikameti gösteren vektörler benzer özellik gösteren kriterlere aittir. Farklı istikameti gösteren kriter çubukları ise birbiri ile çelişen kriterlere aittir [30]. GAIA görsel analizinde tam sıralamada alternatifler arasından öne çıkan geri dönüşüm alternatifi çevresel etki, işletme riski ve işletme maliyeti kriterlerinin tercihlerine daha yakın olurken diğer kriterlere uzak kalmıştır. Diğer alternatifler ile

karşılaştırıldığında en iyi tercih geri dönüşüm uygulaması olmuştur. Piroлиз ve alternatif yakıt olarak kullanma alternatifleri ise tercih edilmeyen alternatifler olmuştur.

## 5.3. PROMETHEE Rainbow (PROMETHEE Rainbow)

Bu analiz yönteminde, her bir alternatif çubuk grafik olarak gösterilmektedir. Her dilim, bir kriterin katkısı (akış değeri kriterin ağırlığının çarpımı) ile alternatifi Phi net akış değerine orantılıdır. Olumlu dilimler yukarı doğru gözüktür ve olumlu özelliklere karşılık gelir. Negatif dilimler ise aşağı doğru gözüktür ve olumsuz noktaları ifade eder [34]. PROMETHEE Rainbow analizi 5 noktalı ölçeklendirme ile gerçekleştirilen PROMETHEE ve bulanık sayılarla gerçekleştirilen bulanık PROMETHEE analizleri için sırasıyla Şekil 4 ve 5 'te sunulmuştur. Analizde alternatiflerden pozitif kriteri fazla olan daha tercih edilebilir alternatifi ifade etmektedir. 5 noktalı ölçek ile gerçekleştirilen PROMETHEE analizine göre Şekil 4'de görüldüğü gibi geri dönüşüm alternatifi için hiçbir kriter negatif kısımda kalmamıştır. Alternatif yakıt alternatifi için ise çevresel etki ve çıkan ürün çeşitliliği kriterleri bu alternatifi seçiminde negatif etki göstermiştir. Piroлиз alternatifi için ise çıkan ürün çeşitliliği kriteri dışındaki bütün kriterler bu seçim için negatif etki göstermiştir. Şekil 5' de verilen ve bulanık PROMETHEE çözümlemesi ile elde edilen PROMETHEE Rainbow analizinde çıkan sonuçlara göre ise geri dönüşüm alternatifi seçimine kurulum



Şekil 3. Bulanık PROMETHEE analizinde GAIA düzlemi (GAIA plane in fuzzy PROMETHEE analysis)

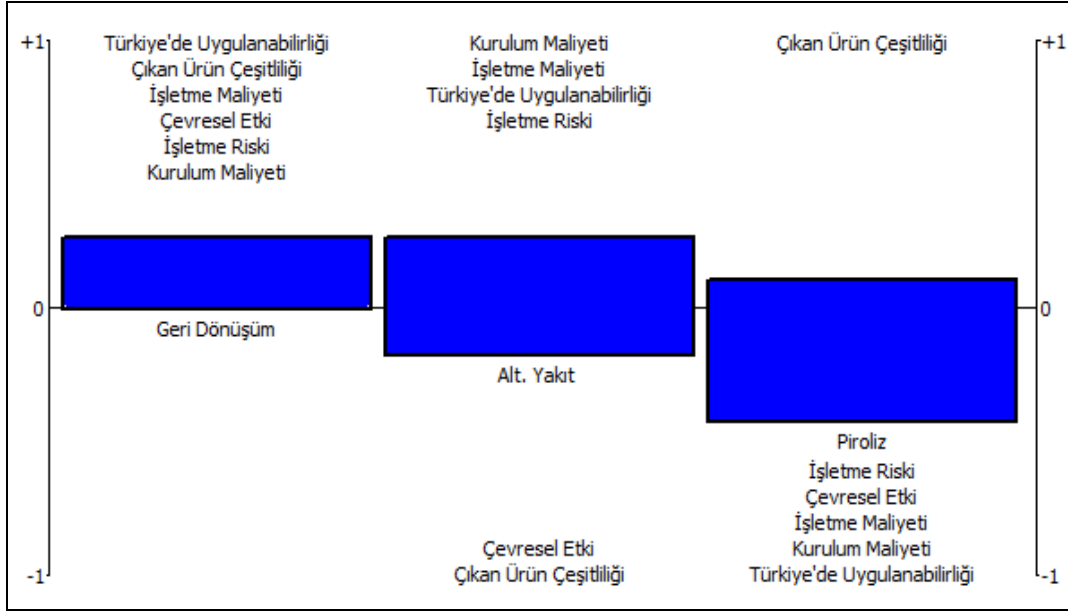


maliyeti dışında ki tüm kriterler pozitif etki etmiştir: Her bir alternatifin pozitif yönde kalan kriterleri dikkate alındığında alternatiflerin tercih edilebilir sıralamalarının geri dönüşüm> alternatif yakıt olarak kullanma>piroliz şeklinde olduğu ortaya çıkmaktadır.

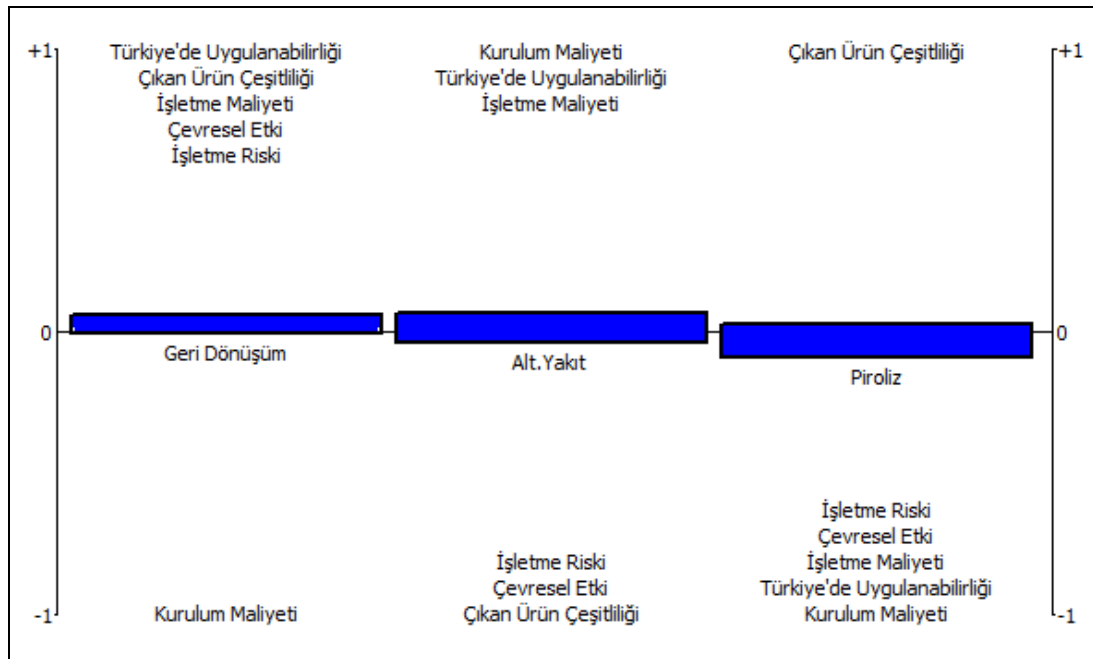
alternatifinde işletme riski kriterinin de negatif yönde etki ettiği görülmüştür.

#### 5.4. GAIA Web Analizi (GAIA Web Analysis)

Bulanık PROMETHEE analizinin klasik PROMETHEE'ye kıyasla daha hassas sonuçlar verdiği



Şekil 4. 5 noktalı ölçek ile değerlendirilen PROMETHEE Rainbow (PROMETHEE Rainbow evaluated with 5-point scale)



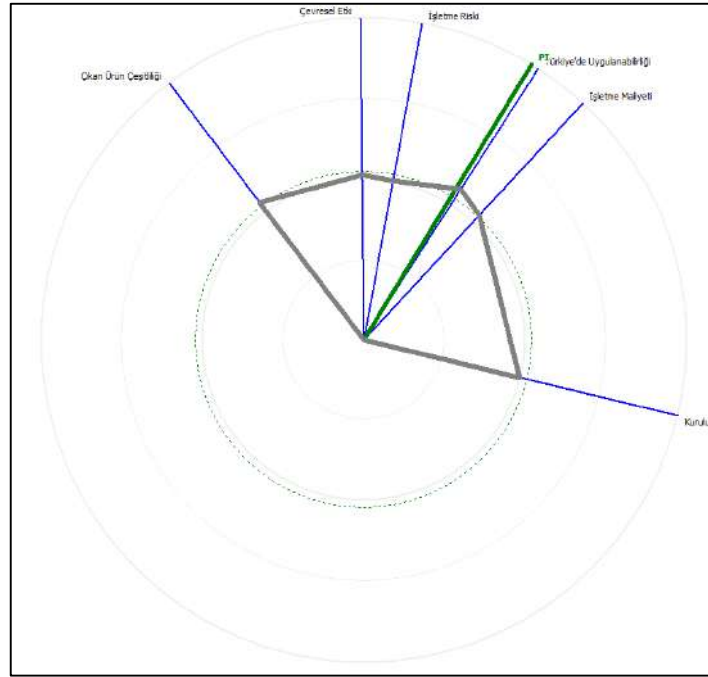
Şekil 5. Bulanık sayılarla değerlendirilen PROMETHEE Rainbow (PROMETHEE Rainbow evaluated with fuzzy numbers)

PROMETHEE ve bulanık PROMETHEE yaklaşımlarının PROMETHEE Rainbow analizlerine bakıldığında birbirinden farklı olarak geri dönüşüm alternatifinin bulanık çözümlemesinde negatif etki eden kriterin kurulum maliyeti olduğu görülmüştür. Ayrıca bulanık çözümleme ile alternatif yakıt olarak kullanım

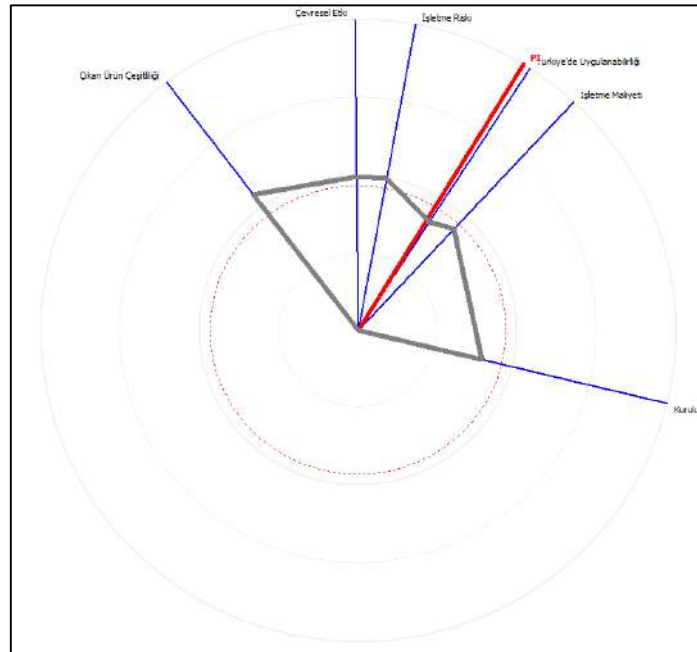
düşünüldüğünden, bulanık PROMETHEE çözümlemesi ayrıca GAIA web analizi ile de değerlendirilmiştir. Bu analiz örümcek ağı görünümünde bir analiz metodu olup, kriterler ekranın merkezinde eşit aralıklarla yerleştirilmektedir. GAIA Web'de ölçüt eksenleri GAIA düzlemindeki gibidir. Her bir boyut için radyal mesafe,

net akım değerine karşılık gelmektedir (merkezde -1, dıştaki daire üzerinde +1). "Yuvarlanmış" seçeneği eksenler arasında çizilen düz çizgileri eğrilerle değiştirerek daha pürüzsüz ve daha tutarlı bir şekil kazandırır. Tüm kriterlerin eşit puanlara sahip olduğu bir alternatif, çokgen yerine bir daire olarak gösterilmektedir. "Karar Eksenini" seçeneği Karar Ekseninin konumunu ve eylemlerin çok kriterli net akış skoruna karşılık gelen noktaları göstermektedir

(akım pozitifse yeşil, negatif ise kırmızı) [34]. GAIA Web analizinde geri dönüşüm ve piroliz alternatifleri karşılaştırılmıştır ve sonuçları Şekil 5 ve 6 da verildiği gibidir. Geri dönüşüm için tüm kriterler merkez çizgisinde olduğu ve pozitif olduğu için yeşil renk aldığı görülmektedir. Piroliz alternatiflerinin GAIA Web analizi olumsuz bir sonuç vermekte olup bu sebeple kırmızı renk almaktadır



Şekil 6. Geri dönüşüm alternatifinin GAIA Web analizi (GAIA Web analysis of recycling alternative)



Şekil 7. Piroliz alternatifinin GAIA Web analizi (GAIA Web analysis of pyrolysis alternative)

## 6. TARTIŞMA VE SONUÇ (DISCUSSION AND CONCLUSION)

Ömrünü tamamlamış lastik miktarının artması, deponi alanlarında depolanamaması ve geri dönüşüm sektöründe önemli bir hammadde ve enerji kaynağı olarak düşünülmesi, bu atıklara ekonomik, sosyal ve çevresel bir yönetim anlayışının getirilmesini gerekli kılmıştır. Bu çalışmada ÖTL yönetiminde uygulanan geri dönüşüm, alternatif yakıt olarak kullanma ve piroliz alternatifleri ele alınarak, PROMETHEE yöntemi ile ülkemiz için uygun olabilecek alternatif yöntem belirlenmiştir. Yöntemin belirlenmesinde çevresel etki, işletme riski, kurulum maliyeti, çıkan ürün çeşitliliği, Türkiye’de uygulanabilirliği ve işletme maliyeti kriterleri dikkate alınmıştır. Karar vericilerin her bir alternatif için kriterler dahilinde verdikleri yanıtlar bulanık hale getirilip ortalamaları alınarak durulaştırılmıştır. Visual PROMETHEE programı ile çözümlenme sonrası aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

-PROMETHEE I analizinde hem PROMETHEE hem de bulanık PROMETHEE çözümlemesinde pozitif akımlar ile geri dönüşüm ve alternatif yakıt olarak kullanma alternatiflerinin pozitif üstünlük gösterdikleri, negatif akım skalasında ise geri dönüşüm prosesinin diğer iki alternatiften uzaklaşarak daha tercih edilebilir olduğu görülmüştür.

-PROMETHEE II analizi ile geri dönüşüm alternatifinin diğer alternatiflerden çok daha fazla tercih edilebilir olduğu görülmüştür. PROMETHEE ve bulanık PROMETHEE ile alternatiflerin PROMETHEE I kısmı ve PROMETHEE II net sıralamaları aynı olduğu belirlenmiştir. Ancak bulanık PROMETHEE ile gerçekleştirilen analizlerde alternatif sıralamalarının birbirine çok daha yakın olduğu görülmektedir.

\*Bulanık PROMETHEE ile gerçekleştirilen GAIA analizinden en uygun alternatif olan geri dönüşüm alternatifinin seçilmesinde en çok “Türkiye’de uygulanabilirlik” kriterinin etkili olduğu ortaya çıkmıştır.

\*PROMETHEE Rainbow analizi ile alternatif seçimlerinin hangi kriterler ile tercih edilebilir (pozitif yönde etki) hangi kriterler ile tercih edilemez (negatif yönde etki) durumunda oldukları belirlenmiştir. PROMETHEE ile elde edilen sonuçlara göre geri dönüşüm alternatifini hiçbir kriter negatif yönde etkilememiştir. Alternatif yakıt olarak kullanım alternatifi için ise çevresel etki ve çıkan ürün çeşitliliği kriterleri negatif etki göstermiştir. Piroliz alternatifi için ise çıkan ürün çeşitliliği kriteri dışındaki bütün kriterler bu seçim için negatif etki göstermiştir. Bulanık PROMETHEE ile ise farklı olarak en uygun alternatif olan geri dönüşüm prosesinin seçilmesinde kurulum maliyetinin negatif yönde etki ettiği, diğer kriterlerin tümünün seçim işlemi pozitif yönde etkilediği belirlenmiştir. Alternatif yakıt olarak kullanım alternatifinin seçimini işletme riski, çevresel etki ve çıkan ürün çeşitliliği kriterleri negatif yönde etkilerken, kurulum ve işletme maliyeti ile Türkiye’de uygulanabilirlik kriterleri pozitif yönde etkilemiştir.

Piroliz yönteminin seçimini ise sadece çıkan ürün çeşitliliği kriteri pozitif yönde etkilemiş ve diğer tüm kriterler negatif yönde etki etmiştir.

\*GAIA Web analizinde geri dönüşüm prosesinin uygun olduğunu destekler nitelikte sonuçlar elde edilmiştir.

Sonuç olarak ÖTL yönetiminde belirlenen kriterler dahilinde her kriterin eşit ağırlıkta değerlendirildiği varsayıldığında geri dönüşüm işleminin tercih edilmesinin doğru olacağı belirlenmiştir.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Herrera-Sosa E.S, Martínez-Barrera G., Barrera-Díaz C., Cruz-Zaragoza E., Ureña-Núñez F. “Recovery and modification of waste tire particles and their use as reinforcements of concrete”. *International Journal of Polymer Science*, (2015):8, (2015).
- [2] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin (ÖTL) Kontrolü Yönetmeliği. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/editor/dosya/OmrTamLastKontYonSonHali2.docx>. Yayın tarihi: 25 Kasım 2006. Erişim tarihi: 15 Mayıs 2019.
- [3] Symeonides D., Loizia P., Zorpas A.A. “Tire waste management system in cyprus in the framework of circular economy strategy”. *Environmental Science and Pollution Research*, (1):1-16, (2019).
- [4] Shalaby A., Khan R.A. “Design of unsurfaced roads constructed with large-size Shredded Rubber Tires: A Case Study”. *Resources, Conservation and Recycling*, (44): 318-332, (2015).
- [5] Yakaboylu O. “Atık lastik yönetimi ve atık lastik prolizi model tesisi için yapılabirlik çalışması”, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2010).
- [6] The Council of the European Union, Council Directive on The Landfill of Waste 1999/31/EC. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex:31999L0031>. Yayınlanma tarihi: 26 Nisan 1999. Erişim tarihi: 18 Mayıs 2019.
- [7] Karabörk F., Akdemir A. “Atık taşı lastiklerinin devulkanizasyonla geri kazanımı”. *Tasit Teknolojileri Elektronik Dergisi*, (3):21-35, (2011).
- [8] Eryılmaz H., Demirarslan K.O. “Ömrünü tamamlamış lastiklerin (ÖTL) sınıflandırılarak geri dönüşümünün araştırılması”. *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*, 2(1): 50-56, (2019).
- [9] Karabörk F., Akdemir A. “Atık taşı lastiklerinin parçalanması ve lastik tozunun karakterizasyonu”. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, (29): 29-40, (2012).
- [10] Lasder Lastik Sanayicileri Derneği. <http://www.lasder.org.tr/> (Erişim Tarihi: 15.05.2019).



- [11] Abbaspour M., Aflaki E., Nejad F.M. "Reuse of waste tire textile fibers as soil reinforcement". *Journal of Cleaner Production*, (207): 1059-1071, (2019).
- [12] Anonim. <https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/hurda-178-bin-133-ton-lastik-geri-kazandirildi/1410346>. Yayınlanma Tarihi: 06 Mayıs 2019. Erişim Tarihi: 5 Eylül 2019.
- [13] Zhang X., Li H., Cao Q., Jin L., Wang F. "Upgrading pyrolytic residue from waste tires to commercial carbon black". *Waste Management & Research*, (36): 436-444, (2018).
- [14] Evans A., Evans R. "The composition of a tyre: typical components. *The Waste & Resources Action Programme*. UK, (2006).
- [15] UNEP, Basel Convention, Revised Technical Guidelines on Environmentally Sound Management of Used Tires. <http://www.basel.int/Portals/4/download.aspx?d=UNEP-CHW-OEWG-6-INF-6.English.pdf>. Yayınlanma tarihi: 3 Haziran 2007. Erişim Tarihi: 10 Mayıs 2019. Bazel, İsviçre.
- [16] Adhikari B., De D., Maiti S. "Reclamation and recycling of waste rubber". *Progress in Polymer Science*, (25): 909-948, (2000)
- [17] Karabörk F. "Atık araç tekerlek lastiklerinde mikrodalga devulkanizasyon parametrelerinin lastiğin mekanik özelliklerine etkileri. *Doktora Tezi*, Selçuk Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, (2012).
- [18] Czajczyńska D., Krzyżyńska R., Jouhara H., Spencer N. "Use of pyrolytic gas from waste tire as a fuel: a review". *Energy*, (134):1121-1131, (2017).
- [19] Smelik R., Vilamová Š., Chuchrová K., Kozel R., Király A., Levit A., Gajda J. "complex processing of rubber waste through energy recovery". *Acta Montanistica Slovaca*, (20): 290-297, (2015).
- [20] Tsai W.T., Chen C.C., Lin Y.Q., Hsiao C.F., Tsai C.H., Hsieh M.H. "status of waste tires' recycling for material and energy resources in taiwan". *Journal of Material Cycles and Waste Management*, (19): 1288-1294, 2017.
- [21] Anonim. Atık Yağların Kontrolü Yönetmeliği. <http://www.mevzuat.gov.tr/Metin.Aspx?MevzuatKod=7.5.12290&MevzuatIliski=0&sourceXmlSearch=at%20C4%20B1k%20ya%20C4%20Flar>. Yayınlanma Tarihi: 21 Ocak 2004. Erişim Tarihi: 22 Mayıs 2019.
- [22] Derakhshan Z., Ghaneiana T.M., Mahvib H.A., Contid O.G., Faramarziane M., Dehghanif M., Ferranted M. "A new recycling technique for the waste tires reuse". *Environmental Research*, (158): 462-469,(2017).
- [23] Rowhani A., Rainey T., "Scrap tyre management pathways and their use as a fuel—a review". *Energies*, (9): 888, (2016).
- [24] Migas, P., Baron J. "Emission parameters on the example of burning rubber waste, coal and biomass". *Przemysł Chemiczny*, (97): 629-632, (2018).
- [25] Conesa J.A., Font R., Fullana A., Martín-Gullón I., Aracil I., Gálvez A., Moltó J., Gómez-Rico M.F. "Comparison between emissions from the pyrolysis and combustion of different wastes". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, (84): 95-102, (2009).
- [26] Gul M., Celik E., Taskin Gumus A., Guneri A.F. "A fuzzy logic based promethee method for material selection problems". *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, (7): 68-79, (2018).
- [27] Brans J.P., Vincke Ph., Mareschal B. "How to select and how to rank projects: the promethee method". *European Journal of Operational Research*, (24): 228-238, 1986.
- [28] Tuzkaya G., Gülsün B., Kahraman C., Özgen D. "An Integrated fuzzy multi-criteria decision making methodology for material handling equipment selection problem and an application". *Expert Systems with Applications*, (37): 2853-2863, (2010).
- [29] Behzadian M., Kazemzadeh R.B., Albadvi A., Aghdasi M. "PROMETHEE: a comprehensive literature review on methodologies and applications". *European Journal of Operational Research*, (200):198-215, (2010).
- [30] Genç T. "PROMETHEE yöntemi ve GAIA düzlemi". *Afyon Kocatepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, (15): 133-154, (2013)
- [31] Şenkayas H., Hekimoğlu H. "Çok kriterli tedarikçi seçimi problemine promethee yöntemi uygulaması". *Verimlilik Dergisi*, (2): 63-80,(2013)
- [32] Li R.J. "Fuzzy method in group decision making". *Computers & Mathematics with Applications*, (38): 91-101, 1999.
- [33] Elizabeth S., Sujatha L. "Project scheduling method using triangular intuitionistic fuzzy numbers and triangular fuzzy numbers". *Applied Mathematical Sciences*, (9): 185-198, (2015).
- [34] Güney, C. "Visual PROMETHEE ile yatırımcılar açısından sektörlerin değerlendirilmesi". *TURAN-SAM Uluslararası Bilimsel Hakemli Dergisi*, (9): 1308-8041, (2017).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Göçme yükü etkisindeki köprü kemerlerinin yapısal davranışı

## *The structural behavior of bridge arches under collapse load*

Yazar(lar) (Author(s)): Gökhan Barış SAKCALI<sup>1</sup>, Alper GÖNÜL<sup>2</sup>, İsmail Enes PARLAK<sup>3</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-9906-0641

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-8257-3026

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0002-0694-9220

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Sakcalı G.B., Gönül A. ve Parlak İ.E., “Göçme yükü etkisindeki köprü kemerlerinin yapısal davranışı”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 929-939, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.633173

# Göçme Yüğü Etkisindeki Köprü Kemerlerinin Yapısal Davranışı

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Gökhan Barış SAKCALI<sup>1\*</sup>, Alper GÖNÜL<sup>2</sup>, İsmail Enes PARLAK<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bursa Teknik Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Bursa Teknik Üniversitesi, Türkiye

<sup>3</sup>Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bursa Teknik Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 15.10.2019 ; Kabul/Accepted : 28.01.2020)

## ÖZ

Osmanlı İmparatorluğu Klasik Döneminin önde gelen mimarlarından Mimar Sinan tarafından tasarımı yapılan köprülerin birçoğu, kullanılan malzeme ve yapım tekniklerine bağlı olarak günümüzde varlıklarını sürdürmektedir. Bu köprülerde genellikle kemer formlarının tercih edilmesinin sebebi çekme dayanımı düşük doğal malzemelerden inşa edilmesidir. Çalışmada, Mimar Sinan tarafından tasarlanan 10 köprü ve bu köprülerde bulunan 48 kemer yapısı üzerinde istatistiksel bir değerlendirme yapılmıştır. Bu değerlendirmeye bağlı olarak açıklığı ve yüksekliği farklı 25 kemer sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiştir. Bu kemer yapılarının mafsallaşma durumları, göçme yükü, maksimum yerdeğiştirmesi, sünekliliği, enerji tüketme kapasitesi incelenmiş ve regresyon analizi yapılmıştır. Çalışma sonucunda, incelenen köprü kemerleri için maksimum yerdeğiştirmeyi ve göçme yükünü veren bağıntılar önerilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Mimar Sinan, köprü kemeri, sonlu elemanlar yöntemi, regresyon analizi.

## The Structural Behavior of Bridge Arches Under Collapse Load

### ABSTRACT

Many of the bridges designed by Mimar Sinan, the leading architect of the Classical Ottoman Period, has continued to exist today thanks to their materials and construction techniques. The reason that arch forms are generally preferred on these bridges is that they are constructed from natural materials with low tensile strength. In the study, 10 bridges and 48 arches in these bridges designed by Mimar Sinan were analysed statistically. Depending on this analysis, 25 arches with varying lengths and heights were modeled by finite element method. For these arches; hinge conditions, collapse loads, maximum displacements, ductility and energy dissipation capacities were examined and regression analyses were performed. Equations have been proposed which gives maximum displacement and collapse load for examined arches.

**Keywords:** Mimar Sinan, bridge arch, finite element method, regression analysis.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

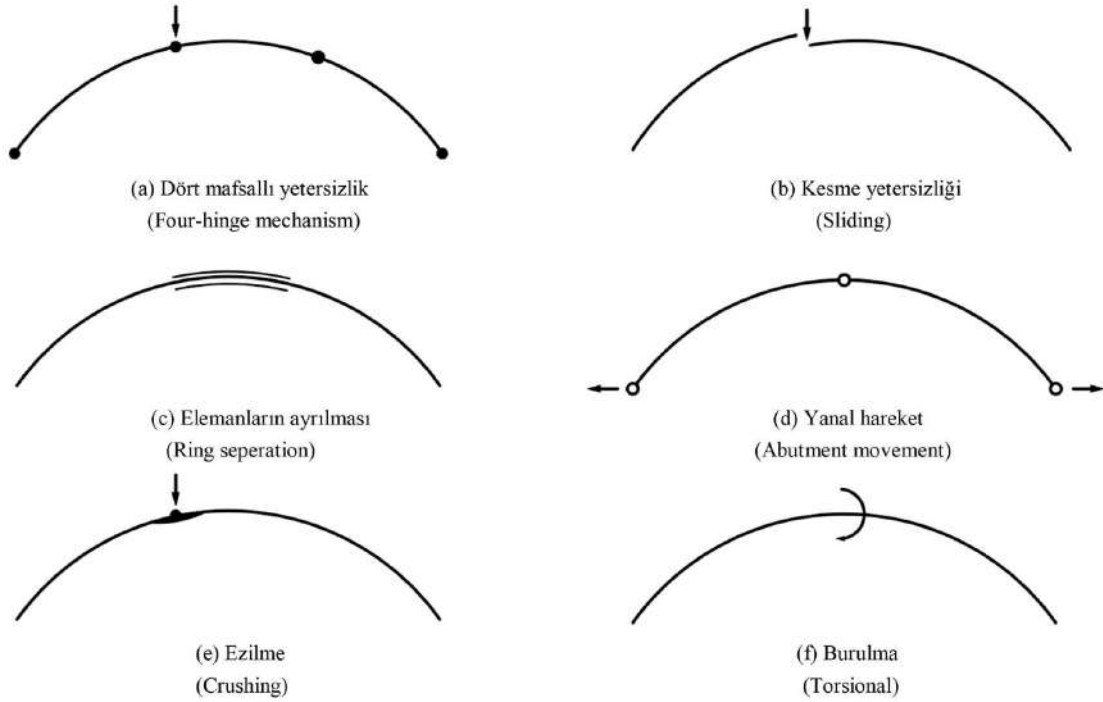
Osmanlı döneminde inşa edilen yığma köprülerde rastlanan en yaygın yapı formu köprü kemerleridir. Kemerli yığma köprüler yüksek taşıma gücüne ve sünekliliğe sahiptir [1-3]. Osmanlı Döneminde kemer ve kubbe öğelerinin kullanımı Mimar Sinan zamanında gerçekleştirilmiştir. Mimar Sinan köprülerinin proje çizimlerine tarihsel süreçte rastlanmamış olsa da Tezkiretu-ül Bünyan ve Tezkiretu-ül Ebniye’de Mimar Sinan tarafından tasarımı yapılan 10 adet kemerli köprüden bahsedilmektedir. Çalışma kapsamında incelenen bu köprülerden Kanuni Sultan Süleyman Köprüsü, Lüleburgaz Sokullu Mehmet Paşa Köprüsü, Büyükçekmece Köprüleri (4 adet), Alpullu Köprüsü, Drina Köprüsü, Kapuağası Köprüsü, Edirne Kanuni Sultan Süleyman Köprüsü ve bu köprülere ait kemerler ele alınarak; köprü kemerlerinin yükseklik, açıklık, ge-

nişlik ve kalınlık parametrelerine yönelik istatistiki bir değerlendirme yapılmıştır.

Literatürde, yapıların nihai yük kapasitesi üzerine gerçekleştirilen çalışmalarda yapısal değerlendirme metodlarından ilki malzemenin elastik olduğu kabulüne dayanırken, sonraki yıllarda malzeme ve geometrinin doğrusal olmayan davranışını göz önünde bulunduran plastik analiz yaklaşımı kullanılarak, yapısal davranış gerçeğe daha yakın elde edilebilmiştir.

Gerçek ölçekli yığma yapıların deneysel testinde altı farklı göçme mekanizması tespit eden çalışmalar bulunmaktadır. Bu göçme mekanizmaları; dört mafsallı yetersizlik, kesme yetersizliği, elemanların birbirinden ayrılması, yanal hareket, ezilme ve burulmadan meydana gelen yetersizlikler olarak sıralanabilir (Şekil 1) [4-6]. Bu göçme mekanizma durumlarından en yaygını dört mafsallı yetersizlik mekanizmasıdır.

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : gokhan.sakcali@btu.edu.tr



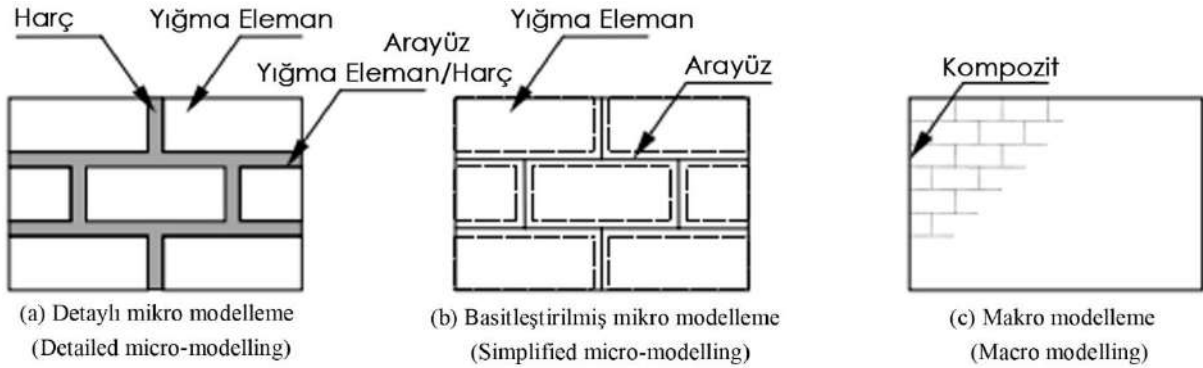
Şekil 1: Yığma kemerler için göçme modları (Failure modes for masonry arches)

## 2. YÖNTEM (METHOD)

Tarihi yığma yapılarda modelleme bir, iki ve üç boyutlu olmak üzere gerçekleştirilebilir. Yığma yapılarda modelleme bir boyutlu yaklaşım ile başlamıştır. Bu yaklaşımın, malzemenin elastik şekil değiştirme bölgesinde kaldığı sürece doğru sonuçlar verdiği; fakat malzemenin plastik şekil değiştirme bölgesinde (çatlaklar oluşuktan sonra) gerilme dağılımının gerçeği yansıtmadığı yapılan çalışmalarda görülmüştür [7]. Çatlaklar oluşuktan sonraki gerilme dağılımında daha doğru sonuçlar elde edebilmek için iki boyutlu modelleme yaklaşımı kullanılmaya başlanmıştır. Ancak bu modelleme yaklaşımı asimetrik kemer ve köprülerde göçme mekanizmasının tayininde gerçekçi sonuçlar vermemiştir [8]. Bu nedenle göçme mekanizması tayininde daha gerçekçi yöntem olan üç boyutlu modelleme yaklaşımı benimsenmiştir. Bu nedenlere

bağlı olarak sunulan çalışmada üç boyutlu modelleme yaklaşımı kullanılmıştır.

Yığma yapıların modellenmesinde genel olarak üç farklı modelleme tekniği kullanılmaktadır (Şekil 2). Mikro modelleme tekniğinde bağlayıcı ile taş ya da tuğla malzeme ayrı ayrı modellenmektedir (Şekil 2a). Bu modelleme tekniğinde malzemelerin mekanik özellikleri birbirinden bağımsız ve tam olarak tanımlandığı için sistem davranışını oldukça gerçekçi yansıtır. Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniğinde tuğla kalınlıkları harç kalınlığının yarısı kadar uzatılır ve sonlu elemanlar ağı arasına arayüz elemanları kullanılarak modellenir (Şekil 2b). Ancak büyük ölçekli yapılarda bu tip modelleme büyük hesap yükü ve zaman gerektirir. Bu nedenle, yapının bütünsel olarak değerlendirildiği çalışmalarda makro modelleme yöntemi tercih edilmektedir (Şekil 2c). Malzemelerin mekanik



Şekil 2. Yığma yapılar için modelleme yöntemleri (Modelling strategies for masonry structures) [9].



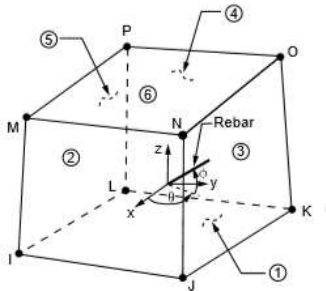
özellikleri ve sınır şartları doğru tanımlandığında, makro modelin de mikro model kadar gerçeğe yakın sonuçlar verdiği deneysel incelemeler sonucunda kanıtlanmıştır. Bunun yanı sıra, makro modelleme tekniğinin analiz süresini ciddi derecede azalttığı görülmüştür [10]. Çalışmada analiz süresini kısaltmak amacıyla makro modelleme yöntemi kullanılmıştır.

Yığma yapılar genelde ayırık elemanlar veya sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmektedir. Bu yöntemlerden sonlu elemanlar yöntemi yapısal veya yapısal olmayan fiziksel bir sistemi, matematiksel bir denklemle dönüştürerek yaklaşık çözümü vermektedir. Bu yöntem kullanılırken analiz tipi, malzeme özellikleri, model geometrisi, sınır şartları ve yüklerin tanımlanmasının yanı sıra; eleman tipi ve eleman sayısının doğru seçilmesi, analizlerin doğruya yakın elde edilmesinde büyük öneme sahiptir.

Sonlu elemanlar yönteminde statik analizler için Denklem 1 kullanılmaktadır [11]. Denklemde yer alan [K] elemanın ya da sistemin geometrik özelliklerine bağlı oluşturulan rijitlik matrisini, [R] elemanın veya sistemin yük vektörünü; [D] ise yük vektörüne ve rijitlik matrisine bağlı olarak elde edilen deplasman vektörüne karşılık gelmektedir. Elde edilen deplasman değerlerine bağlı olarak elemandaki gerilmeler, kuvvetler ve sistemde istenilen diğer veriler bulunabilir.

$$[K].[D]=[R] \quad (1)$$

Sonlu elemanlar yönteminde katı cisimlerde dörtyüzlü (tetrahedral) ve altıyüzlü (hexahedral) olmak üzere iki tip ağ (mesh) tipi kullanılmaktadır [11]. Her iki eleman tipi aynı serbestlik derecesine sahip olması sebebiyle, dörtyüzlü eleman tipi karmaşık geometriler için daha uygunken, altıyüzlü eleman tipinde dörtyüzlü eleman tipine oranla eleman sayısı önemli derecede düşmekte ve daha doğru sonuçlar vermektedir. Bu nedene bağlı olarak çalışmada altıyüzlü mesh eleman tipi kullanılmıştır.



Şekil 3. Solid65 eleman tipi (Solid65 element type) [12].

Çalışma kapsamında Ansys [12] sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Sistemin modellenmesinde kullanılan Solid65 eleman tipi sekiz düğümden oluşmakta ve her bir düğümden üç serbestlik derecesine sahiptir (Şekil 3). Ayrıca bu eleman tipinde betonun doğrusal olmayan malzeme modelini dikkate alabilmek için Williams ve Warnke [13] tarafından geliştirilen üç parametrelili beton modeli kullanılmaktadır. Bu eleman modelinde doğrusal olmayan malzeme modeli kullanabilmek için, basınç bölgesinde oluşan ezilmeler

ve çekme bölgesinde oluşan çatlaklar birlikte dikkate alınabilir. Betonun doğrusal olmayan malzeme modelini dikkate alabilmek için dört farklı sabit tanımlanmaktadır. Bunlardan ilk ikisi 0 ile 1 arasında değişen açık ve kapalı çatlak kayma gerilmesi aktarım katsayılarıdır. Pürüzsüz bir çatlak istenmesi durumunda kayma çatlakları aktarım katsayısı 0 ve tam kayma aktarımı istendiği zaman 1 kullanılabilir. Çalışmada, sayısal modelde stabiliteyi sağlamak amacıyla bu katsayılar 0.01 alınmıştır [14].

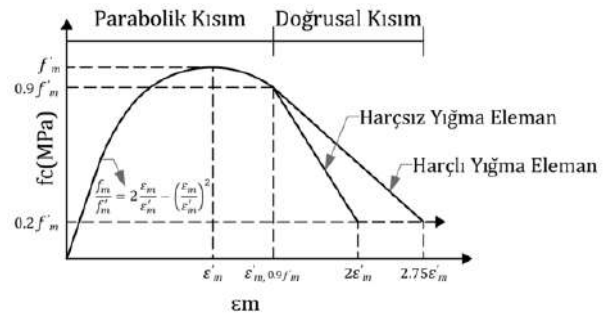
Mimar Sinan tarafından tasarlanan köprü kemerlerinin inşasında genellikle küfeki taşı tercih edilmiştir. Bunun sebebi malzemenin temininin kolay olmasının yanı sıra küfeki taşın kolay işlenebilir olmasıdır. İki küfeki taşı arasına ince bir harç tabakası ilave edilerek küfeki taşlarının birlikte hareket etmesi sağlanabilir. Çalışmada kullanılan küfeki taşının tek eksenli basınç dayanımı 32 MPa alınırken, harcın eksenel basınç dayanımı 1.24 MPa olarak alınmıştır [15].

$$f_c = f_b^{0.65} f_m^{0.25} \quad (2)$$

$$Y_c = Y_b V_B + Y_m V_m \quad (3)$$

$$v_c = v_b V_B + v_m V_m \quad (4)$$

Yığma yapılar taş ve harcın bir araya gelmesiyle meydana gelen kompozit bir malzemedir. Bu tip kompozit malzemeler homojenleştirme tekniği kullanımıyla bir araya getirilerek malzeme özellikleri birleştirilebilir. Yığma yapıların basınç dayanımının homojenleştirilmesinde Denklem 2'de verilen eşitlik kullanılmıştır. Burada;  $f_c$  homojenleştirilmiş yığma elemanın basınç dayanımını,  $f_b$  taş veya tuğla malzemesinin basınç dayanımını ve  $f_m$  harç malzemesinin basınç dayanımını temsil etmektedir [16]. Beton, taş ve tuğla gibi gevrek malzemelerin basınç dayanımı yüksek; çekme dayanımı düşük olması nedeniyle, çekme dayanımları oldukça düşük alınabilir veya ihmal edilebilir. Çalışmada, yığma elemanın çekme dayanımı, basınç dayanımının %10'u olarak alınmıştır [17,18]. Homojenize edilmiş malzemenin poisson oranı ve yoğunluğu sırasıyla Denklem 3 ve Denklem 4 kullanılarak hesaplanmıştır. Burada;  $Y$ ,  $v$  ve  $V$  sırasıyla yoğunluk, poisson oranı ve hacimsel orana karşılık gelirken  $c$ ,  $b$  ve  $m$  sırasıyla homojenleştirilmiş malzeme, taş malzeme ve harç malzemesi olarak tanımlanmaktadır [19].



Şekil 4. Yığma yapılar için idealleştirilmiş gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi (Idealized stress-strain relationship for masonry structures)[20].

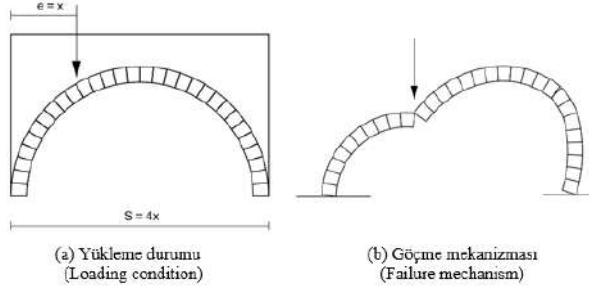
$$C_j = \frac{0.27}{f_m^{0.25}} \quad (5)$$

$$\varepsilon'_c = C_j \frac{f'_c}{E_c} \quad (6)$$

$$\frac{f_c}{f'_c} = 2 \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} \right)^2 \quad (7)$$

Yığılma yapılarında malzemenin gerilme ve birim şekil değiştirme eğrisi ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ) Denklem 7'de verilen bağıntıdan elde edilebilir (Şekil 4). Birim şekil değiştirme değeri Denklem 5 ve Denklem 6'da verilen denklemlerden elde edilebilir [20]. Ayrıca, Denklem 6'da  $E_m=1000f_c$  alınabilir [21]. Denklem 5-7'de  $C_j$  harcın gerilme değerine bağlı bir faktörü ve  $\varepsilon_c$  yığılma malzemesinin birim şekil değiştirme değerini ifade etmektedir.

Sistemin taşıyabileceği kritik yükün belirlenmesi sistemin toplam açıklığının 1/4'ü ya da 1/3'üne etki etmesiyle bulunabileceği, yapılan deneysel çalışmalarca saptanmıştır. Bu çalışmada, sistem kritik yükünün belirlenmesi toplam açıklığın 1/4'üne etki ettiği öngörülerek gerçekleştirilmiştir. Şekil 5' de sisteme etkileyen kritik yük ve sistem kırılma şekli verilmiştir.



Şekil 5. Kemer yapısı (Arch structure)

Sonraki aşamada, modeldeki veriler kullanılarak çoklu regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon analizi neticesinde değişkenler arasındaki ilişkiyi bir fonksiyon ile açıklamak ve bu ilişkiyi bir model yardımıyla tanımlayabilmek amaçlanmaktadır. İki değişken arasındaki ilişki Denklem 8 ile ifade edilir.

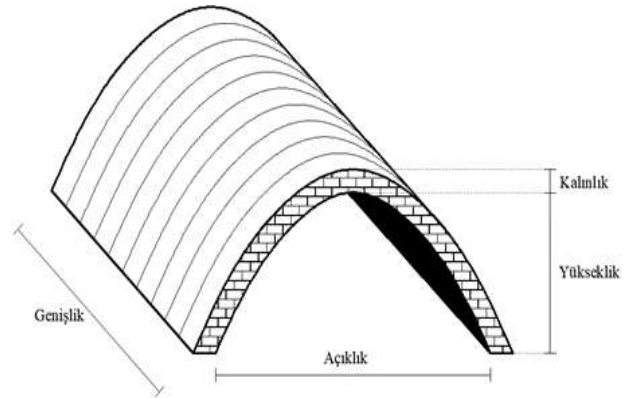
$$Y = \beta_0 + \beta_1 x \pm \varepsilon \quad (8)$$

Burada  $x$  bağımsız değişkeni,  $Y$  bağımlı değişkeni,  $\beta$  terimleri modelin katsayılarını ve  $\varepsilon$  terimi hatayı göstermektedir. Bu denklem ile  $Y$  bağımlı değişkeninin,  $x$  bağımsız değişkeninin belli bir düzeyi için alabileceği sonuç  $\varepsilon$  kadar bir hata ile modellenilebilir [22]. Basit doğrusal regresyonda tek bir bağımsız değişken varken çoklu regresyonda bağımsız değişkenlerin sayısı birden fazladır. Bu durum çoklu regresyon denklemleri olarak bilinen Denklem 9 ile ifade edilebilir. Denklem 9 gibi denklemler çoklu regresyon denklemleri olarak kullanılır [22, 23]. Denklem 8 ve 9' da yer alan  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$  parametreleri en küçük kareler yöntemi ile elde edilebilmektedir.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n \pm \varepsilon \quad (9)$$

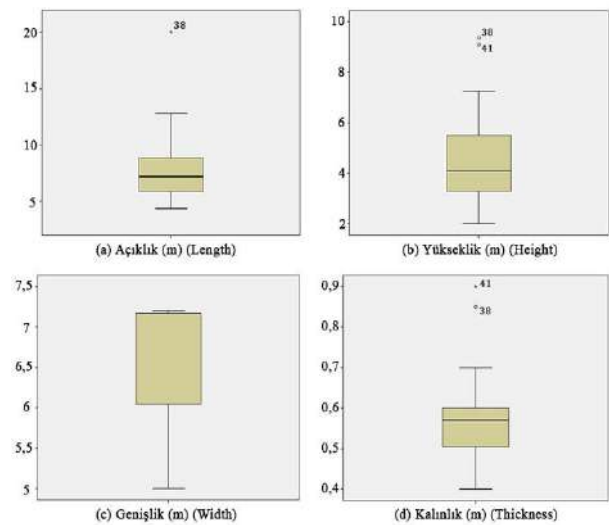
### 3. KÖPRÜ KEMERLERİ VE MALZEME ÖZELLİKLERİ (BRIDGE ARCHES AND MATERIAL PROPERTIES)

Çalışmada; açıklık kemer yapısının net açıklığını, yükseklik kemer yapısının net yüksekliğini, kalınlık kemer yapısında kullanılan duvar malzemesinin et kalınlığını ve genişlik ise kemer yapısının uzunluğunu ifade etmektedir (Şekil 6). Çalışmada, Mimar Sinan tarafından tasarlanan 10 tarihi köprüde bulunan 48 adet kemer yapısı incelenmiştir (Tablo 1). Bu köprü kemerleri üzerine SPSS [24] yazılımı kullanılarak bir istatistiksel çalışma yapılmış ve kutu grafikleri elde edilmiştir (Şekil 7).



Şekil 6. Kemer geometrisi (Arch geometry)

Mimar Sinan tarafından tasarlanan köprü kemerlerinde yapılan istatistiksel çalışma sonucunda kemer açıklığı, yüksekliği, kalınlığı ve genişliği sırasıyla 5.825 ile 8.875 m, 3.3 ile 5.6 m, 0.5 ile 0.6 m ve 6.05 ile 7.17 m aralıklarında olduğu belirlenmiştir (Şekil 7). İstatistiksel çalışma sonucunda kalınlık 0.55 m ve genişlik 6.5 m olarak seçilmiştir. Buna karşın, kemer açıklığı ve yüksekliği değişken olarak seçilmiştir.



Şekil 7. Köprü kemer boyutları üzerine yapılan istatistiksel kutu grafikleri (Statistical box plots for the arch dimensions)

Çalışmadaki analitik modellerin etkinliğini belirlemek amacıyla, İngiltere’de göçme deneyi yapılan Prestwood köprüsünün sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve karşılaştırılmıştır. Deney sonucunda göçme yükü 228 kN

olarak belirlenirken, oluşturulan sonlu elemanlar modelinde göçme yükü 224.6 kN olarak belirlenmiştir. Oluşturulan deneysel model ile sonlu elemanlar modeli arasında %1.5’lik bir fark olduğu gözlemlenmiştir [2].

**Tablo 1.** Mimar Sinan tarafından tasarlanan tarihi köprü kemerleri (Historical bridge arches designed by Mimar Sinan) [25,26]

Köprü No	Köprü Adı	Köprü No	Şehir	Yükseklik (m)	Açıklık (m)	Genişlik (m)	Kalınlık (m)
1	Kanuni Sultan Süleyman Köprüsü	1	Gebze	3.65	9.70	6.05	0.45
		2		2.00	6.35	6.05	0.40
		3		2.30	6.30	6.05	0.40
2	Lüleburgaz Sokullu Mehmet Paşa Köprüsü	4	Edirne	3.70	6.70	6.05	0.60
		5		4.50	8.80	6.05	0.60
		6		4.30	8.90	6.05	0.60
		7		3.80	6.60	6.05	0.60
		8		4.25	6.05	7.17	0.50
		9		5.20	7.30	7.17	0.60
		10		5.80	9.10	7.17	0.60
3	Büyükdemece Köprüsü 1	11	İstanbul	6.20	10.30	7.17	0.65
		12		6.95	11.40	7.17	0.60
		13		6.25	10.30	7.17	0.55
		14		5.70	8.95	7.17	0.55
		15		5.15	7.40	7.17	0.52
		16		4.30	6.15	7.17	0.58
4	Büyükdemece Köprüsü 2	17	İstanbul	3.30	5.40	7.17	0.62
		18		4.25	6.60	7.17	0.55
		19		4.80	8.15	7.17	0.62
		20		5.30	9.20	7.17	0.63
		21		4.75	8.05	7.17	0.58
		22		4.05	6.75	7.17	0.60
		23		3.50	5.50	7.17	0.49
		24		2.95	4.85	7.17	0.50
5	Büyükdemece Köprüsü 3	25	İstanbul	3.30	5.30	7.17	0.52
		26		4.15	6.65	7.17	0.56
		27		3.30	5.30	7.17	0.52
		28		3.10	4.85	7.17	0.51
		29		3.10	4.45	7.17	0.53
6	Büyükdemece Köprüsü 4	30	İstanbul	3.37	5.44	7.17	0.55
		31		3.42	5.47	7.17	0.60
		32		4.30	7.00	7.17	0.60
		33		3.95	5.75	7.17	0.53
		34		3.55	5.25	7.17	0.52
		35		3.20	4.35	7.17	0.42
		36		3.25	7.10	5.94	0.70
7	Alayuntlu (Sokullu Mehmet Paşa) Köprüsü	37	Kırklareli (Babaeski)	6.35	12.80	5.94	0.70
		38		9.35	20.05	5.94	0.85
		39		6.15	12.60	5.94	0.65
		40		3.15	7.10	5.94	0.65
8	Değirli Köprüsü (Sokullu Mehmet Paşa Köprüsü)	41	Vişegrad	9.08	10.70	7.20	0.90
9	Kavuşmaz Köprüsü	42	Edirne (Havaçukçular)	6.10	7.40	6.10	0.58
		43		7.25	8.80	6.10	0.50
		44		6.10	7.40	6.10	0.58
		45		2.85	7.85	5.00	0.45
10	Edirne Kanuni Sultan Süleyman Köprüsü	46	Edirne	3.40	7.95	5.00	0.50
		47		3.50	8.25	5.00	0.50
		48		2.90	8.10	5.00	0.45

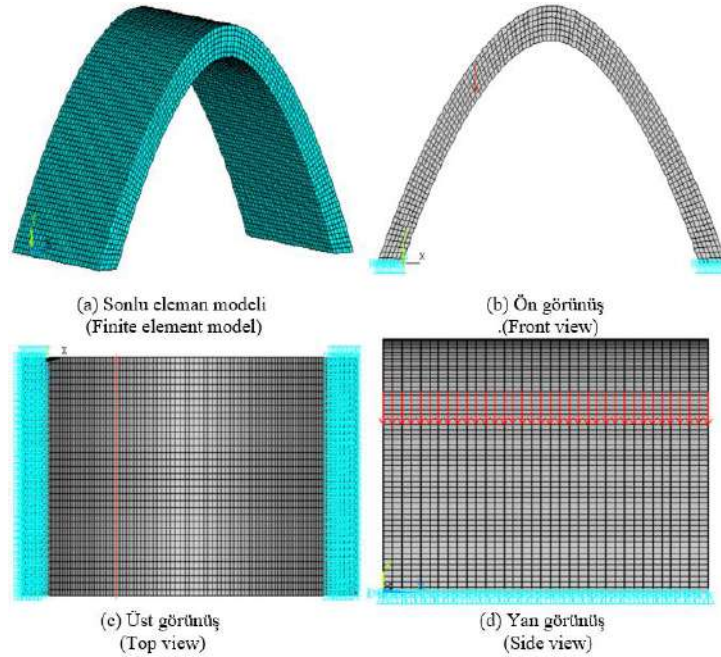
Hazırlanan köprü modelleri Tablo 2’ de verilmiştir.

**Tablo 2.** Model boyutları (Model dimensions)

Model	Açıklık (m)	Yükseklik (m)	Kalınlık (m)	Genişlik (m)
M1_L6xH3.5	6	3.5	0.55	6.5
M2_L6.5xH3.5	6.5	3.5	0.55	6.5
M3_L7xH3.5	7	3.5	0.55	6.5
M4_L7.5xH3.5	7.5	3.5	0.55	6.5
M5_L8xH3.5	8	3.5	0.55	6.5
M6_L6xH4	6	4	0.55	6.5
M7_L6.5xH4	6.5	4	0.55	6.5
M8_L7xH4	7	4	0.55	6.5
M9_L7.5xH4	7.5	4	0.55	6.5
M10_L8xH4	8	4	0.55	6.5
M11_L6xH4.5	6	4.5	0.55	6.5
M12_L6.5xH4.5	6.5	4.5	0.55	6.5
M13_L7xH4.5	7	4.5	0.55	6.5
M14_L7.5xH4.5	7.5	4.5	0.55	6.5
M15_L8xH4.5	8	4.5	0.55	6.5
M16_L6xH5	6	5	0.55	6.5
M17_L6.5xH5	6.5	5	0.55	6.5
M18_L7xH5	7	5	0.55	6.5
M19_L7.5xH5	7.5	5	0.55	6.5
M20_L8xH5	8	5	0.55	6.5
M21_L6xH5.5	6	5.5	0.55	6.5
M22_L6.5xH5.5	6.5	5.5	0.55	6.5
M23_L7xH5.5	7	5.5	0.55	6.5
M24_L7.5xH5.5	7.5	5.5	0.55	6.5
M25_L8xH5.5	8	5.5	0.55	6.5

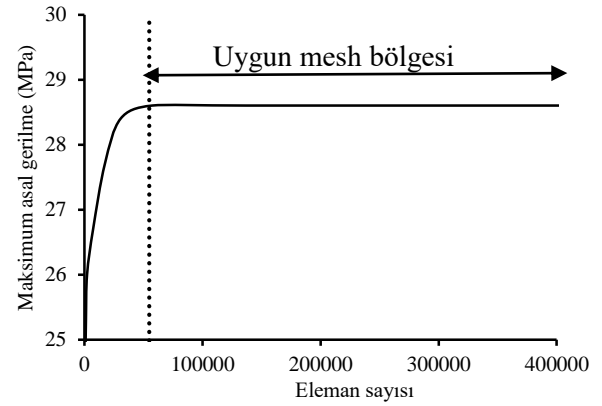
Mx: Model numarası, Lx: Kemer açıklığı, Hx: Kemer yüksekliği

M1\_L6xH3.5 modeline ait sonlu elemanlar modeli ile bu modele ait mesnet koşulları ve yükleme durumları Şekil 8’de verilmiştir. Mesnetler kemer yapısının alt bölgesine ankastre mesnet olarak tanımlanmıştır. Yükleme ise yapının 1/4’üne etki edecek şekilde yayı yük olarak kemer genişliği boyunca uygulanmıştır.



**Şekil 8.** M1\_L6xH3.5 durumu için model görselleri (Model images for M1\_L6xH3.5)

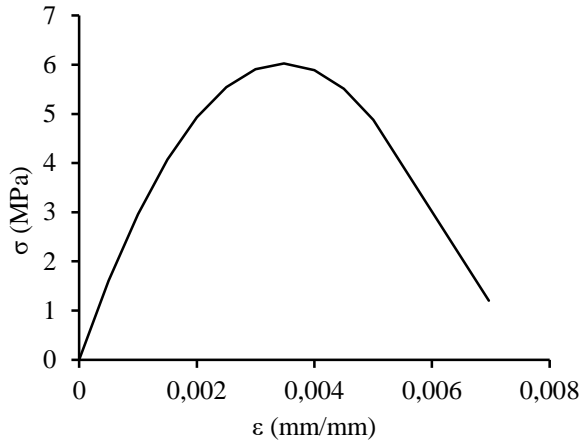
Her bir model için gerçekleştirilen yakınsama çalışması kapsamında kemer modellerinin dış yüzeyine 1 MPa basınç gerilmesi uygulanmış ve eleman sayısına bağlı asal gerilmelerdeki değişimler incelenmiştir. Böylece, her bir kemer modeli için ideal eleman sayısı belirlenmiştir. M25\_L8xH5.5 modeli için 55000 elemandan daha fazla eleman kullanılarak oluşturulan modellerde gerilmenin 28.6 MPa ile 28.7 MPa aralığında değiştiği gözlemlenmiştir (Şekil 9). Bu durum, modellerden elde edilen sonuçlarda hatanın yaklaşık %0.34 olacağını göstermiştir. Örnek olması amacıyla, M25\_L8xH5.5 durumu için eleman sayısı 61620 ve düğüm noktası 73458 seçilmiştir.



**Şekil 9.** M25\_L8xH5.5 durumu için yakınsama çalışması (Convergence study for M25\_L8xH5.5)



Köprü kemerlerinde kullanılan küfeki taşı ve harç malzemesi için homojenleştirme tekniği kullanılmış (Denklem 2-4) ve gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi belirlenmiştir (Denklem 5-7) (Şekil 10).



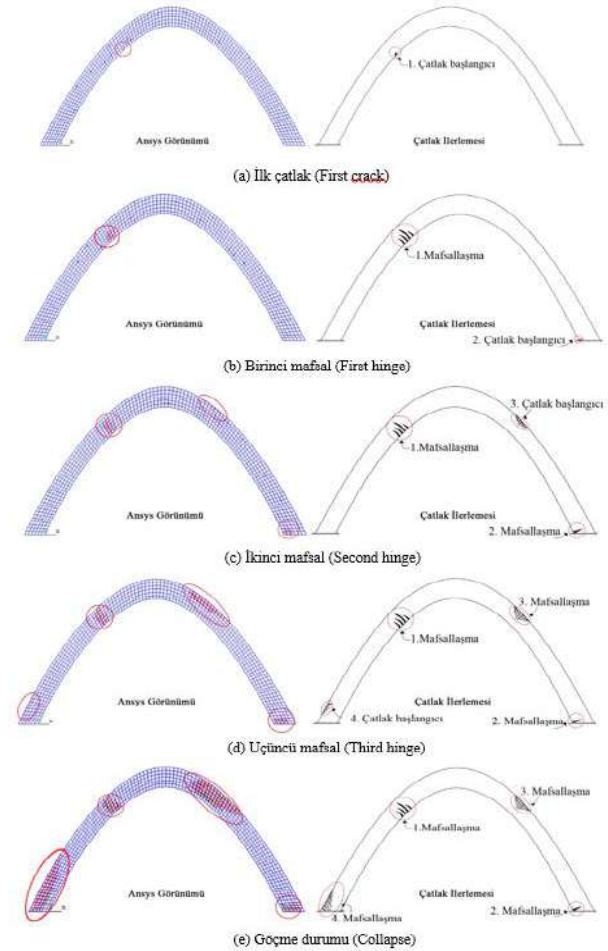
Şekil 10. Kemer yapılarında kullanılan malzemenin gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi (Stress-strain relationship of material used in arches)

#### 4. BULGULAR VE İSTATİSTİKSEL ÇALIŞMA (RESULTS AND STATISTICAL STUDY)

Çalışmada, sonlu elemanlar yöntemiyle modellenen boyutları farklı köprü kemerleri, göçme yüküne maruz bırakılmıştır. Bu kemerlerdeki; mafsallaşma durumları, göçme yükü ve yerdeğıştirmelerinde meydana gelen değışimler ile süneklik ve enerji tüketme kapasitelerinde meydana gelen değışimler incelenmiştir. Ayrıca, modellerde göçme yükü ve yerdeğıştirme için regresyon analizi yapılmıştır.

##### 4.1. Bulgular (Results)

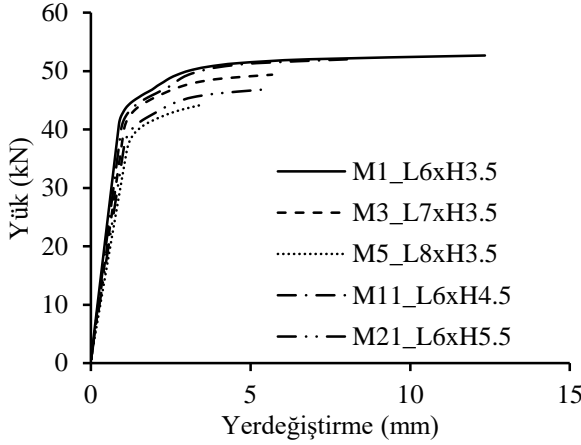
M1\_L6xH3.5 modeli için kemer yapılarında oluşan çatlak görünümleri ve çatlak ilerlemeleri Şekil 11'de verilmiştir. Kemerlerde ilk çatlakların, yüklemenin yapıldığı bölgede oluştuğu gözlenmiştir (Şekil 11a). Etkiyen yük arttıkça yapıda yüklemenin uygulandığı yerde çatlakların genişlediği, sonrasında ise mafsallaştığı gözlenmiştir. Bu mafsallaşma ile beraber sağ mesnet bölgesinde çatlaklar oluşmaya başlamıştır (Şekil 11b). Yükleme arttıkça sağ mesnette çatlakların arttığı, bu bölgenin mafsallaştığı ve yükleme bölgesinin simetriğinde çatlakların oluştuğu gözlenmiştir (Şekil 11c). İlerleyen adımlarda bu bölgede de mafsal oluştuğu ve sol mesnette çatlaklar meydana geldiği gözlenmiştir (Şekil 11d). Son aşamada, dördüncü mafsalın oluştuğu ve yapının göçme moduna geçtiği görülmüştür (Şekil 11e). Ayrıca, birinci ve ikinci mafsalın oluştuğu bölgelerde daha kalın ve uzun çatlakların meydana geldiği; buna karşın üçüncü ve dördüncü mafsalın oluştuğu bölgelerde çatlakların daha ince ve geniş alana yayıldığı görülmüştür.



Şekil 11. Kemer yapısında mafsal oluşumları (Hinge formations for arch)

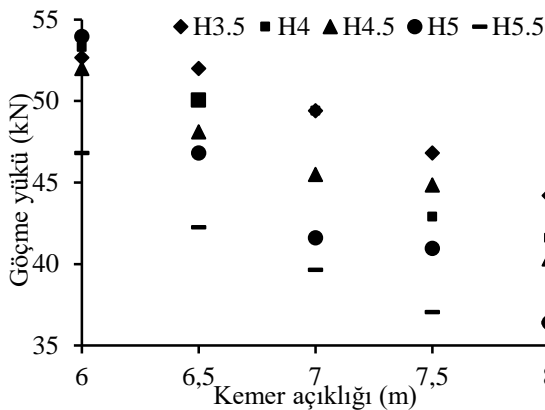
Modellerin statik analizi neticesinde elde edilen yük-yerdeğıştirme ilişkileri beş model için Şekil 12'de verilmektedir. Analizler sonucunda, M1\_L6xH3.5 durumunun yük taşıma kapasitesi ve maksimum yerdeğıştirme kapasitesinin M3\_L7xH3.5 ve M5\_L8xH3.5 durumlarının yük taşıma kapasitelerinden daha fazla olduğu gözlenmiştir. Bu üç durumdaki kemerlerin yüksekliği 3,5 m olmasına karşın açıklıkları sırasıyla 6 m, 7 m ve 8 m'dir. M1\_L6xH3.5 durumunun M3\_L7xH3.5 durumuna göre %6.2 ve M5\_L8xH3.5 durumuna göre %16 daha fazla yük taşıma kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Aynı durumlar dikkate alındığında, M1\_L6xH3.5 durumunun sırasıyla %54 ve %72.2 daha fazla yerdeğıştirme kapasitesine sahip olduğu gözlenmiştir. Kemer açıklığının artması kemerin yük taşıma kapasitesini ve yerdeğıştirme kapasitesini önemli ölçüde düşürdüğünü göstermektedir. Yük taşıma kapasitesinde meydana gelen azalmanın yerdeğıştirme kapasitesinde meydana gelen azalmadan daha düşük olduğu söylenebilir. M1\_L6xH3.5, M11\_L6xH4.5 ve M21\_L6xH5.5 durumlarının açıklığı 6 m ve yükseklikleri sırasıyla 3,5, 4,5 ve 5,5 m'dir. M1\_L6xH3.5 durumunun M11\_L6xH4.5 ve M21\_L6xH5.5 durumundan sırasıyla %1.2 ve %11.1 daha fazla yük taşıma kapasitesine ve M1\_L6xH3.5

durumunun diğer durumlara göre sırasıyla %35 ve %56.9 daha fazla yerdeğiştirme kapasitesine sahip olduğu gözlenmiştir. Kemer yüksekliği arttıkça yük taşıma ve yerdeğiştirme kapasitesinin düştüğü gözlenmektedir. Kapasitelerdeki bu düşüşlerden yerdeğiştirmede meydana gelen düşüşün oransal olarak daha fazla olduğu söylenebilir. Kemer açıklığındaki artış, kemer yüksekliğindeki artışa göre yük taşıma kapasitesini ve yerdeğiştirme kapasitesini daha fazla oranda azaltmaktadır.

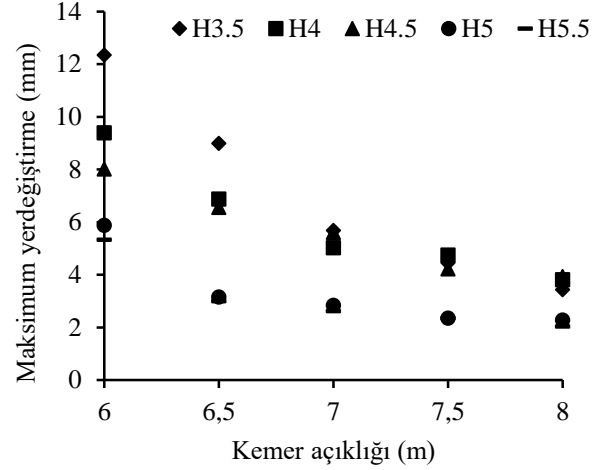


Şekil 12. Yük-yerdeğiştirme ilişkisi (Load-displacement relationship)

İncelenen kemer yapıları arasında en fazla yük taşıma kapasitesine sahip olan kemer yapısının açıklığı 6 m ve yüksekliği 5 m olan (basıklık oranı 1.2) M16\_L6xH5 adlı durumda meydana geldiği görülmüştür. En düşük yük taşıma kapasitesine sahip kemer yapısının açıklığı 8 m ve yüksekliği 5 m olan (basıklık oranı 1.6) M20\_L8xH5 durumu ile kemer yapısının açıklığı 8 m ve yüksekliği 5.5 m olan (basıklık oranı 1.45) M25\_L8xH5.5 durumunda olduğu gözlenmiştir. İncelenen kemer yapıları arasında en büyük yük taşıma kapasitesine sahip durumun en küçük yük taşıma kapasitene sahip durumlardan %32.5 daha fazla yük taşıyabildiği sonucuna varılmıştır. Tüm durumlarda yük taşıma kapasitesinin kemer açıklığına göre değişimi benzer eğilim gösterirken yük taşıma kapasitelerinde en keskin düşüşlerin 5 m yüksekliğindeki durumlarda olduğu gözlenmiştir (Şekil 13).

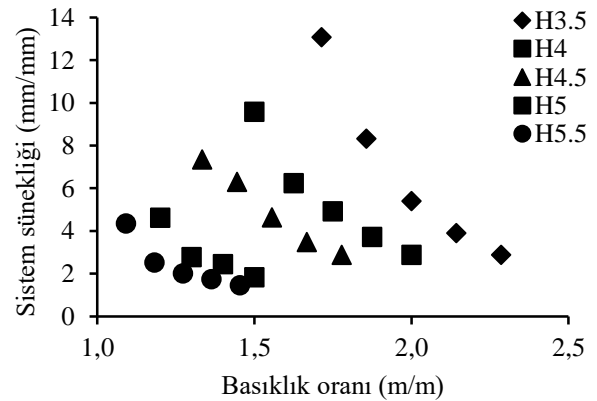


Şekil 13. Kemer boyutlarının göçme yükü üzerine etkisi (Effect of arch dimensions on collapse load)



Şekil 14. Kemer boyutlarının yerdeğiştirme üzerine etkisi (Effect of arch dimensions on displacement)

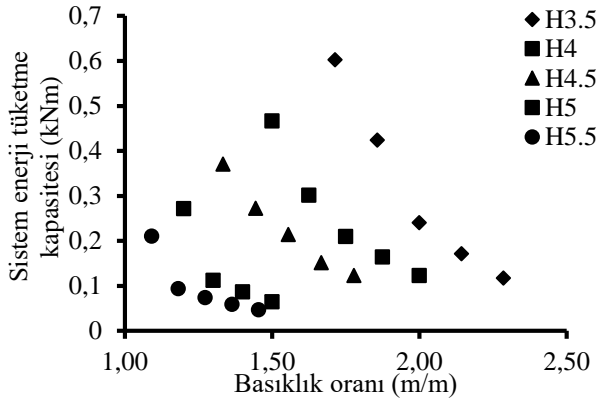
İncelenen kemer yapılarında en fazla yerdeğiştirme kapasitesine sahip olan yapının kemer açıklığı 6 m ve yüksekliği 3.5 m olan (basıklık oranı=1.71) M1\_L6xH3.5 adlı durumda olduğu görülmüştür (Şekil 14). En düşük yerdeğiştirme kapasitesine sahip olan kemer yapısının ise kemer açıklığı 8 m ve yüksekliği 5.5 m olan (basıklık oranı=1.45) M25\_L8xH5.5 adlı durumda olduğu görülmüştür. M1\_L6xH3.5 adlı durumun M25\_L8xH5.5 adlı duruma göre yaklaşık 6 kat daha fazla yerdeğiştirme kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, kemer açıklığı ve yüksekliğindeki boyut artışı kemerin yerdeğiştirme yapabilme kapasitesini düşürürken; kemer açıklığındaki artış, kemer yüksekliğindeki artışa göre yerdeğiştirme kapasitesini yaklaşık %11.5 daha fazla etkilediği sonucuna varılmıştır. Bunlara ek olarak, kemer yükseklikleri aynı olan durumlar dikkate alındığında 3.5 m yüksekliğine sahip kemer yapılarında yerdeğiştirme kapasitesinde daha keskin düşüşler gözlenmektedir. Kemer yüksekliği azaldıkça kemer açıklığının artması yapının yerdeğiştirme kapasitesindeki değişimi azaltmaktadır.



Şekil 15. Sistem sünekliliğinin kemer basıklık oranına göre değişimi (Change of system ductility according to rise to span ratio of arch)

Kemer yapılarındaki sünekliliğin basıklık oranına göre değişimi Şekil 15'te verilmiştir. Burada, kemer yapısında

yükseklik arttıkça ve basıklık oranı azaldıkça sistem sünekliğinin azaldığı belirlenmiştir. Örnek olarak; basıklık oranı 1.71 olan M1\_L6xH3.5 durumundaki sünekliğin, basıklık oranı 2.29 olan M5\_L8xH3.5 durumundaki sünekliğe göre yaklaşık 3.6 kat daha fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca, yakın basıklık oranına sahip M2\_L6.5xH3.5 ve M9\_L7.5xH4 durumlarında ise yüksekliği düşük olan kemerin sünekliğinin diğerine göre yaklaşık 1.9 kat daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durum, kemerdeki yükseklik ve basıklık oranı arttıkça yapı sünekliğinin azaldığını göstermektedir.



Şekil 16. Sistem enerji tüketme kapasitesinin kemer basıklık oranına göre değişimi (Change of system energy dissipation capacity according to rise to span ratio of arch)

Şekil 16'da sistem enerji tüketme kapasitesinin kemer basıklık oranına göre değişimi verilmiştir. Bu değişim sistem sünekliğinin basıklık oranı değişimi ile benzerlik göstermektedir. En yüksek enerji tüketme kapasitesine sahip kemer modeli basıklık oranı 1.71 olan M1\_L6xH3.5 durumu iken en düşük kemer modeli basıklık oranı 1.45 olan M25\_L8xH5.5 durumunun olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, basıklık oranı 2 olan M3\_L7xH3.5 ve M10\_L8xH4 durumları kıyaslandığında yüksekliği ve açıklığı düşük olan kemer yapısının büyük enerji tüketme kapasitesine sahip olduğu gözlenmiştir. Bu durum, aynı basıklık oranına sahip kemer yapılarında küçük açıklık ve yüksekliğe sahip yapının daha fazla enerji tüketebildiği sonucunu göstermektedir.

#### 4.2. İstatistiksel Değerlendirme (Statistical Evaluation)

Çalışmada, regresyon modeli için seçilen bağımsız değişkenler sırasıyla açıklık ve yükseklik parametreleridir. Bu bağımsız değişkenlerin etkilediği öngörülen bağımlı değişkenler de maksimum yerdeğiştirme ve göçme yüküdür. Her iki bağımlı değişken için ayrı regresyon analizi yapılmıştır. Burada yükseklik ve açıklık  $m$  cinsinden hesaba katılırken, yerdeğiştirmeler  $mm$  ve göçme yükü  $kN$  cinsinden verilmiştir. Göçme yükü değerleri ve yerdeğiştirme değerleri sırasıyla Şekil 13 ve Şekil 14'te verilmektedir. Kemer modellerine ait açıklık ve yükseklik değerleri Tablo 2' de yer almaktadır. Bu veriler kullanılarak yerdeğiştirme için Denklem 10 ve göçme yükü için

Denklem 11' de verilen tahmin modelleri oluşturulmuştur.

$$\hat{Y}_{\text{yerdeğiştirme}} = 31.628 - 2.455X_1 - 2.099X_2 \quad (10)$$

$$\hat{Y}_{\text{göçme yükü}} = 104.949 - 5.850X_1 - 4.134X_2 \quad (11)$$

Burada,  $\hat{Y}$  değişkeni bağımlı değişken yani maksimum yerdeğiştirme ve göçme yükü tahmin değerlerini göstermektedir.  $X$  değişkenleri ise bağımsız değişkenler olup 1 ve 2 indisleri sırasıyla açıklık ve yüksekliği belirtmektedir. Bu iki tahmin modeli ile ANOVA (varyans analizi) tabloları oluşturulmuş ve böylece elde edilen denklemlerin geçerliliği sınanmıştır (Tablo 3 ve Tablo 4). Modeller için geliştirilen hipotezde;  $H_0$ : Gözlenen noktaların regresyon doğrusuna uyumu önemsizdir (Model geçersizdir),  $H_1$ : Gözlenen noktalar regresyon doğrusu ile tanımlanabilir (Model geçerlidir).

Tablo 3. Yerdeğiştirme denklemi için ANOVA tab-losu (ANOVA table for displacement equation)

Varyasyon				
Varyasyon kaynağı	Serbestlik der.	Kareler top. (SS)	Kareler ort. (MS)	F değeri
Regresyon modeli	2	130.426	65.213	48.791
Hata	22	29.405	1.337	
Toplam	24	159.831		

Tablo 4. Göçme yükü denklemi için ANOVA tab-losu (ANOVA table for collapse load equation)

Varyasyon				
Varyasyon kaynağı	Serbestlik der.	Kareler top. (SS)	Kareler ort. (MS)	F değeri
Regresyon modeli	2	641.406	320.703	121.680
Hata	22	57.984	2.635	
Toplam	24	699.390		

Hipotezler oluşturulduktan sonra ANOVA tablosu yardımıyla Tablo 3 ve Tablo 4'te yer alan F değerleri ile istatistikte kullanılan F dağılım tablosu değeri ( $F_{2,22,0.05}=2.561$ ) kıyaslanmıştır. Her iki denkleme ait F değeri de  $F_{2,22,0.05}$  değerinden büyük olduğu için  $H_0$  reddedilir, bu iki model de geçerlidir.

Modellerin geçerliliği kanıtlandıktan sonra her model için  $R^2$  (determinasyon katsayısı) hesaplanır.  $R^2$ , oluşturulan modelin gerçeğe uygunluğunu yansıtan bir göstergedir. Bu katsayı, bağımlı değişkenin gözlenen değeri ile modelde tahmin edilen değeri arasındaki korelasyon katsayısının karesidir.  $R^2$ 'nin formülü Denklem 12'de verilmiştir. Bu değer bağımlı değişkenlerin bağımsız değişkenler tarafından ne kadarının açıklandığını gösterir ve nedensellik hakkında bilgi verir.  $R^2$  değeri 1'e ne kadar yakınsa değişkenler, modeli o kadar çok açıklamaktadır [22-23].

$$R^2 = SSR/SST \quad (12)$$

Burada SST, toplamın kareler toplamını belirtirken SSR ise modelin kareler toplamını göstermektedir. Bu iki değer determinasyon katsayısı yerdeğiştirme ve göçme yükü için sırasıyla 0.816 ve 0.917 olarak elde edilmiştir. Bu değerler sırasıyla modellerin yaklaşık %82' si ve %92'sini açıklamaktadır. Elde edilen bu değerlerin 1'e

yakın olması tahmin edilen değer in doğruya yakın olduğunu göstermektedir.

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Tarihi yapıların modellenmesi ve analizinde yaklaşık yöntemler ve basit ampirik bağıntıların geliştirilmesi gerekmektedir. Çalışmada, Mimar Sinan tarafından tasarımı yapılmış 10 tarihi köprü ve bu köprülere ait 48 kemer yapısı incelenmiştir. İnceleme kapsamında, köprü kemer boyutlarının (yükseklik, açıklık, genişlik ve kalınlık) hangi aralıkta değiştiği istatistiksel değerlendirme sonucu oluşturulan kutu grafiklerinden belirlenmiştir. Genişlik ve kalınlık için sabit değerler alınırken, yükseklik ve açıklık değerleri değişken olarak seçilmiştir. Yükseklik ve açıklık değerleri farklı 25 kemer yapısının sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve göçme yükü altındaki davranışı incelenmiştir. İncelemeler sonucunda,

- Farklı dört bölgede mafsallın oluşmasıyla sistemin göçme mekanizmasına ulaştığı belirlenmiştir.
- İlk mafsallaşmanın yüklemenin uygulandığı bölgede oluştuğu görülmüştür.
- Kemerlerin solundan yapılan yükleme durumunda yükleme bölgesinde ve sağ mesnette kalın ve uzun çatlakların oluştuğu, bu bölgelerin simetriğinde ise ince ve geniş alana yayılan çatlakların oluştuğu gözlenmiştir.
- Kemerde açıklığın ve yüksekliğin artması yük taşıma ve yerdeğiştirme kapasitesini azaltmıştır.
- Kemerlerde basıklık oranının artması kemerin sünekliğini ve enerji tüketme kapasitesini düşürmektedir.

Elde edilen veriler regresyon analizine tabi tutulmuş ve sonuçların istatistiksel olarak doğruluğu belirlenmiştir. Denklem 13 ve Denklem 14'te verilen regresyon denklemleri;

$$Y_{\text{yerdeğiştirme}} = 28 - 2(X_1 + X_2), X_1 \in [6,8], X_2 \in [3,5,5,5] \quad (13)$$

$$Y_{\text{göçme yükü}} = 105 - 6X_1 + 4X_2, X_1 \in [6,8], X_2 \in [3,5,5,5] \quad (14)$$

şeklinde sadeleştirilerek önerilmiştir. Bu denklemler Mimar Sinan kemer yapılarında yerdeğiştirme ve göçme yükü hesabında kullanılabilir. Sonraki çalışmalarda, köprü kemerlerinin sayısı artırılıp genişlik, kalınlık, malzeme, modelleme şekli değiştirilerek çalışmalar yapılabilir. Aynı zamanda bu faktörler esas alınarak yapay sinir ağları yaklaşımı ile fonksiyon kestirimi yapılabilir.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Oliveira D.V., Lourenço P.B., Lemos C., "Geometric issues and ultimate load of masonry arch bridges from the northwest Iberian Peninsula", *Engineering Structures*, 32(12):3955-65, (2010).
- [2] Cavicchi A., Gambarotta L., "Collapse analysis of masonry bridges taking into account archfill interaction", *Engineering Structures*, 27(4): 605-15, (2005).
- [3] Cavicchi A., Gambarotta L., "Two-dimensional finite element upper bound limit analysis of masonry bridges", *Computers & Structures*, 84(31-32): 2316-28, (2006).
- [4] Melbourne C., Wang J., Tomor A., Holm G., Smith M., Bengtsson P.E., Bien J., Kaminski T., Rawa P., Casas J.R., Roca P., Molins C., "Masonry arch bridges background document D4.7.", *Sustainable Bridges*, Report number: Deliverable D4.7, (2007).
- [5] Hughes T.G., Blackler M.J., "A review of the UK masonry arch assessment methods", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 122 (3):305-315, (1997).
- [6] Page J., "TRL State of the Art Review: Masonry arch bridges", London, UK, *Her Majesty's Stationery Office*, (1993).
- [7] Rouf M.A. "Fundamental properties of brickwork with particular emphasis to brickwork arches", *PhD Thesis*, University of Liverpool, Liverpool, England, (1984).
- [8] Zhang Y., "Advanced nonlinear analysis of masonry arch bridges", *PhD Thesis*, Imperial College London, London, England, (2015).
- [9] Lourenço P.B., "Computational Strategies for Masonry Structures", *PhD Thesis*, Delft University of Technology, Delft, Holland, (1996).
- [10] Lourenço P.B., "Current experimental and numerical issues in masonry research", *SÍSMICA 2004 - 6º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sismica*, Guimaraes, Portugal, (2004).
- [11] Liu G.R., Quek S.S. "The finite element method: a practical course", *Butterworth-Heinemann*, (2013).
- [12] ANSYS, Swanson Analysis System, Ansys Inc, Canonsburg, PA, (2013).
- [13] Williams K.J., Warnke E.P., "Constitutive model for the triaxial behaviour of concrete", *Proceeding of the International Association for Bridge and Structural Engineering*, Bergamo, Italy, 19:174-86, (1975).
- [14] Gibbons N., Fanning P.J., "Progressive cracking of masonry arch bridges", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Bridge Engineering*, 169:93-112, (2015).
- [15] Alaboz M., "Mimar Sinan Köprülerinin Güncel Durum Değerlendirmesi ve Kapuağası Köprüsü Restorasyon Projesi", *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, (2009).
- [16] Ril 805:Richtlinie 805, Guideline for Load and Resistance Assessment of Existing European Railway Bridges, COWI A/S, (2007).
- [17] Kahraman S., Fener M., Kozman E. "Predicting the compressive and tensile strength of rocks from indentation hardness", *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 112(5): 331-339, (2012).
- [18] Karaton M., Aksoy H.S., Sayın E., Calayır Y., "Nonlinear seismic performance of a 12th century historical masonry

- bridge under different earthquake levels”, *Engineering Failure Analysis*, 79: 408-421, (2017).
- [19] Ersoy HY. “Kompozit malzeme”, *Literatür Yayınları*, (2001).
- [20] Kaushik H.B., Durgesh C.R., Sudhir K.J., “ Stress-strain characteristic of clay brick masonry under uniaxial compression”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(9): 728-739, (2007).
- [21] ENV 1996-1-1, C.E. de Normalisation, Eurocode 6: Design of masonry structures-part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures, *Comit Europen de Normalisation, Brussels*, Belgium, (2005).
- [22] Lindley D.V., “Regression and correlation analysis”, *New Palgrave: A Dictionary of Economics*, 4:120-23, (1987).
- [23] Hocking R.R., “The analysis and selection of variables in linear regression”, *Biometrics*, (1976).
- [24] SPSS: IBM Corp., IBM SPSS Statistics for Windows, Version 21.0. Armonk, NY: IBM Corp., (2012).
- [25] Çeçen K. Sinan’ın yaptığı köprüler. Editör: Sadi Bayram. Mimarbaşı Koca Sinan yaşadığı çağ ve eserleri, Cilt 1, 429-438, Ankara, Türkiye, Vakıflar Genel Müdürlüğü & Türkiye Vakıflar Bankası, (1988).
- [26] Bozkurt O. “Koca Sinan’ın köprüleri (XVI. Asır Osmanlı Medeniyeti içinde Sinan, köprülerin Mimari bakımdan tetkiki, siluet ve abide a-kıymetleri)”, İstanbul, Türkiye, İTÜ Mimarlık Fakültesi, (1952).





POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



**Kavak ağacı kabuğu esaslı sorbentlerin 2<sup>5</sup> tam faktöriyel deney tasarımı kullanılarak boyarmadde gideriminde değerlendirilmesi ve %giderim etkinliğinin istatistiksel analizi**

*Evaluation of poplar tree based sorbents in dye uptake via 2<sup>5</sup> full factorial experimental design and statistical analysis of %removal efficiency*

*Yazar(lar) (Author(s)): Adife Şeyda YARGIÇ*

ORCID: 0000-0002-8671-5896

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Yargıç A. Ş., “Kavak ağacı kabuğu esaslı sorbentlerin 2<sup>5</sup> tam faktöriyel deney tasarımı kullanılarak boyarmadde gideriminde değerlendirilmesi ve %giderim etkinliğinin istatistiksel analizi”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 941-954, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.563697

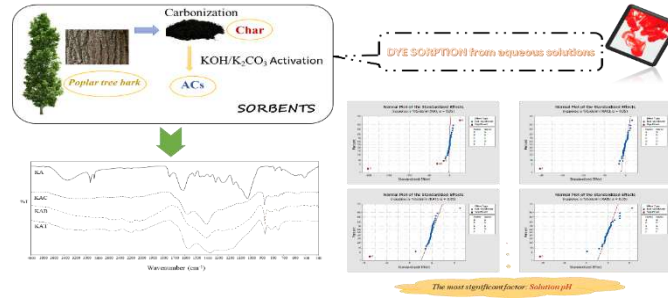
# Kavak Ağacı Kabuğu Esaslı Sorbentlerin 2<sup>5</sup> Tam Faktöriyel Deney Tasarımı Kullanılarak Boyarmadde Gideriminde Değerlendirilmesi ve %Giderim Etkinliğinin İstatistiksel Analizi

## Evaluation of Poplar Tree Based Sorbents in Dye Uptake via 2<sup>5</sup> Full Factorial Experimental Design and Statistical Analysis of %Removal Efficiency

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ 2<sup>5</sup> tam faktöriyel deneysel tasarım ile Pr Red Hegxl boyarmaddesinin giderimi / Pr Red Hegxl dye removal via 2<sup>5</sup> full factorial experimental design
- ❖ KOH ile aktive edilen sorbent kullanarak yüksek giderim etkinliği (% 95,6) sağlama / Ensuring high removal efficiency (95.6%) using KOH-activated sorbent

### Grafik Özet (Graphical Abstract)



Şekil. Sorpsiyon süreci ve deneysel sonuçlar / Figure. Sorption process and experimental results

### Amaç (Aim)

Bu çalışmada, boyarmadde gideriminde kavak ağacı kabuğu esaslı sorbentlerin değerlendirilmesi, deneysel tasarım yöntemi ve varyans analizi ile optimum çalışma koşullarının belirlenmesi amaçlanmıştır. / In this study, it was aimed to evaluate poplar tree bark based sorbents in dye removal from aqueous solutions and to determine optimum working conditions by experimental design method and variance analysis.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

İstatistiksel analiz yapılarak ana faktör etkileri ve faktörler arasındaki etkileşimler analiz edilmiştir. Ayrıca, sorpsiyon mekanizması ve kinetik davranış aydınlatılmıştır. / The main factor effects and interactions between factors were analyzed by performing statistical analysis. Besides, the mechanism of sorption and kinetic behavior were clarified.

### Özgünlük (Originality)

Hamaddenin karbonizasyonu ve kimyasal aktivasyonu yoluyla üretilen sorbentlerin etkinliğini araştırmak için, pH, sorbent dozajı, başlangıç boyarmadde konsantrasyonu, sıcaklık ve temas süresi dahil beş deneysel faktörden oluşan deney setleri belirlenmiştir. / In order to investigate the efficiency of sorbents produced via carbonization and chemical activation of the raw material, the experimental sets of five experimental factors including pH, sorbent dosage, initial dye concentration, temperature and contact time were specified.

### Bulgular (Findings)

Varyans analizi sonuçlarına göre, çözelti pH'ı en etkili parametredir. Deneysel veriler, Langmuir izotermine Freundlich izoterminden daha iyi uygunluk göstermiştir. Kemisorpsiyon, sözde-ikinci-dereceden kinetik model yoluyla sorpsiyon işlemi kontrol etmiştir. / According to the results of variance analysis, the solution pH was the most effective parameter. The experimental data better fitted the Langmuir isotherm than the Freundlich isotherm. The chemisorption inspected the sorption process by the way of pseudo-second-order kinetic model.

### Sonuç (Conclusion)

Kavak ağacı kabuğu esaslı malzemeler boyarmadde içeren atıksuyu dekontamine etmek için faydalı sorbent olabilir. / Poplar tree bark based materials can be beneficial sorbents to decontaminate dye bearing wastewater.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Kavak Ağacı Kabuğu Esaslı Sorbentlerin 2<sup>5</sup> Tam Faktöriyel Deney Tasarımı Kullanılarak Boyarmadde Gideriminde Değerlendirilmesi ve %Giderim Etkinliğinin İstatistiksel Analizi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Adife Şeyda YARGIÇ\*

Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 13.05.2019 ; Kabul/Accepted : 13.09.2019)

## ÖZ

Tekstil sektörünün gelişimine bağlı olarak atıksularda bulunan boyarmadde konsantrasyonunun artması çevre kirliliği açısından ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Bunun yanı sıra, çevre bilincinin artması ve sürdürülebilir yaşamın desteklenmesi sonucunda yeni giderim süreçlerinin tasarımı ve çalışma koşullarının optimizasyonu ile ilgili çalışmalar önem kazanmaktadır. Yapılan çalışmanın amacı, ormansal/endüstriyel atık olan ağaç kabuğunun sorbent olarak değerlendirilebilirliğinin incelenmesi ve çalışma koşullarının optimize edilmesidir. Bu kapsamda, kavak ağacı kabuğu hammadde olarak seçilmiş ve karbonize edildikten sonra iki farklı ajanla (KOH ve K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) aktive edilmiştir. 2<sup>5</sup> tam faktöriyel deney tasarımı modeli kullanılarak deney setleri oluşturulmuş ve sorpsiyon işlemi sonucu elde edilen %giderim etkinliği değerleri kullanılarak varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Çözelti pH'ı, boyarmadde konsantrasyonu, temas süresi, sorbent miktarı ve sıcaklık olmak üzere beş parametrenin birbiri ile ilişkisi incelenmiş ve bütün sorbentler için en etkili parametrenin %95 güven aralığında pH olduğu sonucuna varılmıştır. Kavak ağacı kabuğu ile yapılan deneylerde ikili etkileşimlerin de etkili olduğu görülmüştür. En yüksek %giderim etkinliği değerine (%95,6) ise KOH ile aktive edilen sorbent kullanıldığında ulaşılmıştır. İzoterm ve kinetik modellere göre, sorpsiyonun tek tabakalı homojen yüzey üzerinde fizikokimyasal etkileşimler ile gerçekleştiği belirlenmiştir. Sonuç olarak, ormansal/endüstriyel atıkların değerlendirildiği çevre dostu ve giderim etkinliği yüksek süreçlerin tasarımı ile boyarmadde içeren atıksular düşük maliyetle iyileştirilebilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Boyarmadde giderimi, faktöriyel deney tasarımı, karbonlu sorbentler, kavak ağacı kabuğu, varyans analizi.

## Evaluation of Poplar Tree Based Sorbents in Dye Uptake via 2<sup>5</sup> Full Factorial Experimental Design and Statistical Analysis of %Removal Efficiency

### ABSTRACT

Due to the development of the textile sector, the increase in the concentration of dyestuffs in the wastewater poses a critical threat to the environment. In addition, as a result of increasing environmental awareness and supporting sustainable life, studies on the design of new removal processes and optimization of working conditions gain importance. The aim of the study is to examine the evaluability of wood bark which is forest/industrial waste as a sorbent and to optimize the working conditions. In this context, poplar tree bark was selected as raw material and it was activated with two different agents (KOH and K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) after carbonization. Experimental sets were arranged by using 2<sup>5</sup> full factorial experimental design model and variance analysis was performed by using the %removal efficiency values obtained from the sorption process. The relationship of five parameters, namely solution pH, dye concentration, contact time, sorbent dosage and temperature, were investigated and it was concluded that the most effective parameter was pH in 95% confidence level for all sorbents. In the experiments conducted with poplar bark, it was observed that binary interactions were also effective. The highest %removal efficiency value (95.6%) was achieved when KOH-activated sorbent was used. According to the isotherm and kinetic models, it was determined that sorption was performed by physicochemical interactions on a monolayer homogeneous surface. Consequently, wastewater containing dyestuffs can be treated at low cost with the design of environmental-friendly and high-efficiency process via the evaluation of forestry/industrial wastes.

**Keywords:** Dye removal, factorial experimental design, carbonaceous sorbents, poplar tree bark, analysis of variance.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sanayi ve teknoloji toplumuna geçiş ile birlikte çevre sorunlarında ortaya çıkan artışın engellenmesi amacıyla,

doğal kaynakların dengeli ve etkin bir biçimde kullanılmasının gerekliliği dünya çapında önem kazanmıştır. Dünyada bulunan toplam su miktarı yaklaşık 1,4 milyar km<sup>3</sup> olmasına rağmen; yenilenebilir kaynakların azlığı, su kullanımının bilinçsiz yapılması ve nüfus artışına bağlı olarak su kıtlığı tehlikesi söz

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : seyda.guler@bilecik.edu.tr

konusudur [1]. Su varlığına göre; kişi başına düşen ortalama kullanılabilir su miktarı yılda 8000-10000 m<sup>3</sup>'ten fazla olan ülkeler "su zengini", 2000 m<sup>3</sup>'ten az olanlar "su azlığı çeken" ve 1000 m<sup>3</sup>'ten az olanlar ise "su fakiri" ülkeler olarak sınıflandırılmaktadır. Devlet Su İşleri (DSİ) verilerine göre, Türkiye'de kişi başına 1519 m<sup>3</sup>/yıl civarında su düştüğü bilinmekte ve yapılan sınıflandırmaya göre Türkiye'nin su azlığı çeken ülkeler kategorisinde yer aldığı belirtilmektedir. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) projeksiyonuna göre, 2030 yılında ülkemizde kullanılabilir su miktarı 1120 m<sup>3</sup>/yıl-kişi civarında olacaktır [2]. Bu veriler dikkate alındığında, gelecek nesillerin yeterli ve nitelikli su kullanabilmesi adına kaynakların optimum kullanılması ve geri dönüşümün sağlanması gerekmektedir.

Atık su arıtımı, su kaynaklarının korunması ve yeniden kullanımı için temel bir teknoloji olup, dünya çapında birçok ülkede başarı ile uygulanabildiği açıkça görülmektedir. Son yıllarda, biyolojik, biyokimyasal, kimyasal ve mekanik süreçlere ilişkin karmaşık ve disiplinler arası çalışmalar gerçekleştirilmekte ve atık su arıtımında büyük bir ilerleme kaydedilmektedir. Üretim yapılırken göz önünde bulundurulmuş en önemli çevresel temalar; enerji tasarrufu, küresel ısınmanın önlenmesi, su kaynaklarının korunması ve atıkların azaltılması olarak sıralanmaktadır. Kimyasal kullanımının yönetilmesi, daha az çevresel yüke sahip olan alternatiflerin kullanılması ve "azalt, tekrar kullan, geri dönüştür" programı doğrultusunda sıfır emisyon hedefinin ön planda tutulması ile çevreye duyarlı süreçler geliştirilmektedir [3]. Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Zirvesi'nde (Eylül 2015) kabul edilen Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerinde ifade edildiği gibi, atık su arıtma teknolojisindeki mevcut bilgi ve deneyimin küresel uygulamasının, gelecekteki su yönetiminin temel taşı olacağı sonucuna varılmaktadır. 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerinin altıncısında, "2030'a kadar kirliliği azaltarak, çöp boşaltmayı ortadan kaldırarak, zararlı kimyasalların ve maddelerin salınımını en aza indirgeyerek, arıtılmamış atık su oranını yarıya indirerek, geri dönüşümü ve tekrar kullanımı artırarak su kalitesini yükseltmek" hedeflenmektedir [4]. Küresel olarak üretilen atık suyun yalnızca beşte biri şu anda yeterli şekilde arıtılmaktadır. 2030 yılına kadar sürdürülebilir su yönetimi hedefine ulaşmak için her gün yaklaşık 600000 kişiye ekstra atık su arıtma tesisi gerekmektedir [5].

Çevreye yayılan en tehlikeli ve zehirli kirleticilerden biri olarak kabul edilen boyar maddeler kimyasal, su, ışık veya mikrobiyal işlemlere maruz bırakılırsa bile bozulmaya karşı direnç göstermektedir [6]. Endüstride sıklıkla kullanılan boyar maddelerin % 10-15'i boyama sürecinde atık sulara boşaltılmaktadır [7]. Boyar maddeler düşük konsantrasyonlarda olsa bile besin zincirinde birikerek canlı yaşamını ciddi derecede tehdit etmektedir. Bu nedenle, alıcı ortama verilmeden önce atık suların arıtılması ile ilgili çalışmalar son yıllarda oldukça önem kazanmıştır. Atık su iyileştirme çalışmaları kapsamında fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçlerden faydalanılmaktadır. Atıksu renk gideriminde

yaygın olarak membran filtrasyonu, adsorpsiyon/biyosorpsiyon, elektrokoagülasyon, iyon değişimi, kimyasal/elektro-oksiasyon, aerobik / anaerobik biyolojik arıtma ve ileri oksiasyon süreçleri (fenton, foto-fenton, ozon, ozon/UV) uygulanmaktadır.

Kapsamlı bir literatür araştırması yapıldığında, boyar maddelerin gideriminde sorpsiyon işleminin kullanıldığı çok sayıda araştırmanın bulunduğu belirlenmiştir. Günümüzde, atıkların sorbent olarak değerlendirilmesi, yüksek adsorplama kapasitesine sahip adsorban seçimi ve çalışma koşullarının optimize edilmesi ile giderim etkinliğinin artırılması oldukça önem kazanmıştır. Geleneksel adsorpsiyon işleminde, her faktöre ait değişkenlerin ayrı ayrı çalışıldığı, tek-değişkenli model uygulanmaktadır. Bu model kapsamında, bir faktörün optimum değeri belirlendikten sonra diğer faktörün bütün değişkenleri ile ilişkisi incelenmektedir. Çok-değişkenli model ile çalışıldığında ise, deney sayısının azalmasına bağlı olarak zaman ve maliyet açısından ortaya çıkan dezavantajın önüne geçilmektedir.

Kavak ağacı kışın yaprak dökün, 30-40 m'ye kadar boyanabilen, sık ve kalın dallı, kabuğu gövdenin üst kısımlarında düz ve grimsi, alt kısımlarında ise derin düşey çatlaklı ve siyah renkli olan hızlı büyüyen bir ağaçtır. Kavak ağacının vatanı Türkiye, orta ve güney Avrupa'dan Orta Asya'ya kadar uzanmaktadır [8]. Yapılan çalışmada, sulu çözeltilerden boyarmadde gideriminde kavak ağacı kabuğu esaslı sorbentlerin değerlendirilmesi ve optimum çalışma koşullarının deneysel tasarım yöntemi ve varyans analizi yapılarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Kavak ağacı kabuğuna karbonizasyon ve kimyasal aktivasyon uygulanması ile üretilen sorbentlerin boyar madde gideriminde etkinliğinin araştırılması amacıyla, 2<sup>5</sup> tam faktöriyel deney tasarımı kullanılarak pH, sorbent miktarı, başlangıç boyarmadde konsantrasyonu, sıcaklık ve temas süresi olmak üzere beş deneysel faktöre ait deney planı oluşturulmuştur. İşlem sonucunda, istatistiksel analiz gerçekleştirilerek ana faktör etkileri ve faktörler arası etkileşimler incelenmiştir. Buna ek olarak, Freundlich, Langmuir, Temkin ve Dubinin-Radushkevich izoterm modelleri ile denge verileri incelenerek sorpsiyon mekanizması aydınlatılmış; yalancı-birinci/ikinci derece kinetik modeller ve partikül içi difüzyon kinetik modeli ile kinetik çalışmalar yapılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

### 2.1. Adsorbat ile Sorbent Hazırlama ve Fizikokimyasal Karakterizasyon Teknikleri (Adsorbate and Sorbent Preparation and Physicochemical Characterization Techniques)

Sulu çözeltilerden boyar madde gideriminin araştırılması amacıyla reaktif tekstil boyası Pr Red Hegxl (RH, Renk İndeksi: 293755) herhangi bir saflaştırma metodu uygulanmadan kullanılmıştır. Distile su içinde RH boyasının çözünmesi ile elde edilen standart boyarmadde çözeltisi (1000 mg/L) seyreltilerek 50-100 mg/L

aralığında çeşitli konsantrasyonlarda çözeltiler hazırlanmıştır. Çözelti pH'ını ayarlamak için 0,1 M NaOH veya 0,1 M HCl ilave edilmiş ve pH-metre (Thermo Scientific Orion 3 Star) kullanılmıştır.

Sorpsiyon deneylerinde kullanılan kavak ağacı kabuğu (KA) Eskişehir'de (Türkiye) bulunan kereste işleme fabrikasından temin edilmiş ve laboratuvar ortamında kurutulmuştur. Öğütücü kullanılarak (Armfield FT-7A) hammadde parçacık büyüklüğü küçültülmüş ve ortalama parçacık büyüklüğü 0,812 mm olan KA sorpsiyon deneylerinde kullanılmıştır. Hammadde ısıtma hızı 10 °C/min olacak şekilde 550 °C'ye ısıtılıp karbonize edilerek kavak ağacı çarı (KAC) elde edilmiştir. Ayrıca, hammadde ağırlıkça kimyasal ajan/hammadde oranı 0,75 olacak şekilde potasyum hidroksit (KOH) veya potasyum karbonat (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) kullanılarak aktive edilmiştir. Aktivasyon işleminde, öncü madde ve kimyasal ajan karışımı 24 h boyunca karıştırılmış, ardından 85 °C'de 24 h etüvde kurutulmuştur. Elde edilen numuneler 10 °C/min ısıtma hızı ile 700 °C'ye kadar ısıtılmış ve aktivasyon sıcaklığında 60 min beklenmiştir. Aktive edilen numuneler yapıda kalan kimyasal ajanların uzaklaştırılması amacı ile pH değeri nötr olana kadar distile su ile yıkanmış ve ardından 105 °C'de 24 h kurutulmuştur. Sorpsiyon deneylerinde kullanılacak sorbentlerin kodları: KA = Kavak Ağacı Kabuğu, KAC = Kavak Ağacı Çarı, KAB = Kavak Ağacı Baz Aktivasyonu (KOH) ve KAT = Kavak Ağacı Tuz Aktivasyonu (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) olarak belirlenmiştir.

Sorbentlerin özelliklerini tespit etmek için çeşitli karakterizasyon teknikleri kullanılmıştır. Elementel analiz (Leco CNH628 S628) gerçekleştirilerek sorbentlerin içeriğindeki karbon, hidrojen, azot ve oksijen miktarları ölçülmüştür. KA'nın bileşen analizi ve kısa analizi (nem, kül, uçucu madde, sabit karbon) yapılarak yapısı aydınlatılmıştır. Zayıflatılmış Toplam Yansıma-Fourier Dönüştümlü Kıızıl Ötesi Spektrometresi (ATR-FTIR, Perkin Elmer Spektrumu 100) yardımı ile 4000-400 cm<sup>-1</sup> aralığında, 100 taramadan sonra çözünürlüğü 4 cm<sup>-1</sup> olan spektrum alınarak yapıdaki fonksiyonel gruplar tespit edilmiştir. Sorbentlerin yüzey alanı ve gözenek boyut dağılımları Micromeritics ASAP 2020 azot sorpsiyon cihazı kullanılarak belirlenmiştir.

## 2.2. Boyarmadde Giderim Prosedürü (Dye Removal Procedure)

Kavak ağacı kabuğu esaslı sorbentler kullanılarak RH boyarmaddesinin sulu çözeltilerden gideriminde pH, sorbent miktarı, başlangıç boyarmadde konsantrasyonu, sıcaklık ve temas süresinin etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, 50 mL'lik boyarmadde çözeltisi içeren konik test tüplerinde kesikli sorpsiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Süspansiyonlar süzülerek süzünüdeki boyarmadde miktarı 533 nm'lik maksimum dalga boyunda ( $\lambda_{maks}$ ) UV/görünür bölge spektrofotometresinde (Agilent Cary 60 UV-Visible Spectrophotometer) absorbansın ölçülmesi ile belirlenmiştir. Boyarmadde sorpsiyon kapasitesi ( $q_e$ ) ve

giderim etkinliği ( $\eta$ ) değerleri Eş. 1 ve Eş. 2 numaralı eşitlikler ile ifade edilmektedir [9]:

$$q_e \text{ (mg/g)} = (C_0 - C_e)V/W \quad (1)$$

$$\eta \text{ (\%)} = [(C_0 - C_e)/C_0]100 \quad (2)$$

burada, sorbent tarafından tutulan boyarmadde miktarı  $q_e$  (mg/g) ile gösterilmektedir.  $V$  (L) çözelti hacmi ve  $W$  (g) kullanılan sorbent miktarıdır.  $C_0$  (mg/L) başlangıç çözeltisindeki ve  $C_e$  (mg/L) ise dengedeki boyarmadde konsantrasyonudur.

## 2.3. Hız Modelleri ve Sorpsiyon İzotermi (Rate Models and Sorption Isotherms)

Hız sabitleri ile adsorpsiyon dinamiğinin incelenmesi amacıyla farklı kinetik modeller kullanılmaktadır. Bir adsorpsiyon işleminde gerçekleşen adımlar: *i*) çözünen maddenin çözüldüğü adsorban yüzeyinde oluşturulan ince bir filme taşınması, *ii*) çözünen maddenin bu ince filmde adsorban yüzeyine taşınması, *iii*) çözünen maddenin adsorban yüzeyinden gözenekli yapının içine taşınması olarak sıralanmaktadır [10]. RH boyarmaddesinin gideriminde yalancı-birinci (Eş. 3) ve ikinci derece (Eş. 4) kinetik modelleri ve partikül içi difüzyon kinetik modeli (Eş. 5) kullanılarak sorpsiyon denge verileri analiz edilmiştir.

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - (k_1 t)/2,303 \quad (3)$$

$$t/q_t = 1/(k_2 q_e^2) + (1/q_e)t \quad (4)$$

$$q_t = k_i t^{1/2} + C \quad (5)$$

burada  $t$  temas süresi (min),  $q_e$  ve  $q_t$  (mg/g) dengede ve  $t$  (min) süresi sonunda tutulan RH boyarmadde miktarı,  $k_1$  (min<sup>-1</sup>) ve  $k_2$  (g/mg·min) sırasıyla yalancı-birinci ve ikinci dereceden sorpsiyon hız sabiti [11],  $k_i$  (mg/g·min<sup>0.5</sup>) hücre içi difüzyon hız sabiti ve  $C$  sabittir [12].

Çözeltide sabit bir sıcaklıkta kalan denge adsorbat konsantrasyonu ile adsorbat miktarı arasındaki matematiksel korelasyon, sorpsiyon izotermi ile ifade edilmektedir [13]. RH boyarmaddesinin deneysel verilerini analiz etmek ve sorpsiyonun denge özelliklerini incelemek için Langmuir (Eş. 6), Freundlich (Eş. 7), Temkin (Eş. 8-9) ve Dubinin-Radushkevich (Eş. 10-11) izoterm modelleri kullanılmıştır. En uygun izoterm genellikle lineer regresyon uygulanarak bulunmakta ve bunun yanında izoterm denkleminin uygulanabilirliğini kontrol etmek için R<sup>2</sup> korelasyon katsayıları hesaplanmaktadır.

$$C_e/q_e = 1/(K_L q_m) + C_e/q_m \quad (6)$$

$$\log q_e = \log K_F + (1/n) \log C_e \quad (7)$$

$$q_e = B \ln A_T + B \ln C_e \quad (8)$$

$$B = RT/b_t \quad (9)$$

$$\ln q_e = \ln q_m - \beta \varepsilon^2 \quad (10)$$

$$\varepsilon = RT \ln(1 + 1/C_e) \quad (11)$$



burada  $C_e$  (mg/L) dengede bulunan çözeltinin boyarmadde konsantrasyonu;  $q_e$  (mg/g) sorbentin birim ağırlığı başına tutulan boyarmadde miktarıdır. Ayrıca,  $K_L$  (L/mg) ve  $q_m$  (mg/g) sırasıyla, sorpsiyon hızı ve maksimum sorpsiyon kapasitesine göre elde edilen Langmuir sabitleridir. Langmuir izotermine ait boyutsuz ayırma faktörü  $R_L = 1/(1 + C_0K_L)$  ifadesi ile belirlenmektedir. Heterojenite faktörü ve Freundlich sorpsiyon sabiti, sırasıyla  $n$  ve  $K_F$  (mg/g(L/mg)<sup>1/n</sup>) olarak sembolize edilmektedir.  $1/n$  değeri ve  $K_F$  sırasıyla sorpsiyon şiddeti ve bağlanma enerjisini ifade etmektedir. Bu değerler,  $\ln q_e - \ln C_e$  grafiğinde kesişim noktası ( $K_F$ ) ve eğim ( $1/n$ ) verileri kullanılarak elde edilir. Temkin izotermine kullanılan simgeler,  $A_T$  (L/g) Temkin izotermi denge bağlanma sabiti,  $B$  sorpsiyon ısı ile ilgili sabit,  $b_T$  Temkin izoterm sabiti (J/mol),  $R$  (J/molK) gaz sabiti ve  $T$  (K) mutlak sıcaklıktır. Dubinin-Radushkevich eşitliklerinde ise  $\epsilon$  ve  $\beta$  sırasıyla Polanyi potansiyelini ve sorpsiyon enerjisi ile ilgili sabiti (mol<sup>2</sup>/kJ<sup>2</sup>) ifade etmektedir. Ortalama sorpsiyon enerjisi ( $E$ ) ise  $1/\sqrt{2\beta}$  ifadesinden kJ/mol olarak hesaplanmaktadır.

#### 2.4. Tam Faktöriyel Deneysel Tasarımı (Full Factorial Experimental Design)

Faktöriyel deney tasarımı kullanılması ile toplam deney sayısı, zaman ve araştırma maliyetinin azaltılması mümkün olup; tüm ana faktörlerin etkileri ve faktörlerin etkileşim etkileri doğru bir şekilde tahmin edilerek sürecin optimizasyonu gerçekleştirilebilmektedir. Çeşitli biyokütle atıkları kullanıldığında ağır metal olarak Cr(IV) [14] ve Pb(II) [15], boyarmadde olarak metilen mavisi [16] gideriminin gerçekleştirildiği ve sorpsiyon parametrelerinin istatistiksel analizinin yapıldığı çalışmalar bulunmaktadır. Tam faktöriyel deneysel tasarım yönteminde, belirlenen seviye sayısına bağlı olarak tüm faktörlerin birbiri ile ilişkisi değerlendirilebilmektedir. Bu çalışmada, pH ( $A=2$  ve  $8$ ), sorbent miktarı ( $B=0,1$  ve  $0,4$  g/50 mL), sıcaklık ( $C=20$  ve  $40$  °C), temas süresi ( $D=60$  ve  $120$  min) ve başlangıç boyarmadde konsantrasyonu ( $E=50$  ve  $100$  mg/L) etkisi olmak üzere 5 faktörün iki seviyeli tam faktöriyel deney tasarımında  $2^5=32$  deney gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel grafiklerde düşük seviye “-1” ve yüksek seviye “1” ile sembolize edilmiştir.

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

#### 3.1. Sorbent Özelliklerinin İncelenmesi (Investigation of Sorbent Properties)

Sorbentlerin temel analizi ve KA'nın yaklaşık analizine ait sonuçlar Çizelge 1'de verilmiştir. Kavak ağacı kabuğunun yüksek uçucu madde (%78,93) ve nem (%7,58) içeriğine sahip olduğu belirlenmiştir. Karbonizasyon işleminden sonra, KA ile karşılaştırıldığında diğer sorbentlerin karbon içeriğinin fazla ve oksijen içeriğinin az olmasına bağlı olarak ısı değerlerinin de daha yüksek olduğu görülmüştür. Yığın

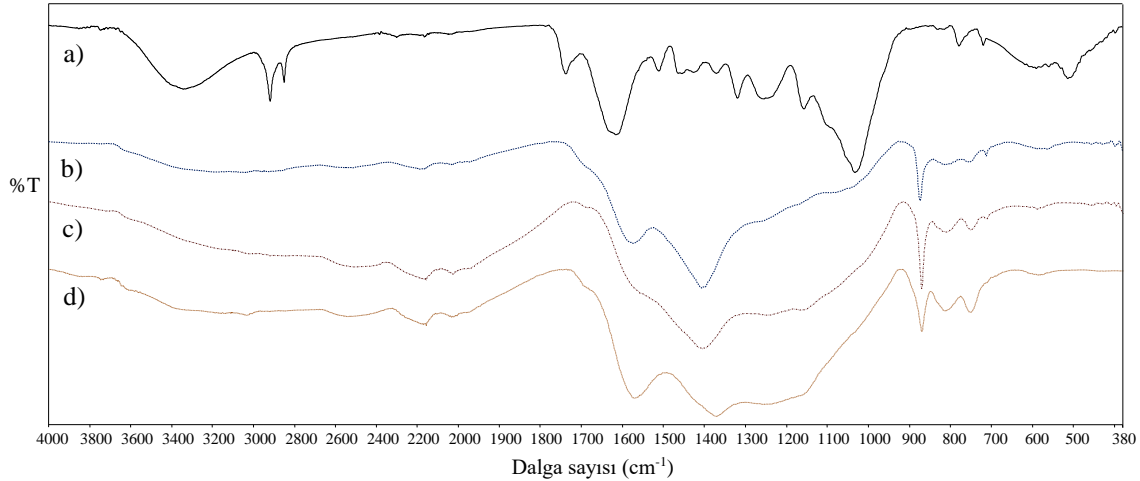
yoğunluğu  $0,45$  g/cm<sup>3</sup> olan KA'nın azot adsorpsiyon/desorpsiyon analizi ile belirlenen yüzey alanı  $0,39$  m<sup>2</sup>/g olarak bulunmuştur. KOH ve K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> aktivasyonu sonucu elde edilen karbonlu malzemelerin yüzey alanları sırasıyla  $195,42$  ve  $202,39$  m<sup>2</sup>/g'dır. Ortalama gözenek boyutları ise KAB ve KAT için sırasıyla  $5,0$  ve  $4,6$  nm olup, mezogözenekli yapıya sahip sorbentler üretilmiştir.

**Çizelge 1.** Temel ve yaklaşık analiz sonuçları (The results for ultimate and proximate analyses)

Temel Analiz				
Bileşen (%)	KA	KAC	KAB	KAT
C	39,92	63,93	64,98	66,89
N	1,67	0,95	0,35	0,36
H	7,60	2,64	2,19	2,25
O <sup>a</sup>	50,81	32,48	32,48	30,50
HHV (MJ/kg)	15,30	19,57	19,28	20,37
KA'nın Yaklaşık Analizi				
Kısa analiz	%ağ.			
Nem	7,58			
Kül	5,29			
Uçucu Madde	78,93			
Sabit Karbon <sup>a</sup>	8,20			
Bileşen analizi	%ağ.			
Holoselüloz	57,04			
Hemiselüloz	36,82			
Ekstraktif Madde	6,82			
Lignin	30,85			
Selüloz <sup>a</sup>	20,22			

<sup>a</sup> Farktan hesaplanmıştır.

Sorbentlerin kimyasal bileşimleri ve yüzey fonksiyonel gruplarının belirlenmesi amacıyla FT-IR spektrumları (Şekil 1) alınmıştır. Şekil 1 incelendiğinde, karbonlu sorbentlere kıyasla hammadde olan KA'nın yapısında daha fazla fonksiyonel grubun bulunması, yapısının daha kompleks olduğunun bir göstergesidir. KA'nın spektrumunda karbonlu yapıya sahip diğer sorbentlere kıyasla,  $3300-3200$  cm<sup>-1</sup> bant aralığında tanımlanmış olan hidrojen bağımlı içeren hidroksil fonksiyonel gruplarının geniş ve yayvan O-H gerilme titreşimi saptanmıştır [17]. Ayrıca,  $2950-2800$  cm<sup>-1</sup> aralığında metil ve metilene ait asimetric ve simetric C-H titreşimleri alifatik yapıların varlığını göstermektedir.  $1770-1500$  cm<sup>-1</sup> civarındaki pikler aromatik yapılarda bulunan olefinik C=C titreşimlerinden ve C=O titreşimlerinden kaynaklanmakta olup; bu pikler esterler, ketonlar, karboksilik asitler ve aldehitlerin varlığına işaret etmektedir.  $1480-1420$  cm<sup>-1</sup> civarındaki pikler



**Şekil 1.** FT-IR spektrumları (a) KA, (b) KAC, (c) KAB ve (d) KAT (FT-IR spectrums of (a) KA, (b) KAC, (c) KAB and (d) KAT)

ise -OH bükülme ve C-O gerilim titreşimlerini belirtmekte olup, doyurulmamış eterlerin ve fenollerin varlığının kanıtıdır. 1200-1000 cm<sup>-1</sup> civarındaki pikler ise biyosorbent yapısındaki ligninin varlığını gösteren C-O gerilim bandını ifade etmektedir [18]. 900-700 cm<sup>-1</sup> bant aralığında belirlenen pikler, bir aromatik halkaya bağlı süstitüentleri ifade etmektedir.

### 3.2. Deneylerin İstatistiksel Analizi (Statistical Analysis of Experiments)

Boyarmadde %giderim değerlerinin cevap olarak kullanıldığı istatistiksel analiz işlemi MINITAB 17 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. İki seviyeli tam faktöriyel deney tasarımı ile sorpsiyon sürecinde çalışılacak deney koşulları belirlenmiş; standart etkilerin normal olasılık grafikleri, Pareto grafiği, ana ve etkileşim etkileri grafikleri incelenmiştir. Buna ek olarak, %95 güven seviyesinde varyans analizi gerçekleştirilerek bağımsız değişkenler arasındaki etkileşimler ve en etkili parametreler belirlenmiştir. Deneysel değişkenler ve karşılık gelen cevaplar arasındaki ilişki Eş. 12'de verilen lineer eşitlik ile temsil edilmekte, istatistiksel analiz sonucu elde edilen katsayılar denklemde yerine yazılarak ilgili sorbent boyarmadde giderimine (%) etkisi belirlenmektedir.

$$Y = X_0 + X_1A + X_2B + X_3C + X_4D + X_5E + X_6AB + X_7AC + X_8AD + X_9AE + X_{10}BC + X_{11}BD + X_{12}BE + X_{13}CD + X_{14}CE + X_{15}DE + X_{16}ABC + X_{17}ABD + X_{18}ABE + X_{19}ACD + X_{20}ACE + X_{21}ADE + X_{22}BCD + X_{23}BCE + X_{24}BDE + X_{25}CDE + X_{26}ABCD + X_{27}ABCE + X_{28}ABDE + X_{29}ACDE + X_{30}BCDE \quad (12)$$

burada  $Y$  öngörülen yanıt (boyarmadde giderimi, %) olup,  $X_0$  sabit katsayıyı ve  $X_i$  ana faktörlerin etkileri ve

etkileşimleri ile ilgili katsayıları sembolize etmektedir. Çözelti pH'ı, sorbent miktarı (g/50 mL), sıcaklık (°C), temas süresi (min) ve başlangıç boyarmadde konsantrasyonu (mg/L) sırasıyla  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  ve  $E$  olarak kodlanmıştır.

#### 3.2.1. Varyans analizi-ANOVA (Analysis of variance-ANOVA)

$RH$  boyarmaddesinin sulu çözeltilerden gideriminde, faktörlerin istatistiksel analizinin gerçekleştirilmesi ve etkileşim etkilerinin incelenmesi amacıyla varyans analizi uygulanmıştır. Analiz sonucunda elde edilen ana ve etkileşim etkileri, olasılık değerleri ( $P$ -değeri), Student's- $T$ -test değerleri, Fisher  $F$ -oranları Çizelge 2 ve Çizelge 3'de verilmiştir.

Varyans analizi sonuçlarına göre, çözelti pH'ı ( $A$ ) ana etkisinin her sorbent için güvenlik seviyesi  $P < 0,05$  olacak şekilde büyük ölçüde önemli olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, modelin *kavak ağacı kabuğu esaslı sorbentler* için uygun olduğu öngörülmüştür. Ayrıca,  $KA$  sorbenti için pH ( $A$ ) etkisi ile birlikte sorbent miktarı ( $B$ ), başlangıç boyarmadde konsantrasyonu ( $E$ ) ve  $A*B$  ikili etkileşim etkilerinin de anlamlı olduğu belirlenmiştir. Uygun modele ait korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) değerleri incelendiğinde,  $KA$  (1,00),  $KAC$  (0,9994),  $KAT$  (0,9960) ve  $KAB$  (0,9971) sorbentleri için deneysel değerler ile istatistiksel modelden hesaplanan değerlerin uyumlu olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Varyans analizi sonucunda elde edilen  $X_i$  katsayıları kullanılarak Eş. 12 her sorbent için yeniden düzenlenmiş

**Çizelge 2.** Boyarmadde gideriminde 2<sup>5</sup> tam faktöriyel deneysel tasarım için istatistiksel parametreler (Statistical parameters for 2<sup>5</sup> full factorial experimental design in dye removal)

Terim	Etki				T-değeri			
	KA	KAC	KAT	KAB	KA	KAC	KAT	KAB
Sabit					224,49	49,39	23,5	31,85
A	-69,531	-60,75	-45,31	-45,37	-202,27	-40,84	-13,76	-15,68
B	8,844	4,375	20,59	15,98	25,73	2,94	6,25	5,52
C	0,131	1,525	4,08	4,19	0,38	1,03	1,24	1,45
D	1,031	2,675	2,36	8,02	3	1,8	0,72	2,77
E	-4,981	-4,712	-11,91	-13,91	-14,49	-3,17	-3,61	-4,81
A*B	-10,631	-1,738	-4,58	1,67	-30,93	-1,17	-1,39	0,58
A*C	-1,594	-1,587	-4,22	1,08	-4,64	-1,07	-1,28	0,37
A*D	-1,794	-1,862	0,26	-2,49	-5,22	-1,25	0,08	-0,86
A*E	2,969	-1,275	1,54	0,16	8,64	-0,86	0,47	0,05
B*C	-3,744	-0,687	-0,84	7,83	-10,89	-0,46	-0,26	2,71
B*D	1,481	1,237	-0,67	8,06	4,31	0,83	-0,2	2,78
B*E	-0,206	-4,25	-3,26	-1,64	-0,6	-2,86	-0,99	-0,57
C*D	0,219	1,338	1,22	-5,88	0,64	0,9	0,37	-2,03
C*E	-1,469	-1,65	2,53	-0,73	-4,27	-1,11	0,77	-0,25
D*E	-1,269	0,85	-1,09	-2,21	-3,69	0,57	-0,33	-0,76
A*B*C	2,656	1,65	2,78	-1,91	7,73	1,11	0,84	-0,66
A*B*D	0,381	-1,75	0,81	-2,03	1,11	-1,18	0,24	-0,7
A*B*E	1,069	3,287	0,62	-0,76	3,11	2,21	0,19	-0,26
A*C*D	-0,731	-1,25	-0,48	1,88	-2,13	-0,84	-0,15	0,65
A*C*E	0,356	-0,113	0,38	-0,04	1,04	-0,08	0,12	-0,02
A*D*E	0,156	-0,238	-1,34	1,88	0,45	-0,16	-0,41	0,65
B*C*D	-3,231	1,525	-2,58	-4,02	-9,4	1,03	-0,78	-1,39
B*C*E	0,156	3,187	-1,94	-1,64	0,45	2,14	-0,59	-0,57
B*D*E	-0,519	-0,637	0,03	0,68	-1,51	-0,43	0,01	0,24
C*D*E	2,369	-2,787	-1,58	3,14	6,89	-1,87	-0,48	1,09
A*B*C*D	1,644	-0,662	-0,81	-0,38	4,78	-0,45	-0,24	-0,13
A*B*C*E	0,806	-2,625	0,13	-1,38	2,35	-1,76	0,04	-0,48
A*B*D*E	-0,469	-0,575	-0,34	-3,61	-1,36	-0,39	-0,1	-1,25
A*C*D*E	0,169	0,075	-2,23	1,91	0,49	0,05	-0,68	0,66
B*C*D*E	-0,381	1,25	-0,03	0,06	-1,11	0,84	-0,01	0,02

ve %giderim için tüm katsayıları içeren model denklemleri Eş. 13-16'da verilmiştir. Eğer, bir faktörün etkisi incelenirken, düşük seviye koşulları yerine yüksek seviye koşullarında çalışıldığında elde edilen cevabın (%giderim) değeri de artıyorsa pozitif, azalıyorsa negatif katsayılar elde edilmektedir. Örneğin, kavak ağacı kabuğunun sorbent olarak kullanıldığı durumda, A, E, A\*B, A\*C, A\*C\*D, B\*C\*D\*E vb. terimlerin katsayıları negatiftir. Buna göre, diğer değişkenler sabit tutulurken çözelti pH'ındaki (A) her %1'lik artış sonucunda, boyarmadde gideriminde %34,766'lık bir azalma gerçekleşmektedir. Buna karşılık, pozitif katsayıya sahip sorbent miktarı (B), sıcaklık (C) veya temas süresi (D) ayrı ayrı incelendiğinde, bu etkilerin her %1'lik artışı sonucunda sırasıyla %4,422, %0,066 ve %0,516'lık bir artış olmaktadır. Ayrıca, bütün sorbentler için çözelti pH'ı (A) ve başlangıç boyarmadde konsantrasyonunun (E) negatif etki gösterdiği belirlenmiş, etkileşim etkilerinde ise denklemlerden görüldüğü üzere standart bir eğilim gözlenmemiştir.

$$\begin{aligned} \%Giderim (KA) = & 38,584 - 34,766A + 4,422B + 0,066C \\ & + 0,516D - 2,491E - 5,316AB - 0,797AC - 0,897AD + \\ & 1,484AE - 1,872BC + 0,741BD - 0,103BE + 0,109CD - \\ & 0,734CE - 0,634DE + 1,328ABC + 0,191ABD + \\ & 0,534ABE - 0,366ACD + 0,178ACE + 0,078ADE - \\ & 1,616BCD + 0,078BCE - 0,259BDE + 1,184CDE + \\ & 0,822ABCD + 0,403ABCE - 0,234ABDE + 0,084ACDE \\ & - 0,191BCDE \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \%Giderim (KAC) = & 36,731 - 30,375A + 2,187B + 0,763C \\ & + 1,337D - 2,356E - 0,869AB - 0,794AC - 0,931AD - \\ & 0,637AE - 0,344BC + 0,619BD - 2,125BE + 0,669CD - \\ & 0,825CE + 0,425DE + 0,825ABC + 0,875ABD + 1,644ABE \\ & - 0,625ACD - 0,056ACE - 0,119ADE + 0,762BCD \\ & + 1,594BCE - 0,319BDE - 1,394CDE - 0,331ABCD - \\ & 1,312ABCE - 0,287ABDE + 0,037ACDE + 0,625BCDE \end{aligned} \quad (14)$$

Çizelge 3. Varyans analizi (ANOVA) sonuçları (Variance analysis (ANOVA) results )

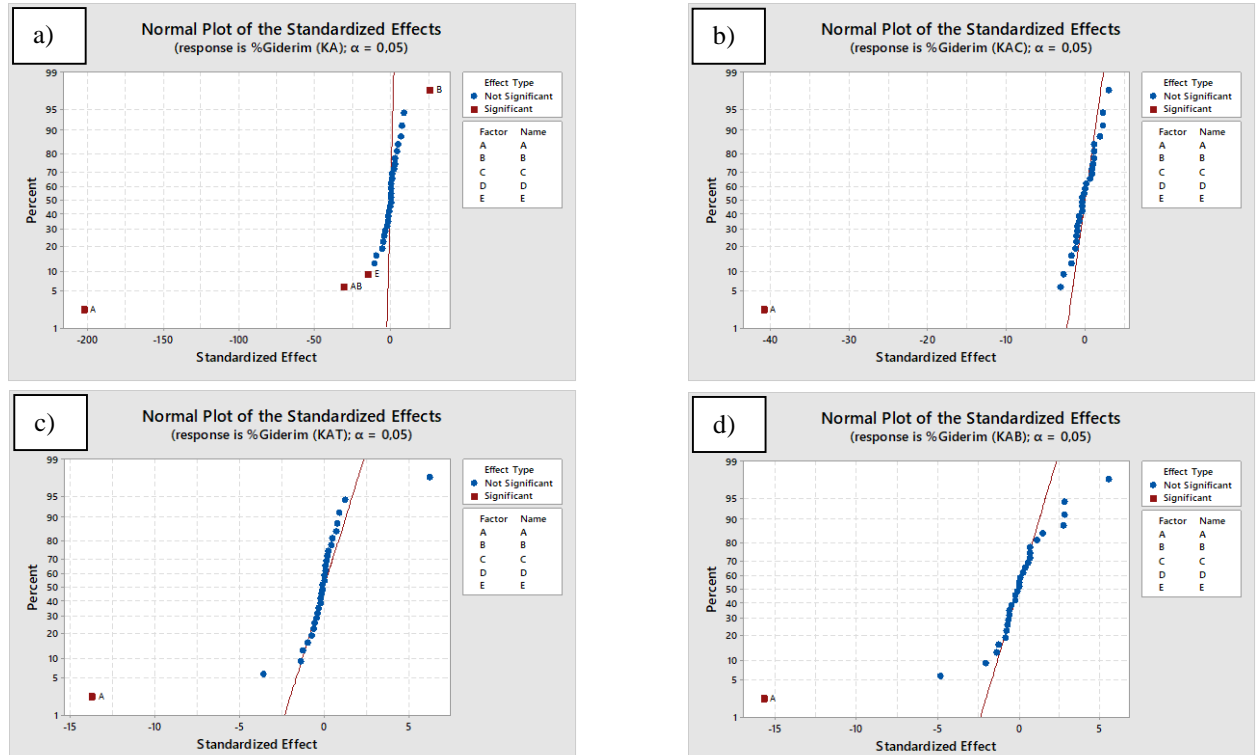
Terim	P-değeri				F-oranı			
	KA	KAC	KAT	KAB	KA	KAC	KAT	KAB
Model	0,021	0,104	0,268	0,232	1443,05	57,63	8,4	11,27
<b>Lineer</b>	0,008	0,041	0,108	0,096	8359,06	338,18	48,68	61,84
A	<b>0,003</b>	<b>0,016</b>	<b>0,046</b>	<b>0,041</b>	40914,26	1667,93	189,21	245,81
B	<b>0,025</b>	0,209	0,101	0,114	661,89	8,65	39,09	30,5
C	0,768	0,492	0,432	0,385	0,15	1,05	1,54	2,1
D	0,205	0,323	0,605	0,22	9	3,23	0,51	7,68
E	<b>0,044</b>	0,195	0,172	0,131	209,99	10,04	13,07	23,09
<b>2-yönlü etkileşim</b>	0,07	0,549	0,784	0,49	124,96	1,62	0,57	2,14
A*B	<b>0,021</b>	0,451	0,397	0,667	956,5	1,36	1,93	0,33
A*C	0,135	0,479	0,422	0,772	21,5	1,14	1,64	0,14
A*D	0,121	0,429	0,951	0,547	27,23	1,57	0,01	0,74
A*E	0,073	0,549	0,721	0,966	74,59	0,73	0,22	0
B*C	0,058	0,724	0,84	0,225	118,61	0,21	0,07	7,32
B*D	0,145	0,558	0,872	0,22	18,57	0,69	0,04	7,75
B*E	0,656	0,214	0,504	0,671	0,36	8,16	0,98	0,32
C*D	0,639	0,534	0,774	0,291	0,4	0,81	0,14	4,13
C*E	0,146	0,467	0,583	0,842	18,26	1,23	0,59	0,06
D*E	0,168	0,67	0,796	0,585	13,62	0,33	0,11	0,58
<b>3-yönlü etkileşim</b>	0,167	0,532	0,941	0,799	21,47	1,76	0,22	0,53
A*B*C	0,082	0,467	0,554	0,629	59,71	1,23	0,71	0,43
A*B*D	0,467	0,448	0,847	0,61	1,23	1,38	0,06	0,49
A*B*E	0,198	0,271	0,882	0,837	9,67	4,88	0,04	0,07
A*C*D	0,28	0,555	0,908	0,633	4,53	0,71	0,02	0,42
A*C*E	0,489	0,952	0,927	0,99	1,07	0,01	0,01	0
A*D*E	0,728	0,899	0,753	0,633	0,21	0,03	0,17	0,42
B*C*D	0,067	0,492	0,577	0,397	88,36	1,05	0,61	1,93
B*C*E	0,728	0,278	0,661	0,671	0,21	4,59	0,35	0,32
B*D*E	0,373	0,742	0,994	0,853	2,28	0,18	0	0,06
C*D*E	0,092	0,312	0,715	0,474	47,48	3,51	0,23	1,18
<b>4-yönlü etkileşim</b>	0,292	0,677	0,972	0,805	6,34	0,83	0,11	0,45
A*B*C*D	0,131	0,733	0,847	0,917	22,87	0,2	0,06	0,02
A*B*C*E	0,257	0,328	0,975	0,716	5,5	3,11	0	0,23
A*B*D*E	0,403	0,765	0,934	0,43	1,86	0,15	0,01	1,55
A*C*D*E	0,709	0,968	0,621	0,629	0,24	0	0,46	0,43
B*C*D*E	0,467	0,555	0,994	0,988	1,23	0,71	0	0
<b>R<sup>2</sup> (%)</b>	100	99,94	99,60	99,71				

$$\begin{aligned} \%Giderim (KAT) = & 38,70 - 22,65A + 10,30B + 2,04C + \\ & 1,18D - 5,95E - 2,29AB - 2,11AC + 0,13AD + 0,77AE - \\ & 0,42BC - 0,33BD - 1,63BE + 0,61CD + 1,27CE \\ & - 0,55DE + 1,39ABC + 0,40ABD + 0,31ABE - 0,24ACD \\ & + 0,19ACE - 0,67ADE - 1,29BCD - 0,97BCE \\ & + 0,02BDE - 0,79CDE - 0,40ABCD + 0,07ABCE \\ & - 0,17ABDE - 1,12ACDE - 0,02BCDE \end{aligned} \quad (15)$$

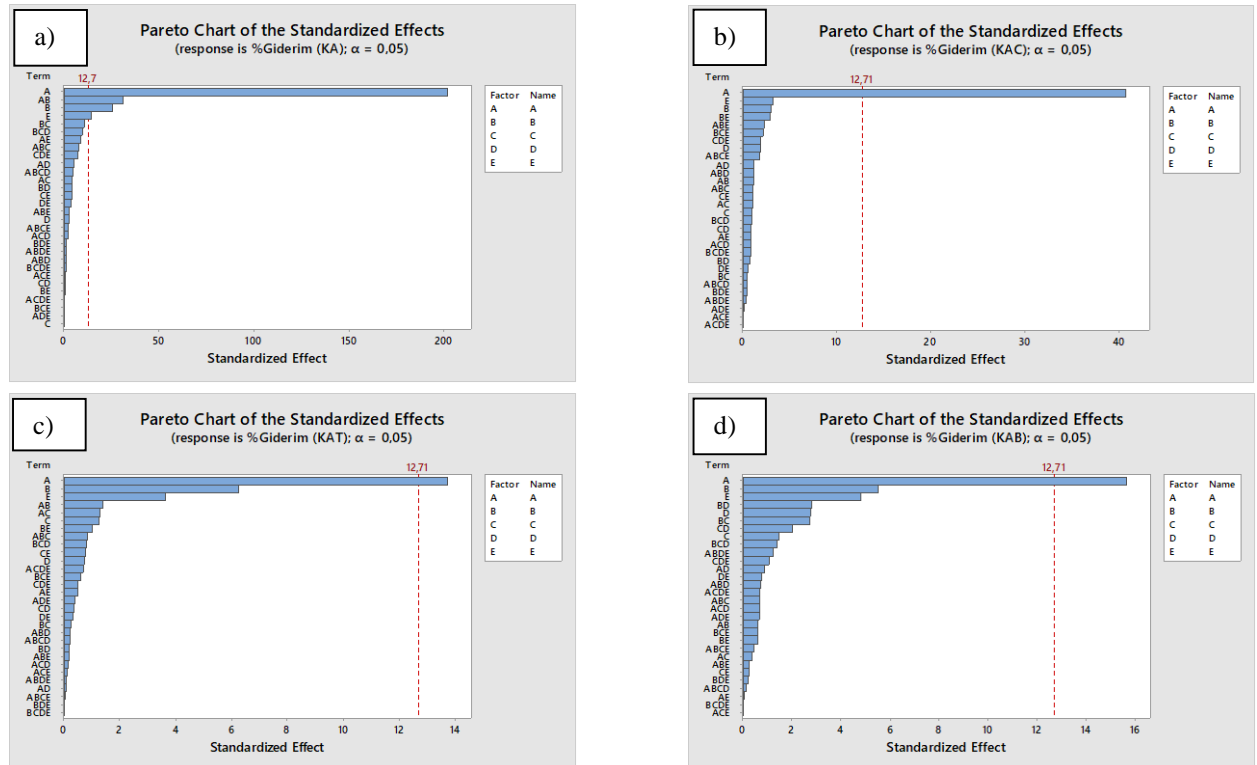
$$\begin{aligned} \%Giderim (KAB) = & 46,08 - 22,68A + 7,99B + 2,10C \\ & + 4,01D - 6,95E + 0,83AB + 0,54AC - 1,25AD + 0,08AE \\ & + 3,92BC + 4,03BD - 0,82BE - 2,94CD - 0,37CE \\ & - 1,10DE - 0,95ABC - 1,02ABD - 0,38ABE + 0,94ACD \\ & - 0,02ACE + 0,94ADE - 2,01BCD - 0,82BCE \\ & + 0,34BDE + 1,57CDE - 0,19ABCD - 0,69ABCE \\ & - 1,80ABDE + 0,95ACDE + 0,03BCDE \end{aligned} \quad (16)$$

### 3.2.2. Standart etkilerin normal olasılık dağılımları ve Pareto grafikleri (Normal probability plots of standardized effects and Pareto charts)

Normal olasılık grafikleri kullanıldığında her etki bir nokta ile simgelenmekte ve etkilerinin dağılımı incelenmektedir [19]. Eğer, grafikteki noktalar bir doğru boyunca düzgün bir şekilde dağılırsa, verilerin normal dağıldığı sonucuna ulaşılır [20]. Standart etkiler, etkinin "0" olduğunu belirten boş hipotezi doğrulayan t-istatistikleri olup, standart etkilerin normal olasılık grafikleri Şekil 2'de verilmiştir. Normal olasılık grafiklerinin dağılımları incelendiğinde, tüm noktaların KA için -200 ila +25, KAC için -45 ila +5, KAT için -15 ila +10 ve KAB için -20 ila +10 aralığında olduğu görülmüştür. Normal dağılım, modelin, uygun değerlerin gözlenen değerden nominal bir sapma göstermesini



Şekil 2. “%Giderim” için standart etkilerin normal olasılık grafikleri: a) KA b) KAC, c) KAT ve d) KAB (Normal probability plots of standard effects for “%Removal”: a) KA b) KAC, c) KAT and d) KAB)



Şekil 3. “%Giderim” için Pareto grafikleri: a) KA b) KAC, c) KAT ve d) KAB (Pareto charts for “%Removal”: a) KA b) KAC, c) KAT and d) KAB)

önermektedir [21]. Normal olasılık grafiklerinin sağ tarafında bulunan faktörler pozitif katsayılara sahip olmasına rağmen, grafiğin sol tarafında negatif katsayılar tanımlanmaktadır. Faktörler ve etkileşimler anlamlı ise

daire, önemsiz ise kare ile sembolize edilmektedir. Şekil 3’de verilen standart etkilerin Pareto grafikleri ise, her etkinin ve etkileşim etkilerinin anlamlı olup olmadığı hakkında bilgi vermektedir. Pareto grafikleri ile normal



dağılım grafikleri uyumlu olup, dikey çizgili hattın sağ tarafında kalan etkilerin anlamlı olduğu bilinmektedir. Pareto grafiklerinde etkiler büyüklük sırasına göre sıralanmakta ve olasılık değeri 0,05 olmak üzere bir serbestlik derecesi için  $t$ -değeri=12,71 olarak tanımlanmaktadır. Buna göre, KA sorbenti için A, A\*B, B ve E etkileri anlamlı iken; diğer sorbentler için sadece A etkisinin anlamlı olduğu ve en yüksek etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

### 3.2.3. Ana etki ve etkileşim etkileri grafikleri (Plots of main effects and interaction effects)

Faktör etkileri incelenirken, seviye değiştirildiğinde cevapta (%Giderim) meydana gelen değişime bağlı olarak etkinin pozitif ya da negatif değere sahip olduğu belirlenmektedir. RH boyarmaddesi gideriminde kullanılan sorbentler için ana etkilerin grafiği (Şekil 4) incelendiğinde, A ve E etkilerinin negatif olduğu görülmektedir. Seviye değişimi sırasında etkinin meydana getirdiği değişimin istatistiksel derecesi iki seviye arasındaki çizginin yüksekliği ile orantılıdır. Örneğin, çözelti pH'nın (A) artırılması boyarmadde gideriminin önemli ölçüde azalmasına neden olmuştur. Benzer şekilde, başlangıç boyarmadde konsantrasyonunun (E) artırılması da sorbent üzerinde bulunan aktif alanların azalmasına bağlı olarak giderimin düşmesine neden olmuştur [22]. Buna karşılık, sorbent miktarı (B), sıcaklık (C) ve temas süresinin (D) cevap (%giderim) üzerinde pozitif etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

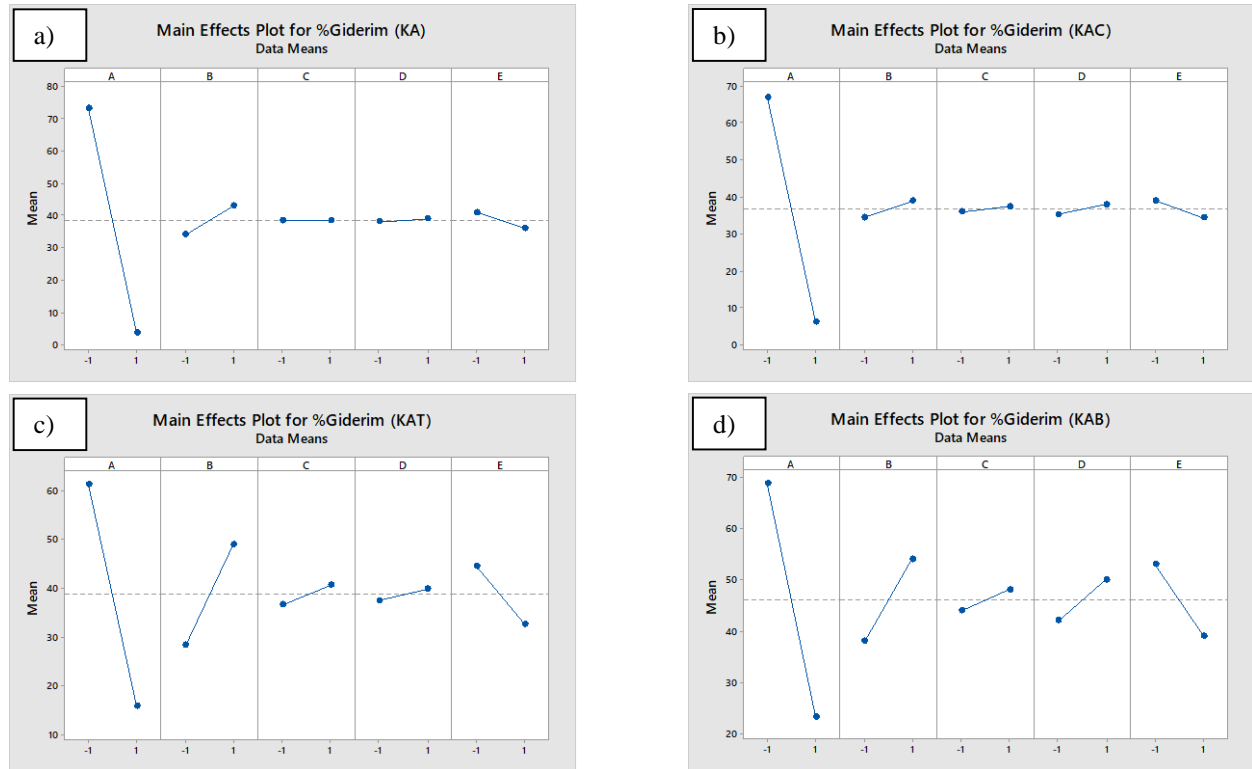
İstatistiksel analiz gerçekleştirilirken, ana etkilerin yanı sıra etkileşim etkilerinin incelenmesi son derece önemlidir. İki faktörün etkileşim etkisi yüksek olduğunda, birbirine paralel olmayan doğrular gözlenmektedir. Şekil 5'de RH boyarmaddesinin gideriminde etkili olan beş faktörün ikili etkileşim etkisi (A\*B, A\*C, A\*D, A\*E, B\*C, B\*D, B\*E, C\*D, C\*E ve D\*E) grafikleri verilmiştir. Buna göre, pH (A) ile her etkinin etkileşimlerinin (A\*B, A\*C, A\*D ve A\*E) diğer etkileşimlere kıyasla daha güçlü olduğu ve pH düşük olduğunda diğer faktörler ile etkileşiminin yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. KAB sorbenti kullanıldığında, başlangıç boyarmadde konsantrasyonu (E) 50 mg/L için pH'nın (A) 2'den 8'e artırılmasıyla %giderimin %95,6'dan %47,0'a düştüğü belirlenmiştir. Benzer eğilimle, başlangıç boyarmadde konsantrasyonu (E) 100 mg/L için pH'nın (A) 2'den 8'e artırılmasıyla %giderimin %78,3'ten %31,8'e düştüğü belirlenmiştir.

### 3.3. İzoterm ve Kinetik Modellerinin İncelenmesi (Investigation of Isotherm and Kinetic Models)

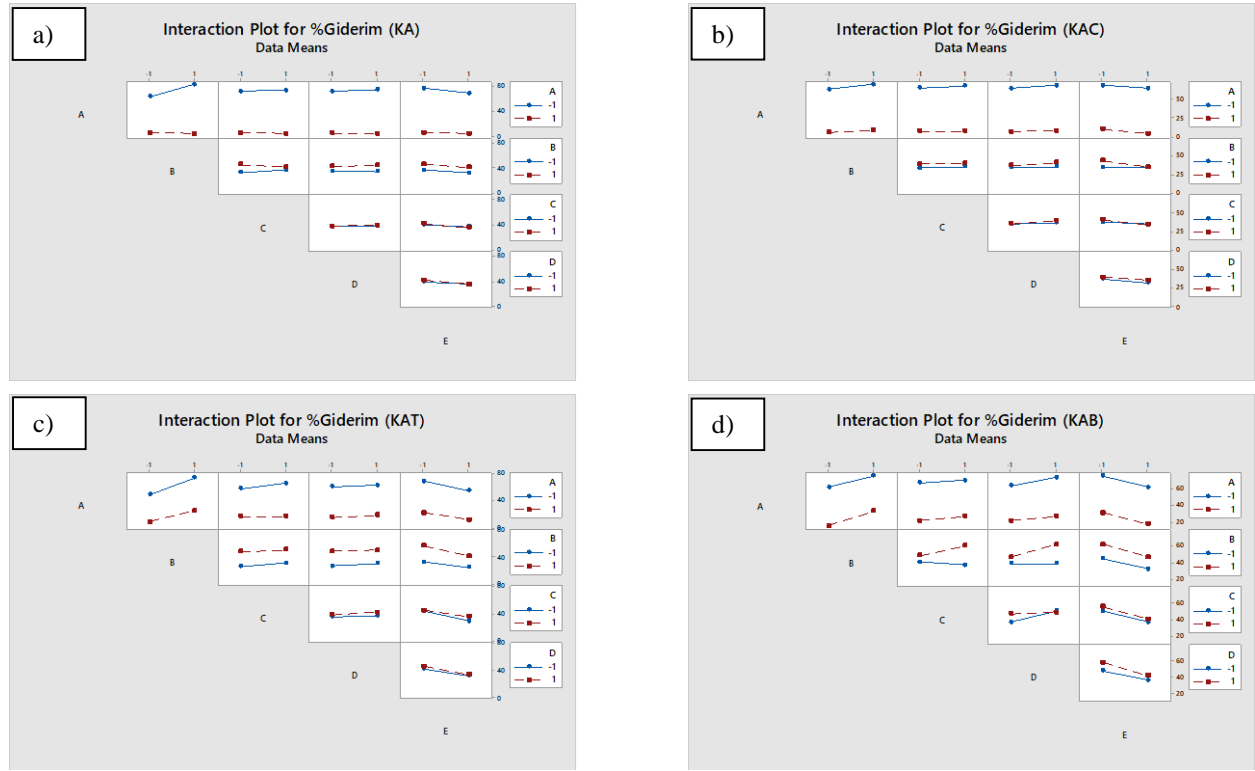
Sorpsiyon sistemlerinin tasarımında, verilerin farklı izoterm ve kinetik modellere göre analiz edilmesi uygun modelin belirlenmesi için önemli adımlardır. Bu bölümde kinetik modeller ve denge izotermelerinden elde edilen katsayılar ve sabitler incelenmiştir.

#### 3.3.1. Hız modellerinin uygulanması (Implementation of kinetic models)

RH boyarmaddesinin sulu çözeltilerden giderimi için kullanılan kavak ağacı kabuğu esaslı sorbentlerin kinetik



Şekil 4. “%Giderim” için ana etkilerin grafikleri: a) KA b) KAC, c) KAT ve d) KAB (Plots of main effects for “%Removal”: a) KA b) KAC, c) KAT and d) KAB)



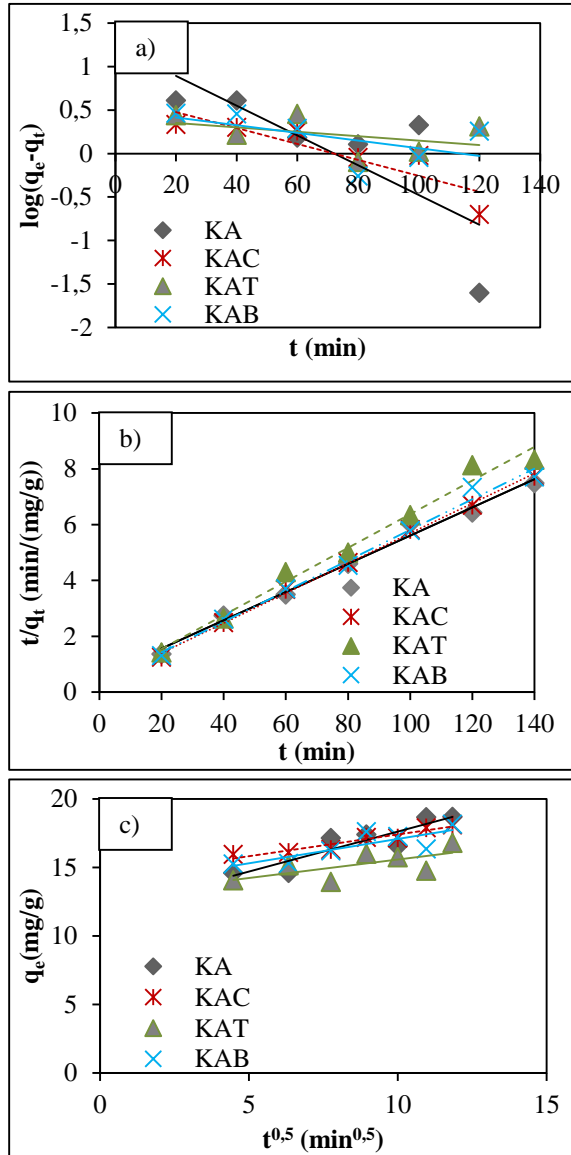
Şekil 5. “%Giderim” için etkileşim etkilerinin grafikleri: a) KA b) KAC, c) KAT ve d) KAB (Plots of interaction effects for “%Removal”: a) KA b) KAC, c) KAT and d) KAB)

Çizelge 4. RH boyarmaddesi giderimi için partikül içi difüzyon, yalancı-birinci ve ikinci derece kinetik model parametreleri (The intra particle diffusion, pseudo-first and second order kinetic model parameters for RH dye removal)

Model	Parametreler	Sorbent			
		KA	KAC	KAT	KAB
-	$q_{e,dny}$ (mg/g)	18,68	18,10	16,80	18,15
Yalancı-birinci derece model	$R^2$	0,5943	0,7818	0,1797	0,3270
	$q_{e,hsp}$ (mg/g)	17,26	4,60	2,52	3,17
	$k_1$ (min <sup>-1</sup> )	0,039151	0,020727	0,004606	0,009212
Yalancı-ikinci derece model	$R^2$	0,9892	0,9977	0,9834	0,9904
	$q_{e,hsp}$ (mg/g)	20,00	18,87	16,67	18,52
	$k_2$ (g/mg·min)	0,004529	0,008538	0,010465	0,008972
Partikül içi difüzyon modeli	$R^2$	0,8224	0,9124	0,4545	0,6828
	C	11,752	14,241	13,531	12,880
	$k_i$ (mg/g·min <sup>0,5</sup> )	0,5866	0,3154	0,3547	0,2703

modellemesi için üç farklı hız modeli kullanılmıştır (Şekil 6). 40 °C’de ve pH değeri 2 olarak ayarlandığında 50 mg/L’lik boyarmadde konsantrasyonu için elde edilen kinetik parametreler ( $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_i$ ,  $q_{e,hsp}$  ve C) ve korelasyon katsayıları ( $R^2$ ) hesaplanarak Çizelge 4’te verilmiştir.  $R^2$  değerleri incelendiğinde, RH boyarmaddesi gideriminin sorpsiyon kinetiğinin yalancı-ikinci derece modele uyduğu, yüzey ve adsorban arasında elektronik bağların etkin olduğu kemisorpsiyon sürecinin gerçekleştiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu modelde, hız sınırlayıcı adım kimyasal adsorpsiyonu içeren yüzey adsorpsiyonu olup iki faz arasındaki fizikokimyasal etkileşimlerden kaynaklanan bir ayırma söz konusudur [23]. Ayrıca, deneysel olarak elde edilen ( $q_{e,dny}$ ) ve hız modellerine göre hesaplanan ( $q_{e,hsp}$ ) adsorplama kapasitesi değerleri

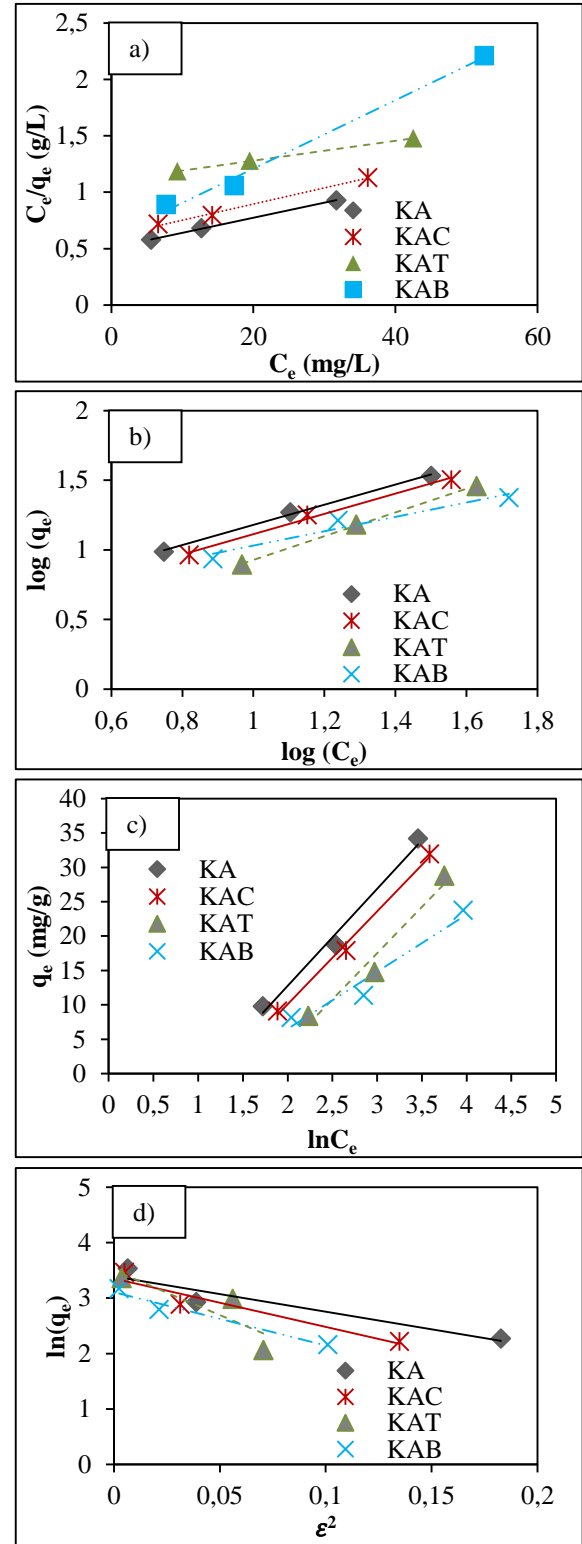
kıyaslandığında; yalancı-birinci derece modelde aradaki farkın fazla olduğu, ancak yalancı-ikinci derece modelde değerlerin birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Partikül içi difüzyon modeli, adsorpsiyon hızının adsorbatın adsorbana doğru yayılma hızına bağlı olduğu prosesleri tanımlamaktadır. Partikül içi difüzyon modeli (Şekil 6-c) grafiğinde, geniş bir temas süresi aralığı için çizilen doğrusal hattın orijinden geçmediği belirlenmiştir. Bu eğilimin, sorpsiyon işleminin başlangıç ve bitiş aşamalarında kütle transferindeki değişikliklerden kaynaklandığı bildirilmiştir [24].



Şekil 6. *RH* boyarmaddesi giderimi için kinetik modeller: a) yalancı-birinci derece, b) yalancı-ikinci derece ve c) partikül içi difüzyon (Kinetic models for the removal of *RH* dye: a) pseudo-first order, b) pseudo-second order, and c) intra particle diffusion)

### 3.3.2. Sorpsiyon izotermelerinin (Application of sorption isotherms)

Kavak ağacı kabuğu esaslı sorbentlerin *RH* boyarmaddesi gideriminde denge parametrelerinin belirlenmesi amacıyla, farklı başlangıç boyarmadde konsantrasyonlarında (25, 50 ve 100 mg/L) elde edilen veriler (koşullar: pH=2, sıcaklık=40 °C ve süre=120 min) çeşitli izotermeler kullanılarak analiz edilmiştir. İzotermeler Şekil 7'de verilmiş, elde edilen sabitler ve R<sup>2</sup> değerleri Çizelge 5'te özetlenmiştir. Korelasyon katsayıları incelendiğinde, Langmuir izotermine bütün sorbentler için kullanışlı olmasının yanında Freundlich ve Temkin modellerinin de *RH* boyarmaddesi giderimi sürecine uygun olduğu belirlenmiştir. Langmuir izotermi boyarmaddenin homojen sorbent yüzeyinde tek tabakalı emilimini gösterirken, tutulan moleküller arasındaki



Şekil 7. *KA* esaslı sorbentlerin *RH* boyarmaddesi gideriminde izoterm modelleri: a) Langmuir, b) Freundlich, c) Temkin ve d) Dubinin-Radushkevich (Isotherm models for *RH* dye on *KA*-based sorbents: a) Langmuir, b) Freundlich, c) Temkin, and d) Dubinin-Radushkevich)

yanal etkileşimleri ve sterik koaksiyonu yok saymaktadır [25]. Freundlich modeli ise, yüzeyel heterojenliği esas almakla birlikte sorbent aktif bölgelerinin ve tutulan

**Çizelge 5.** İzoterm katsayıları ve regresyon korelasyon katsayılarının karşılaştırılması (Comparison of isotherm coefficients and regression correlation coefficients)

Model	Parametreler	Sorbent			
		$K_A$	$K_{AC}$	$K_{AT}$	$K_{AB}$
Langmuir model	$R^2$	0,9994	0,9941	0,9998	0,9923
	$q_m$ (mg/g)	74,63	69,93	113,64	32,90
	$K_L$ (L/mg)	0,0265	0,0235	0,0080	0,0505
	$R_L$	0,43	0,46	0,71	0,28
Freundlich model	$R^2$	0,9971	0,9907	0,9992	0,9437
	$n$	1,38	1,37	1,17	1,94
	$K_F$ (mg/g(L/mg) <sup>1/n</sup> )	2,84	2,42	1,18	3,28
Temkin model	$R^2$	0,9846	0,9943	0,9609	0,9444
	$B$	14,103	13,505	13,432	8,3090
	$b_t$ (J/mol)	0,0054	0,0052	0,0052	0,0032
	$A_T$ (L/g)	0,3349	0,2854	0,1835	0,2965
Dubinin-Radushkevich model	$R^2$	0,8963	0,9179	0,9637	0,7235
	$q_m$ (mg/g)	29,75	28,58	33,17	22,31
	$\beta$ (mol <sup>2</sup> /kJ <sup>2</sup> )	6,3509	8,7035	16,1340	9,5878
	$E$ (kJ/mol)	0,2806	0,2397	0,1760	0,2284

moleküllere karşı bu bölgelerin enerjilerinin üssel dağıldığını kabul etmektedir [26]. Freundlich izotermine göre  $n$  değerinin 1-10 arasında olması ve Langmuir izotermine göre  $0 < R_L < 1$  aralığında elde edilen ayırma faktörü, sorpsiyonun elverişli olduğunu göstermektedir. Dubinin-Radushkevich modelinden sorpsiyon işleminin ortalama enerjisi ( $E$ , kJ/mol) hesaplanarak sorpsiyonun fiziksel ve kimyasal mekanizması analiz edilebilmektedir.  $E < 8$  kJ/mol olduğunda sorpsiyon üzerinde fiziksel kuvvetlerin etkili olduğu bilinmektedir.  $8 < E < 16$  kJ/mol değerleri arasında ise sorpsiyonun iyon değişim mekanizması üzerinden gerçekleştiği  $E > 16$  kJ/mol olduğunda sorpsiyon işleminde partikül difüzyonunun etkili olduğu bilinmektedir [27]. Buna göre,  $RH$  boyarmaddesi sorpsiyonunun kavak ağacı esaslı sorbentler kullanıldığında fiziksel etkileşimler ile yüzeye tutunduğu sonucuna ulaşılmıştır.

#### 4. SİMGELER VE KISALTMALAR (SYMBOLS AND ABBREVIATIONS)

$A$  : Çözelti pH'ı  
 $A_T$  : Temkin izotermi denge bağlanma sabiti (L/g)  
 $B$  : Temkin izotermi sorpsiyon ısısı ile ilgili sabit  
 $B$  : Sorbent miktarı (g/50 mL)  
 $b_t$  : Temkin izoterm sabiti (J/mol)  
 $C$  : Sıcaklık (°C)  
 $D$  : Temas süresi (min)  
 $C_e$  : Dengedeki boyarmadde konsantrasyonu (mg/L)  
 $C_0$  : Başlangıç çözeltisindeki boyarmadde konsantrasyonu (mg/L)  
 $E$  : Dubinin-Radushkevich izotermi ortalama sorpsiyon enerjisi (kJ/mol)

$E$  : Başlangıç boyarmadde konsantrasyonu (mg/L)  
 $F$ -oranı: Fisher  $F$ -oranı  
 $K_A$  : Kavak Ağacı Kabuğu,  
 $K_{AB}$  : Kavak Ağacı Baz Aktivasyonu (KOH)  
 $K_{AC}$  : Kavak Ağacı Çarı  
 $K_{AT}$  : Kavak Ağacı Tuz Aktivasyonu (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)  
 $K_F$  : Freundlich sorpsiyon sabiti (mg/g(L/mg)<sup>1/n</sup>)  
 $k_i$  : Hücre içi difüzyon hız sabiti (mg/g·min<sup>0,5</sup>)  
 $K_L$  : Sorpsiyon hızına göre elde edilen Langmuir sabiti (L/mg)  
 $k_1$  : Yalancı-birinci dereceden sorpsiyon hız sabiti (min<sup>-1</sup>)  
 $k_2$  : Yalancı-ikinci dereceden sorpsiyon hız sabiti (g/mg·min)  
 $n$  : Freundlich izotermi heterojenite faktörü  
 $P$ -değeri : Olasılık değeri  
 $q_e$  : Dengeye sorbent tarafından tutulan boyarmadde miktarı (mg/g)  
 $q_m$  : Maksimum sorpsiyon kapasitesine göre elde edilen Langmuir sabiti (mg/g)  
 $q_t$  :  $t$  süresi sonunda sorbent tarafından tutulan boyarmadde miktarı (mg/g)  
 $R$  : İdeal gaz sabiti (J/molK)  
 $R_L$  : Langmuir izotermine ait boyutsuz ayırma faktörü  
 $t$  : Temas süresi (min)  
 $T$  : Mutlak sıcaklık (K)  
 $T$ -değeri: Student's- $T$ -test değeri  
 $V$  : Çözelti hacmi (L)  
 $W$  : Kullanılan sorbentin miktarı (g)

- $X_0$  : Global ortalama  
 $X_i$  : Ana faktörlerin etkileri ve etkileşimleriyle ilgili regresyon katsayısı  
 $Y$  : Öngörülen yanıt (boyarmadde giderimi, %)  
 $\beta$  : Dubinin-Radushkevich izotermi sorpsiyon enerjisi ile ilgili sabiti (mol<sup>2</sup>/kJ<sup>2</sup>)  
 $\varepsilon$  : Polanyi potansiyeli

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Deneysel faktörlerin optimizasyonunda, geleneksel olarak tek parametrenin incelendiği modellerin uygulanması sırasında hem zaman hem maliyet açısından ortaya çıkan dezavantajın, faktöriyel deney tasarım modelleri kullanıldığında azaldığı bilinmektedir. Atıksu artırımında yeni/ucuz sorbentlerin değerlendirilmesi, süreci etkileyen parametrelerin belirlenmesi ve deneysel koşulların optimize edilmesi ile ilgili çalışmalar dünya çapında yoğun bir şekilde devam etmektedir. Gerçekleştirilen çalışmada, kavak ağacı kabuğu esaslı malzemelerin *RH* boyarmadde sorpsiyonunda değerlendirilmesi sonucu, %80-95 aralığında giderim sağlanmıştır. 2<sup>5</sup> tam faktöriyel deney tasarım modeli ile oluşturulan çalışma koşullarında elde edilen %giderim değerleri analiz edildiğinde çözelti asiditesinin oldukça önemli olduğu (%95 güvenlik düzeyinde) sonucuna ulaşılmıştır. İzoterm modelleri incelendiğinde, boyarmadde gideriminin homojen sorbent yüzeyinde gerçekleştiği ve Langmuir izotermine uyduğu belirlenmiştir. Ayrıca, Dubinin–Radushkevich modeline göre hesaplanan sorpsiyon enerjisinin 8 kJ/mol değerinden düşük olması Van der Waals kuvvetleri etkisiyle fiziksel adsorpsiyonun gerçekleştiğinin göstergesidir. Kinetik modeller incelendiğinde ise, yalancı-ikinci derece kinetik modele uygun olarak sorpsiyon sürecinde fizikokimyasal etkileşimin söz konusu olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Sonuç olarak, ormansal/endüstriyel atık olan kavak ağacı kabuğunun yanı sıra hammaddenin karbonizasyonu ve aktivasyonu ile üretilen karbonlu malzemeler kullanılmasıyla boyarmadde gibi atıksularda ciddi tehlike oluşturan kirleticilerin gideriminin etkili bir şekilde gerçekleştirilebileceği tespit edilmiştir.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Eren Y., “Bölüm-4 Biyolojik Çeşitlilik ve Türkiye’deki Durum”, Çevre ve Enerji, Editör: Aydın Kocaeren A., *Nobel Akademik Yayıncılık*, Ankara, Türkiye, 61-70, (2016).
- [2] Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü. Toprak Su Kaynakları. <http://www.dsi.gov.tr/toprak-ve-su-kaynaklari>. Erişim Tarihi Haziran 6, 2018.
- [3] Japan Display Inc. Group. Environmental Report 2013: A clean earth for the next generation. [https://www.j-display.com/english/Environment/report\\_backnumber.html#2013](https://www.j-display.com/english/Environment/report_backnumber.html#2013). Erişim Tarihi Şubat 20, 2019.
- [4] Özbakır S.N., “Birleşmiş Milletler Binyıl Kalkınma Hedefleri ve 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri-Hedef 6:Temiz Su ve Sıhhi Koşullar”, *Pusula Dergisi*, 1-21, (2016).
- [5] Kroiss H., “Experimental methods in wastewater treatment”, Editör: van Loosdrecht M.C., Nielsen P.H., Lopez-Vazquez C.M. and Brdjanovic D., *IWA Publishing*, London, UK, (2016).
- [6] Elfarash A., Mawad A.M., Yousef N.M. and Shoreit, A.A., “Azoreductase kinetics and gene expression in the synthetic dyes-degrading *Pseudomonas*”, *Egyptian J. Basic Appl. Sci.*, 4(4): 315-322, (2017).
- [7] Garg V.K., Gupta R., Yadav A.B. and Kumar R., “Dye removal from aqueous solution by adsorption on treated sawdust”, *Bioresource Technol.*, 89(2): 121-124, (2003).
- [8] Yücel E., “Ağaçlar ve Çalılar-1”, *Türmatsan*, Eskişehir, Türkiye, 194-197, (2005).
- [9] Ozbay N. and Yargic A.S., “Statistical analysis of Cu (II) and Co (II) sorption by apple pulp carbon using factorial design approach”, *J. Ind. Eng. Chem.*, 57: 275-283, (2018).
- [10] Sharma A., Bhattacharyya K.G. “Adsorption of chromium(VI) on *Azadirachta Indica* (neem) leaf powder”, *Adsorption*, 10: 327-338, 2005.
- [11] Ozbay N. and Yargic A.S., “Factorial experimental design for Remazol Yellow dye sorption using apple pulp/apple pulp carbon–titanium dioxide co-sorbent”, *J. Clean. Prod.*, 100: 333-343, (2015).
- [12] Okur M., “Tekstil Atıksularındaki Metal Kompleks Boyarmaddelerin Yumurta Kabukları ile Giderimi”, *J. Fac. Eng. Archit. Gaz.*, 28(4): 777-785, (2013).
- [13] Gupta N., Kushwaha A.K. and Chattopadhyaya M.C., “Adsorptive removal of Pb<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup> and Ni<sup>2+</sup> by hydroxyapatite/chitosan composite from aqueous solution”, *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, 43(1): 125-131, (2012).
- [14] Brasil J.L., Ev R.R., Milcharek C.D., Martins L.C., Pavan F.A., Dos Santos A.A., Dias S.L.P., Dupont J., Noreña C.P.Z and Lima E.C., “Statistical design of experiments as a tool for optimizing the batch conditions to Cr(VI) biosorption on *Araucaria angustifolia* wastes”, *J. Hazard. Mater.*, 133(1): 143-153, (2006).
- [15] Saadat S. and Karimi-Jashni A., “Optimization of Pb(II) adsorption onto modified walnut shells using factorial design and simplex methodologies”, *Chem. Eng. J.*, 173(3): 743-749, (2011).
- [16] Pavan F.A., Gushikem Y., Mazzocato A.C., Dias S.L.P. and Lima E.C., “Statistical design of experiments as a tool for optimizing the batch conditions to methylene blue

- biosorption on yellow passion fruit and mandarin peels”, *Dyes Pigments*, 72(2): 256-266, (2007).
- [17] Zhong Z.Y., Yang Q., Li X.M., Luo K., Liu Y. and Zeng G.M., “Preparation of peanut hull-based activated carbon by microwave-induced phosphoric acid activation and its application in Remazol Brilliant Blue R adsorption”, *Ind. Crop. Prod.*, 37(1): 178-185, (2012).
- [18] Yargıç, A.Ş., “Karbon köpük üretimi ve karakterizasyonu”, *Doktora Tezi*, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi-Anadolu Üniversitesi Ortak Protokol, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2017).
- [19] Safa Y. and Bhatti H.N., “Biosorption of direct red-31 and direct orange-26 dyes by rice husk: application of factorial design analysis”, *Chem. Eng. Res. Des.*, 89: 2566-2574, (2011).
- [20] Gottipati R. and Mishra S., “Process optimization of adsorption of Cr (VI) on activated carbons prepared from plant precursors by a two-level full factorial design”, *Chem. Eng. J.*, 160(1): 99-107, (2010).
- [21] Rathinam A., Rao J.R. and Nair, B.U., “Adsorption of phenol onto activated carbon from seaweed: Determination of the optimal experimental parameters using factorial design”, *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, 42: 952-956, (2011).
- [22] Kaouah F., Boumaza S., Berrama T., Trari M. and Bendjama Z., “Preparation and characterization of activated carbon from wild olive cores (oleaster) by H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> for the removal of Basic Red 46”, *J. Clean. Prod.*, 54: 296-306, (2013).
- [23] Robati D., “Pseudo-second-order kinetic equations for modeling adsorption systems for removal of lead ions using multi-walled carbon nanotube”, *J. Nanostructure Chem.*, 3(1): 55, (2013).
- [24] Ramachandran P., Vairamuthu R. and Ponnusamy, S., “Adsorption isotherms, kinetics, thermodynamics and desorption studies of reactive Orange 16 on activated carbon derived from Ananas comosus (L.) carbon”, *J. Eng. Appl. Sci.*, 6(11): 15-26, (2011).
- [25] Foo K.Y. and Hameed B.H., “Insights into the modeling of adsorption isotherm systems”, *Chem. Eng. J.*, 156(1): 2-10, (2010).
- [26] Prasad R.K. and Srivastava S.N., “Sorption of distillery spent wash onto fly ash: Kinetics, mechanism, process design and factorial design”, *J. Hazard. Mater.*, 161(2): 1313-1322, (2009).
- [27] Selim A.Q., Mohamed E.A., Mobarak M., Zayed A.M., Seliem M.K. and Komarneni, S., “Cr(VI) uptake by a composite of processed diatomite with MCM-41: Isotherm, kinetic and thermodynamic studies”, *Micropor. Mesopor. Mater.*, 260: 84-92, (2018).





POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Derin öğrenme tabanlı otomatik plaka tanıma

## *Automatic license plate recognition based on deep learning*

Yazar(lar) (Author(s)): Fatih BAYRAM

ORCID: 0000-0001-9578-9478

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Bayram F., “Derin öğrenme tabanlı otomatik plaka tanıma”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 955-960, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.515830

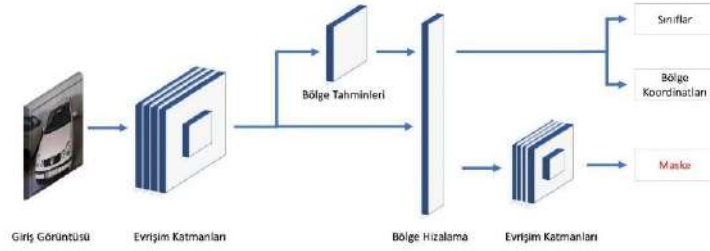
# Derin Öğrenme Tabanlı Otomatik Plaka Tanıma

## Automatic License Plate Recognition Based on Deep Learning

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Maskeli Bölgesel Evrişimsel Sinir Ağı (Mask Region Based Convolutional Neural Network)

### Grafik Özet (Graphical Abstract)



Şekil. M-BESA Mimarisi /Figure. Mask-RCNN architecture

### Amaç (Aim)

Bu çalışmada kamera görüntüsü üzerinden plaka karakterlerini otomatik olarak tanıyabilen bir sistem geliştirilmesi amaçlanmıştır. / In this study, it is aimed to develop a system that can automatically recognize license plate characters from the camera image.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Geliştirilen sistem görüntüden bölgesel nesne tanımda oldukça başarılı olan M-BESA yöntemini kullanmaktadır. Bu yöntemde bölge hizalama katmanından sonra, tekrar evrişim katmanları uygulanarak nesnelerin ikili maskesi elde edilmektedir. / The developed system uses the Mask-RCNN method, which is very successful in regional objects recognition on image. In this method, after the region alignment layer, the convolution layers are reapplied to obtain the binary masks of objects.

### Özgünlük (Originality)

Diğer geleneksel yöntemlerden farklı olarak önerilen model; plaka konumunu tespit etmek, plakadaki karakterlerin konumunu tespit etmek gibi ek aşamalara gerek duymadan doğrudan karakter tanıma işlemi gerçekleştirebilmektedir. / Unlike other traditional methods, the proposed model; It can perform character recognition without the need for additional steps such as determining the position of the plate, determining the position of the plate characters.

### Bulgular (Findings)

Sonuçlar, önerilen sistemin diğer çalışmalara kıyasla daha başarılı olduğunu göstermektedir. / The results show that the proposed system is more successful than other studies.

### Sonuç (Conclusion)

M-BESA modeli ve karakter maskelerinin kullanılması otomatik plaka tanıma uygulamalarında performansı arttırmaktadır. / Using Mask-RCNN model and character masks increases performance in automatic license plate recognition applications.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Derin Öğrenme Tabanlı Otomatik Plaka Tanıma

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Fatih BAYRAM\***

Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 21.01.2019 ; Kabul/Accepted : 18.09.2019)

## ÖZ

Günümüzde araç sayısındaki artış plaka tanıma sistemlerine olan ihtiyacı arttırmıştır. Otomatik plaka tanıma sistemleri trafik denetim işlemleri, otoyol geçişleri, otopark giriş-çıkış kontrolleri ve daha birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Geleneksel görüntü işleme teknikleri ile ham görüntü çok fazla ön işlemden geçirilmesi gerekmekte iken, bu alandaki son gelişmelerle birlikte ön işleme süreçleri önemli ölçüde azalmış ve başarı oranları artmıştır.

Bu çalışmada kamera görüntülerinden otomatik olarak plaka tanıyabilen bir sistem geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem bilgisayarla görü alanındaki en ileri derin öğrenme tekniklerinden olan Maskeli Bölgesel Evrimsel Sinir Ağları (M-BESA) tabanlıdır. Bu makalede evrimsel sinir ağları ve kullanılan M-BESA modeli elde edilen sonuçlarıyla birlikte açıklanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Otomatik plaka tanıma, derin öğrenme, maskeli bölgesel evrimsel sinir ağları.

# Automatic License Plate Recognition Based on Deep Learning

## ABSTRACT

Nowadays, the increase in the number of vehicles has enhanced the importance of automatic license plate recognition systems. The automatic license plate recognition systems has widely used in areas of traffic control operations, highway crossings, car park entrance-exit controls etc. As the traditional image processing techniques have a need of raw image's excessive pre-processing, with the recent advances in this area have significantly decreased the pre-processing processes and increased the performance rates. This study presents a system that automatically recognizes the images of the license plates observed from camera. The developed system is based on Mask Region Based Convolutional Neural Networks (Mask-RCNN) which is the state-of-the-art deep learning techniques in the field of computer vision. In this study, convolutional neural networks, Mask-RCNN and the obtained results of Mask-RCNN have been explained.

**Keywords:** Automatic license plate recognition, deep learning, mask region based convolutional neural networks.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geleneksel plaka tanıma sistemleri araç plakası konum tespiti ve plakada bulunan karakterlerin tespiti olarak iki aşamadan meydana gelir. Şimdiye kadar kullanılmakta olan plaka tanıma sistemleri kenar bulma tabanlı, renk tabanlı, doku tabanlı veya karakter tabanlı gibi geleneksel görüntü işleme yöntemleri kullanılarak geliştirilmekteydi. Fakat günümüzde ortaya çıkan bilgisayarla görü alanındaki gelişmeler herhangi bir ön işleme gerektirmeden doğrudan ham görüntü üzerinden plaka tanımaya imkân vermektedir.

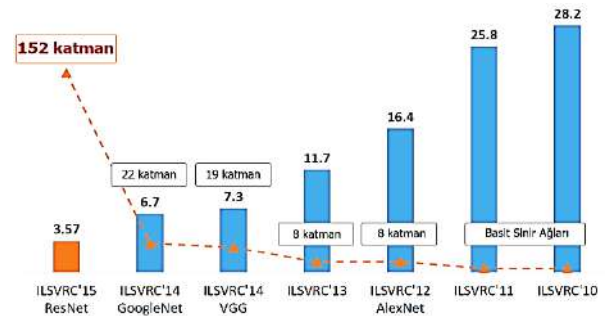
## 2. EVRİŞİMSEL SİNİR AĞLARI

### (CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS)

Evrimsel sinir ağları, 2012 yılında büyük ölçekli görsel tanıma (ILSVRC) adlı yarışmada elde ettiği başarı ile adından söz ettirmiş ve tam anlamıyla görüntü işleme ve bilgisayarla görü alanlarında yeni bir çığır açmıştır [1]. Google, Microsoft, Samsung, Qualcomm vb. birçok teknoloji şirketinin takımlar halinde katılım sağladığı bu

yarışma 2010 yılında başlamış ve her sene düzenlenmeye devam etmektedir.

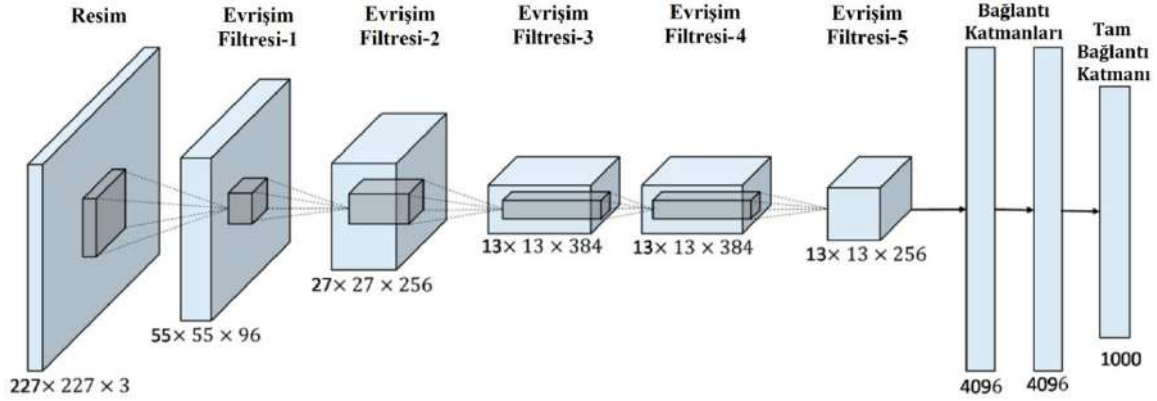
Yarışma yüksek çözünürlüğe sahip yaklaşık 1,2 milyon görüntüden oluşan veriseti ile gerçekleştirilmektedir. Yarışmada 2010-2015 yılları arasında katılımcıların geliştirdikleri evrimsel sinir ağı modelleri sayesinde görüntü sınıflandırma hata oranı 7,89 kat (%28,2'den %3,57'ye) ve nesne tespiti hata oranı 4,7 kat (%42,5' ten %9'e) azalmıştır. Şekil 1'de 2010-2015 yılları arasında gerçekleştirilen yarışmaları kazanan takımların görüntü sınıflandırma hata oranları verilmiştir [2].



**Şekil 1.** 2010-2015 yılları arasında ILSVRC'de elde edilen görüntü sınıflandırma hata oranları ve katman sayıları [3]. (The error rates and layer numbers of image classification obtained from ILSVRC 2010 to 2015)

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : fatihbayram@aku.edu.tr

Şekil 1’de görüleceği üzere AlexNet ile 2012 yılında evrişimsel sinir ağları ile elde edilen başarı her sene geliştirilmiştir. Bu geliştirmelerde sinir ağındaki katman sayılarının artırılması ve böylece ağı daha derin bir yapıya kavuşması büyük pay sahibidir. Şekil 2’de AlexNet evrişimsel sinir ağı ve katmanları görülmektedir.



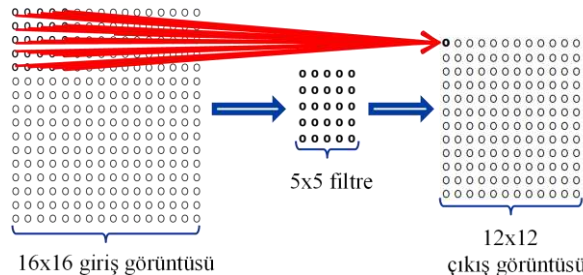
Şekil 2. AlexNet evrişimsel sinir ağı ve katmanları [7] (AlexNet convolutional neural network and its layers)

Derin öğrenme temelli bu sinir ağları sayesinde artık çok sayıda görüntü işleme süreçleri ve sınıflandırıcı işlemlerinin yerine tek bir ağ yapısı ile görüntü sınıflama, nesne tanıma ve nesne konumu tespitinde yüksek başarı oranları yakalanabilmektedir.

Evrişimsel sinir ağlarında nesne özellikleri klasik görüntü işlemeden farklı olarak programcı tarafından elde edilmez, oluşturulan model kendi kendine öğrenerek en uygun özellikleri seçer. Bunun için de yapay sinir ağlarından farklı olarak evrişim katmanı ve havuzlama katmanı kullanılmaktadır. Daha sonradan evrişim sinir ağlarının geliştirilmesi ile birlikte ağı doğrusal olmayan bir yapıya kavuşturmak için aktivasyon katmanı ve ağın ezberlemesine engel olmak için daha az ağırlıklara sahip düğümlerin kaldırılmasını sağlayan dışarıda bırakma katmanı eklenmiştir. Ağı son katmanı da sinir ağıının sınıflandırma tahmini yapması için önceki katmanlardan gelen tüm özellikleri birleştirerek tek boyutlu bir özellik vektörü haline getiren tam bağlantı katmanıdır [4,5,6].

### 2.1. Evrişim Katmanı (Convolution Layer)

Ana katman olan evrişim katmanı görüntü üzerinde 2x2,3x3,5x5 vb. değişik boyutlarda filtrenin uygulanması işlemidir. Filtre tüm görüntü üzerinde kaydırma yapılarak gezdirilir.



Şekil 3. 16x16 boyutundaki bir görüntüye 5x5 filtre uygulanması (Applying a 5x5 filter to a 16x16 size image)

Kaydırma adım sayısı ve filtre boyutu programlayıcı tarafından belirlenir. Filtre her satır sonuna geldiğinde bir alt satıra iner, bu işlem görüntünün sonuna kadar devam etmektedir [8,9]. Şekil 3’de 16x16 boyutundaki bir görüntüye 5x5 boyutunda bir filtre ile evrişim işlemi uygulanması işlemi görülmektedir.

Evrişim işlemi sırasında filtre çerçevesi içerisinde kalan piksel değerleri filtrenin değerleri ile çarpılır ve elde edilen değerler toplanarak çıkış görüntüsünün bir pikselinin değeri olarak kaydedilir. Şekil 4’te evrişim operatörünün uygulanması işlemi görülmektedir.

$$\begin{bmatrix} 3 & 5 & 2 \\ 9 & 7 & 5 \\ 2 & 4 & 6 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} (3 \times 1) + (5 \times 0) + (2 \times 0) + \\ (9 \times 1) + (7 \times 1) + (5 \times 0) + \\ (2 \times 0) + (4 \times 0) + (6 \times 1) \end{bmatrix} = 25$$

Şekil 4. Evrişim operatörünün uygulanması (Application of convolution operator)

Giriş görüntüsü üzerinde birden fazla evrişim işlemi uygulanarak ağı derinliği artırılmış ve ağı daha doğru sonuçlar vermesi sağlanmış olur. Her evrişim katmanında filtre kendinden önceki evrişim katmanlarında elde edilen görüntülere uygulanır. Böylece giriş görüntüsünün en boy oranı düşürülürken derinliği artırılmış ve en sonunda görüntünün özellik haritası ortaya çıkarılmış olur. Alt seviye katmanlardan elde edilen özellikler daha az ayırt ediciliğe sahipken alt katmanların birleştirilmesinden oluşan üst seviye katmanlar ise daha çok ayırt ediciliğe sahiptir. (Şekil 5)

Alt Katmanlar → Üst Katmanlar

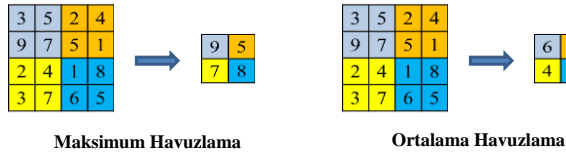
The diagram shows a sequence of layers: a 3D cube representing the input, followed by several layers of smaller cubes representing the output of convolution operations, and finally a larger cube representing the final output. Arrows indicate the flow from left to right.

Şekil 5. Evrişim işlemi ile katmanlar da elde edilen özelliklerin ayırt edicilikleri (The distinctive features of convolution process on layers)

### 2.2 Havuzlama Katmanı (Pooling Layer)

Havuzlama katmanında bir önceki katman evrişim katmanında olduğu gibi gelen görüntü üzerinde değişik boyutlarda filtreler gezdirilir. Bu katmandaki filtrelerin evrişim katmanında uygulanan filtrelerden farkı ise

maksimum veya ortalama alan filtreler olmasıdır [10,11]. Şekil 6'da havuzlama katmanındaki filtrelerin uygulanma işlemi gösterilmiştir.



**Şekil 6.** 4x4 boyutunda görüntüye 2x2 boyutunda maksimum ve ortalama havuzlama operatörünün uygulanması (The implementation of 2x2 maximum and average pooling filter to 4x4 image)

Maksimum havuzlamada filtre penceresi içerisinde kalan piksel değerlerinden en yüksek olanı, ortalama havuzlama işleminde ise filtre penceresi içerisinde kalan tüm piksel değerlerinin ortalaması alınarak çıkış pikseline tek bir değer olarak kaydedilir. Havuzlama işlemi sonunda görüntünün en boy oranı indirgenmiş olur. Bu işlemde piksel değerlerinde kayıplar olur fakat bu kayıplar sonraki katmanlar için daha az hesaplama yükü oluşturacağı ve sistemin ezberlemesini önlediği için getirisi daha fazladır.

### 3. BÖLGESEL EVRİŞİMSSEL SİNİR AĞLARI (REGION BASED CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS)

Nesne sınıflandırma işleminde girilen görüntünün sınıfı ve o sınıfa ait olma yüzdesi çıkış olarak elde edilir. Fakat nesne tespiti işlemi, nesnenin veya nesnelerin sınıfı ve o sınıfa ait olma yüzdesi ile birlikte görüntü içerisindeki konumunu kutu şeklinde ifade eden x koordinatı, y koordinatı, genişlik ve yükseklik değerleri çıkış olarak elde edildiği karmaşık bir işlemdir. Örnek bölütleme ise görüntüdeki her pikselin ait olduğu sınıfı yani nesneye ait tüm koordinatların çıkış olarak elde edildiği daha da karmaşık bir işlemdir.

Evrışimsel sinir ağları, nesne sınıflandırmada olduğu gibi bu karmaşık işlemlerde de başarılı sonuçlar elde etmiştir. İlk defa 2014 yılında Girshick ve arkadaşlarının [12] ortaya koymuş olduğu bölgesel evrışimsel sinir ağları ile nesne tespitinde önceki yöntemlere göre önemli ölçüde yüksek performanslar elde etmişlerdir. İlk ortaya konan bölgesel evrışimsel sinir ağından sonra çeşitli hız ve performans geliştirmeleri yapılmıştır [13,14]. Son olarak 2017 yılında yapılan geliştirme ile nesne bölütleme yeteneği kazanmış ve maskeli bölgesel evrışimsel sinir ağları olarak adlandırılmıştır [15]. Şekil 7'de maskeli bölgesel evrışimsel sinir ağı yapısı gösterilmiştir.

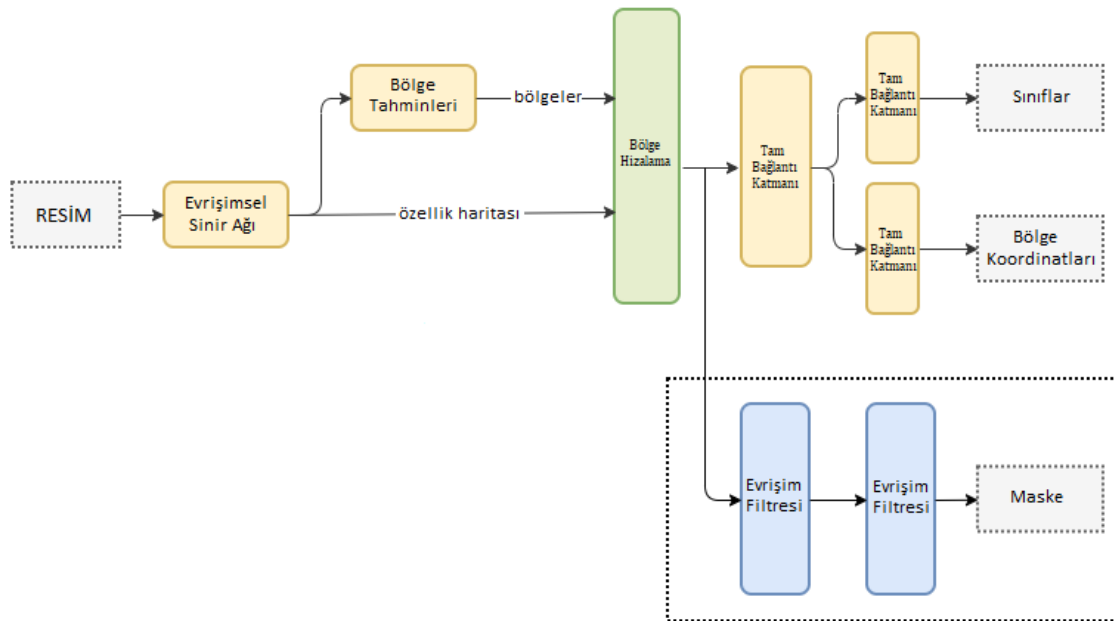
### 4. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Önerilen otomatik plaka tanıma sistemi, üç ana adımdan oluşmaktadır. Adımlar; araç görüntülerindeki plaka karakterlerinin manuel olarak etiketlenmesi, maskeli bölgesel evrışimsel sinir ağı tasarımını ve eğitilmesi ile plaka tanıma detektörünün elde edilmesi ve değerlendirilmesidir.

**Çizelge 1.** Görüntü veriseti dağılımı (The distribution of image dataset)

	Eğitim	Test	Toplam
<b>Plaka Görüntüsü</b>	300	130	<b>430</b>
<b>Karakter Görüntüsü</b>	2165	975	<b>3140</b>

Bu çalışmada 1920x1075 boyutlarında ve 430 adet araç görüntüsünden oluşan bir veriseti kullanılmıştır. Veri setinde bulunan görüntüler üzerinde herhangi bir görüntü iyileştirme veya düzeltme işlemi yapılmadan doğrudan sinir ağına verilmiştir. 430 adet araç plakasından elde



**Şekil 7.** Maskeli bölgesel evrışimsel sinir ağı yapısı [16] (The structure of Mask-RCNN)



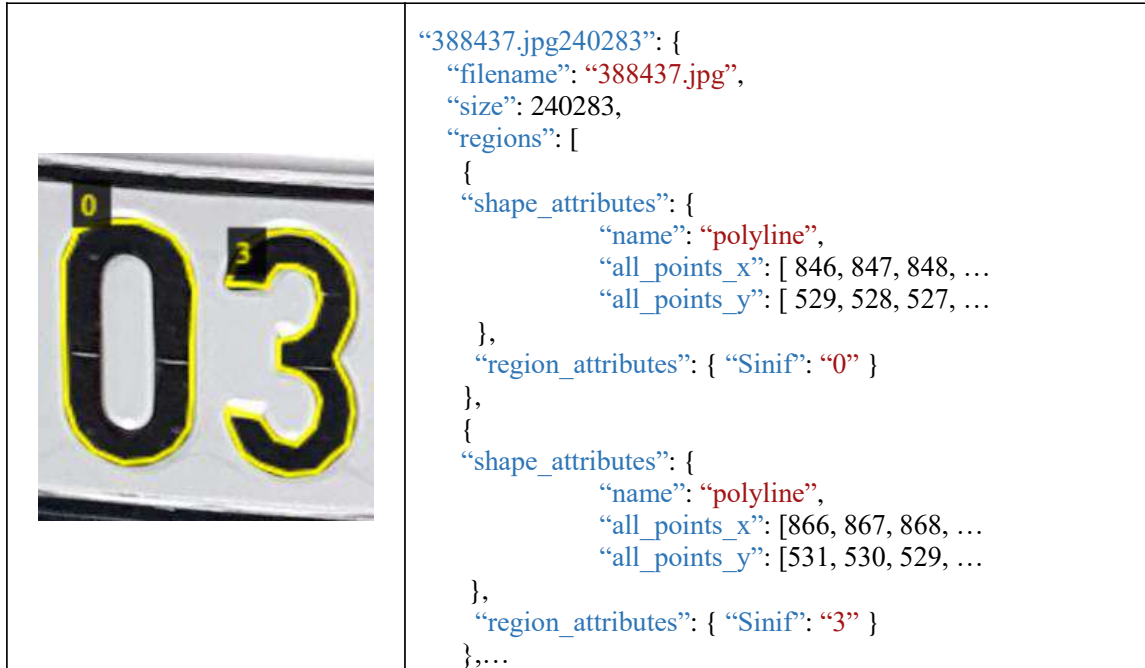
edilen toplam 3140 karakter ile oluşturulan görüntü verisetinin dağılımı Çizelge 1’de verilmiştir.

Türk plaka sisteminde 1 ve 0 gibi rakamlar ile karışıklığa yol açabileceği için I ve O gibi harfler plaka karakteri olarak nadiren kullanılmaktadır, yine plakalarda Ç, Ğ, İ, Ö, Ş, Ü gibi türkçe karakterler kullanılmadığı için verisetinden bu 8 karakter çıkartılmıştır. Çizelge 2’de plaka görüntülerindeki karakterlerin dağılımları verilmiştir.

**Çizelge 2.** Plakalardan elde edilen karakterlerin dağılımı (The distribution of characters obtained from license plates)

KARAKTER	#	KARAKTER	#	KARAKTER	#	KARAKTER	#	KARAKTER	#
A	95	H	38	R	41	0	452	5	170
B	107	J	20	S	28	1	141	6	198
C	35	K	32	T	34	2	173	7	147
D	61	L	41	U	45	3	454	8	157
E	49	M	29	V	53	4	216	9	119
F	43	N	44	Y	35				
G	27	P	33	Z	23				
TOPLAM KARAKTER:									3140

Maskeli bölgesel evrişimsel sinir ağıları piksel bazında bölütleme yaptığı için diğer bölgesel evrişimsel sinir ağlarından farklı olarak nesne konumlarının sadece dikdörtgen olarak koordinatlarına değil, tespit edilecek nesnelere ait bütün koordinatlara ve o koordinatların ait olduğu sınıflara ihtiyaç duyar. Bu yüzden araç görüntülerdeki etiketleme işleminde plakalarda yer alan tüm karakterler dikdörtgen şeklinde değil çokgenler şeklinde sınıflarına göre tek tek etiketlenmiştir. Etiketleme işlemi Oxford üniversitesi tarafından geliştirilen VIA görüntü etiketleme uygulamasında gerçekleştirilmiştir [17]. Görüntü etiketleme işlemi ile elde edilen koordinatlar json formatında kaydedilmiş ve ağı eğitiminde kullanılmıştır. Şekil 8’de VIA görüntü etiketleme uygulamasıyla etiketlenmiş plaka karakter örneği ve json formatındaki çıktısı gözükmektedir.



**Şekil 8.** Etiketlenmiş plaka karakterleri ve json formatında çıktısı (The labeled license plate characters and the output in json format)

Maskeli bölgesel evrişimsel sinir ağının eğitimi ve test edilmesi işlemleri için Google Colaboratory veya kısa adıyla Colab bulut sistemi kullanılmıştır [18]. Bu sistemin avantajı NVIDIA Tesla K80 grafik işlemcisi ile büyük veriler üzerinde çok fazla hesaplama işlemini hızlı bir şekilde yapabileceğiniz bulut teknolojisini ücretsiz olarak hizmete sunmasıdır. Şekil 9’da Google Colaboratory çalışma ortamına ait bir ekran görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 9.** Google Colaboratory çalışma ortamı (Google Colaboratory working environment)

Colab’ta uygulanabilirliği ve performansı yüksek olması nedeniyle Python 3, Keras ve TensorFlow kullanılarak geliştirilen açık kaynak kodlu bir maskeli bölgesel evrişimsel sinir ağı modeli kullanılmıştır [19]. Bu modelde standart evrişimsel sinir ağı olarak önceden eğitilmiş Resnet-101 kullanılmış ve sinir ağının başlangıç ağırlıkları olarak coco veriseti ağırlıkları belirlenmiştir [20,21]. Eğitim sonunda elde edilen otomatik plaka tanıma dedektörüne giriş olarak verilen araç görüntülerinden elde sonuçlar Şekil 10’da gösterilmiştir.





Şekil 10. Otomatik plaka tanıma dedektörü ile elde edilen sonuçlar (The results obtained from automatic license plate recognition detector)

Otomatik plaka tanıma dedektörü ile plaka bazında elde edilen test sonuçları Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Plaka tanıma test sonuçları (The test results of license plate recognition)

	Sayısı	Hatalı Tespit	Başarım Oranı
<b>Toplam Plaka</b>	130	2	<b>% 98,46</b>

Otomatik plaka tanıma ve plaka tespiti konusunda geleneksel ve modern yöntemlerle yapılmış olan çalışmaların karşılaştırma tablosu Çizelge 4'te verilmiştir.

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada araç görüntüleri üzerinden plaka karakterlerinin sınıfını ayırt edebilen plaka tanıma sistemi önerilmiştir.

Çizelge 4. Otomatik plaka tanıma ve plaka tespiti konusunda yapılmış olan çalışmaların karşılaştırma tablosu (Comparison table of performed previously in literature about automatic plate recognition and plate detection)

Metot	Uygulama	Kullanılan Yöntemler	Başarım Oranı (%)	Süre (ms)
Anagnostopoulos ve ark. [22]	Plaka Tanıma	Kayan Ortak Merkezli Pencere, Bağlı bileşenler analizi, Olasılıksal Sinir Ağları	89.10	276
Zhou ve ark. [23]	Plaka Tespiti	Görsel Kelime Eşleme, SIFT	93.20	220
Guo ve ark. [25]	Plaka Tanıma	Renk özellikleri, Hough Dönüşümü	93.60	594
Yuan ve ark. [26]	Plaka Tespiti	Kenar Bulma, Bölütleme, Çizgi Yoğunluk Filtreleme, SVM sınıflandırıcı	96.62	42
Li ve ark. [24]	Plaka Tespiti	Kenar Bulma, Geometrik-Görsel Öznitelik Çıkarma	97.60	767
Panahi ve ark. [27]	Plaka Tanıma	Bağlı bileşenler analizi, Rasgele Örnekleme, Olasılıksal SVM	97.60	180
<b>Derin Öğrenme Tabanlı Yöntemler</b>				
Laroca ve ark. [28]	Plaka Tanıma	YOLO	93.53	21
Rafique ve ark. [29]	Plaka Tespiti	RCNN, SVM	94.53	350
Li ve ark. [30]	Plaka Tanıma	CNN, RCNN	96.57	400
Geliştirilen Sistem	Plaka Tanıma	Mask-RCNN	<b>98.46</b>	<b>400</b>
Bulan ve ark. [31]	Plaka Tanıma	Gizli Markov modelleri, CNN	99.00	2000
Zhuang ve ark. [32]	Plaka Tanıma	DeeplabV2 ResNet-101	99.25	-

Önerilen sistemde, plaka karakterlerinin başarılı bir şekilde sınıflandırabilmesi için derin öğrenme tabanlı maskeli bölgesel evrişimsel sinir ağı kullanılmıştır. Evrişimsel sinir ağları eğitim esnasında her bir karaktere özgü özellikleri öğrenebilmekte böylece klasik sınıflandırıcılardan daha efektif başarımlarına ulaşabilmektedir. Ayrıca maskeli bölgesel evrişimsel sinir ağlarında giriş olarak nesnelerin tüm dış kenar koordinatlarının verilmesi de nesne konumunun tespit edilmesi işlemini ortadan kaldırarak daha hızlı bir model performansı ortaya koymaktadır. Gerçekleştirilen test sonuçlarına göre toplam 130 adet 1920x1075 boyutlarındaki araç görüntüsü üzerindeki plaka tanıma başarımları %98.46 ve plaka tanıma işlemi ortalama 0,4 sn. gibi kısa bir sürede gerçekleştirilebilmektedir.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Krizhevsky A., Sutskever I. and Hinton G. E., "Imagenet classification with deep convolutional neural networks", *Advances in Neural Information Processing Systems*, 25:1097-1105, (2012).
- [2] *ImageNet Large Scale Visual Recognition Competition (ILSVRC)*, <http://image-net.org/challenges/LSVRC>
- [3] He K., "Deep Residual Learning for Image Recognition", [http://cvlab.postech.ac.kr/~bhhan/class/cs\\_e703r\\_2016s/Hyeongseok\\_Deep\\_Residual\\_Learning\\_for\\_Image\\_Recognition.pptx](http://cvlab.postech.ac.kr/~bhhan/class/cs_e703r_2016s/Hyeongseok_Deep_Residual_Learning_for_Image_Recognition.pptx), (2016).
- [4] Arı A., and Hanbay D., "Bölgesel Evrişimsel Sinir Ağları Tabanlı MR Görüntülerinde Tümör Tespiti", *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 18(2), (2018).
- [5] Kızrak A. and Bolat B., "Derin Öğrenme ile Kalabalık Analizi Üzerine Detaylı Bir Araştırma", *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 11:263-286, (2018).
- [6] Uçar A. and Bingöl M. S., "Derin öğrenmenin Caffe kullanılarak grafik işleme kartlarında değerlendirilmesi", *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 39-49, (2018)
- [7] Han X., Zhong Y., Cao L. and Zhang L., "Pre-Trained AlexNet Architecture with Pyramid Pooling and Supervision for High Spatial Resolution Remote Sensing Image Scene Classification", *Remote Sensing*, 9:848, (2017).
- [8] İnik Ö. and Ülker E., "Derin Öğrenme ve Görüntü Analizinde Kullanılan Derin Öğrenme Modelleri", *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 6(3):85-104, (2017).
- [9] Doğan F., and Türkoğlu İ., "Derin Öğrenme Algoritmalarının Yaprak Sınıflandırma Başarımlarının Karşılaştırılması", *Sakarya University Journal of Computer and Information Sciences*, 1(1):10-21, (2018).
- [10] Civaner O. F. and Kamaşak M., "Classification of pediatric snoring episodes using deep convolutional neural networks", *Signal Processing and Communications Applications Conference*, İzmir, 1-4, (2018).
- [11] Cengil, E. and Çınar A., "A New Approach for Image Classification: Convolutional Neural Network", *European Journal of Technic*, 6(2):96-103, (2016).
- [12] Girshick R., Donahue J., Darrell T. and Malik J., "Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation", *Computer Vision and Pattern Recognition*, 580-587, (2014).
- [13] Girshick R., "Fast R-CNN", *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, Washington-USA, 1440-1448, (2015).
- [14] Ren S., He K., Girshick R. and Sun J., "Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks", *Advances in Neural Information Processing Systems*, 28: 91-99, (2015).
- [15] He K., Gkioxari G., Dollár P. and Girshick, R., "Mask R-CNN", *International Conference on Computer Vision*, Venice-ITALY, 2980-2988, (2017).
- [16] [https://medium.com/@jonathan\\_hui/image-segmentation-with-mask-r-cnn-ebe6d793272](https://medium.com/@jonathan_hui/image-segmentation-with-mask-r-cnn-ebe6d793272)
- [17] Dutta, A., Gupta A. and Zissermann A., VGG Image Annotator, <http://www.robots.ox.ac.uk/~vgg/software/via>
- [18] Google Colaboratory, <https://colab.research.google.com>.
- [19] Waleed A., Mask R-CNN for object detection and instance segmentation on Keras and TensorFlow, [https://github.com/matterport/Mask\\_RCNN](https://github.com/matterport/Mask_RCNN)
- [20] Common Objects in Context, <http://cocodataset.org>
- [21] He K., Zhang X., Ren S. and Sun J., "Deep Residual Learning for Image Recognition", *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Las Vegas-USA, 770-778, (2016).
- [22] Anagnostopoulos, C. N. E., Anagnostopoulos, I. E., Loumos, V. and Kayafas, E., "A license plate-recognition algorithm for intelligent transportation system applications", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 7(3):377-392, (2006).
- [23] Zhou, W., Li, H., Lu, Y. and Tian, Q., "Principal visual word discovery for automatic license plate detection", *IEEE Transactions on Image Processing*, 21(9):4269-4279, (2012).
- [24] Li, B., Tian, B., Li, Y. and Wen, D., "Component-based license plate detection using conditional random field model", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14(4):1690-1699, (2013).
- [25] Guo, J. M. and Liu, Y. F., "License plate localization and character segmentation with feedback self-learning and hybrid binarization techniques", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 57(3):1417-1424, (2008).
- [26] Yuan, Y., Zou, W., Zhao, Y., Wang, X., Hu, X. and Komodakis, N., "A robust and efficient approach to license plate detection", *IEEE Transactions on Image Processing*, 26(3):1102-1114, (2017).
- [27] Panahi, R. and Gholampour, I., "Accurate detection and recognition of dirty vehicle plate numbers for high-speed applications", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(4):767-779, (2017).
- [28] Laroca, R., Severo, E., Zanlorensi, L. A., Oliveira, L. S., Gonçalves, G. R., Schwartz, W. R. and Menotti, D., "A robust real-time automatic license plate recognition based on the YOLO detector", *IEEE International Joint Conference on Neural Networks*, 1-10, (2018).
- [29] Rafique, M. A., Pedrycz, W. and Jeon, M., "Vehicle license plate detection using region-based convolutional neural networks", *Soft Computing*, 22(19):6429-6440, (2018).
- [30] Li, H., Wang, P., and Shen, C., "Toward end-to-end car license plate detection and recognition with deep neural networks", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 99:1-11, (2018).
- [31] Bulan, O., Kozitsky, V., Ramesh, P. and Shreve, M., "Segmentation-and annotation-free license plate recognition with deep localization and failure identification", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(9): 2351-2363, (2017).
- [32] Zhuang, J., Hou, S., Wang, Z., and Zha, Z. J., "Towards Human-Level License Plate Recognition", *In Proceedings of the European Conference on Computer Vision*, 306-321, (2018).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Bacaklı robotların yürüme stratejileri üzerine bir literatür taraması

## *A literature review on walking strategies of legged robots*

Yazar(lar) (Author(s)): Veli BAKIRCIOĞLU<sup>1</sup>, Mete KALYONCU<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-1170-5327

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-2214-7631

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Bakırcioğlu V. ve Kalyoncu M., "Bacaklı robotların yürüme stratejileri üzerine bir literatür taraması", *Politeknik Dergisi*, 23(4): 961-986, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.573673

# Bacaklı Robotların Yürüme Stratejileri Üzerine Bir Literatür Taraması

## A Literature Review on Walking Strategies of Legged Robots

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ *Yürüyen robotlar alanında etki yaratan gelişmeler ve çalışmalar derlenmiştir. / The developments and studies is reviewed which made an impact in the field of walking robots.*

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

The first linkage design used in early walking machines.	1850	Tchebyshev
The very first pioneering work on animal locomotion.	1872	Muybridge
The Plantigrade Machine – The world's first walking mechanism.	1878	Tchebyshev
The first important attempt to build a walking machine with independently controlled legs.	1940	Hutchinson
The first design concepts of walking machine that relates to the pantograph leg.	1960	Shigley
The Phony Pony – The first autonomous quadruped robot with simple digital logic controls.	1968	McGhee
The OSU Hexapod – The first walking hexapod robot with using digital computer.	1977	McGhee
The PANTOMECH mechanism and TITAN series quadruped robots that can climb stairs.	1980	Hirose
The first important attempt to build a walking robot based on the active balancing principle.	1980	Kato
The first experimental studies – Active balancing while hopping on one leg.	1980	Matsuoka
The first important attempt to build an active balancing robot walking in 3-D space.	1981	Miura
Introducing the 'virtual leg' concept for the first time.	1983	Sutherland
Introducing the 'three decomposition algorithm' – One-legged planar hopping machine.	1983	Raibert
The Humanoid Robot Project.	1986	Honda
The Adaptive Suspension Vehicle hexapod robot.	1987	McGhee
The first promising studies on active balancing quadruped based on virtual leg concept.	1989	Raibert
The first promising studies on dynamic walking quadruped robot based on central pattern generator.	2000	Kimura and Fukuoka
The BigDog Project – The quadruped robot that sets the current standards.	2005	Boston Dynamics
The HyQ Project – The closest quadruped robot to be used in real life.	2007	Semini
The StarLETH robot – The first important study using series elastic actuators.	2013	Hutter
The ANYmal robot – The closest quadruped robot to be used in real life.	2016	Hutter

**Şekil.** Yürüyen robot literatüründeki kilometre taşları / **Figure.** Milestones in walking robot literature

### Amaç (Aim)

*Bu çalışmanın amacı, yürüyen robotlar hakkında yürüme stratejilerine göre sınıflandırılmış ayrıntılı bir literatür taraması sunmaktır. / The aim of this study is to provide a detailed literature review about walking robots classified according to walking strategies.*

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

*Bacaklı robotlar üzerine yapılan çalışmalar yürüme stratejisi olarak iki ana yaklaşım altında incelenmiştir; statik yürüme ve dinamik yürüme. / Studies on legged robots were reviewed under two main approaches as walking strategy; static walking and dynamic walking.*

### Özgünlük (Originality)

*Yazarların tüm bilgisi dahilinde, dört ayaklı robotlar ve yürüme stratejileri hakkında kapsamlı bir derleme daha önce yapılmamıştır. / To the fullest knowledge of the authors, a comprehensive review of four-legged robots and walking strategies has not been made before.*

### Bulgular (Findings)

*Diğer mobil robotlara üstünlüklerine rağmen, yürüyen robotlar üzerinde yapılan çalışmalar henüz deneysel ortamların ötesine geçememiştir. / Despite their superiority to other mobile robots, studies on walking robots have not yet gone beyond experimental environments.*

### Sonuç (Conclusion)

*Yürüyen robotların tarihsel gelişim süreci ve dört ayaklı robotlar alanındaki son gelişmeler sunulmuştur. Bu çalışmanın, bacaklı robotlar alanındaki dört ayaklı yürüyüşün daha iyi anlaşılmasını ve aynı zamanda yürüyüş robotları ile ilgili gelecekteki çalışmalar için bir referans kaynağı olacağı öngörülmektedir. / The historical development process of walking robots and recent developments in the field of four-legged robots are presented. It is anticipated that this study will provide a better understanding of four-legged gait in the field of legged robots and also a reference for future studies on walking robots.*

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

*Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.*

# Bacaklı Robotların Yürüme Stratejileri Üzerine Bir Literatür Taraması

*Derleme Makalesi / Review Article*

Veli BAKIRCIOĞLU<sup>1\*</sup>, Mete KALYONCU<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Aksaray Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Konya Teknik Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 04.06.2019 ; Kabul/Accepted : 23.09.2019)

## ÖZ

Bu çalışmada, ayaklı hareket üzerine yapılan geçmiş dönem araştırmalara; özellikle, ayaklı robotlar literatürünün önemli kilometre taşlarına değinilmiştir. Geçmiş dönem araştırmalardan, öncelikle canlıların yürüyüşü ve bunu taklit edebilen makineler üzerine yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Daha sonra, çalışmanın konusu olan ayaklı robotların tarihçesi ele alınmıştır. Ayaklı robotlar üzerine yapılan çalışmalarda, yürüyüş stratejisi olarak iki temel yaklaşım söz konusudur; statik yürüyüş ve dinamik yürüyüş. Bu sebepten dolayı ayaklı robotlar tarihçesi, Statik Yürüyen Ayaklı Robotlar ve Dinamik Yürüyen Ayaklı Robotlar olmak üzere iki temel başlık altında kronolojik sırayla anlatılmıştır. Statik Yürüyen Ayaklı Robotlar başlığında, engebeli yüzeylerde hareket ve engelleri aşma gibi arazi adaptasyonunun daha karmaşık problemleriyle başa çıkmak için çok bacaklı sistemlerin kontrol edilmesine yönelik tekniklerin geliştirilmesi üzerine yapılan araştırmalar; Dinamik Yürüyen Ayaklı Robotlar başlığında ise, koşma ve zıplama gibi oldukça gelişmiş hareket kabiliyetlerine sahip ayaklı sistemler geliştirebilmek için dinamik kontrol kavramlarının ve tekniklerinin ilettilmesi üzerine yapılan araştırmalar sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Ayaklı robotlar, dört bacaklı yürüyüş, statik yürüyen robotlar, dinamik yürüyen robotlar.

## A Literature Review on Walking Strategies of Legged Robots

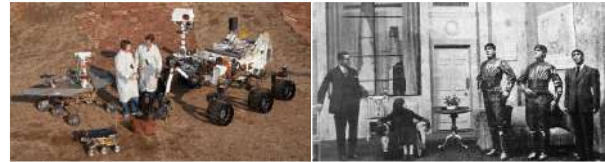
### ABSTRACT

In this study, previous studies on legged motion; in particular, important milestones of the legged robots' literature were referred. From the past period research, primarily, studies on the walking of the living beings and the machines that can mimic it were mentioned. Subsequently, the history of legged robots that is the subject of the study was addressed. In the studies on the legged robots, two basic approaches as the walking strategy were concerned; static gait and dynamic gait. Due to this reason, the history of the legged robots was reported in chronological order under two main topics as Static Walking Legged Robots and Dynamic Walking Legged Robots. In the Static Walking Legged Robots topic, researches on the development of techniques for controlling of the multi-legged systems to cope with more complex problems of the land adaptation such as locomotion on rough surfaces and overcoming obstacles; as for in the Dynamic Walking Legged Robots topic, researches on the improvement of dynamic control concepts and techniques to develop legged systems with highly sophisticated mobility capabilities such as running and jumping are presented.

**Keywords:** Legged robots, quadrupedal locomotion, static walking robots, dynamic walking robots.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Robot teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak destek birim olarak robotik sistemlerin kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır ve artık günlük işlerde bile, robotlar, kendilerine yer bulmaya başlamışlardır. Günümüzde robotlar, boya, kaynak, montaj, lehimleme, taşıma ve iletme gibi üretim işlemlerinde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, nükleer atıkların işlenmesi, uzay araştırmaları gibi tehlikeli ve insan gücünü aşan işlerde de kullanılmaktadır. Örneğin NASA tarafından geliştirilen Curiosity robotu, Mars yüzeyine inerek, insanoğlu için neredeyse imkânsız bir görevi yapabilmektedir (Şekil 1a).



(a) NASA tarafından Mars'a gönderilmiş üç robot. (Three robots that sent to Mars by NASA.) (b) "Rossum's Universal Robots" oyunundan bir sahne. (A scene from "Rossum's Universal Robots".)

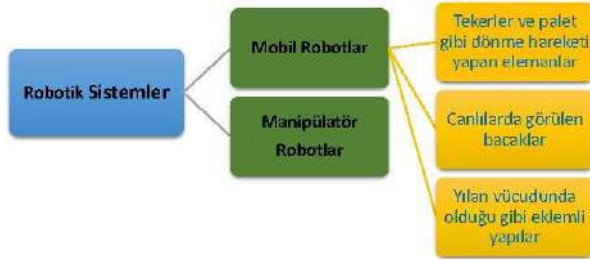
**Şekil 1.** Robot teknolojisinin günümüzde geldiği nokta ve tarihte robot kelimesinin ilk kullanıldığı yer. (The point where robot technology is reached today and where the word robot was first used in history.)

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : vbakircioglu@aksaray.edu.tr

Robot kelimesi ilk olarak, Karel Čapek isimli oyun yazarının, Şekil 1b'de bir sahnesi gösterilen, 1920'de yazdığı "Rossum's Universal Robots" isimli oyunda



karşımıza çıkmaktadır [1]. Amerika Robotik Enstitüsü (RIA) tarafından yapılan tanıma göre bir robot, çeşitli görevlerin yerine getirilmesi için değişken ve programlanmış hareketlerle malzemeleri, parçaları, araçları veya özel cihazları taşımak üzere tasarlanmış yeniden programlanabilir çok işlevli bir manipulatördür. Buna ek olarak, herhangi bir robotik sistem geliştirebilmek için, robotik alanının, farklı tasarım alanlarının (mekanik, elektrik ve yazılım vd.) başarılı bir şekilde çok karmaşık bir sistemde toplandığını ve disiplinler arası bir alanı temsil ettiğini bilmemiz gerekir. Uygulama açısından bakıldığında, robot yapılandırılmasını sadece mekanik gereklilikler değil, elektrik ve yazılım gereklilikleri de büyük ölçüde etkiler ve hatta bazen daha baskın olur [2].

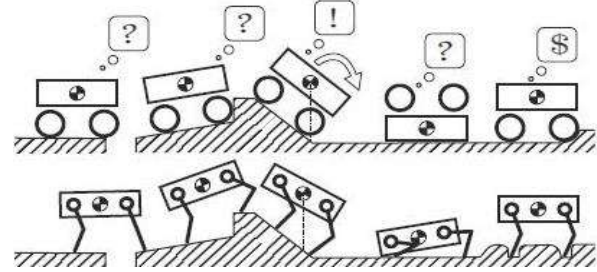


**Şekil 2.** Mobil robotların temel hareket yapılandırma stratejileri. (Basic motion configuration strategies of mobile robots.)

Robotik sistemleri kendi altında, sabit bir çalışma uzayına sahip olan Manipülasyon Robotları ve taşınabilir bir çalışma uzayına sahip olan Mobil Robotlar diye iki ana alanda sınıflandırılabiliriz. Bir mobil robot tasarlanırken, hareket stratejisi problemi için robotun tamamlaması istenen görevlerin gerektirdikleri, çalışma ortamının ve çevrenin kısıtlamaları, kullanılan eyleyicilerin kısıtları ile güç kaynağı ve enerji ihtiyacı gibi konulara dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda düşünüldüğünde, Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterildiği gibi, mobil robotların hareketini sağlayacak üç temel yapılandırma şekli vardır. Her bir hareket yapılandırması belirli bir uygulama alanına yönelik kendine özgü karakteristikler göstermektedir.

Tekerlekli robotlar çok hızlı hareket edebilirler, fakat düz bir arazi üzerinde hareket gerekliliği vardır. Paletli robotlar daha engebeli arazilerde hareket edebilirler ancak tekerlekli robotlara göre daha yavaştır. Ayaklı robotlar, daha fazla hareketlilik ve esneklik gösterdiğinden, yüksek arazi adaptasyonuna sahip olduklarından ve çevreye daha az hasar verdiklerinden

dolayı tekerlekli ve paletli robotlara nazaran zorlu arazilerde daha üstündür (Şekil 4). Bu üstünlük ve yeryüzünün yaklaşık %80'inin geleneksel tekerlekli taşıtlar ile erişilemez olduğu [3] gerçeği göz önüne alındığında, ayaklı robotlar, mobil robotlar alanında daha çok ön plana çıkmaktadır.



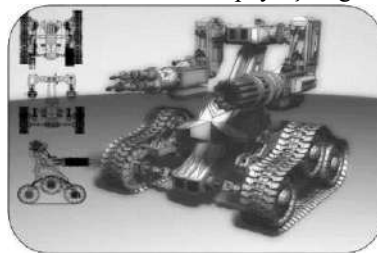
**Şekil 4.** Tekerlekli ve ayaklı robotların zorlu arazi koşullarındaki performanslarını karşılaştıran piktogram (Remy'nin [4] çalışmasından.) (A pictogram comparing the performances of wheeled and legged robots in rough terrain (from the study of Remy [4].))

Bu yüzden, ayaklı robotlar, literatürde yeni olmamasına rağmen günümüzde halen birçok araştırmacının ilgisini çekmektedir. Ayaklı robotlar literatüründeki çalışmaların hemen ayak sayısına göre iki, dört ve altı ayaklı olmak üzere çiftli simetrikler şeklinde yapılmıştır. Bacak sayılarının bu şekilde çiftli simetrikler şeklinde olmasının ana sebebi doğadaki canlılarda görülen simetridir ve ayaklı robotların esin kaynağının yine doğa olmasıdır. Ayaklı sistemlerin tasarımında sistem yapılandırılması doğrudan bacak sayısı ile alakalıdır.

Teknolojinin gelişimine paralel, algılayıcılar ve eyleyiciler gibi mobil robotların önemli bileşenlerindeki teknolojik gelişmeler bu ilgiyi güncel tutmaktadır. Buna en iyi örnek olarak Honda R&D Co. Ltd. firmasına ait Humanoid Robot projesi gösterilebilir (Şekil 5). 1986 yılında başlayan bu projenin geliştirilmesine günümüzde halen devam edilmektedir. Birçok insan benzeri hareketi taklit edebilen ve proje kapsamında geliştirilen robotların son sürümü olan ASIMO [5-7] ayaklı robotlar literatüründe önemli bir yere sahiptir. Üstelik, Amerikan Savunma İleri Araştırma Projeleri Ajansı (DARPA) desteği ile Boston Dynamics firması tarafından tamamlanan ve bugün dört bacaklı robotlar alanında standartları belirleyen BigDog projesi [8], bu ilginin ticari firmalar ve devlet kuruluşları tarafından da paylaşıldığını göstermektedir (Şekil 6a). Öyle ki, daha



(a) Tekerlekli Mobil Robot (Wheeled Mobile Robot)



(b) Paletli Mobil Robot (Tracked Mobile Robot)



(c) Ayaklı Mobil Robot (Legged Mobile Robot)

**Şekil 3.** Mobil robotların temel hareket yapılandırmalarına örnekler. (Examples of basic motion configurations of mobile robots.)



sonra Google® firmasının, ayaklı robotlar üzerine birçok araştırması olan Boston Dynamics firmasını satın alarak, robotik alanında büyük bir etki yaratan, BigDog robotunun halefi Spot (Şekil 6b) ve antropomorfik bir robot olan Atlas (Şekil 6c) gibi yeni ayaklı tasarımlar geliştirmesi, ayaklı robotlar üzerine olan bu ilginin sürdürülmeye devam edeceğini ve hatta artacağını göstermiştir.



**Şekil 5.** Honda R&D Co. Ltd. firması tarafından iki ayaklı robotlar üzerine yürütülen proje kapsamında 1986 yılından günümüze kadar geliştirilen robotlar. (Robots developed from 1986 to present under the project carried out by Honda R&D Co. Ltd. company on biped robots.)

Literatürde, son yirmi yılda ASIMO ve BigDog gibi başarılı robotik uygulamaların yarattığı etki ile, ayaklı robotlar üzerine yapılan çalışmaların sayısı giderek yükselen bir ivme ile artmıştır. Ayaklı robotlar alanında 1990'lı yıllardan günümüze 200 adetten fazla robot geliştirilmiştir ve bu robotların yaklaşık %20'sini dört bacaklı robotlar oluşturmaktadır [9]. Bu çalışmada, kaynak araştırması sırasında dört bacaklı robotlar ile ilgili çalışmalara odaklanılmıştır, ancak sadece bununla sınırlı kalmayıp iki ayaklı ve altı ayaklı robotlar gibi farklı ayak sayılarına sahip robotlar üzerine yapılan, ayaklı robotlar literatüründe önemli bir yere sahip olduğu düşünülen çalışmalara da yer verilmiştir. Ayaklı robotlar literatüründeki çalışmaların hemen hemen hepsi ayak sayısına göre iki, dört ve altı ayaklı olmak üzere çiftli simetrikler şeklinde yapılmıştır. Bacak sayılarının bu şekilde çiftli simetrikler şeklinde olmasının ana sebebi doğadaki canlılarda görülen simetridir ve ayaklı robotların esin kaynağının yine doğa olmasıdır.

Bunun yanında, statik ve dinamik yürüyüş çeşitlerinin her ikisinin de uygulanabileceği ayaklı bir robot tasarımı için en uygun yapılandırma dört ayaklı sistemlerdir. Bunun başlıca sebebi, statik yürüyüş tipi için gerekli en az bacak sayısının dört olmasıdır ve bu sayı aynı zamanda dinamik yürüyüşe de elverişlidir. Yerdeki ayak sayısı bakımından altı ayaklı robotlara nazaran daha az avantajlı olmasına rağmen oluşan denge poligonu statik yürüyüş için yeterlidir. Bu yüzden dört ayaklı sistemlerde, dinamik yürüyüş sırasında ayaklarda aktif dengeleme için fazladan kontrol elemanlarına gerek



(a) BigDog (b) Spot (c) Atlas

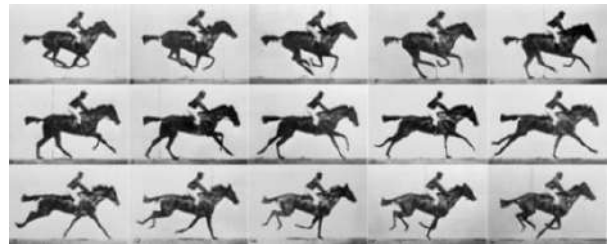
**Şekil 6.** Boston Dynamics firması tarafından geliştirilen ayaklı robotlar. (Legged robots developed by Boston Dynamics.)

yoktur. İki ve altı ayaklı sistemlere nazaran daha sade bir sistem yapılandırması ve kontrolcü mimarisi ile farklı yürüyüş tiplerinin uygulanabildiği dört ayaklı sistemler bacak sayısı bakımından optimum bir seçimdir. Tüm bu olumlu yönler göz önüne alındığında, yüksek hareketlilik bağlamında, doğada bulunan en gelişmiş hayvanların dört ayaklı olarak tasarlanmış olması da tesadüf değildir.

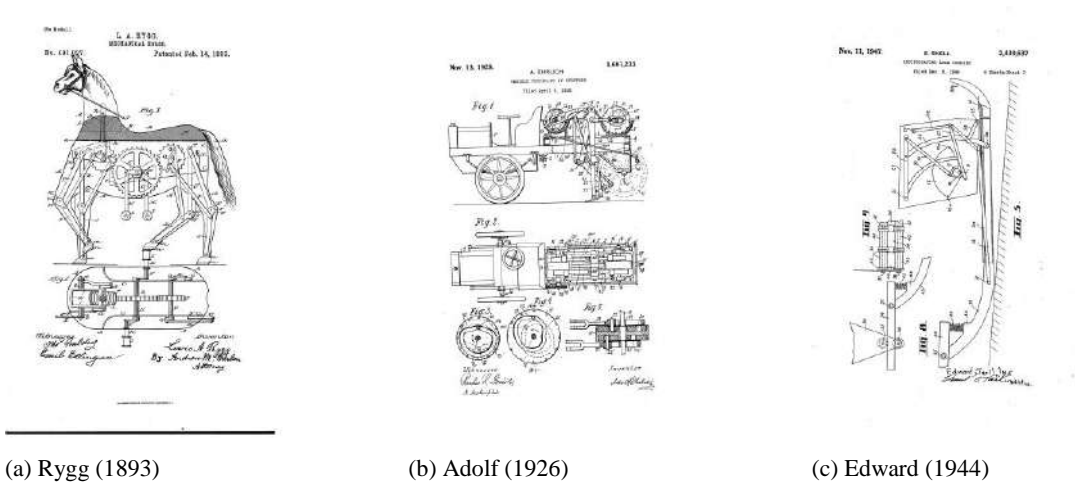
Ayaklı robotlar üzerine yapılan çalışmalarda, yürüyüş stratejisi olarak iki temel yaklaşım söz konusudur; statik yürüyüş ve dinamik yürüyüş. Bu sebepten dolayı ayaklı robotlar üzerine yapılan çalışmalar, Statik Yürüyen Ayaklı Robotlar ve Dinamik Yürüyen Ayaklı Robotlar olmak üzere iki temel başlık altında kronolojik sırayla anlatılmıştır. Ancak bu çalışmalara geçmeden önce yazının devamında, ayaklı robotların gelişim sürecinin daha iyi anlaşılabilmesi için, yürüyüş üzerine yapılan geçmiş dönem çalışmalar ve bu çalışmaların ayaklı robotların gelişimi üzerine etkileri anlatılmıştır.

## 2. YÜRÜYEN MAKİNELER TARİHÇESİ (WALKING MACHINES HISTORY)

Literatürde canlıların yürüyüşü üzerine yapılan çalışmaların ilki ve belki de en önemlisi, 19. yüzyılda İngiliz fotoğrafçı Muybridge'in insan da dahil olmak üzere kırkın üzerinde canlının yürüme, koşma, zıplama gibi hareketleri yaparken fotoğraflarını çektiği çalışmalarıdır [10–12]. Şekil 7'de bir kısmı gösterilen tek resim tekniği ile çekilen bu fotoğraf kareleri canlıların hareketlerini anlamamızda bir dönüm noktası olmuştur ve hala özellikle dört bacaklı canlıların yürüyüşü üzerine yapılan araştırmalarda referans gösterilerek varlığını sürdürmektedir.



**Şekil 7.** Eadweard Muybridge'in resimlerinden elde edilmiş kareler. (Images obtained from the pictures of Eadweard Muybridge.)



(a) Rygg (1893)

(b) Adolf (1926)

(c) Edward (1944)

**Şekil 8.** On dokuzuncu yüzyıl sonları ve Yirminci yüzyılın ilk yarısında yürüyen makineler ile ilgili yapılan patent başvurularından ve çizimlerinden örnekler. (Examples of patent applications and drawings relating to walking machines in the late Nineteenth and early Twentieth centuries.)

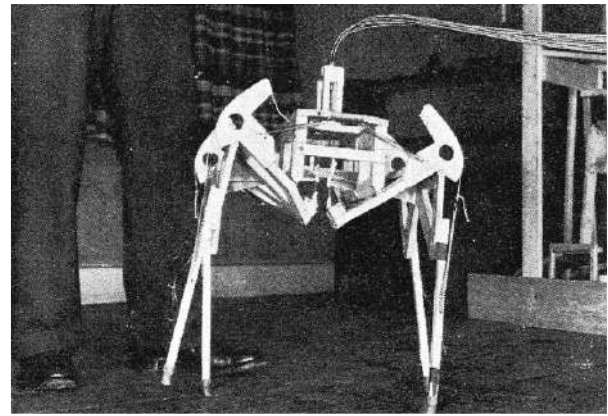
Yürüeyebilen makinelerle ilgili yapılan önemli çalışmaların başlangıcı da yine 19. yüzyıl olmuştur. Yürüeyebilen ilk mekanizma, 1878 yılında Paris'te düzenlenen Dünya Fuarı'nda karşımıza çıkmaktadır. "The Plantigrade Machine" adındaki bu makine, Rus matematikçi Pafnutiy L. Tchebyshev'e ait, dönme hareketini doğrusal harekete dönüştürebilen lambda mekanizmasını temel almaktadır [13]. Buna ek olarak, geçtiğimiz yüzyılın son çeyreğinde son derece popüler olan iki yürüeyebilen makine Melwalk Mark III [14] ve Dante [15] bu mekanizmayı esas alarak tasarlanmıştır. 20. yüzyılın son çeyreğine kadar yürüyen makineler üzerine yapılan çalışmalarda, sabit bir adım atma hareketini taklit edebilecek mekanizmalar tasarlamak üzerine olan bu yaklaşım benimsenmiştir ve bu yaklaşım ile birçok tasarım uygulaması ve patent başvurusu (Şekil 8) yapılmıştır [16–19]. Şekil 8'de bir çizimi gösterilen Mekanik At isimli yürüeyebilen bir makine için Rygg tarafından yapılan patent başvurusunun ayaklı bir makine için yapılan ilk patent başvurusu olduğu, ancak bu çizimin sadece fikir aşamasında kaldığı düşünülmektedir [20].

Yukarıda bahsedilen yaklaşım ile tasarlanan makineler, kullanılan mekanizmaların sabit bir yörüngesi olduğundan sınırlı bir hareket kabiliyetine sahipti ve aynı zamanda bu tip yürüyüş taklidi yapan makinelerin adım atma şekillerinin kontrol edilebilmesi mümkün değildi. Farklı arazi şartlarına uyumlu, adım atma şeklinin kontrol edilebileceği, birbirinden bağımsız bacaklara sahip yürüeyebilen makineler tasarlayabilmek için daha sofistike bir yaklaşımın gerekliliğini gören araştırmacılar, 20. yüzyılın ikinci yarısında, özellikle bilgisayar teknolojisinin icadı [21,22] gibi teknolojik gelişmelerin kazandırdığı ivme ile yürüyüşün kontrol edilebildiği makineler geliştirmeye başlamışlardı. Bu noktada, askeri ve uzay araştırmalarının çok büyük etkisi olmuştur; tekerlekli ve paletli harekete göre arazi uyumu yönünden göstermiş olduğu üstün performanstan dolayı

askeri ve uzay araştırmalarında çalışan araştırmacılar yürüeyebilen makineler üzerine odaklanmışlardır [9].

### 3. STATİK YÜRÜYEN AYAKLI ROBOTLAR (STATIC WALKING LEGGED ROBOTS)

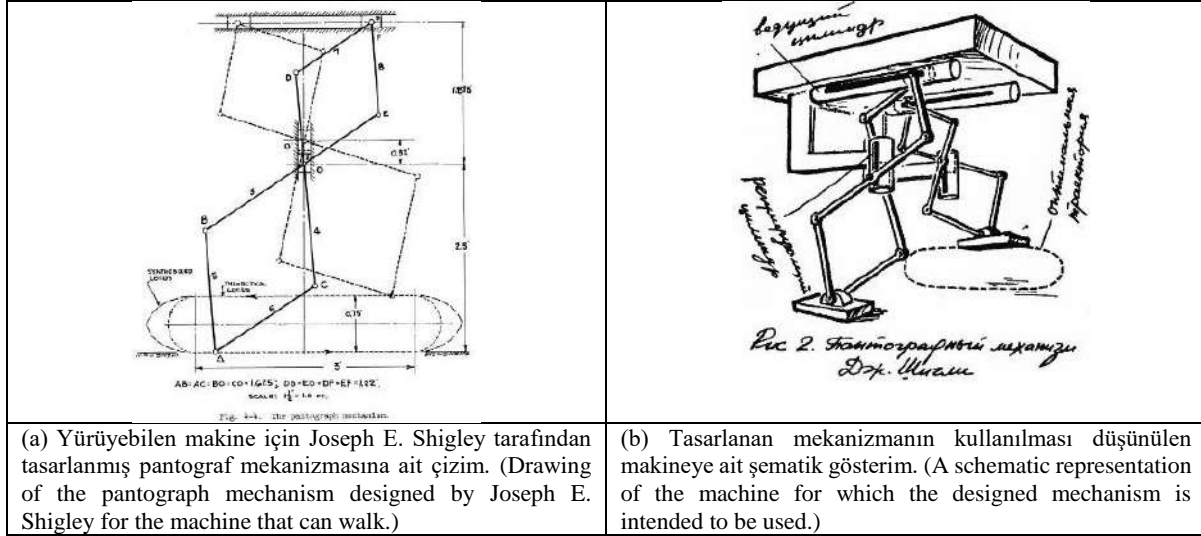
Bağımsız olarak kontrol edilebilen bacaklara sahip yürüeyebilen bir makine tasarlamaya yönelik bilinen ilk ciddi girişim, 1940 yılında Birleşik Krallık Savaş Departmanı desteğiyle Hutchinson [23] tarafından denenmiştir. W. H. Allen & Company Ltd. firması için çalışan Hutchinson, çok büyük zırhlı bir araç için ayaklı hareketin paletli hareketten daha iyi olacağını öne sürmüştü ve zırhlı araç tasarımı için, yaklaşık 60cm yüksekliğinde, operatörün oturduğu bir konsola bağlı dört adet esnek kablo tarafından kontrol edilebilen, toplamda sekiz ekleme sahip, dört bacaklı bir model oluşturmuş ve test etmiştir (Şekil 9). Ancak o yıllarda İngiltere İkinci Dünya Savaşı'na girdiğinden, Birleşik Krallık Savaş Departmanı bu tür gelişmelere daha fazla ilgi gösterememiş ve sonuç olarak bu proje tamamlanamadan sonlandırılmıştır [24].



**Şekil 9.** Yirminci yüzyıl ortalarında dört bacaklı makineler üzerine yapılan ilk önemli çalışma. (The first major

study on four-legged machines in the mid-Twentieth century.)

ayaklara aktarmak için pantograf mekanizması (Şekil 10a) kullanılmıştır. Ne yazık ki, böyle bir makinenin



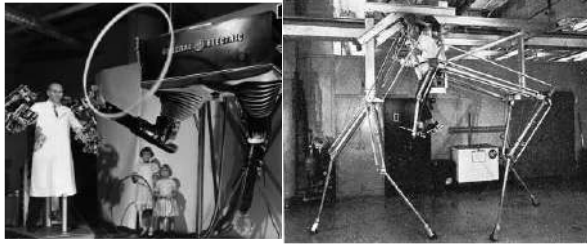
**Şekil 10.** Joseph E. Shigley tarafından ATAC bünyesinde yapılan çalışmalara ait çizimler. (Sketches of the study done by Joseph E. Shigley within ATAC.)

Hutchinson'ın yaptığı çalışmaların devamında, yaklaşık yirmi yıl boyunca ayaklı robotlar ile ilgili dönemin en dikkat çekici teorik çalışmaları, Amerika'da Birleşik Devletler Ordusu ve NASA destekli projeler kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bunun başlıca sebebi olarak, 2. Dünya Savaşı'ndan sonra Amerika Ordusu'nun engebeli arazide taşıma ve ulaşım için araç geliştirme çalışmalarına olan ilgisinin artması gösterilmektedir [24]. Bu bağlamda, birçoğu DARPA destekli olmak üzere, Michigan Üniversitesi iş birliği ile ABD Ordusu Tank-Otomotiv Merkezi (ATAC) tarafından ayaklı sistemler üzerine birçok araştırma yapılmıştır [25]. Bu araştırmaların temeli, 1950'li yıllarda Polonyalı mühendis M. G. Bekker'in ATAC bünyesinde Arazi Hareket Laboratuvarı'nı kurması ile atılmıştır ve Bekker, hem zorlu arazilerde hem de ay yüzeyi gibi daha yumuşak yüzeylerde hareket ile ilgili birçok araştırma yapmıştır [26–29]. ATAC bünyesinde yapılan bu çalışmalar Liston tarafından devam ettirilmiştir [30–33]. Daha sonra yine ATAC bünyesinde ayaklı hareket üzerine yapılan çalışmalar, Michigan Üniversitesi'nden Shigley tarafından yapılan yürüyebilen makineler için makinenin nispi boyutları, kontrol edilecek nicelikler ve düzgün ve verimli yürümeyi sağlayacak metotlar gibi birtakım kriterlerin belirlendiği çalışmaları kapsayan araştırmalar ile geliştirilmeye devam edilmiştir [34].

Shigley, bu kriterlerin çoğunu yerine getirmeyi amaçlayan ve daha sonra imalatı yapılan tamamen mekanik bağlantılara sahip bir yürüyüş makinesi tasarlamıştır (Şekil 10). Bu tasarımda, bacakların ivmelenmesini azaltan ancak imal edilmesi çok zor olan dairesel olmayan dişliler kullanması aracın performansını sınırlamaktaydı ve sonuç olarak hidrolik bir sistem kullanılmasının daha iyi bir sonuç verebileceği düşünülmüştür. Önerilen hidrolik tasarımda (Şekil 10b), her köşede dört ayak olacak şekilde toplamda 16 ayak vardı ve eyleyicilerin yatay ve dikey hareketlerini

engebeli bir zeminde ve engeller arasında kontrol edilmesine yönelik uygun bir yöntem bulunamamıştır ve bu çalışmadan da tamamlanmadan vazgeçilmiştir. Ancak tüm bu çalışmalar, yürüyen makineler literatüründe bir kilometre taşı olarak görülen başka bir çalışmanın temelini oluşturmuştur.

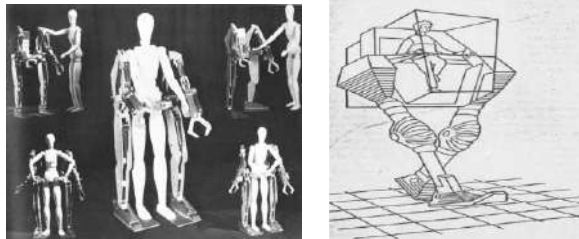
Bahsi geçen çalışmanın temeli ATAC bünyesindeki yürüyüş laboratuvarının 1962 yılında General Electric (GE) firması ortaklığında, sonrasında ayaklı hareket literatüründe büyük bir etki yaratacak, bir proje üzerine çalışmaya başlaması ile atılmış oldu. Bu anlaşmanın yapıldığı yıllarda Liston ve Shigley çalışmalarını kontrol problemi üzerine yoğunlaştırmışlardı [33]. GE ise aynı zamanlarda Sibernetik Antropomorfik Makineler (CAMs) adını verdiği, operatörün kollarına kuvvet geri beslemesi kullanarak kontrol edilebilen telemanipülatörler üzerine çalışmalar yapmaktaydı. Şekil 11a'da gösterilen Ralph S. Mosher tarafından GE bünyesinde 1958-59 yılları arasında Birleşik Devletler Ordusu Hava Kuvvetleri ve Birleşik Devletler Atom Enerjisi Komisyonu ortaklığında yürütülen Uçak Nükleer Tahrik Programı için geliştirilen Handyman adındaki telemanipülatör zamanının en popüler çalışmasıydı ve haptik teleoperasyon teknolojisinde bir kilometre taşı olma özelliğine sahiptir [35]. GE, o yıllarda, zaten Hardiman adında bir dış-iskelet geliştirdiğinden (Şekil 12b), ATAC için insan boyutlarına göre dış-iskelet sayılamayacak kadar büyük, iki ayaklı, operatörünün içerisinde bulunduğu, yürüyebilen bir makine yapmak için Handyman'de kullanılan kuvvet geri-besleme servo prensibini kullanmayı önermişti (Şekil 12a). Fakat ATAC tarafından gelen talep üzerine, dört bacaklı bir makine yapılmasına karar verilmiş ve Hutchinson'ın çalışmaları ile hemen hemen aynı yıllarda yapılan fizibilite çalışmalarının (Şekil 11b) başarıyla tamamlanması üzerine tam ölçekli dört bacaklı bir yürüyüş makinesi



(a) Ralph S. Mosher tarafından GE bünyesinde geliştirilen Handyman. (The Handyman developed by Ralph S. Mosher in GE.)  
 (b) GE Araştırma ve Geliştirme Merkezi tarafından yürüyebilen makineler üzerine yapılan uygulanabilirlik çalışması. (The feasibility study on machines that can walk by GE Research and Development Center.)

**Şekil 11.** GE tarafından yürütülen çalışmaların resimleri. (The pictures of the study carried out by GE.)

yapılması için GE ile ATAC arasında bir sözleşme imzalanmıştır [35].



(a) Ralph S. Mosher tarafından GE bünyesinde geliştirilen dış-iskelet modeli Hardiman. (The exoskeleton model Hardiman that developed by Ralph S. Mosher within GE.)  
 (b) GE tarafından ATAC için önerilen yürüyebilen iki ayaklı makineye ait şematik çizim. (A schematic drawing of a walking biped machine that suggested for ATAC by GE.)

**Şekil 12.** GE bünyesinde yapılan iki ayaklı makine ve dış-iskelet çalışmalarına ait görseller. (Images of biped machine and exoskeleton studies performed within GE.)



(a) Ralph S. Mosher operatörlüğünde yapılan Walking Truck denemelerine ait görsel. (The image of the Walking Truck trials run by Ralph S. Mosher.)  
 (b) Birleşik Devletler Ordusu Ulaşım Müzesinde sergilenen Walking Truck. (Walking Truck on display at the United States Army Transportation Museum.)

**Şekil 13.** Ralph S. Mosher tarafından GE bünyesinde geliştirilen Walking Truck isimli dört ayaklı yürüyebilen makineye ait görseller. (Images of the quadruped walking machine named Walking Truck that developed by Ralph S. Mosher within GE.)

Todd [24] tarafından belirtildiği gibi, bu araştırma başlangıçtaki fikre bağlı kalarak iki ayaklı makineler üzerine yapılsaydı, belki de operatör, insan doğasına benzerliğinden dolayı iki ayaklı bir makineyi dört bacaklı bir makineye göre daha iyi kontrol edebilecekti ve devamında yürüyen makineler tarihi şimdikinden çok farklı olabilecekti. Fakat yine de 1962-1968 yılları arasında, Ralph S. Mosher tarafından dört bacaklı olarak tasarımı ve imalatı yapılan bu makine ayaklı robotlar alanında birçok çalışmaya esin kaynağı olarak yön vermiştir ve günümüze kadar ayaklı hareket üzerine yapılan çalışmalarda referans gösterilerek popülerliğini korumuştur.

Günümüzde halen Birleşik Devletler Ordusu Ulaşım Müzesi'nde sergilenmekte olan ve Şekil 13'de gösterilen, Walking Truck adındaki yürüyebilen dört bacaklı makine, yaklaşık 3 m boyundaydı, 1400 kg ağırlığındaydı ve saatte 8 km gibi bir hıza çıkabilmekteydi [36-38]. Ek olarak, Hutchinson'ın çalışmasına benzer bir kontrol stratejisi kullanılmaktaydı [23]. Dört bacaklı ve toplamda 12 serbestlik dereceli aracın, 3 serbestlik derecesine sahip her bir ayağı, hidrolik servo döngülerle operatörün bir kol veya bacağına bağlıydı; aracın ön bacakları operatörün kol hareketlerini takip ederken, aracın arka ayakları operatörün bacak hareketlerini takip ediyordu. Aracın hareketi için gerekli hidrolik güç, 90 Beygir gücünde içten yanmalı bir motor ile çalışan pompalar tarafından üretiliyordu.

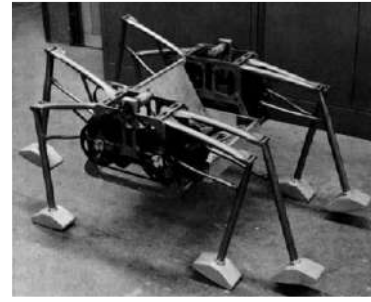




(a) Moon Rover



(b) Walking Chair



(c) The Iron Mule

**Şekil 14.** Space General Corporation firması tarafından 20. yüzyıl son çeyreğinde Birleşik Devletler Ordusu ve NASA tarafından sağlanan destek ile geliştirilen yürüyebilen makineler. (Walking machines developed by Space General Corporation with support from the United States Army and NASA in the last quarter of the 20th century.)

Günümüzde halen Birleşik Devletler Ordusu Ulaşım Müzesi'nde sergilenmekte olan ve Şekil 13'de gösterilen, Walking Truck adındaki yürüyebilen dört bacaklı makine, yaklaşık 3 m boyundaydı, 1400 kg ağırlığındaydı ve saatte 8 km gibi bir hıza çıkabilmekteydi [36–38]. Ek olarak, Hutchinson'ın çalışmasına benzer bir kontrol stratejisi kullanılmaktaydı [23]. Dört bacaklı ve toplamda 12 serbestlik dereceli aracın, 3 serbestlik derecesine sahip her bir ayağı, hidrolik servo döngülerle operatörün bir kol veya bacağına bağlıydı; aracın ön bacakları operatörün kol hareketlerini takip ederken, aracın arka ayakları operatörün bacak hareketlerini takip ediyordu. Aracın hareketi için gerekli hidrolik güç, 90 Beygir gücünde içten yanmalı bir motor ile çalışan pompalar tarafından üretiliyordu.

Walking Truck imal edildiği zamana göre çok iyi bir performans göstermişti, ancak Raibert'in belirttiği gibi kontrolü için çok iyi bir eğitime ve uzmanlığa ihtiyaç duyulmaktaydı ve operasyon süresi oldukça kısıtlıydı [39]. Buna rağmen, Walking Truck, ayakların birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebildiği yürüyebilen makinelerin uygulanabilirliğini kanıtlatdığı için ve kendi zamanının ötesine geçerek ayaklı robotlarla ilgili birçok çalışmayı teşvik eden bir çalışma olması sebebiyle ayaklı hareket teknolojisinde son derece önemli bir dönüm noktası olmuştur. Aynı yıllarda, yine Birleşik Devletler Ordusu ve uzayda, Ay'da ve diğer gezegenlerde hareketlilik problemlerine ilgi duyan NASA, GE firması ile olan projelere paralel, Space General Corporation (Aerojet General Corporation) firması ile askeri taşımacılık, gezegenler arası keşif ve engelli destek birimi olmak üzere en az üç uygulama alanı için ayaklı makinelerin geliştirilme olanaklarının araştırılması üzerine ortak projelere destek sağlamıştı [40]. Bu araştırma ve geliştirme serisi içerisinde geliştirilen yürüyen makinelere ait görseller Şekil 14'de gösterilmektedir.

Bu çalışmaların en önemli çıktısı, askeri taşımacılık için geliştirilen ve ayaklı makinelerin gelişim tarihinde bir başka kilometre taşı olarak kabul edilen, Iron Mule Train isimli sekiz ayaklı yürüyebilen makinenin imalatı

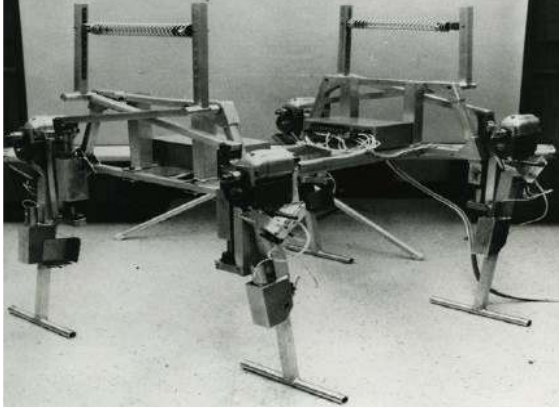
olmuştur. Todd daha sonra herhangi bir teknik iyileştirme yapmadan sadece bazı bileşenlerinde küçük değişiklikler yaparak Iron Mule Train makinesine dayanan bir robot üretmişti ve yaptığı çalışmada denge problemi bağlamında ayaklı robotların avantajlarını ve sınırlarını göstermek için hala değerli bir buluş olduğunu belirtmişti [41]. 21. yüzyıl başlarında, Morrison ve Mosher'in yaptığı çalışmalardan yaklaşık kırk sene sonra, bu görüşü destekleyen önemli bir gelişme olmuştur; DARPA, ayaklı hareket konseptini temel alan zorlu ve engelli arazi taşımacılığı fikrine tekrar başvurmuş ve Boston Dynamics firmasına BigDog robotunun geliştirilmesi için fon sağlamıştır. Ayaklı hareket literatürüne ait önemli çalışmalar olmasına rağmen GE Walking Truck ve Iron Mule Train, ayaklı makinelerin tamamen mekanik olarak tasarlanmasına yönelik son girişimleri temsil etmektedir. Bu yaklaşımda, tasarım sadeliğinin getirdiği avantajlara nispeten zemin koşullarına uyum sağlayamamadan kaynaklanan dezavantajlar çok daha fazlaydı ve bu dezavantajların giderilmesi gerekmektedir.

Bu sebeple, 20. yüzyılın son çeyreğinde, Bölüm 2'de belirtildiği gibi ayaklı hareket alanında çalışan araştırmacıların bilgisayar ve elektronik alanındaki gelişmelerden etkilenmesi ile, ayaklı makinelerin tasarımında ve kontrolünde bilgisayar desteğine başvuru yeni bir döneme geçilmişti. 20. yüzyılın son çeyreğinden itibaren, analog veya kablolu elektronik mantık devreleri ile sınırlandırılan birkaç çalışma hariç, ayaklı robotların hemen hemen hepsinde belirli bir dereceye kadar bilgisayar kontrolü kullanılmıştır.

### 3.1 Statik Yürüyüşte Tam Otomatik Sistemlere Geçiş Dönemi (Transition Era to Fully Automatic Systems in Static Walking)

Bu dönemdeki bilgisayar boyutları göz önüne alındığında, hareket eden sistemler için esnek depolanmış program kontrolünün gerekliliği aşılması gereken bir problemdi, ancak ilk önce mini bilgisayarların ve daha sonra mikroişlemcilerin icadı ile çok küçük makinelere bile bir çeşit bilgisayar işlem gücünün entegre edilebilmesi bu problemin aşılmasını mümkün kılmıştı. Ayrıca tam otomatik sistemlere geçiş döneminde, yürüyebilen makinelerin çoğu sonuçta bir

operatör tarafından kontrol ediliyordu ve insan-makine arasında kontrol görevinin nasıl paylaşılacağına karar verilmesi gerekmekteydi. Bu noktada, araştırmacılar, yürüeyebilen makinelerin kontrol sistemlerini, stratejik kararların operatör tarafından alındığı ancak eklemlerin servo kontrolü gibi daha spesifik kararların bilgisayarlar tarafından denetlendiği alt sistemler şeklinde yapılandırılarak bu problemin aşılmasını amaçlamışlardı.



**Şekil 15.** Andrew A. Frank ve Robert B. McGhee tarafından South California Üniversitesi bünyesinde geliştirilen Phony Pony isimli dört bacaklı robot. (The quadruped robot named Phony Pony developed by Andrew A. Frank and Robert B. McGhee at the University of South California.)

Bilgisayar kullanılarak mevcut hareket etme tekniklerinin geliştirilmesine yönelik bilinen ilk ciddi girişim, Robert B. McGhee'nin önce South California Üniversitesi ve daha sonra Ohio State Üniversitesi bünyesinde yürüttüğü araştırma çalışmaları olmuştur. McGhee o yıllarda GE Walking Truck ile ilgili bir tanıtım gösterisini izlemişti ve makineyle ilgili asıl sorunun, operatörün kısa bir süre için bile olsa makinenin bacak hareketlerini koordine edememesi olduğunu fark etmişti. McGhee böyle bir makinenin bilgisayar veya elektronik bir mantık tarafından oluşturulan otomatik bir adım döngüsü kullanılarak kontrol edilebileceğini göstermeye karar verdi. O yıllarda Robert B. McGhee'nin, Belgrad Üniversitesi'nden Rajko Tomovic ile Sonlu-Durum Kontrol Teorisi [42] üzerine çalışmaları vardı ve operatörü ikame edebilen otomatik bir döngü sistemi tasarlamak için bu yöntemi önermişti [43]. South California Üniversitesi'nde çalışmalarına devam eden McGhee [44], daha sonra, doktora danışmanlığını yaptığı Andrew A. Frank ile birlikte dört bacaklı yürüyüş üzerine araştırmalar yapmıştı [45,46]. Aynı dönemde, insan hareketleri için bir model olarak sonlu durum makinesini öneren Robert B. McGhee ve Rajko Tomoviç tarafından teorik çalışmalarının yapıldığı Frank'in doktora çalışması kapsamında [47], Phony Pony (Şekil 15) olarak adlandırılan, dönemin ilk otonom dört bacaklı robotunun imalatı gerçekleştirilmişti [48]. Phony Pony robotunda her bacak, birbirinin eşleniği ve iki serbestlik dereceli olacak şekilde tasarlanmıştı. Robotun bacakları ön ve arka çiftler aynı olacak şekilde monte edilip kontrol edilmişti. Ayrıca mikroişlemcilerin varlığından çok önce imal edildiğinden, bu robot, bitişik bir binanın ikinci

katında yer alan uzak bir mini bilgisayar vasıtasıyla kontrol ediliyordu. Robotu bilgisayara bağlayan kablo Şekil 15'in sağ kenarında görülebilir.

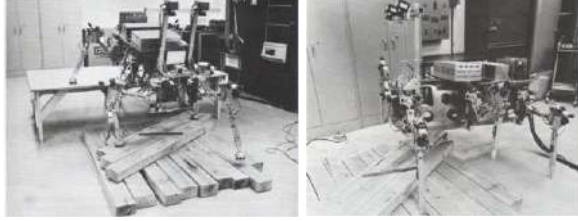
Robot, dahili herhangi bir kinematik veya dinamik modeli olmaksızın, limit sensörler ile eklemlerin durum geri-beslemesi kullanılarak sonlu durumlu bir makine tarafından kontrol edilmişti. Ayaklı robotlar literatüründe, bilgisayar kullanımına geçiş dönemi içerisinde bir ilk olması sebebiyle, Phony Pony robotu son derece önemli bir kilometre taşıdır ve bu robotun asıl önemi McGhee'ye, robotların yürütmesinde önemli bir dönüm noktası olacak olan, yürüeyebilen daha sofistike robotlar üzerine çalışmalar [49-51] yapması için ilham kaynağı olmasıdır. Ayrıca, Phony Pony çalışmasının o dönemdeki başarısı, Andrew A. Frank'e, antropomorfik sistemler üzerine önemli çalışmaları olan [52,53] ve iki ayaklı robotların hareket planlamasında çok önemli bir kavram olan Sıfır Moment Noktası (ZMP) kavramını [54-56] literatüre kazandıran Miomir Vukobratović ile birlikte çalışma fırsatı sağlamıştır [57-60].

### 3.2 Aktif Uyum Kavramının Ortaya Çıkışı

(Emergence of Active Adaptation Concept)

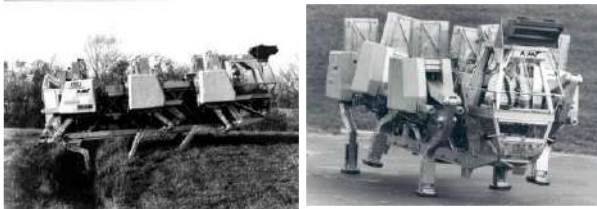
Yukarda belirtildiği gibi Phony Pony robotundan sonra McGhee, ayaklı yürüyüş üzerine çalışmalarına Ohio State Üniversitesi'nde devam etmiş ve 1977 yılında, OSU Hexapod isimli, altı bacaklı, belirli birkaç yürüyüş şeklini taklit edebilen, dönebilen, yana yürüeyebilen, basit engelleri aşabilen, eklem bacaklılara benzer yapıda bir robot imalatını gerçekleştirmiştir [61]. Bu robot, 3 serbestlik dereceli birbirine benzer bacaklara sahipti. Ayrıca, altı adet bacakta, eyleyici olarak toplamda 18 adet elektrik motoru kullanılmıştı. Bu robotun en büyük özelliği bilgisayar kontrollü yürüeyebilen ilk robot olmasıydı. Bilgisayarın asıl görevi, bacakları hareket ettiren elektrik motorlarının sürülebilmesi için yürüyüş boyunca makinenin kütle merkezinin ayakların sağladığı destek poligonunun içerisinde kalacak şekilde kinematik denklemleri çözmektir. Şekil 16'da OSU Hexapod robotunun iki ayrı versiyonu gösterilmektedir. Bu robotun diğer bir önemi ise robot kontrolü, yürüyüş üretimi, merdivenlere çıkmak ve engellerin aşılması, dönme, aktif uyumluluk, sensörlerin kullanımı ve çok işlemcili kontrol gibi çok sayıda deneysel çalışma için kullanılmış olmasıdır [62-66].





(a) Yüksek bir masadan inerken (Climbing down from a high table)  
(b) Engebeli bir yüzeyde ilerlerken (Moving on a rough surface)

**Şekil 16.** Robert B. McGhee tarafından Ohio State Üniversitesi bünyesinde geliştirilen OSU Hexapod isimli altı ayaklı robot. (The hexapod robot named OSU Hexapod developed by Robert B. McGhee at Ohio State University.)

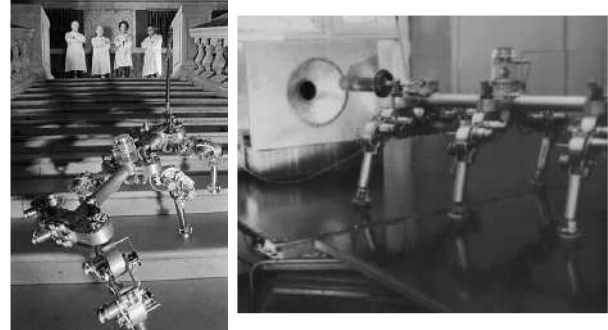


(a) Engebeli arazide ilerlerken (Moving on a rough surface)  
(b) Düz bir zeminde ilerlerken (Moving on a flat surface)

**Şekil 17.** DARPA desteği ile, Robert B. McGhee ve Kenneth J. Waldron tarafından Ohio State Üniversitesi bünyesinde geliştirilen ASV isimli altı ayaklı robot. (The hexapod robot named ASV developed by Robert B. McGhee and Kenneth J. Waldron at Ohio State University with DARPA support.)

Çoğu temel bilimsel araştırmada olduğu gibi, OSU Hexapod robotuyla ilgili en dikkat çekici şey robotun kendisi değil, geliştirilmesi sırasında ortaya koyulan veya doğrulaması yapılan yeni kavramlardı. Bu robot sayesinde yapılan çalışmalarda, robotta kullanılan algılayıcı sistemler ile ayağın temas noktasındaki zemin yüzeyinin kesin seviyesi bilinemediğinden dolayı, tek başına konum kontrolünün yürüyen bir robot için yeterli olmadığını, bu yüzden de kontrol algoritmasında yüzeye uygulanan kuvvet geri-beslemesinin de kullanılması gerekliliği görülmüştü ve bu sayede aktif uyum kavramı ortaya çıkmıştı [67]. Ayrıca, McGhee, o yıllarda hala Ohio State Üniversitesi'nde olan ve ayaklı robotlar üzerine önemli çalışmaları olan Kenneth J. Waldron ile birlikte, 1983 yılında, yine DARPA tarafından desteklenen, başka bir ayaklı robot çalışması gerçekleştirmişti [68-71]. Adaptif Süspansiyonlu Araç (ASV) adındaki bu robot, arazi adaptasyonu açısından o zamana kadar yapılmış en üstün ve en büyük araçtı (Şekil

17). ASV, toplamda yaklaşık 3 ton gibi bir ağırlığa ve 250 kg taşıma kapasitesine sahipti, 5,6 m boyundaydı ve içten yanmalı bir motor ile çalışıyordu. Ayakların hareket kontrolü bir bilgisayar tarafından yapılıyordu, ancak aracın durumu, hareketi, hızı ve yapılan manevralar bir operatör tarafından yapılıyordu [72].



(a) Masha Robotu yapılıırken (The Masha Robot)  
(b) Kuvvet geri-beslemesi deneyleri yapılırken (Performing force feedback experiments)

**Şekil 18.** SSCB Bilimler Akademisi iş birliği ile, E. V. Gurfinkel tarafından Moskova State Üniversitesi bünyesinde geliştirilen Masha isimli altı ayaklı robot. (The hexapod robot named Masha developed by E. V. Gurfinkel in Moscow State University, in collaboration with the USSR Academy of Sciences.)

1976 yılında, SSCB Bilimler Akademisi iş birliği ile Moskova State Üniversitesi bünyesinde, Phony Pony robotuna benzer özelliklere ve performansa sahip, Masha adında (Şekil 18), eklem bacaklılara benzer yapıda altı ayaklı bir robot geliştirilmişti. Masha robotunda, üç serbestlik dereceli boru şeklinde mafsallı bacaklar kullanılmıştı. Bacaklar, elektrikli motorlar ve dişliler ile tahrik ediliyordu ve eklemlerde açılma konumları ölçmek için potansiyometre sensörleri kullanılmıştı. Robot, engelleri bir yakınlık sensörü ve ayaklardaki kontak sensörleri ile aşabiliyordu ve engellerin üzerinden geçmek ve tırmanmak gibi hareketler dahil olmak üzere tüm hareketleri otonom bir şekilde yapabiliyordu [73,74].



(a) KUMO-I  
(b) PV-II

**Şekil 19.** Shigeo Hirose tarafından TIT bünyesinde geliştirilen robotlardan ilk ikisi. (The first two of the robots that developed by Shigeo Hirose in TIT.)



(a) COMET-I

(b) COMET-II

(c) COMET-III

(d) COMET-IV

**Şekil 22.** Chiba Üniversitesi bünyesinde Kenzo Nonami tarafından insani amaçlı mayın temizleme işi için geliştirilen COMET serisi robotlar. (COMET series robots for humanitarian demining developed by Kenzo Nonami within Chiba University.)

Yine aynı yıllarda, Japonya'da Tokyo Teknoloji Enstitüsü (TIT) bünyesinde, Shigeo Hirose ve Yoji Umetani, daha sonra çok sayıda ayaklı robot çalışmasına öncülük edecek olan KUMO-I (Şekil 19a) ve genel olarak ayaklı robotların geliştirilmesinde önemli bir kilometre taşı olarak kabul edilen PV-II (Şekil 19b) üzerine araştırmalar yapmışlardı [75-78]. PV-II robotunda, PANTOMEK ismiyle patentli olan üç serbestlik dereceli bir pantograf mekanizmasını temel alan bacaklar kullanılmıştı [78,79]. Pantograf mekanizması sayesinde, her bir eyleyicinin hareketi ayağın her bir Kartezyen koordinatlarda hareketine karşılık geliyordu. Her ayağın x, y ve z hareketlerini sadece bir eyleyici ile gerçekleştirebilme yeteneği ile, robotun kontrolü için kullanılan bilgisayarın, hareket etmek için karmaşık kinematik çözümler yapmasına gerek kalmıyordu. Bu mekanizma daha sonra geliştirilen diğer ayaklı robotlarda da kullanılmıştır [80].



(a) TITAN-III

(b) TITAN-XIII

**Şekil 20.** Shigeo Hirose tarafından TIT bünyesinde geliştirilen TITAN serisi robotlardan ilki TITAN-III ve sonuncusu TITAN-XIII. (The TITAN series robots developed by Shigeo Hirose within TIT, the first one TITAN-III and the last one TITAN-XIII)

PV-II robotunda, bacak hareketleri harici bir elektrik enerjisi kaynağından beslenen DC motorlar sayesinde sağlanıyordu, ayrıca yer teması ve engelleri tespit edebilmek için bacaklarda kontak sensörleri kullanılmıştı. Hirose daha sonra, 1984 yılında, PV-II'nin gelişmiş bir versiyonu olan TITAN-III isimli bir robot geliştirdi [81]. TITAN-III, Hirose'ye ait TITAN serisi robotların ilk üyesiydi (Şekil 20) ve bu serinin devamında TIT bünyesinde günümüze kadar birçok ayaklı robot geliştirilmiştir [78,82-90].

### 3.3 Ayaklı Robotların Gerçek Görevlerde Kullanılmaya Başlanması (Starting to Use Legged Robots in Real Missions)



(a) Dante-I

(b) Dante-II

**Şekil 21.** FCR bünyesinde volkanik araştırmalarda kullanılmak üzere geliştirilen Dante serisi robotlar. (Dante series robots that developed to be used in volcanic researches within FCR.)

1992 yılında Carnegie Mellon Üniversitesi (CMU) bünyesinde bulunan Saha Robotik Merkezi'nde (FCR), aktif volkanik kraterler gibi zorlu yerleri keşfetmek ve bu yerlerden veri toplamak için sekiz bacaklı, Dante adında (Şekil 21a), başarılı bir saha robotu tasarlanmış ve imal edilmiştir [15,91]. Dante projesi, fikirden uygulamaya geçiş süreci sadece 10 ay süren iddialı bir girişimdi ve bu projenin sonucunda Antarktika'da aktif bir yanardağ olan Erebus Dağı'nda bir keşif yapıldı. Ancak kraterle yaklaşık 6 metrelik bir iniş yaptıktan sonra iletişimi sağlayan kablolardan birisi kopunca görev iptal olmuştu. Daha sonra, 1994 yılında yine FCR bünyesinde, NASA tarafından desteklenen, selefının daha sağlam bir versiyonu olan ve Alaska'da aktif bir volkanik dağ olan Spurr Dağı kraterine başarılı bir keşif gerçekleştiren Dante-II (Şekil 21b) robotu geliştirilmişti [92]. Bu araştırmanın en büyük özelliği, volkanik araştırmalara katkıda bulunmasının yanı sıra, bunun gibi insanlar için zor ve tehlikeli görevlerde robotların kullanımının mümkün olduğunu göstermesidir.

21. yüzyıl başlarında Japonya'da Chiba Üniversitesi bünyesinde, Kenzo Nonami tarafından, zorlu ve engembeli arazilerde kuvvet ve empedans kontrolü ile yürüme, lazer haritalama ile tam otonom navigasyon ve teleoperasyon kontrollü yürüme konularını kapsayan ve günümüzde halen geliştirilmeye devam edilen proje kapsamında [93], insani amaçlı mayın temizleme işi için arazi mayınlarının tespitini ve imhasını yapmak üzere, daha sonra üç farklı versiyonu da geliştirilecek olan, altı ayaklı COMET

adında bir robot geliştirilmişti [94–96]. Nonami tarafından geliştirilen COMET serisi robotların (Şekil 22) farklı tipteki arazi koşullarında hareket etkinliğini göstermek için, farklı algoritmalara sahip kontrolcüler ile başarılı denemeler gerçekleştirilmiştir [97]. Bu serideki robotlardan, COMET–I ve COMET–II, elektrik motorlarıyla tahrik edilirken, COMET– III ve serinin en son versiyonu olan COMET–IV robotlarında, engebeli arazilerde ağır yükler altında yürümeye yetecek güçleri sağlayabilmek için hidrolik tahrik tercih edilmiştir. COMET–IV robotunda, dört serbestlik dereceli ve iki adet içten yanmalı motor ile çalışan bir hidrolik pompaya bağlı hidrolik eyleyiciler tarafından sürülen bacaklar kullanılmıştır [98,99].

### 3.4 Statik ve Dinamik Yürüyüş Stratejilerinin Karşılaştırılması (Comparison of Static and Dynamic Gait Strategies)



- (a) Statik Yürüyüş – Dört ayaklı bir robotun statik yürüyüş esnasında yerdeki ayakların oluşturduğu destek poligonu ve ağırlık merkezinin izdüşümü gösterilmektedir. Yürüyüşün her anında en az üç ayak yerde olmaktadır. (Static Walking – The support polygon formed by the legs on the ground and the projection of the center of gravity of a quadruped robot during the static walk. At least three legs are at the ground during every moment of the walk.)
- (b) Dinamik Yürüyüş – Dört ayaklı bir robotun dinamik yürüyüş esnasında yerdeki ayakların oluşturduğu destek poligonu ve ağırlık merkezinin izdüşümü gösterilmektedir. Yürüyüşün her anında ayaklar yere temas etmeyebilir. Dengenin korunabilmesi için sürekli hareket etmelidir. (Dynamic Walking – The support polygon formed by the legs on the ground and the projection of the center of gravity of a quadruped robot during the static walk. The legs may not touch the ground at any moment of the walk. It must move continuously to maintain balance.)

**Şekil 23.** Statik ve dinamik yürüyüş yaklaşımlarının dengeleme stratejisi bakımından karşılaştırılması. (Comparing static and dynamic walking approaches in sense of stability strategy)

Şu ana kadar bahsedilen yürüyen robotlar üzerine yapılan araştırmalar, daha önce bahsedilen iki temel yaklaşımdan ilk yaklaşımı temsil eden statik yürüyüş üzerine yapılan çalışmalardır. Tasarım yaklaşımlarında, kontrol edilmelerinde kullanılan algoritmalarda ve bilgisayar teknolojilerinde temel bazı farklılıklar olsa da konu edilen robot ve makinelerin hepsinde denge ve kararlılık için ortak bir yaklaşıma gidilmiş ve yürüyüş şekli olarak statik yürüyüş diye tanımladığımız bir yürüme stratejisi tercih edilmiştir. Statik yürüyüş stratejisinde, yürüyüşün her anında denge ve kararlılığı sağlayacak yeterli derecede geniş bir destek poligonunun oluşması için yeterli sayıda ayağın yerde olması sağlanmaktadır (Şekil 23a) ve hareket esnasında, robotun ağırlık merkezi bu destek poligonunun içerisinde hareket edecek şekilde gövde ve ayaklar hareket ettirilmektedir. Bunun sonucu olarak da statik yürüyüş stratejisinde hareket oldukça yavaş olmaktadır.

## 4. DİNAMİK YÜRÜYEN AYAKLI ROBOTLAR (DYNAMIC WALKING LEGGED ROBOTS)

Dinamik yürüyüş stratejisinde temel yaklaşım denge ve kararlılığın yürüyüş esnasında bir destek poligonunun oluşmasına ihtiyaç duymadan aktif olarak sağlanmasıdır. Yani kısaca bu yürüyüş stratejisinde robot hareket ederken ayakların yerle temas etmediği bir an olabilir (Şekil 23b). Bu nedenle dinamik yürüyüş esnasında, robot davranışını öngörebilmek, kararlılık ve dengeyi sağlayabilmek için robot yapılandırmasının ve robot duruş şeklinin yanı sıra, bu yaklaşımda, robotun sahip olduğu kinetik ve potansiyel enerjiler ve bunlar arasındaki değişimler de önem arz etmektedir.

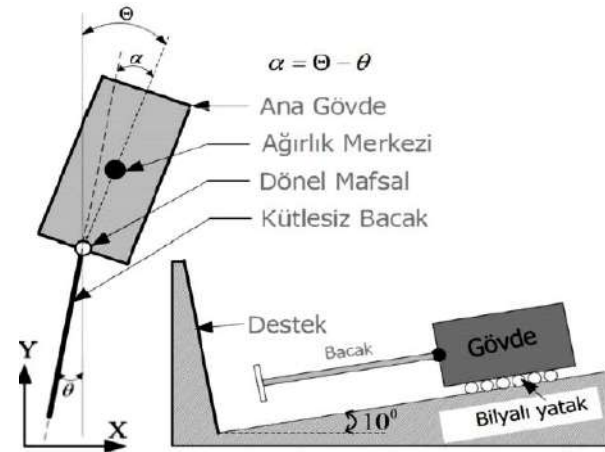
### 4.1 Yarı-Dinamik Yürüyüş Çalışmaları ve Aktif Dengeleme (Quasi-Dynamic Gait Studies and Active Balancing)

Aktif olarak dengelenen ilk makineler, otomatik olarak kontrol edilen küçük bir taşıyıcı üzerine monte edilmiş ters sarkaçlardır. Bu şekilde dizayn edilmiş bir makine imalatı üzerine yapılan bilinen ilk çalışma, 1951 yılında, "Bilgi Kuramının babası" olarak tanımlanan [100] Amerikalı matematikçi Claude Shannon tarafından gerçekleştirilmiştir [39]. Stanford Üniversitesi bünyesinde bulunan Robert H. Cannon, Shannon'ın bu çalışmasından esinlenerek ikili ters sarkaç kullanılan bir aktif dengeleme sistemi geliştirmiştir. Cannon daha sonra tek giriş ve çok çıkış prensibine dayalı sistemler üzerine çalışmalar yaparak, sadece taşıyıcı araba tahrik edilerek ikili ters sarkacın açılarının kontrol edilebilmesini araştırmıştır. Bu araştırmalar sonucunda, Cannon, kontrol edilebilirlik sınırlarını sistemin fiziksel parametrelerinin açık işlevleri olarak ifade edebilmiştir [101,102]. Ters sarkaçlar üzerine yapılan bu aktif dengeleme araştırmaları, ayaklı yürüyüş üzerine yapılan çalışmalara öncü çalışmalar olmuştur, ayrıca ayaklı robotlarda aktif dengeleme probleminin çözümüne ilham kaynağı olması bakımından oldukça önemli çalışmalardır [103–106].



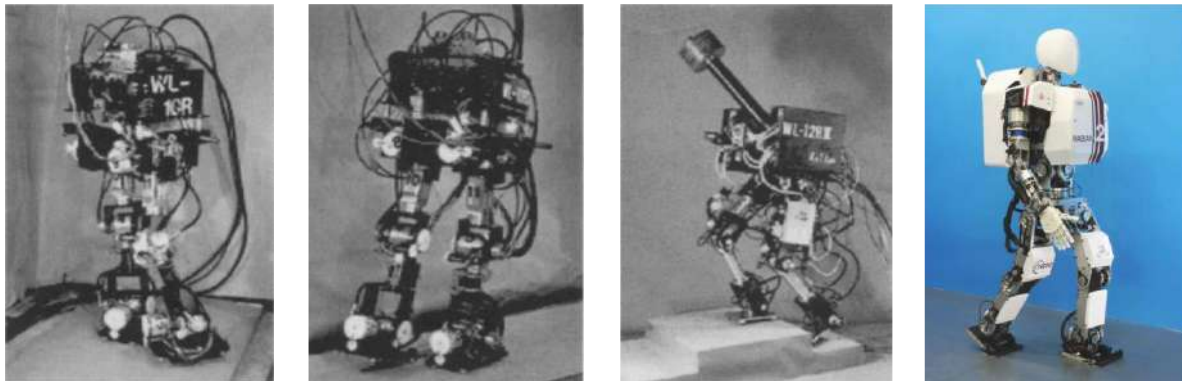
Aktif dengeleme prensibini temel alarak ayaklı bir robot geliştirilmesine yönelik gerçekleştirilen ilk ciddi araştırmalar, bu ilkelere dayalı fiziksel bir sistemin o dönemlerde oluşturulmasındaki zorluklar nedeniyle deneysel çalışmalar olmadan yapılmıştır [54,107]. Ancak, antropomorfik robotlar üzerine ciddi çalışmaları olan Ichiro Kato ve Atsuo Takanishi, 20. yüzyılın sonlarına doğru, Waseda Üniversitesi bünyesinde WL serisi (Şekil 24a, 24b, 24c) ve daha sonra Şekil 24d'de son sürümü gösterilen WABIAN serisi isminde bir dizi antropomorfik robot geliştirmeye başlamışlardır [108–115]. Hidrolik olarak tahrik edilen 10 serbestlik derecesine sahip, toplamda dakikada 0,4m adım atabilen WL serisi robotlarda, ters sarkaç modelini esas alan bir hareket planı kullanılmıştır. Tam anlamıyla aktif bir dengeleme sistemine sahip olmasa da WL serisi robotların geliştirilmesindeki en dikkat çekici nokta, kullanılan dinamik geçiş evreleri sayesinde, ayaklı robotların basit bir kontrolcü ile çok karmaşık dinamik davranışlar sergileyebileceğinin gösterilmesidir. Bu yönüyle WL serisi robotlar, ayaklı robotlar literatüründe statik yürüyüşten dinamik yürüyüşe geçiş döneminin en önemli kilometre taşlarından biri olma özelliğine sahiptir.

1980'li yılların ortalarında Tokyo Üniversitesi bünyesinde, Isao Shimoyama ve Hirofumi Miura, antropomorfik bir robot geliştirebilmek için Biper isimli bir dizi robot üzerine çalışmalar yapmışlardır [116–118]. Beş farklı robota sahip bu serinin ilk iki sürümü olan BIPER-1 ve BIPER-2 sadece yanlara yürüyebilmektedir. BIPER-3 yaklaşık 2kg ağırlığında ve 30.8cm yüksekliğindedir. Bu robotun ayakta durması için bir dizi adım atması gerekmektedir, çünkü her iki ayak da yere temas ettiğinde kendini dengelemeyi başaramamaktadır. Yedi serbestlik derecesine sahip Biper-4, insan bacakları ile hemen hemen aynı serbestlik derecesine sahiptir ve her bir eklemden sekiz adet DC motor kullanılmıştır. Şekil 25a'da gösterilen Biper-4, günümüzde halen, Kaliforniya'da bulunan Bilgisayar Tarih Müzesi'nde sergilenmektedir. BIPER-5, üzerine monte edilen bilgisayar haricinde BIPER-3 benzeri bir



Şekil 26. Kyushu Teknoloji Enstitüsü bünyesinde Kiyotoshi Matsuoka tarafından geliştirilen tek bacaklı zıplayan robota ait kavramsal model (soldaki) ve deney düzeneği modeli (sağdaki) (Sayyad ve ark.'nın [121] çalışmasından uyarlanmıştır.) (The conceptual model of the monopod jumping robot developed by Kiyotoshi Matsuoka within Kyushu Institute of Technology (left) and the experimental setup model (right) (adapted from the study Sayyad et al. [121]))

yapıya sahiptir. Biped serisi robotlar, statik olarak kararlı bir yapıya sahipti ancak dinamik olarak kararlı bir yürüyüş yapabilen robotlardır. Kısaca, Isao Shimoyama ve Hirofumi Miura tarafından geliştirilen BIPER serisi robotlar, aktif dengeleme prensibinin ilk defa tam anlamıyla uygulandığı deneysel çalışmalar olması sebebi ile ayaklı robotlar literatüründe önemli bir yere sahiptir. Buna ek olarak, koşma ve zıplama gibi yüksek hareket becerisini sergileyebilecek çalışmalar yapılabilmesine de öncül olmuşlardır.



(a) WL-10R

(b) WL-10RD

(c) WL-12RIII

(d) WABIAN-2R

Şekil 24. Waseda Üniversitesi bünyesinde Kato ve Takanishi tarafından geliştirilen antropomorfik robotlar. (Anthropomorphic robots developed by Kato and Takanishi within Waseda University)



(a) Bilgisayar Tarih Müzesi'nde sergilenmekte olan Biper-4 robotu (Biper-4 robot that exhibiting at Computer History Museum.) (b) Sağdaki Biper-3 robotu, Soldaki Biper-4 robotu (Biper-3 robot at right, Biper-4 robot at left)

**Şekil 25.** Tokyo Üniversitesi bünyesinde Shimoyama ve Miura tarafından geliştirilen iki ayaklı robotlar. (Biped robots developed by Shimoyama and Miura within Tokyo University)

Koşabilen bir robot üzerine bilinen ilk deneysel araştırma çalışmaları Kyushu Teknoloji Enstitüsü bünyesinde Kiyotoshi Matsuoka tarafından gerçekleştirilmiştir [119–121]. Burada koşma kavramı, daha net bir ifade ile, daha hızlı ilerleyebilmek için ayakların yerden kesildiğinde balistik uçuş yaptığı anların varlığı ile tanımlanmaktadır. Matsuoka, insanların zıplayarak ilerlemesine benzer bir hareketi taklit ederek ilerleyebilen, ana bir gövdeye dönel bir mafsal ile bağlanmış kütlesiz bir bacadan oluşan bir sistemin modelini formüle etmiştir. Sistem modelini formüle ederken, zıplayarak ilerleme esnasında yerle temas süresinin balistik uçuş evresine kıyasla çok daha kısa olduğunu varsayarak problemi basitleştirmiştir. Tüm çevrim süresinin neredeyse balistik uçuş evresi içerisinde tamamlandığı bu koşma modeli sayesinde Matsuoka, zıplayarak düşük bir hızda ilerleme için optimal bir zaman durum geribildirim kontrolörü elde edebilmiştir. Daha sonra, Şekil 26'de gösterilen deney düzeneğini kullanarak, elde ettiği modeli deneysel çalışmalar ile doğrulamayı başarmıştır. Bilyalı rulmanlar ile sürtünmenin azaltıldığı, yatayda 10 derecelik eğimli bir masa üzerinde hareket eden bir bacak modelinden oluşan deney düzeneği ile yaptığı çalışmalar, ayaklı robotlar literatüründe aktif olarak dengelenmiş ilk deneysel çalışma olması nedeniyle önemli bir yere sahiptir.

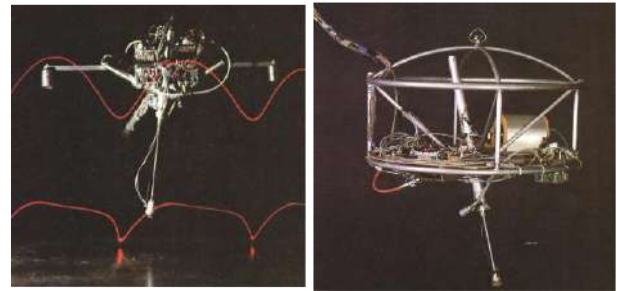
#### 4.2 SLIP Modeli ve Raibert'ın Çalışmaları (SLIP Model and Raibert's Works)

Ayaklı robotlar literatüründe, aktif dengeleme prensibini temel olarak ayaklı bir robot geliştirilmesine yönelik yapılan en önemli çalışmalar ve ilk ciddi girişimler,

robotik alanının öncülerinden Marc H. Raibert tarafından, önceleri CMU bünyesinde ve daha sonra Massachusetts Teknoloji Enstitüsü bünyesinde (MIT) yürütülen araştırma çalışmaları olmuştur [122–124]. Özellikle dört bacaklı robotlar alanında gerçekleştirdiği çalışmalar ve literatüre kazandırdığı kavramlar ile Marc H. Raibert bugün en etkili robotistlerden biridir. Ayaklı robotların geliştirilmesi için DARPA tarafından desteklenen birçok proje yürütmüştür. Spot, LS3, BigDog [8], Petman [125], Atlas [126], Wildcat ve RHex [127] gibi dünyanın en gelişmiş dinamik robotlarını geliştiren bir şirket olan Boston Dynamics'in kurucusudur ve halen başkanlığını yürütmektedir.

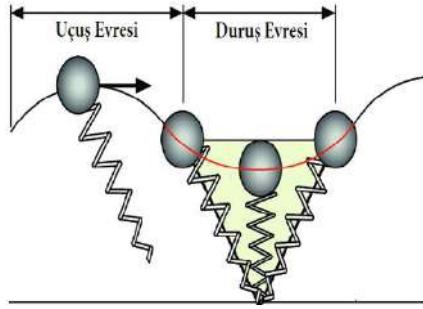
Robotikte önemli bir dönüm noktası olan aktif olarak kendini dengeleyen ve dinamik yürüyüş yapabilen robotların ilk geliştiricilerinden biri olan Raibert [128–130] çalışmalarına, ilk başta, Şekil 27a'da gösterilen hareketi dikey bir düzleme kısıtlanmış zıplayan tek ayaklı bir robot geliştirerek başlamıştır [131] ve devamında Şekil 27b'de gösterilen üç boyutlu zıplayabilen tek ayaklı bir robot geliştirmiştir [132]. İki ve üç boyutlu hareket eden tek ayaklı robotların her ikisinde de zıplama yüksekliğinin ayarlanmasının yanında enerji depolayan elemanlar olarak da kullanılabilmesi için yay eklenmiş pnömomatik silindirlere teleskopik bacak olarak kullanılmıştır. İki boyutta hareket edebilen ilk robotta, teleskopik bacak gövdeye döner mafsal ile bağlanmıştır. Ayrıca, robot üzerine gövdenin eğim açısını, ayak açısını, ayak boyunu, bacağa eklenmiş yaydaki gerilmeyi ve yer temasını ölçen sensörler eklenmiştir.

Ayaklı robotlarda aktif dengeleme ile koşma ve zıplama gibi hareketlerin incelenmesi amacıyla geliştirilen bu robotlar sayesinde, Raibert, daha sonra çok bacaklı sistemlere de uygulanabilecek basit ama etkili, koşma ile arasındaki analogi Şekil 28'de gösterilen Yay Yüklü Ters Sarkaç (SLIP) modelini temel alan bir algoritma geliştirmiştir. Matsuoka'nın çalışmasına benzer şekilde



(a) Düzlemsel zıplayan tek ayaklı robot (Planar jumping monopod robot) (b) Üç boyutlu zıplayan tek ayaklı robot (Three-dimensional jumping monopod robot)

**Şekil 27.** Marc H. Raibert tarafından geliştirilen tek ayaklı robotlar. (The monopod robots developed by Marc H. Raibert)



- (a) Burada duruş evresinin başlangıcında bacak sıkışmakta ve enerji duruş sonunda kalkışa geçerken gövdeyi ivmelendirmek için tekrar kullanılmaktadır (Poulakakis'in [133] çalışmasından uyarlanmıştır.) (The leg is compressed at the beginning of the stance phase, and the energy is re-used to accelerate the body as it enters the swing phase at the end of the stance (adapted from the study Poulakakis [133]).)
- (b) Koşan bir insan üzerinde SLIP model analogisinin gösterimi (Schwind ve Koditschek'in [134] çalışmasından uyarlanmıştır.) (The representation of the SLIP model analogy on a running person (based on the study of Schwind and Koditschek [134]))

**Şekil 28.** Koşma modeli ile SLIP modelinin benzeşimini gösteren çizimler. (Drawings illustrating the similarity of SLIP model with the running model.)

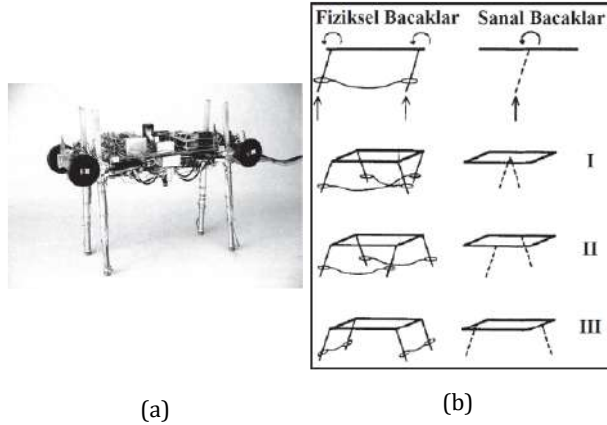
**Şekil 29.** Raibert tarafından dört ve iki ayaklı yürüyen robotlar için önerilen kontrol algoritmasını eş zamanlayan durum makinesinin şematik gösterimi. Durumlar arasında geçişler zıplama hareketine bağlı olarak sensörler aracılığı ile sağlanmaktadır (Raibert'in [39] çalışmasından uyarlanmıştır.) (Schematic representation of the state machine synchronizing the control algorithm proposed by Raibert for four- and two-legged walking robots. Transitions between states are provided by sensors depending on the bounce movement (adapted from the work of Raibert [39]).)



koşma çevrimini duruş evresi ve uçuş evresi olarak iki ayrı evrede inceleyen Raibert, duruş evresini göz ardı etmeden; duruş evresinde ayak yerde sabit bir noktada dururken sistemi ters sarkaç gibi, ayağın yerden kesildiği uçuş evresinde ise yine kütle merkezinin hareketini balistik uçuş gibi modellemiştir. Daha sonra tek bir çevrimi zıplama yüksekliği, ilerleme ve gövde durusu olmak üzere üç ana kısımda ayrı ayrı dikkate alan bir yaklaşım sunmuştur. Bu şekilde tek ayaklı bir robotun aktif olarak dengelemesi için kullanılacak kontrolcü algoritmasının, birbirleriyle eşzamanlı çalışan ve ilerleme hızının, gövde duruşunun ve son olarak zıplama yüksekliğinin ayrı ayrı düzenlendiği üç ayrı ve çok basit kısımdan oluşturulabileceğini göstermiştir. Kontrolcülerini eş zamanlamak için sistem durumları arasında geçiş yapan bir sonlu durum makinesi kullanılmıştır (Şekil 29). Etkinlikler arasındaki bağlantı, bağlantıların üç ayrı kontrolcüde bozucu sinyal olarak işleme alınmasıyla sağlanmıştır.

Raibert daha sonra, iki boyutta hareket için önerdiği bu hareketlilik algoritmasının, üç boyutta çalışan tek bacaklı bir makinenin hareketini kontrol etmek için de yeterli olduğunu göstermiştir [132]. Hareketlilik algoritmasının bu şekilde ayrıştırılması basit bir kontrolcü tasarımına imkan vermesinin yanında, ayaklı robotlarda hareketliliğin daha karmaşık problemlerine odaklanılmasını sağlayan kavramsal bir çerçeve de sunmaktadır. Bu kontrol prensibi genellikle Raibert'in üç parçalı kontrolü olarak adlandırılır ve ayaklı hareketlilik araştırmasında çok önemli bir kilometre taşıdır. Raibert, ayaklı robotlarda aktif denge ve dinamik temellerinin anlaşılabilmesi için, basitleştirilmiş bir hareketlilik problemi bağlamında tek ayaklı robotlar üzerinde gerçekleştirdiği deneysel çalışmalar ile ortaya koyduğu bu kavramsal çerçevenin, birtakım kabuller ile çok bacaklı sistemler için de kullanılabileceğini göstermiştir. İlk önce, iki ayaklı koşan bir robot üzerinde [135], daha sonra Şekil 30a'da gösterilen dört bacaklı bir robot üzerinde, tek ayak için önerilen kontrol algoritmalarının



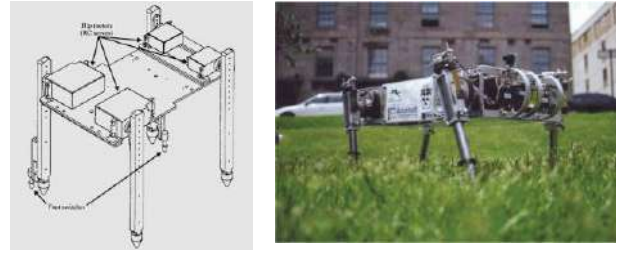


**Şekil 30.** (a) Marc H. Raibert tarafından geliştirilen dört bacaklı robot ve (b) sanal bacak kavramının farklı yürüyüş tipleri için uygulamasını gösteren şematik çizim (Raibert ve ark.'nın [129] çalışmasından uyarlanmıştır.) ((a) The quadruped robot developed by Marc H. Raibert, and (b) Schematic drawing of the virtual leg concept implementation for different types of walking (adapted from the study by Raibert et al. [129]))

doğrudan uygulanabileceği gösterilmiştir [129]. Buradaki temel yaklaşımın dayanağı, insanlarda olduğu gibi, koşarken bacakların dönüşümlü kullanılmasından dolayı her iki baceden sadece birinin aktif olması gerçeğinden yola çıkarak, tek bacak için oluşturulan kavramsal çerçevenin iki ayaklı bir robotta aktif bacak için uygulanabilir olmasıdır.

Prensipde bu yaklaşımın, hareket boyunca sadece bir bacağın aktif olduğu herhangi bir ayaklı sistem için uygulanabilir olmasına rağmen, hareket boyunca birden fazla bacağın aktif olduğu durumlarda bu yaklaşımın uygulanması mümkün değildir. Bu problemi aşır, oluşturduğu kavramsal çerçeveyi dört bacaklı robotlarda da kullanabilmek için, Raibert, Ivan Sutherland tarafından önerilen [136] birden fazla aktif bacağın tek bir bacakmış gibi davrandığı sanal bacak kavramına başvurmuştur. Bu yöntemle, Şekil 30b'de gösterildiği gibi dört bacaklı bir robot, ikili eşleştirmeler ile Raibert'in üç parçalı kontrolünün uygulanabildiği iki ayaklı bir sisteme indirgenebilmektedir. Burada, bacaklarda yapılan eşleştirmeler robotun yürüyüş şeklini belirlemektedir. İki çapraz bacağın eşzamanlı hareketi, Tırs yürüyüş şekline, aynı taraftaki iki bacağın eşzamanlı hareketi, Rahvan yürüyüş şekline neden olurken, Zıplayarak yürüyüş şekli arka bacakların ve ön bacakların eşzamanlı hareketiyle elde edilmektedir.

Raibert tarafından aktif dengeleme ve dinamik yürüyüş üzerine yapılan bu araştırma çalışmaları sonrasında, ayaklı robotlar alanında çalışan birçok araştırmacının ilgi odağı, antropomorfik robotlarda daha çok tercih edilen ZMP kontrollü sistemler yerine hızlı, dinamik ve çok yönlü hareketler sunabilen dinamik yürüyüş şekli üzerine



**(a) Scout-I robotuna ait (b) Scout-II robotu (The Scout-II çizim (Drawing robot) of the Scout-I robot)**

**Şekil 31.** McGill Üniversitesi Gezici Robotik Laboratuvarı bünyesinde Martin Buehler tarafından geliştirilen Scout serisi dört ayaklı robotlar. (The quadruped robots developed by Martin Buehler within Ambulatory Robotics Lab of McGill University )

yoğunlaşmıştır. Nitekim araştırmacılar, iki ayaklı robotlar ile karşılaştırıldığında yapılandırmasından dolayı denge problemine daha basit bir çözüm sunan, daha hızlı ve çeşitli yürüyüş şekilleri olan dört bacaklı robotlar geliştirilmeye başlamıştır. 1990'lı yılların sonunda McGill Üniversitesi Gezici Robotik Laboratuvarı (ARL) bünyesinde bulunan Martin Buehler tarafından, mekanik sadeliği temel alan Scout isimli robot serisi geliştirilmeye başlanmıştır [137–139]. Dört bacaklı hareket için tasarlanan, Şekil 31a'da tasarıma ait bir çizimi de gösterilen, serinin ilk robotu Scout-I her bacede sadece bir serbestlik derecesine sahip oldukça basit bir tasarımdı. Oldukça basit bir mekanığe sahip olmasına rağmen bu robotun, hareket stratejisinde ters sarkaç dinamiklerinin temel alındığı deneysel çalışmalar sonucunda yüksekliği yaklaşık bacak boyunun %45'i olan merdivenleri tırmanabildiği gösterilmiştir [137]. Şekil 31b'de gösterilen serinin ikinci ve son robotu olan Scout-II robotunda, yine mekanik basitlik korunmuş, sadece bacağa yaylı prizmatik mafsal eklenerek bacağın serbestlik derecesi biri aktif diğeri pasif olmak üzere ikiye çıkarılmıştır. Saatte 1,3 m/s gibi bir hıza erişebilen bu ikinci robotun ağırlığı 27 kg'dır [140]. Bu çalışma, bacaklarda sadece bir eyleyicinin kullanıldığı oldukça basit bir tasarıma sahip dört bacaklı bir robotun yürüme, koşma, merdiven tırmanma gibi yüksek hareket kabiliyeti sergileyebileceğini göstermesi açısından ayaklı robotlar literatüründe önemli bir yere sahiptir.

#### 4.3 Son On Yılda Yapılan Dört Ayaklı Robot Çalışmaları (Quadruped Robot Studies in the Last Decade)

21. yy başlarında, Hiroshi Kimura ve Yasuhiro Fukuoka, Kyoto Teknoloji Enstitüsü bünyesinde, canlılardaki sinir sisteminden esinlenerek geliştirdikleri Merkezi Örüntü Üretici (MÖÜ) modeli kullanılan, Patrush serisi (Şekil 32a) ve Tekken serisi (Şekil32b) isminde bir dizi dört bacaklı robot geliştirilmeye başlamıştır. Canlılarda



(a) Patrush-I (b) Tekken-II

**Şekil 32.** Kyoto Teknoloji Enstitüsü bünyesinde Hiroshi Kimura ve Yasuhiro Fukuoka tarafından geliştirilen dört ayaklı robotlar. (Quadruped robots developed by Hiroshi Kimura and Yasuhiro Fukuoka within Kyoto Institute of Tehcnology)

görülen vestibülo-spinal refleks, gerilme refleksi gibi spinal refleksleri taklit edebilen bir MÖÜ geliştirmeyi amaçlamışlardır. Önerdikleri yapay sinir sistemi yaklaşımını deneysel çalışmalarla doğrularak, MÖÜ temelli kontrol yöntemini kullanan dört bacaklı bir robotun, bilinmeyen düzensiz bir araziye otonom adaptasyon yeteneğine sahip olduğu gösterilmiştir. 2010 yılında en son sürümü olan Tekken IV isimli robotta kamera ve lazer mesafe algılayıcıları kullanılmışlardır [141-145]. O yıllara kadar yapılan çalışmalarda, ayaklı robotların hareketi esnasında genellikle bacakların yörünge planlamasına dayalı bir arazi adaptasyonu yaklaşımı kullanılmıştır. Ancak Hiroshi Kimura ve Yasuhiro Fukuoka tarafından yapılan çalışmalarda, MÖÜ ve reflekslerin kullanıldığı tork tabanlı bir kontrol sisteminin çevreyle olan etkileşimi sonucu otonom şekilde gerçekleştirilen bir arazi adaptasyonu yaklaşımı sunulması ve bu yaklaşımın deneysel çalışmalarla doğrulanmasından dolayı ayaklı robotlar literatüründe bu çalışmalar bir fark yaratmıştır ve önemli bir yere sahiptir.

21. yüzyılın başlarına gelindiğinde, DARPA tarafından desteklenen ayaklı robotlar üzerine bir proje yürüten

Boston Dynamics firması, daha önce de belirtildiği gibi günümüzde halen dört bacaklı robotlar alanında standartları belirleyen BigDog adında bir robot geliştirmiştir.

Martin Buehler tarafından yürütülen proje kapsamında, 2005 yılında BigDog robotunun ilk versiyonu 1 m boyunda, 1 m uzunluğunda, 0,3 m genişliğinde ve yaklaşık 90 kg ağırlığındaydı, ayrıca zorlu arazilerde saatte 6,5 km gidebilecek hızlara çıkabilmektedir. Her bacak, hidrolik olarak tahrik edilen üç aktif serbestlik derecesi ve ayakucu ile bacak arasında pnömatik bir yay kullanılmış prizmatik mafsallı bulunan bir pasif serbestlik derecesi olmak üzere toplamda dört serbestlik derecesine sahiptir [146].

Şekil 33a'da görüldüğü üzere, BigDog robotunun ilk versiyonunda diz eklemlerinin dört bacakta da aynı yönde olduğu bir bacak yapılandırılması tercih edilmiştir. Kendi ağırlığı 109 kg ve yaklaşık 50 kg ek yük taşıma kapasitesi olan ikinci versiyonda en temel farklılık bacak yapılandırmasında yapılmış ve yine hidrolik olarak tahrik edilen dördüncü bir serbestlik derecesi eklenmiştir [8]. Şekil 33b'de gösterilen bu robotta, gövdenin duruşunu ve ivmesini ölçen atalet sensörleri, eklemleri tahrik eden hidrolik eyleyicilerin hareketini ve kuvvetini ölçen eklemler sensörleri ile hidrolik basınç, akış ve sıcaklık gibi nicelikleri ölçen toplamda yaklaşık elli adet sensör kullanılmıştır. Ayrıca, sensörlerden gelen bu bilgileri işleyip BigDog robotunun hareketini kontrol eden yerleşik bir bilgisayar ve güç kaynağı olarak içten yanmalı bir motor kullanılmıştır.

2009 yılında, robotik alanında BigDog ile müthiş bir başarı ve etkinin elde edilmesinden dolayı, DARPA, BigDog projesinin gelişmiş versiyonu olan ve AlphaDog (Şekil 33c) adıyla da bilinen Bacaklı Birim Destek Sistemi (LS3) projesini başlatmıştır ve 2015 yılında bu proje sonlandırılmıştır. LS3 robotu, yaklaşık 600 kg ağırlığa ve 200 kg bir yük taşıma kapasitesine sahiptir, ayrıca zorlu arazi şartlarında 32 km gidebilecek bir yakıt

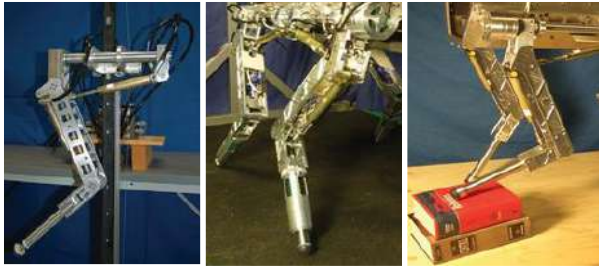


(a) BigDog robotunun 2005 yılındaki ilk versiyonu (The first version of the BigDog robot in 2005)

(b) BigDog robotunun 2008 yılındaki versiyonu (The 2008 version of the BigDog robot)

(c) Bigdog robotunun, AlphaDog ismiyle de bilinen, 2015 yılındaki son versiyonu (The latest version of the Bigdog robot in 2015, also known as AlphaDog)

**Şekil 33.** Boston Dynamics firması bünyesinde Martin Buehler ve Marc H. Raibert tarafından DARPA için geliştirilen dört ayaklı robotlar. (Quadruped robots developed by Martin Buehler and Marc H. Raibert for DARPA within Boston Dynamics.)



(a) HyQ robotunda kullanılan ilk bacak tasarımı (The first leg design developed for use in HyQ robot)  
 (b) HyQ robotunun 1.1 versiyon modelinde kullanılan bacak tasarımı (The leg design used in HyQ robot version 1.1 model)  
 (c) HyQ robotunun 1.2 versiyonunda kullanılan bacak tasarımı (The leg design used in HyQ robot version 1.2 and later)

**Şekil 34.** İtalya Teknoloji Enstitüsü bünyesinde Claudio Semini tarafından geliştirilen HyQ robotunda kullanılmak üzere geliştirilen bacak tasarımları. (Leg designs developed for use in HyQ robot developed by Claudio Semini within Italy Institute of Technology.)

kapasitesine sahiptir. Yine güç kaynağı olarak içten yanmalı bir motor kullanılmıştır. Ayaklı robotlar alanında yapılan diğer çalışmalara birer referans olmalarının yanında BigDog ve LS3 robotları, bu alanda çalışan bilim insanlarının dikkatini çektiği gibi büyük ölçekli askeri uygulamalar olmasından dolayı kamuoyunda da büyük bir ilgi uyandırmıştır. Askeri projeler olmasından dolayı literatürde bu robotlar hakkında neredeyse hiçbir bilimsel kaynak bulunmamaktadır.

Aynı yıllarda Claudio Semini, İtalya Teknoloji Enstitüsü (IIT) bünyesinde Hydraulic Quadruped (HyQ) isminde yine dört bacaklı ve hidrolik tahrikli bir robot geliştirmeye başlamıştır. Semini'nin kendi doktora tezinde de belirttiği gibi, bu çalışmanın asıl motivasyon kaynağı Marc. H. Raibert'm çalışmaları ve BigDog robotunun yarattığı büyük etkidir [123]. Semini 2007 yılında, BigDog robotuna benzer bir robot geliştirebilmek için, çalışmalarına ilk olarak ayaklı robotların en önemli bileşeni olan bacak mekanizması ve

yapılandırması üzerine yaptığı araştırmalar ile başlamıştır [147–149]. Elektro-mekanik yapıların ve özellikle hidrolik eyleyicilerin tasarımının ve performansının değerlendirildiği deneysel çalışmalarda kullanılması için geliştirilen ve Şekil 34a'da gösterilen HyQ robotuna ait bacağın ilk versiyonu, sadece dikey düzlemde hareket edebilecek şekilde birbirine döner mafsallarla bağlanmış iki adet uzuvdan oluşan basit bir mekanizmaya sahipti. Bacak mekanizması, hidrolik silindireler ile tahrik edilen her biri 0.3m uzunluğunda olmak üzere toplamda iki serbestlik derecesine sahipti. Şekil 34b'de gösterilen ikinci bacak versiyonunda, ayakucu ve bacak arasına yay eklenerek, sistemin toplam serbestlik derecesi üçe çıkartılmıştır [150], fakat Şekil 34c'de gösterilen sistem empedansının aktif olarak kontrol edildiği HyQ robotunun son versiyonunda kullanılan bacak tasarımında bu yay eklenmemiştir [151,152].

Şekil 35a'da ilk versiyonu gösterilen 2011 yılında imal edilen HyQ robotu ile dört bacaklı robotların dinamik yürüyüşü ve kontrolü üzerine birçok deneysel araştırma-geliştirme çalışmaları gerçekleştirildikten sonra, robota ait eyleyiciler, hidrolik bileşenler, elektro-mekanik yapı ve sensörler iyileştirilerek, 2013 yılında Şekil 35b'de gösterilen HyQ robotuna ait son versiyon imal edilmiştir. Hidrolik olarak tahrik edilen toplamda 12 serbestlik derecesine sahip, 75 kg ağırlığında, 1 m uzunluğunda, 0,5 m genişliğinde, 1 m boyunda olan son versiyon HyQ robotunun tüm eklemlerinde manyetik mutlak ve optik bağlı kodlayıcılar vardır, ayrıca robot, gerinim ölçme tabanlı kuvvet-tork sensörlerine sahiptir. Bunlara ek olarak robotta, hidrolik bileşenlere ait basınç sensörleri ve gövde duruşunun belirlenmesinde kullanılan atalet ölçüm birimi de mevcuttur. Ayakucunda yüksek frekanslı darbelerin sönümlenmesini sağlayan ve robota çekiş gücü sağlayan yüksek oranda sıkıştırılmış araba lastiği kauçuğu benzeri bir malzeme kullanılmıştır [153–158].



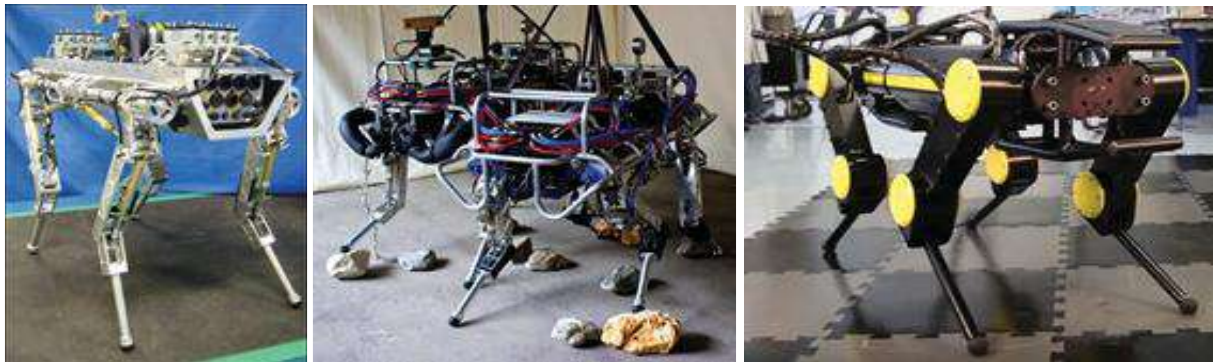
**Çizelge 1.** HyQ2Max robotuna ait sistem özellikleri (Semini ve ark.,'nın çalışmasından uyarlanmıştır [163]). (System specifications of the HyQ2Max robot. (It was adapted from the study of Semini et al. [163]).)

<b>Boyutlar</b>	Boy: 1,31m Genişlik: 0,54m Yükseklik: 0,91m	<b>Kalça Uzunluğundaki Eyleyici ve Maksimum Tork</b>	Çift Kanatlı Döner Hidrolik Eyleyici 120N·m (@20 MPa)
<b>Uzuv Boyutları ve Ağırlıkları</b>	Bacağın Kalça Uzvu: 0,117m, 3,54kg	<b>Üst Uzunluğundaki Eyleyici ve Maksimum Tork</b>	Tek Kanatlı Döner Hidrolik Eyleyici 45N·m (@20 MPa)
	Bacağın Üst Uzvu: 0,36m, 4,95kg Bacağın Alt Uzvu: 0,38m, 1,40kg	<b>Alt Uzunluğundaki Eyleyici ve Maksimum Tork</b>	Hidrolik Silindir & Dört Çubuk Mekanizması 250N·m (@20 MPa)
<b>Maksimum Ayak Uzunluğu</b>	0,740m	<b>Toplam Serbestlik Derecesi</b>	12
<b>Toplam Ağırlık</b>	80kg (Güç Kaynağı Hariç)	<b>Kontrolcü Frekansı</b>	1 kHz Tork & Konum Kontrolcüsü (EtherCAT arayüzü)
<b>Eklemlerin Açılış Aralığı</b>	Kalça Uzvu: 80° Üst Uzuv: 270° Alt Uzuv: 165°	<b>Konum Sensörleri</b>	Tüm eklemlerde Mutlak Konum Sensörü (Çözünürlük: 262.144 CPR)

HyQ robotu ile düz, eğimli ve engebeli arazide yürüme, dış darbeler altında dengeyi sağlama [159], koşma [156], adım refleksleri, sezgisel yürüyüş, engeller üzerinden atlama [160,161] ve engebeli yüzeylerde yürüme ve merdiven çıkma için optimize edilmiş yürüyüş [162] gibi yüksek hareket kabiliyetlerinin değerlendirildiği birçok başarılı deneysel çalışma gerçekleştiren Semini, laboratuvar ortamının dışına çıkarak gerçek hayatta kullanılacak bir robot imal edebilmek amacıyla 2015 yılında Şekil 35'e gösterilen HyQ2Max adını verdiği HyQ robotunun daha gelişmiş bir versiyonunu geliştirmeye başlamıştır. Yapılan deneyler sonucu elde edilen bilgi ve birikimler ışığında HyQ robotunun sağlamlığını, bacağın çalışma uzayını ve eklemlerde üretilen torkları artırabilmek ve zayıf yönlerini güçlendirebilmek için bacakları ve gövdeyi tamamen yeniden tasarladıkları HyQ2Max robotundaki en dikkat çekici değişiklikler bacak ile gövde arasındaki eklemin yapılandırılmasında ve bacaklarda tork üretimi için kullanılan eyleyicilerde yapılmıştır. Bacağın üst kısmını tahrik etmek için hidrolik silindir yerine hidrolik döner eyleyici tercih edilmiştir. Bacağın alt kısmında tork

üretimini iyileştirebilmek için yine hidrolik silindiler dört çubuk mekanizması ile birlikte kullanılmıştır [163]. Bu derlemenin yazımı sırasında halen IIT bünyesinde geliştirilmeye devam edilen ve günümüzün en gelişmiş dört bacaklı robotlarından biri olan HyQ2Max robotuna ait sistem özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Gerçek hayatta kullanılmaya en yakın diğer bir dört bacaklı robot, özellikle dört bacaklı robotlar üzerine birçok araştırmanın yapıldığı Zürih Federal Teknoloji Üniversitesi (ETHzürich) Robotik ve Akıllı Sistemler Enstitüsü bünyesinde, ANYbotics firmasının kurucularından Marco Hutter tarafından geliştirilen ANYmal isimindeki robottur [164]. Yukarıda bahsedilen gelişmiş robotların başlangıç noktasının ilk önce tek bir bacak üzerine yapılan araştırma çalışmaları olduğu gibi, ANYmal robotunun geliştirilmesine de ilk önce canlıların yürüyüşlerindeki benzer dinamikleri sağlayabilen, eklemlerde geçici enerji depolayabilen ve arazi uyumunun pasif olarak geliştirilebildiği Seri Esnek Eklemlerli Robotik Bacak (ScarLETH) adı verilen tek bir robot bacağı üzerine yapılan araştırma ve geliştirme çalışmalarıyla başlamıştır. ETHzürich bünyesinde

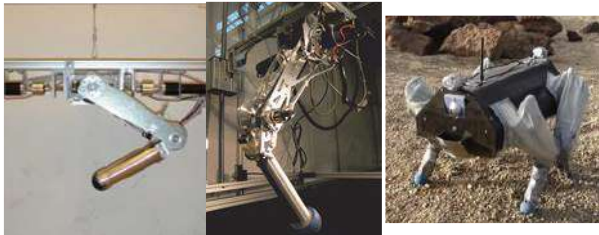


(a) HyQ robotunun 2011 yılındaki ilk versiyonu (The first version of the HyQ robot in 2011) (b) HyQ robotunun 2013 yılındaki son versiyonu (The latest version of the HyQ robot in 2013) (c) HyQ robotunun selefi HyQ2Max robotu (The predecessor of the HyQ robot)

**Şekil 35.** İtalya Teknoloji Enstitüsü bünyesinde Claudio Semini tarafından geliştirilen HyQ isimli dört ayaklı robot versiyonları. (The versions of the quadruped robot named HyQ developed by Claudio Semini within Italy Institute of Technology)

ayaklı yürüyüş üzerine yapılan birçok araştırma çalışmaları [165–167] sonucu geliştirilen, Şekil 36a'da ilk ve Şekil 36b'de son versiyonu gösterilen ScarLETH ismindeki robotik bacak, ilk olarak David Remy tarafından 2008 yılında Avrupa Uzay Ajansı tarafından düzenlenen Lunar Robotik Yarışması'na katılmak için geliştirilen ALoF isimli (Şekil 36c) dört bacaklı bir robotta kullanılmıştır [4,168–170]. Daha sonra Marco Hutter yine ScarLETH adındaki robotik bacakları kullanarak, Şekil 37a'da gösterilen, Eklemli Robotik Ayaklı Yaylı Tetrapod (StarLETH) adını verdiği dört bacaklı bir robot geliştirmiştir [171]

Laboratuvar ortamında hareket kontrol prensipleri ve eyleyici üzerine yapılan çalışmalarda kullanılmak üzere tasarlanan StarLETH robotu, rijid bir ana gövdeye bağlanmış dört özdeş ve tamamen simetrik eklemli bacaklara sahiptir. Her bacağın memeli tarzında düzenlenmiş üç serbestlik derecesi vardır. Hızlı bacak hareketleri elde edebilme adına tüm eyleyiciler gövdeye montaj edilerek, hafif bir bacak yapısı tercih edilmiştir. Yaklaşık 0,5 m boyunda ve 23 kg ağırlığındaki bu robotun bacakları 0,2 m uzunluğundaki bölümlerden oluşmaktadır. Canlılardaki kas ve tendon yapısına benzer özelliklere sahip, son derece esnek seri elastik eyleyiciler tarafından tahrik edilen bacaklar sayesinde hareket esnasında enerji depolayabilmektedir. Bu sayede yüksek enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. Hutter, StarLETH robotu ile mekanik tasarım [172], ayaklı robotlarda esnek bacakların kullanımı [173], yürüyüş ve tork kontrolü [174], dört bacaklı robotların hızı, verimliliği, çok yönlülüğü ve sağlamlığı [175], yürüyüş esnasında kuvvet ve tork optimizasyonu [176], eğimli yüzeylerde dinamik yürüyüş [177], dört bacaklı koşma ve atlama hareketlerinin matematiksel model kullanılarak durum-geri bildirim ile optimizasyon tabanlı kontrolü [178] gibi birçok konu üzerine yapılan çalışmalar sonucu elde edilen bilgi ve birikimi kullanarak, laboratuvar ortamının dışında, gerçek hayatta zorlu ortamlarda kullanılacak bir robot imal edebilmek amacıyla Şekil 37b'de



(a) FerrETH ismindeki ilk versiyonu (The first version named FerrETH)  
 (b) ScarLETH ismindeki son versiyonu (The last version named ScarLETH)  
 (c) ScarLETH'nin kullanıldığı ALoF ismindeki ilk robot (The first robot named ALoF in which ScarLETH is used)

**Şekil 36.** Zürih Federal Teknoloji Üniversitesi bünyesinde ayaklı robotlarda kullanılmak üzere geliştirilen robotik bacaklar (a, b) ve kullanıldığı ilk dört ayaklı robot (c). (The robotic legs developed for use in legged robots within the Zurich Federal University of Technology (a,b) and the first quadruped robot used in (c).)

gösterilen ANYmal robotunu geliştirmeye başlamıştır [179].



(a) StarLETH

(b) ANYmal

**Şekil 37.** Zürih Federal Teknoloji Üniversitesi bünyesinde Marco Hutter tarafından geliştirilen dört bacaklı robotlar. (Quadruped robots developed by Marco Hutter within Zurich Federal University of Technology)

Tek bir ana karbon fiber gövdeye basit mekanik bağlantılarla bağlanmış 12 adet özdeş eyleyiciye sahip, çevre algısı için iki adet lidar sensör ve geniş açılı kameranın kullanıldığı, toplamda 30 kg ve 0,5 m yüksekliğinde olan ve farklı uygulamalar için kullanılacak gaz algılama sensörü, ultrason mikrofona, optik yakınlaştırma ve termal kamera gibi sensörler veya manipülasyon için kullanılacak robotik kolların bağlantısına izin veren modüler bir yapıya ve IP67 sınıfı bir koruma derecesine sahip olan ANYmal robotu (Şekil

38b), yüksek hareketlilik, hızlı ve dinamik hareket yetenekleri, sağlıklı, basit bakım onarım gibi konulara odaklanılarak zorlu ortamlarda uzun süreli dayanıklı otonom çalışma için özel olarak tasarlanmıştır [180]. ANYmal robotunda da selefi StarLETH robotunda olduğu gibi memeli canlılarda görülen bir eklem yerleşimi tercih edilmiştir. Ancak StarLETH, ALoF, HyQ, BigDog veya diğer geliştirilen ayaklı sistemlerin aksine bu robotun bacakları, tüm eklemlerin tamamen dönebileceği şekilde, ofsetli olarak birbirlerine bağlanmıştır. Bu sayede ANYmal robotunun bacakları, yüksek hareketliliğin anahtarı olan oldukça geniş bir hareket aralığında çalışabilmektedir (Şekil 38a). Bununla birlikte, geniş hareket aralığı sayesinde Şekil 38a'da gösterildiği gibi ANYmal robotunun ayakları, kapı açmak veya yüksek engelleri aşmak gibi hareketler için gerekli yüksekliklere çıkabilmekte veya yürüyüş esnasında bacak yapılandırmasını değiştirebilmektedir. Bu derlemenin yazıldığı tarihte, ETHzürich bünyesinde ANYmal robotunun geliştirilmesine yönelik çalışmalar halen devam etmektedir [181–184].

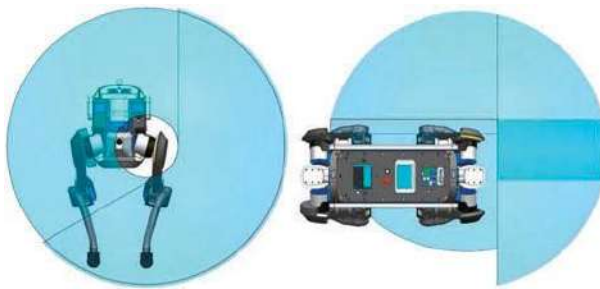
Son olarak, yine bu derlemenin yazıldığı tarihlerde halen dört ayaklı robotlar üzerine çalışmalarının devam ettiği Mete Kalyoncu ve ekibi tarafından, ilk olarak Selçuk Üniversitesi ve daha sonra Konya Teknik Üniversitesi bünyesinde olmak üzere, literatürdeki başarılı dört ayaklı robotlarda olduğu gibi yine hidrolik tahrikli bir dört ayaklı robot geliştirilebilmek için araştırma çalışmaları yürütülmektedir. Yukarıda değinildiği üzere birçok başarılı robotun başlangıç noktasının ilk önce tek bir bacak üzerine yapılan araştırma çalışmaları olmasından dolayı, Kalyoncu ve ekibi çalışmalarına, dört ayaklı bir robot için bir bacak tasarımı da dahil olmak üzere, ilk önce yürüyüşün kendisi ile değil de yürüyüş performansını doğrudan etkileyen adım atma performansı ve adım kontrolü üzerine yaptıkları

araştırmalar ile başlamışlardır. Devamında farklı çalışma şartları için adım refleksinin iyileştirilmesi ile yürüyüş performansının artırılması ve dört ayaklı bir robotun ters kinematik analizi gibi konular üzerine yaptıkları araştırmalar ile çalışmalarına devam etmişlerdir [185–191].

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Literatürde yeni olmamasına rağmen, son yıllarda araştırmacılar mobil robotlar ile ilgili yaptıkları çalışmalarda BigDog, ASIMO, HyQ ve ANYmal gibi robotların yarattığı etki ile genelde ayaklı robotlar üzerine odaklanmıştır ve ayaklı robotlarla ilgili çalışmaların sayısında artan bir eğilim gözlenmektedir. Bu eğilimin bir sonucu olarak, son on yılda, ayaklı robot literatürüne birçok yeni robot tasarımı eklenmiştir. Bunun ana sebebi, ayaklı robotların, diğer hareketlilik yöntemlerine göre engebeli ve zorlu araziler üzerinde daha iyi bir performans gösterdiği ve yeryüzünün çok az bir parçasının konvansiyonel hareketlilik yöntemleri ile ulaşılabilir olduğu gerçeğidir.

Bahsedilen gelişmelere ve diğer mobil robotlara olan üstünlüklerine rağmen, ayaklı robotlar ile ilgili yapılan çalışmalar henüz deneysel ortamların ötesine geçememiştir. Araştırmacılar tarafından geçtiğimiz on yılda geliştirilen ve günümüzde üzerinde araştırmalara devam edilen birçok ayaklı robot, kararlı bir şekilde yürüme, koşma, zıplama gibi dinamik hareketleri ancak engebesiz ve düz bir zeminde yapabilmektedir ve üstelik bu robotların, endüstriyel veya günlük işlerde destek eleman olarak diğer mobil robotlar gibi tam anlamıyla kullanımı henüz mümkün değildir. Bunun başlıca sebebi, ayaklı robotların yapısından dolayı çok yüksek derecede doğrusal olmayan kararsız dinamik özellikler göstermesi ile birlikte çok serbestlik dereceli kararsız bir sistemin



(a) ANYmal robotuna ait bacak hareket aralığı (Leg movement range of the ANYmal robot)



(b) ANYmal robotuna ait çeşitli yapılandırmalar (Various configurations of ANYmal robot.)

**Şekil 38.** Tamamen dönebilen bacak eklemleri sayesinde ANYmal robotunda elde edilen bacak hareket aralığı ve robota ait farklı bacak yapılandırmaları (Hutter ve ark.'nin [180] çalışmasından uyarlanmıştır.) (The leg movement range obtained from ANYmal robot by courtesy of the fully rotatable leg joints, and the different leg configurations of the robot (adapted from the work of Hutter et al. [180]))



gerçek zamanlı kontrolünün oldukça güç ve karmaşık olmasıdır. Buna ek olarak, mobil robotlarda enerji ihtiyacının sınırlı bir güç kaynağından karşılanması gerektiğinden çalışma sürelerinin kısıtlı olmasıdır. Bu bağlamda, ayaklı robotların yüksek hareketlilik kabiliyeti, kendini dengeleyebilme yeteneği ve enerji verimliliği gibi becerileri henüz yetersizdir ve bu yönlerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Ayaklı robotlar alanında 1990'lı yıllardan günümüze 200 adetten fazla robot geliştirilmiştir ve bu robotların yaklaşık %20'sini dört bacaklı robotlar oluşturmaktadır. Ancak, yazarların tüm bilgisi dahilinde, ayaklı robotlar ile ilgili yapılan geniş kapsamlı bir derleme çalışması yoktur. Bu bağlamda, bu çalışmada, ayaklı robotların – özellikle dört bacaklı robotların – gelişim süreci ve dört bacaklı robotlar alanındaki en son gelişmeler ele alınmıştır. Yürüyüş üzerine yapılan ilk çalışmalar dahil olmak üzere, yürüyen robotların gelişim sürecine etki eden önemli çalışmalar ve dört bacaklı robot literatüründeki son gelişmeler benimsenen yürüyüş stratejilerine göre sınıflandırılarak sunulmuştur. Bu çalışmanın, ayaklı robotlar alanında dört bacaklı yürüyüş konusunun daha iyi anlaşılmasını sağlayacağı ve aynı zamanda ayaklı robotlar ile ilgili gelecekteki çalışmalara bir başvuru kaynağı olacağı öngörülmektedir.

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Spong, M.W., Hutchinson, S., Vidyasagar, M., "**Robot Modeling and Control.**" Wiley, (2005).
- [2] Nof, S.Y. ed., "**Handbook of Industrial Robotics.**" Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., (1999).
- [3] Silva, M.F., Machado, J.T., "A literature review on the optimization of legged robots." *Journal of Vibration and Control*, 18 (12): 1753–1767, (2012).
- [4] Remy, C.D., "Optimal exploitation of natural dynamics in legged locomotion." *Ph.D Thesis*, ETH Zurich, (2011).
- [5] Hirai, K., Hirose, M., Haikawa, Y., Takenaka, T., "The Development of Honda Humanoid Robot." *International Conference on Robotics and Automation*. Leuven, Belgium: IEEE, 1321–1326, (1998).
- [6] Sakagami, Y. et al., "The intelligent ASIMO: system overview and integration." *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2478–2483, (2002).
- [7] Chestnutt, J. et al., "Footstep Planning for the Honda ASIMO Humanoid." *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 629–634, (2005).
- [8] Raibert, M.H., Blankespoor, K., Nelson, G., Playter, R., "BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot." *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2): 10822–10825, (2008).
- [9] de Santos, P.G., Garcia, E., Estremera, J., "**Quadrupedal Locomotion.**" London: Springer London, (2006).
- [10] Muybridge, E., "The attitudes of animals in motion." *Journal of the Franklin Institute*, 115(4): 260–274, (1883).
- [11] Muybridge, E., "**The human figure in motion.**" New York, USA: Dover Publications, (1887).
- [12] Muybridge, E., "**Animals in motion.**" New York, USA: Dover Publications, (1957).
- [13] Lucas, E., "Huitieme Recreation – La Machine a Marcher." *Recreations Mathematiques*, 4: 198–204, (1891).
- [14] Kaneko, M., Abe, M., Tanie, K., "A hexapod walking machine with decoupled freedoms." *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 1(4): 183–190, (1985).
- [15] Wettergreen, D., Thorpe, C., Whittaker, R., "Exploring Mount Erebus by walking robot." *Robotics and Autonomous Systems*, 11(3–4): 171–185, (1993).
- [16] Dederick, Z.P., Grass, I., Dredrick, Z.P., Grass, I., "Improvement in steam-carriage." Washington, DC, U.S. Patent and Trademark Office, US Patent US75874A, (1868).
- [17] Ehrlich, A., "Vehicle propelled by steppers." Washington, DC, U.S. Patent and Trademark Office, US Patent US1691233A, (1926).
- [18] Edward, S., Snell, E., "Reciprocating load carrier." Washington, DC, U.S. Patent and Trademark Office, US Patent US2430537A, (1944).
- [19] Urschel, W.E., "Walking tractor." Washington, DC, U.S. Patent and Trademark Office, US Patent US2491064A, (1945).
- [20] Rygg, L.A., "Mechanical Horse." Washington, DC, U.S. Patent and Trademark Office, US Patent US491927A, (1893).
- [21] Eckert, J.P., Mauchly, J.W., "Electronic numerical integrator and computer." Washington, DC, U.S. Patent and Trademark Office, US Patent US3120606A, (1947).
- [22] Shurkin, J.N., "**Engines of the mind: the evolution of the computer from mainframes to microprocessors.**" Norton, (1996).
- [23] Hutchinson, A.C., "Machines can walk." *The Chartered Mechanical Engineer*, 11(10): 480–484, (1967).
- [24] Todd, D.J., "**Walking Machines: An Introduction to Legged Robots.**" Boston, MA: Springer US, (1985).
- [25] Mann, M., "Tanks that Walk and Jump." *Popular Science*, 177(1): 51–54, (1960).
- [26] Bekker, M.G., "Land Locomotion on the Surface of Planets." *ARS Journal*, 32(11): 1651–1659, (1962).
- [27] Bekker, M.G., "Mechanics of Off-the-Road Locomotion." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Automobile Division*, 16(1): 25–44, (1962).
- [28] Bekker, M.G., "Mechanics of Locomotion and Lunar Surface Vehicle Concepts." *SAE Technical Paper Series*. 549–569, (1964).
- [29] Bekker, M.G., "Off-road locomotion on the moon and on earth." *Journal of Terramechanics*, 3(3): 83–91, (1966).
- [30] Liston, R.A., "**Requirements for Increased Ground Mobility.**" (1963).
- [31] Liston, R.A., "Walking machines." *Journal of Terramechanics*, 1 (3): 18–31, (1964).
- [32] Liston, R.A., "Correlation Between Predicted and Actual Off-Road Vehicle Performance." *SAE Technical Paper 670170*, (1967).
- [33] Liston, R.A., "Walking Machine Studies and Force-Feedback Controls." *Biomechanics*. Boston, MA: Springer US, 51–64, (1969).
- [34] Shigley, J.E., "*The mechanics of walking vehicles.*" Army Tank-Automotive Center, Warren, MI, USA, (1960).

- [35] Mosher, R.S., "Handyman to Hardiman." *SAE Transactions*, 76: 588–597, (1968).
- [36] Mosher, R., "Test and evaluation of a versatile walking truck." *Proceedings of Off-Road Mobility Research Symposium*. Washington DC, 359–379, (1968).
- [37] Mosher, R.S., "Exploring the Potential of a Quadruped." *SAE Technical Paper 690191*, (1969).
- [38] Liston, R.A., Mosher, R.S., "A versatile walking truck." *Proceedings of the Transportation Engineering Conference*. London: Institution of Civil Engineers, (1968).
- [39] Raibert, M.H., "Legged robots." *Communications of the ACM*, 29 (6): 499–514, (1986).
- [40] Morrison, R.A., "Iron Mule Train." *Proceedings of Off Road Mobility Research Symposium*. 381–400, (1968).
- [41] Todd, D.J., "An evaluation of mechanically co-ordinated legged locomotion (The Iron Mule Train revisited)." *Robotica*, 9 (04): 417, (1991).
- [42] Tomovic, R., Mcghee, R.B., "A finite state approach to the synthesis of bioengineering control systems." *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*, HFE-7 (2): 65–69, (1966).
- [43] Mcghee, R.B., "Finite state control of quadruped locomotion." *Simulation*, 9(3): 135–140, (1967).
- [44] Mcghee, R.B., "Some finite state aspects of legged locomotion." *Mathematical Biosciences*, 2(1–2): 67–84, (1968).
- [45] Mcghee, R.B., Frank, A.A., "On the stability properties of quadruped creeping gaits." *Mathematical Biosciences*, 3(1–2): 331–351, (1968).
- [46] Frank, A.A., Mcghee, R.B., "Some considerations relating to the design of autopilots for legged vehicles." *Journal of Terramechanics*, 6(1): 23–35, (1969).
- [47] Frank, A.A., "Automatic Control Systems for Legged Locomotion Machines." University of Southern California, (1968).
- [48] Bekey, G.A., "Autonomous Robots: From Biological Inspiration to Implementation and Control." MIT Press, (2005).
- [49] Mcghee, R.B., Jain, A.K., "Some properties of regularly realizable gait matrices." *Mathematical Biosciences*, 13(1–2): 179–193, (1972).
- [50] Mcghee, R.B., Pai, A.L., "An approach to computer control for legged vehicles." *Journal of Terramechanics*, 11(1): 9–27, (1974).
- [51] Gubina, F., Hemaml, H., Mcghee, R.B., "On the Dynamic Stability of Biped Locomotion." *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, BME-21 (2): 102–108, (1974).
- [52] Vukobratović, M., Juricic, D., "Contribution to the synthesis of biped gait." *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, BME-16(1): 1–6, (1969).
- [53] Vukobratović, M., Stepanenko, J., "Mathematical models of general anthropomorphic systems." *Mathematical Biosciences*, 17(3–4): 191–242, (1973).
- [54] Vukobratović, M., Stepanenko, J., "On the stability of anthropomorphic systems." *Mathematical Biosciences*, 15 (1–2): 1–37, (1972).
- [55] Vukobratović, M., "Locomotion Robots: Kinematics, Dynamics and Control Algorithms." *5th IFAC Symposium on Automatic Control in Space*. (1973).
- [56] Vukobratović, M., Borovac, B., Šurdilović, D., "Zero moment point - Proper interpretation and new applications." *Proceedings of the IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots*. 237–244, (2001).
- [57] Frank, A.A., Vukobratović, M., "On the synthesis of biped locomotion machines." *Proceedings of 8th International Conference on Medical and Biological Engineering, Evanston, IL*. 64, (1969).
- [58] Vukobratović, M., Frank, A.A., Juricic, D., "On the stability of biped locomotion." *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, BME-17(1): 25–36, (1970).
- [59] Vukobratović, M., Juricic, D., Frank, A.A., "On the control and stability of one class of biped locomotion systems." *Journal of Basic Engineering*, 92(2): 328–332, (1970).
- [60] Frank, A.A., Vukobratović, M., "On the gait stability of biped machines." *IEEE Transactions on Automatic Control*, 15 (6): 678–679, (1970).
- [61] McGhee, R.B., "Control of legged locomotion systems." *Proceedings of the 18th Automatic Control Conference, San Francisco, CA, USA*. 205–215, (1977).
- [62] Mcghee, R.B., Iswandhi, G.I., "Adaptive Locomotion of a Multilegged Robot over Rough Terrain." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9 (4): 176–182, (1979).
- [63] Mcghee, R.B., Koozekanani, S.H., Weimer, F.C., Rahmani, S., "Dynamic modelling of human locomotion." *Proceedings of the Joint Automatic Control Conference*, 16: 405–413, (1979).
- [64] Mcghee, R.B., "Mathematical models for dynamics and control of posture and gait." *Proceedings of the VII International Congress of Biomechanics, Warsaw, Poland*. 18–22, (1979).
- [65] Mcghee, R.B., Olson, K.W., Briggs, R.L., "Electronic coordination of joint motions for terrain - Adaptive robot vehicles." *SAE Technical Papers*, (1980).
- [66] Orin, D.E., Mcghee, R.B., "Dynamic computer simulation of robotic mechanisms." *Theory and Practice of Robots and Manipulators*, 286–296, (1981).
- [67] Holland, J.M., "Basic robotic concepts." Indianapolis: Howard W. Sams & Company, (1983).
- [68] Waldron, K.J., Vohnout, V.J., Pery, A., Mcghee, R.B., "Configuration design of the adaptive suspension vehicle." *The International Journal of Robotics Research*, 3 (2): 37–48, (1984).
- [69] Waldron, K.J., Mcghee, R.B., "The mechanics of mobile robots." *Robotics*, 2(2): 113–121, (1986).
- [70] Waldron, K.J., Mcghee, R.B., "The adaptive suspension vehicle." *IEEE Control Systems Magazine*, 6 (6): 7–12, (1986).
- [71] Song, S., Waldron, K.J., "Machines that walk: the adaptive suspension vehicle." MIT press, (1989).
- [72] Todd, D.J., "Current developments." *Walking Machines: An Introduction to Legged Robots*. Boston, MA: Springer US, 151–168, (1985).
- [73] Gurfinkel, V.S.S. et al., "Walking robot with supervisory control." *Mechanism and Machine Theory*, 16 (1): 31–36, (1981).
- [74] Devjanin, E.A. et al., "The six-legged walking robot capable of terrain adaptation." *Mechanism and Machine Theory*, 18 (4): 257–260, (1983).
- [75] Hirose, S., Umetani, Y., "Some considerations on a feasible walking mechanism as a terrain vehicle." *3rd CISM-IFTOMM International Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators*. 357–375, (1978).
- [76] Hirose, S., Umetani, Y., "A Cartesian coordinates manipulator with articulated structure." *Proceedings of 11th International Symposium Industrial Robots*. 603–609, (1981).
- [77] Hirose, S., Kato, K., "Study on quadruped walking robot

- in Tokyo Institute of Technology – past, present and future.” *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 414–419, (2000).
- [78] Hirose, S., Arikawa, K., “Coupled and decoupled actuation of robotic mechanisms.” *Advanced Robotics*, 15 (2): 125–138, (2001).
- [79] Hirose, S., “A study of design and control of a quadruped walking vehicle.” *The International Journal of Robotics Research*, 3 (2): 113–133, (1984).
- [80] de Santos, P.G., Garcia, E., Estremera, J., “Walking Robots.” *Quadrupedal Locomotion: An Introduction to the Control of Four-legged Robots*. London: Springer London, 3–32, (2006).
- [81] Hirose, S., “TITAN–III: A Quadruped Walking Vehicle - Its Structure and Basic Characteristics.” *Proceedings of the 2nd International Symposium on Robotics Research*. The MIT Press, 325–331, (1985).
- [82] Hirose, S., Yoneda, K., Arai, K., Ibe, T., “Design of prismatic quadruped walking vehicle TITAN–VI.” *Proceedings of Fifth International Conference on Advanced Robotics, “Robots in Unstructured Environments.”* 723–728, (1991).
- [83] Hirose, S., Kunieda, O., “Generalized Standard Foot Trajectory for a Quadruped Walking Vehicle.” *The International Journal of Robotics Research*, 10 (1): 3–12, (1991).
- [84] Hirose, S., Yoneda, K., Tsukagoshi, H., “TITAN–VII: quadruped walking and manipulating robot on a steep slope.” *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 494–500, (1997).
- [85] Hirose, S., Arikawa, K., “Development of Quadruped Walking Robot TITAN–VIII for Commercially Available Research Platform.” *Journal of the Robotics Society of Japan*, 17: 1191–1197, (1999).
- [86] Kato, K., Hirose, S., “Development of the quadruped walking robot, TITAN–IX.” *Proceedings of 26th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, 40–45, (2000).
- [87] Hodoshima, R. et al., “Development of TITAN–XI: a quadruped walking robot to work on slopes.” *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 792–797, (2004).
- [88] Hodoshima, R., Fukumura, Y., Amano, H., Hirose, S., “Development of track-changeable quadruped walking robot TITAN X-design of leg driving mechanism and basic experiment-.” *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 3340–3345, (2010).
- [89] Kitano, S., Hirose, S., Endo, G., Fukushima, E.F., “Development of lightweight sprawling-type quadruped robot TITAN–XIII and its dynamic walking.” *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 6025–6030, (2013).
- [90] Kitano, S., Hirose, S., Horigome, A., Endo, G., “TITAN–XIII: sprawling-type quadruped robot with ability of fast and energy-efficient walking.” *ROBOMECH Journal*, 3 (1): 8, (2016).
- [91] Christian, D.A., “*The Mt. Erebus Explorer Control System*.” Pittsburgh, PA, (1993).
- [92] Wettergreen, D., “Robotic Walking on Natural Terrain: Gait planning and behavior-based control for statically-stable walking robots.” Carnegie Mellon University, (1995).
- [93] Tedeschi, F., Carbone, G., “Design of Hexapod Walking Robots: Background and Challenges.” *Handbook of Research on Advancements in Robotics and Mechatronics*. Hershey, PA: IGI Global, 527–566, (2015).
- [94] Nonami, K., “Development of mine detection robot COMET–II and COMET–III.” *Proceedings of the 41st SICE Annual Conference*. 346–351, (2002).
- [95] Huang, Q., Nonami, K., “Humanitarian mine detecting six-legged walking robot and hybrid neuro walking control with position/force control.” *Mechatronics*, 13 (8): 773–790, (2003).
- [96] Nonami, K. et al., “Development and Control of Mine Detection Robot COMET–II and COMET–III.” *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, 46 (3): 881–890, (2003).
- [97] Irawan, A., Nonami, K., Daud, M.R., “Optimal Impedance Control with TSK-Type FLC for Hard Shaking Reduction on Hydraulically Driven Hexapod Robot.” *Autonomous Control Systems and Vehicles: Intelligent Unmanned Systems* (Editors, K. Nonami et al.). Tokyo: Springer Japan, 223–236, (2013).
- [98] Oku, M. et al., “Development of Hydraulically Actuated Hexapod Robot COMET–IV : The 1st Report : System Design and Configuration.” *The Proceedings of JSME annual Conference on Robotics and Mechatronics*, 2007: G01-1--3, (2007).
- [99] Nonami, K., Barai, R.K., Irawan, A., Daud, M.R., “*Hydraulically Actuated Hexapod Robots*.” Tokyo: Springer Japan, (2014).
- [100] James, I., “Claude Elwood Shannon 30 April 1916 – 24 February 2001.” *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*, 55: 257–265, (2009).
- [101] Higdon, D.T., Cannon, R.H., “On the control of unstable multiple-output mechanical systems.” *ASME Winter Annual Meeting*. (1963).
- [102] Schaffer, J., Cannon, R.H., “On the Control of Unstable Mechanical Systems.” *Automatic and Remote Control III: Proceedings of the Third Congress of the International Federation of Automatic Control*. (1966).
- [103] Hemami, H., Golliday, C.L., “The inverted pendulum and biped stability.” *Mathematical Biosciences*, 34(1–2): 95–110, (1977).
- [104] Poulakakis, I., Grizzle, J.W., “The spring loaded inverted pendulum as the hybrid zero dynamics of an asymmetric hopper.” *IEEE Transactions on Automatic Control*, 54(8): 1779–1793, (2009).
- [105] Piovani, G., Byl, K., “Enforced symmetry of the stance phase for the Spring-Loaded Inverted Pendulum.” *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 1908–1914, (2012).
- [106] Bae, H., Oh, J.-H., “Biped robot state estimation using compliant inverted pendulum model.” *Robotics and Autonomous Systems*, 108: 38–50, (2018).
- [107] Frank, A.A., “An approach to the dynamic analysis and synthesis of biped locomotion machines.” *Medical & Biological Engineering*, 8 (5): 465–476, (1970).
- [108] Takanishi, A., Ishida, M., Yamazaki, Y., Kato, I., “The Realization of Dynamic Walking by the Biped Walking Robot WL-10 RD.” *Journal of the Robotics Society of Japan*, 3(4): 325–336, (1985).
- [109] Yamaguchi, J., Takanishi, A., Kato, I., “Development of a biped walking robot compensating for three-axis moment by trunk motion.” *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1 (C): 561–566, (1993).
- [110] Yamaguchi, J., Kinoshita, N., Takanishi, A., Kato, I., “Development of a Dynamic Biped Walking System

- for Humanoid - Development of a Biped Walking Robot Adapting to the Humans' Living Floor." *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1 (April): 232–239, (1996).
- [111] Lim, H.O., Ishii, A., Takanishi, A., "Emotion-based biped walking." *Robotica*, 22 (5): 577–586, (2004).
- [112] Lim, H.O., Takanishi, A., "Compensatory motion control for a biped walking robot." *Robotica*, 23(1): 1–11, (2005).
- [113] Lim, H.O., Takanishi, A., "Biped walking robots created at Waseda University: WL and WABIAN family." *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365 (1850): 49–64, (2007).
- [114] Hashimoto, K. et al., "Biped walking stabilization based on gait analysis." *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 154–159, (2012).
- [115] Kryczka, P. et al., "Walking despite the passive compliance: Techniques for using conventional pattern generators to control intrinsically compliant humanoid robots." *Nature-Inspired Mobile Robotics*. World Scientific Publishing Co., 487–494, (2013).
- [116] Miura, H., Shimoyama, I., "Dynamic Walk of a Biped." *The International Journal of Robotics Research*, 3(2): 60–74, (1984).
- [117] Kimura, H., Shimoyama, I., Miura, H., "Dynamics in the dynamic walk of a quadruped robot." *Advanced Robotics*, 4(3): 283–301, (1989).
- [118] Bezerra, C.A.D., Zampieri, D.E., "Biped Robots: The State of Art." *International Symposium on History of Machines and Mechanisms*. Dordrecht: Springer Netherlands, 371–389, (2004).
- [119] Matsuoka, K., "A model of repetitive hopping movements in man." *Proceedings of 5th World Congress of Theory of Machines and Mechanisms*. 1168–1171, (1979).
- [120] Matsuoka, K., "A mechanical model of repetitive hopping movements." *Biomechanisms*, 5: 251–258, (1980).
- [121] Sayyad, A., Seth, B., Seshu, P., "Single-legged hopping robotics research – A review." *Robotica*, 25(5): 587–613, (2007).
- [122] Todd, D.J., "A brief history of walking machines." *Walking Machines: An Introduction to Legged Robots*. Boston, MA: Springer US, 11–33, (1985).
- [123] Semini, C., "HyQ - Design and Development of a Hydraulically Actuated Quadruped Robot." *Ph.D Thesis*, University of Genoa, (2010).
- [124] Popović, M.B., "Biomechanics and Robotics." New York: Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., (2013).
- [125] Nelson, G. et al., "PETMAN: A Humanoid Robot for Testing Chemical Protective Clothing." *Journal of the Robotics Society of Japan*, 30(4): 372–377, (2012).
- [126] Feng, S., Xinjilefu, X., Atkeson, C.G., Kim, J., "Optimization based controller design and implementation for the Atlas robot in the DARPA Robotics Challenge Finals." *IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*. 1028–1035, (2015).
- [127] Saranlı, U., Buehler, M., Koditschek, D.E., "RHex: A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot." *The International Journal of Robotics Research*, 20 (7): 616–631, (2001).
- [128] Raibert, M.H. et al., "Dynamically Stable Legged Locomotion Progress Report: October 1982–October 1983." (1983).
- [129] Raibert, M.H., Chepponis, M., Brown, H., "Running on four legs as though they were one." *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 2(2): 70–82, (1986).
- [130] Raibert, M.H. et al., "Dynamically Stable Legged Locomotion." (1989).
- [131] Raibert, M.H., Brown, H.B., "Experiments in Balance with a 2D One-Legged Hopping Machine." *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 106(1): 75–81, (1984).
- [132] Raibert, M.H., Brown, H.B., Chepponis, M., "Experiments in Balance with a 3D One-Legged Hopping Machine." *The International Journal of Robotics Research*, 3(2): 75–92, (1984).
- [133] Poulakakis, I., "Spring Loaded Inverted Pendulum embedding: Extensions toward the control of compliant running robots." *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 5219–5224, (2010).
- [134] Schwind, W.J., Koditschek, D.E., "Approximating the Stance Map of a 2-DOF Monoped Runner." *Journal of Nonlinear Science*, 10 (5): 533–568, (2000).
- [135] Hodgins, J.K.K., Raibert, M.H., "Adjusting step length for rough terrain locomotion." *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7(3): 289–298, (1991).
- [136] Sutherland, I.E., Ullner, M.K., "Footprints in the Asphalt." *The International Journal of Robotics Research*, 3(2): 29–36, (1984).
- [137] Buehler, M. et al., "SCOUT: a simple quadruped that walks, climbs, and runs." *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 1707–1712, (1998).
- [138] Buehler, M., Cocosco, A., Yamazaki, K., Battaglia, R., "Stable open loop walking in quadruped robots with stick legs." *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2348–2353, (1999).
- [139] Battaglia, R.F., "Design of the SCOUT II Quadruped with Preliminary Stair-Climbing." McGill University, (1999).
- [140] Poulakakis, I., Smith, J.A., Buehler, M., "Modeling and Experiments of Untethered Quadrupedal Running with a Bounding Gait: The Scout II Robot." *The International Journal of Robotics Research*, 24(4): 239–256, (2005).
- [141] Kimura, H., Fukuoka, Y., "Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot on Irregular Terrain by Using Neural System Model." *IFAC Proceedings Volumes*, 33(26): 585–590, (2000).
- [142] Kimura, H., Fukuoka, Y., Konaga, K., "Adaptive dynamic walking of a quadruped robot using a neural system model." *Advanced Robotics*, 15(8): 859–878, (2001).
- [143] Kimura, H., Fukuoka, Y., Katabuchi, H., "Mechanical Design of a Quadruped 'Tekken3&4'" and Navigation System Using Laser Range Sensor." *International Symposium on Robotics*. 10, (2005).
- [144] Kimura, H., Fukuoka, Y., Cohen, A.H., "Adaptive dynamic walking of a quadruped robot on natural ground based on biological concepts." *International Journal of Robotics Research*, 26(5): 475–490, (2007).
- [145] Fukuoka, Y., Katabuchi, H., and Hiroshi Kimura, "Dynamic Locomotion of Quadrupeds Tekken3&4 Using Simple Navigation." *Journal of Robotics and Mechatronics*, 22(1): 36–42, (2010).
- [146] Playter, R., Buehler, M., Raibert, M.H., "BigDog." *Proceedings of the Unmanned Systems Technology VIII, Defense and Security Symposium* (Editors, G. R. Gerhart et al.). 62302O, (2006).
- [147] Semini, C. et al., "HyQ - Hydraulically actuated quadruped robot: Hopping leg prototype." *2008 2nd IEEE RAS & EMBS International Conference on*

- Biomedical Robotics and Biomechanics*. Scottsdale, AZ, USA: IEEE, 593–599, (2008).
- [148] Semini, C., Tsagarakis, N.G., Guglielmino, E., Caldwell, D.G., “Design and experimental evaluation of the hydraulically actuated prototype leg of the HyQ robot.” *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 3640–3645, (2010).
- [149] Yang, Y. et al., “Leg mechanisms for hydraulically actuated robots.” *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. St. Louis, MO, USA: IEEE, 4669–4675, (2009).
- [150] Semini, C. et al., “Design of HyQ – a hydraulically and electrically actuated quadruped robot.” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 225(6): 831–849, (2011).
- [151] Semini, C. et al., “Is Active Impedance the Key to a Breakthrough for Legged Robots?” *Robotics Research*. Springer International Publishing, 3–19, (2016).
- [152] Focchi, M. et al., “Torque-control based compliant actuation of a quadruped robot.” *International Workshop on Advanced Motion Control*. Sarajevo, Bosnia-Herzegovina, 1–6, (2012).
- [153] Boaventura, T. et al., “On the role of load motion compensation in high-performance force control.” *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 4066–4071, (2012).
- [154] Havoutis, I. et al., “Onboard perception-based trotting and crawling with the Hydraulic Quadruped Robot (HyQ).” *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 6052–6057, (2013).
- [155] Ugurlu, B., Havoutis, I., Semini, C., Caldwell, D.G., “Dynamic trot-walking with the hydraulic quadruped robot – HyQ: Analytical trajectory generation and active compliance control.” *International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 6044–6051, (2013).
- [156] Semini, C. et al., “Towards versatile legged robots through active impedance control.” *The International Journal of Robotics Research*, 34(7): 1003–1020, (2015).
- [157] Winkler, A.W. et al., “Planning and execution of dynamic whole-body locomotion for a hydraulic quadruped on challenging terrain.” *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*. 5148–5154, (2015).
- [158] Boaventura, T., Buchli, J., Semini, C., Caldwell, D.G., “Model-Based Hydraulic Impedance Control for Dynamic Robots.” *IEEE Transactions on Robotics*, 31(6): 1324–1336, (2015).
- [159] Semini, C. et al., “Design of the Hydraulically Actuated, Torque-Controlled Quadruped Robot HyQ2Max.” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22(2): 635–646, (2017).
- [160] Barasuol, V. et al., “A reactive controller framework for quadrupedal locomotion on challenging terrain.” *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*. 2554–2561, (2013).
- [161] Havoutis, I., Semini, C., Buchli, J., Caldwell, D.G., “Quadrupedal trotting with active compliance.” *Proceedings of the International Conference on Mechatronics*. 610–616, (2013).
- [162] Bazeille, S. et al., “Quadruped robot trotting over irregular terrain assisted by stereo-vision.” *Intelligent Service Robotics*, 7(2): 67–77, (2014).
- [163] Winkler, A. et al., “Path planning with force-based foothold adaptation and virtual model control for torque controlled quadruped robots.” *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 6476–6482, (2014).
- [164] Bellicoso, C.D. et al., “Advances in real-world applications for legged robots.” *Journal of Field Robotics*, 35(8): 1311–1326, (2018).
- [165] Fisler, J., “Maximum high jump with a robotic leg.” *MSc Thesis*, ETH Zurich, (2008).
- [166] Hutter, M., Remy, C.D., Siegart, R., “Design of an Articulated Robotic Leg with Nonlinear Series Elastic Actuation.” *Mobile Robotics: Solutions and Challenges, Proceedings of the 12th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*. World Scientific, 645–652, (2009).
- [167] Hutter, M., Remy, C.D., Hoepflinger, M.A., Siegart, R., “ScarLETH: Design and control of a planar running robot.” *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. San Francisco, CA, USA: IEEE, 562–567, (2011).
- [168] Belo, F.A.W. et al., “The ESA Lunar Robotics Challenge: Simulating operations at the lunar south pole.” *Journal of Field Robotics*, 29(4): 601–626, (2012).
- [169] Hoepflinger, M.A., Remy, C.D., Hutter, M., Siegart, R., “The quadruped ALoF and a step towards real world haptic terrain classification.” *Proceedings of the 12th Mechatronics Forum Biennial International Conference*. Swiss Federal Institute of Technology ETH, Zurich Switzerland, 1–8, (2010).
- [170] Remy, C.D. et al., “Walking and crawling with ALoF: a robot for autonomous locomotion on four legs.” *Industrial Robot: An International Journal*, 38 (3): 264–268, (2011).
- [171] Hutter, M., “StarLETH & Co.–Design and Control of Legged Robots with Compliant Actuation.” *Ph.D Thesis*, ETH Zurich, (2013).
- [172] Remy, C.D. et al., “Quadrupedal Robots with Stiff and Compliant Actuation.” *at - Automatisierungstechnik Methoden und Anwendungen der Steuerungs-, Regelungs- und Informationstechnik*, 60 (11): 682–691, (2012).
- [173] Hutter, M., Remy, C.D., Hoepflinger, M.A., Siegart, R., “Efficient and versatile locomotion with highly compliant legs.” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18 (2): 449–458, (2013).
- [174] Gehring, C. et al., “Towards automatic discovery of agile gaits for quadrupedal robots.” *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*. 4243–4248, (2014).
- [175] Hutter, M. et al., “Toward Combining Speed, Efficiency, Versatility, and Robustness in an Autonomous Quadruped.” *IEEE Transactions on Robotics*, 30(6): 1427–1440, (2014).
- [176] Hutter, M. et al., “Quadrupedal locomotion using hierarchical operational space control.” *The International Journal of Robotics Research*, 33(8): 1047–1062, (2014).
- [177] Gehring, C. et al., “Dynamic trotting on slopes for quadrupedal robots.” *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 5129–5135, (2015).
- [178] Gehring, C. et al., “Practice Makes Perfect: An Optimization-Based Approach to Controlling Agile Motions for a Quadruped Robot.” *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 23(1): 34–43, (2016).



- [179] Hutter, M. et al., "ANYmal - a highly mobile and dynamic quadrupedal robot." **2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)**. Daejeon, South Korea: IEEE, 38–44, (2016).
- [180] Hutter, M. et al., "ANYmal - toward legged robots for harsh environments." **Advanced Robotics**, 31(17): 918–931, (2017).
- [181] Bellicoso, C.D., Jenelten, F., Gehring, C., Hutter, M., "Dynamic Locomotion Through Online Nonlinear Motion Optimization for Quadrupedal Robots." **IEEE Robotics and Automation Letters**, 3(3): 2261–2268, (2018).
- [182] Fankhauser, P., "Perceptive Locomotion for Legged Robots in Rough Terrain." **Ph.D Thesis**, ETH Zurich, (2018).
- [183] Winkler, A.W., "Optimization-based motion planning for legged robots." **Ph.D Thesis**, ETH Zurich, (2018).
- [184] Fankhauser, P., Hutter, M., "ANYmal: A Unique Quadruped Robot Conquering Harsh Environments." **Research Features**, 126: 54–57, (2018).
- [185] Bakırcıoğlu, V., Arif Şen, M., Kalyoncu, M., "Optimization of PID controller based on The Bees Algorithm for one leg of a quadruped robot." **MATEC Web of Conferences**, 42: 03004, (2016).
- [186] Şen, M.A., Kalyoncu, M., "Optimal Tuning of PID Controller Using Grey Wolf Optimizer Algorithm for Quadruped Robot." **Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering**, 6(1): 29–35, (2018).
- [187] Şen, M.A., Bakırcıoğlu, V., Kalyoncu, M., "Automatic LQR Controller Tuning Based on Grey Wolf Optimizer Algorithm for a Quadruped Robot." **2nd International Vocational Science Symposium**. (2018).
- [188] Bakırcıoğlu, V., Şen, M.A., Kalyoncu, M., "Motion Analysis of the Robotic Leg Mass Centre during Reference Trajectory Tracking." **2nd International Vocational Science Symposium**. (2018).
- [189] Bakırcıoğlu, V., Şen, M., A., Kalyoncu, M., "Obtaining Dynamic Characteristics of of Parker D1FP Proportional Valve." **International Conference on Engineering Technologies** (Editor, İ. Sarıtaş). Konya, Turkey, 662–668, (2017).
- [190] Bakırcıoğlu, V., Şen, M.A., Kalyoncu, M., "Adaptive Neural-Network Based Fuzzy Logic (ANFIS) Based Trajectory Controller Design for One Leg of a Quadruped Robot." **Proceedings of the 5th International Conference on Mechatronics and Control Engineering - ICMCE '16**. Venice, Italy: ACM Press, 82–85, (2016).
- [191] Şen, M.A., Bakırcıoğlu, V., Kalyoncu, M., "Inverse Kinematic Analysis of a Quadruped Robot." **International Journal of Scientific & Technology Research**, 6(9): 285–289, (2017).



# POLİTEKNİK DERGİSİ

## JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



## Aksiyomatik tasarım yöntemi ile yenilikçi ürün geliştirilmesi

### *Development of an innovative product using axiomatic design methodology*

Yazar(lar) (Author(s)): İbrahim ULUTÜRK<sup>1</sup>, Mustafa YURDAKUL<sup>2</sup>, Yusuf Tansel İÇ<sup>3</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-2363-544X

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-1562-5738

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0001-9274-7467

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Ulutürk, İ., Yurdakul, M. ve İç, Y.T., “Aksiyomatik tasarım yöntemi ile yenilikçi ürün geliştirilmesi”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 987-1002, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.591154

# Aksiyomatik Tasarım Yöntemi İle Yenilikçi Ürün Geliştirilmesi

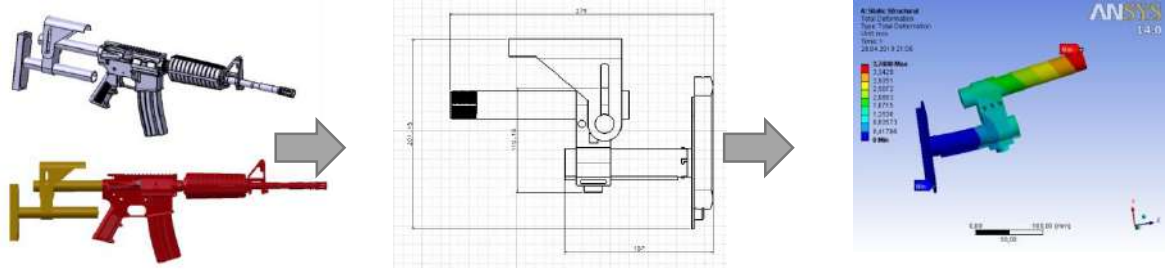
## Development of an Innovative Product Using Axiomatic Design Methodology

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Aksiyomatik tasarım yöntemi kullanılarak bir dipçik modeli geliştirilmiştir (An axiomatic design methodology is applied to design a rifle butt).
- ❖ Geliştirilen model yaygın tüfek modellerinde kullanılabilir şekilde boyutlandırılmıştır (The developed model is sized to fit into common rifle types).
- ❖ Tamamen yeni bir ürün tasarımı geliştirilmiştir (A completely new product design has been developed).

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Kullanıcının gereksinimlerine uygun tamamen yeni bir ürün tasarımının nasıl gerçekleştirileceği detayları ile beraber bu çalışmada sunulmuştur (This study presents in detail a new product design to develop a completely new product that satisfies customer requirements.)



Şekil. Yenilikçi dipçiğin AR15 tüfeğine montajlı haldeki görüntüsü /Figure. Innovative butt assembled to the AR15 rifle

### Amaç (Aim)

Bu çalışmada aksiyomatik tasarım yöntemi kullanılarak yenilikçi bir dipçik modeli geliştirilmiştir. / In this study, axiomatic design methodology is applied to design an innovative rifle butt.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Geliştirilen model yaygın tüfek modellerinde kullanılabilir şekilde boyutlandırılmış ve ANSYS Workbench programı uygulanmıştır. / The developed rifle butt model is sized to fit into common rifle types and ANSYS Workbench program is used for its structural analysis.

### Özgünlük (Originality)

Tasarım ve mühendislik çalışmaları içeren bir süreç ile herhangi bir mevcut modeli kopyalamadan orijinal ve kullanıcının gereksinimlerine uygun bir ürün tasarımının nasıl gerçekleştirileceği detayları ile beraber bu çalışmada sunulmuştur. / This study presents in detail a new product design and engineering process to develop a completely new product that satisfies customer requirements without copying any existing products designs.

### Bulgular (Findings)

Yaygın tüfek tiplerine uyacak şekilde uygun bir tüfek dipçik modeli elde edilmiştir. / A suitable rifle butt model is sized to fit into common rifle types is obtained

### Sonuç (Conclusion)

Bu çalışma kapsamında belirlenen müşteri ihtiyaçlarını karşılamak adına bir adet dipçik yapılanması (Yenilikçi Model) oluşturulmuştur. / Within the scope of this study, a butt structure (Innovative Model) was created in order to meet the specified customer needs.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Aksiyomatik Tasarım Yöntemi ile Yenilikçi Ürün Geliştirilmesi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**İbrahim ULUTÜRK<sup>1</sup>, Mustafa YURDAKUL<sup>2</sup>, Yusuf Tansel İÇ<sup>3\*</sup>**

<sup>1</sup> Türk Patent Enstitüsü Başkanlığı, Yenimahalle, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 06570 Maltepe Ankara, Türkiye

<sup>3</sup>Başkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06810, Etimesgut Ankara, Türkiye

(Geliş/Received : 12.07.2019 ; Kabul/Accepted : 24.09.2019)

## ÖZ

Bu çalışma kapsamında aksiyomatik tasarım yöntemi kullanılarak yöntemin bağımsızlık aksiyom kriterini sağlayan yenilikçi bir dipçik modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model yaygın tüfek modellerinde kullanılabilecek şekilde boyutlandırılmış ve ANSYS Workbench programı ile yapısal analizi gerçekleştirilmiştir. Böylelikle tasarım ve mühendislik çalışmaları içeren bir süreç ile herhangi bir mevcut modeli kopyalamadan orijinal ve kullanıcının gereksinimlerine uygun bir ürün tasarımının nasıl gerçekleştirileceği detayları ile beraber bu çalışmada sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Aksiyomatik tasarım yöntemi, tüfek, dipçik tasarımı, sonlu elemanlar yöntemi.

## Development of an Innovative Product Using Axiomatic Design Methodology

### ABSTRACT

In this study, axiomatic design methodology is applied to design an innovative rifle butt. The developed rifle butt model is sized to fit into common rifle types and ANSYS Workbench program is used for its structural analysis. So that, this study presents in detail a new product design and engineering process to develop a completely new product that satisfies customer requirements without copying any existing products designs.

**Keywords:** Axiomatic design approach, rifle, rifle butt design, finite element method.

### 1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde pazara sunulan ürünler için müşteri beklentileri çok yüksek seviyelerdedir ve çok zorlu bir rekabet ortamı bulunmaktadır. Özellikle 3. Sanayi devriminden sonra kullanımı yaygınlaşan “inovasyon” kavramı üreticiler tarafından çok sevilmiş ve tüm dünyada bir inovasyon yarışı başlamıştır. Bu rekabet ortamına ayak uydurabilmek adına ürün geliştirme süreçleri mümkün olduğunca kısa ve sağlıklı sonuçlar doğuracak şekilde tutulmaktadır. Bu da tasarım süreçlerinin deneysellikten ziyade bilimsel bir perspektifle ele alınmasını zorunlu kılmaktadır. Birçok araştırmacı tasarım süreçlerini bilimsel bir yöntem üzerine oturtan çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu çalışmaların en önemlilerinden bir tanesi Nam [1-3] tarafından geliştirilen “aksiyomatik tasarım” yöntemidir. Tasarımı yapılan sistemi oluşturan tasarım parametrelerinin, başlangıçtan itibaren ayrılması ve süreç içerisinde yapılacak değişikliklerin diğer fonksiyonları etkilememesi üzerine kurgulanan aksiyomatik tasarım yönteminin bir tüfek dipçığı tasarım sürecine uygulanabilir olup olmadığı bu çalışma kapsamında ele alınmıştır.

### 2. METODOLOJİ (METHODOLOGY)

#### 2.1.Aksiyomatik Tasarım (Axiomatic Design)

Aksiyomatik Tasarım iki temel aksiyoma dayanmaktadır. İlk aksiyom bağımsızlık aksiyomu olarak bilinir ve fonksiyonel ve fiziksel alandaki karar verme sürecinde oldukça önemlidir. İkinci aksiyom bilgi aksiyomu ise üretim alanında daha çok seçim amaçlı kullanılmaktadır [1-3]. Bağımsızlık aksiyomu, fonksiyonel alandaki fonksiyonel gerekliliklerden (Functional Requirement-FR) fiziksel alandaki tasarım parametrelerine (Design Parameter-DP) eşleme işlemi sırasında belirli bir değişikliğin yalnızca karşılık geldiği FR’yi etkilemesi gerektiğini belirtmektedir. Bilgi aksiyomu ise, bağımsızlık aksiyomunu sağlayan tüm uygulanabilir tasarımlar arasında en iyi alternatifini belirlemek için en az bilgi içeriğine sahip olan tasarımın seçilmesi gerektiğini belirtmektedir [4]. Alanlar arasındaki ilişki matematiksel olarak, tasarım hedeflerini ve tasarım çözümlerini tanımlayan karakteristik vektörler ile ifade edilmektedir. Tasarım hiyerarşisinin belli bir seviyesinde, spesifik tasarım hedeflerini tanımlayan işlevsel gereksinimlerin kümesi, fonksiyonel alanda bir {FRs} vektörü oluştururken benzer şekilde, tasarım parametreleri seti de başka bir vektör {DPs} oluşturmaktadır. Bu iki vektör arasındaki ilişki Eş. (1) gösterilmektedir.

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : yustanic@baskent.edu.tr

$$\{FRs\} = [A] \{DPs\} \quad (1)$$

Eş.(1)'de, [A] tasarımın özelliklerini belirleyen tasarım hiyerarşisinin herhangi bir seviyesindeki FR'ler ve DP'ler arasındaki ilişkileri gösteren tasarım matrisi olarak tanımlanmaktadır. Tasarım matrisi bağımsızlık aksiyomu kriterini sağlamak için köşegen veya üçgen matris olmalıdır. [A] tasarım matrisi, Eş.(4)'teki gibi köşegen matris olduğunda, FR'lerin her biri bağımsız olarak bir DP vasıtasıyla karşılanabilmektedir. Bu tarz tasarımlar, bağlantısız veya ayrık tasarım olarak ifade edilmektedir. [A] tasarım matrisi Eş. (3)'teki gibi üçgen matris olduğunda, FR'lerin bağımsızlığı ancak ve ancak DP'ler uygun bir sırayla değiştirilirse garanti edilebilir. Böyle bir tasarıma, ayrıştırılmış tasarım denir. [A] tasarım matrisi, ayrık ve ayrıştırılmış matrislerin dışında kalan ve DP'lerin birden fazla FR'ye etki ettiği anlamına gelen Eş.(2)'deki gibi bir matris olduğunda tasarım bağlı tasarım olarak ifade edilmektedir. Eş. (1-3)'de X, bir FR üzerindeki bir DP'nin güçlü bir etkisini temsil ederken sıfır ise FR ile ilişki olmadığını belirtmektedir.

$$\begin{Bmatrix} FR1 \\ FR2 \\ FR3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & X \\ X & X & X \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP1 \\ DP2 \\ DP3 \end{Bmatrix} \text{Bağlı Tasarım} \quad (2)$$

$$\begin{Bmatrix} FR1 \\ FR2 \\ FR3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP1 \\ DP2 \\ DP3 \end{Bmatrix} \text{Ayrıştırılmış Tasarım} \quad (3)$$

$$\begin{Bmatrix} FR1 \\ FR2 \\ FR3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP1 \\ DP2 \\ DP3 \end{Bmatrix} \text{Ayrık Tasarım} \quad (4)$$

Eş.(1) diferansiyel formda yazıldığında Eş.(5) elde edilmektedir.

$$A_{ij} = \frac{\partial DP_j}{\partial FR_i} \quad (5)$$

Eş. (5), 3 fonksiyonel gereksinim ve 3 tasarım parametresi olduğunda Eş.(6)'daki gibi elde edilmektedir [1-3].

$$\begin{aligned} FR1 &= A11 DP1 + A12 DP2 + A13 DP3 \\ FR2 &= A21 DP1 + A22 DP2 + A23 DP3 \\ FR3 &= A31 DP1 + A32 DP2 + A33 DP3 \end{aligned} \quad (6)$$

Aksiyomatik tasarım ilkelerinin ikinci aksiyomu olan bilgi aksiyomu, tasarımın bilgi içeriğini en aza indirmeyi hedeflemektedir. Diğer bir deyişle, bağımsızlık aksiyomunu karşılayan tüm önerilen çözümler arasında, en iyi tasarım, asgari bilgi içeriğine sahip tasarımdır. Bilgi aksiyomu, tasarımların en iyi tasarımını seçmek için kullanılan geleneksel bir yöntem sağlamaktadır. Seçim süreci, FR'nin gerçekleşmesi için en yüksek ihtimali veren tasarımın en iyi tasarım

olduğunu belirten kritere dayanmaktadır. Verilen bir FR için başarı olasılığı  $p$  ise, bilgi içeriği Eş.(7)'deki gibi hesaplanır [1-4]:

$$l_i = \log_2 \frac{1}{p_i} \quad (7)$$

Birden fazla FR varsa, bilgi içeriği Eş.(8)'deki gibi hesaplanır:

$$l_{sistem} = \sum_{i=1}^m \log_2 \frac{1}{p_i} \quad (8)$$

### 3. LİTERATÜR TARAMASI

#### (LITERATURE SURVEY)

Aksiyomatik tasarım yöntemi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Aksiyomatik tasarımın birçok farklı alana uygulanabilmesi yapılan çalışmalarda önemli derecede çeşitlilik ortaya çıkarmıştır. Son yıllarda farklı alanlarda uygulanmış olan aksiyomatik tasarım yöntemi, farklı alanlarda uygulama alanını genişleterek gelişimine devam etmektedir. Çalışmaların içerikli özellikle ürün tasarımıyla ilgili konuları kapsamaktadır [3].

Cochran ve Reynal [5], imalat sistemlerini tasarlamak için aksiyomatik tasarımı kullanmışlardır. İki farklı işlevsel gereksinim, farklı üretim sistemlerinin performans analizinde kullanılmıştır. Run-Jie ve arkadaşları [6] etkileşim tasarımı ve aksiyomatik tasarım teorisine dayalı bir ürün tasarımı üzerine çalışmışlardır. Bu çalışma kapsamında etkileşim tasarımı aksiyomatik tasarım ile birleştiren bir tasarım yöntemi sunulmuştur. Önerilen yöntem ilk önce, kullanıcı ihtiyaçlarını üç açıdan ele alarak etkileşim tasarımı kullanmaktadır: "insanlar", "ürünler" ve "çevre" ve ardından kavramsal tasarımı tamamlamak için aksiyomatik tasarım benimsemiştir. Metodoloji, çocuk bisikleti ile ilgili bir vaka incelemesi ile gösterilmiştir. Önerilen yöntemin kullanıcıların ürün deneyimini önemli ölçüde artırdığını ve özellikle kullanıcıların psikolojik ve ruhsal ihtiyaçları açısından daha kapsamlı kullanıcı gereksinimlerini karşıladığını göstermiştir. Suh ve arkadaşları [7], müşteri istekleri doğrultusunda ideal bir üretim sistemi tasarımı aksiyomatik tasarım yaklaşımı kullanarak geliştirmiştir. Bu çalışma kapsamında bir üretim işletmesinin istenen hedeflerine ulaşmak için, üretim sistemlerinin belirli bir fonksiyonel gereksinimleri (FR'ler) ve kısıtlamaları karşılayacak şekilde tasarlanmasına çalışılmıştır. Metodolojiyi göstermek için oldukça rekabetçi bir sektörde çok sayıda ürün karışımı üretmek zorunda olan varsayımsal bir üretim sistemi tasarlanmıştır. Varsayımsal olsa da, bu tasarım, dünya çapındaki yüksek üretim tesisleri kapasitesine sahip tüketici odaklı endüstrilerde rekabet eden birçok imalat firması için ideal ve pratik bir tasarım olabileceği gösterilmiştir. Ayrıca Suh [1], aksiyomlarla tasarımın amacı ve uygulamaları anlatılarak tasarımcıya bir değerlendirme aracı sunmuştur. Bu çalışma, tasarım araçları geliştirme ile ilgili öncü bir çalışma niteliindedir. Cochran ve arkadaşları [8], aksiyomlarla tasarım yöntemini kullanarak etkin bir üretim sistemi tasarlayıp üretim



sistemini küçük, esnek ve merkezi olmayan üretim birimlerine dönüştüren bir çalışma sunmuşlardır.

Demirtaş [9] aksiyomatik tasarım parametrelerinden bağımsızlık aksiyomunu kullanarak otomatik bir araç park sistemi geliştirmişlerdir. Bu çalışma ile tasarım mühendisliği alanında çalışan araştırmacılar için mevcut bir tasarımı analiz etmek ve yeni bir ürün geliştirmek için aksiyomatik tasarım uygulamaları için bir metodoloji ve örnek geliştirilmiştir. Aksiyomatik tasarım prensibini kullanımının, başlangıçta sistemden beklentileri belirlemek için oldukça önemli olduğu gösterilmiştir. Kabadurmuş ve Durmuşoğlu [10], aksiyomlarla tasarım ilkelerini kullanarak, bir kanban sistemi tasarlamışlardır. Tarcan [11], birçok alternatif arasından, uygun dizüstü bilgisayar seçimine yönelik olarak, aksiyomatik tasarım yöntemi uygulayarak bilgi aksiyomunu kullanmıştır. Yılmaz [12], aksiyomlarla tasarım prensipleriyle kent içi toplu taşıma sistemlerini tasarlamıştır. Özel ve Özyörük [13], aksiyomlarla tasarım prensipleri ile analitik hiyerarşi süreci (AHS) yöntemini bütünleştirerek beyaz eşya üreten bir firma için tedarikçi seçimi gerçekleştirmişlerdir.

Özel [14], çalışmasında aksiyomatik tasarımının bilgi aksiyomuna dayanarak karar verici açısından önemli kriterler temelinde tasarlanan hiyerarşik bir tedarikçi seçim modeli sunmuştur. Durmuşoğlu ve Danacı [15], aksiyomatik tasarım yöntemini kullanarak askeri bir lojistik ağını oluşturmayı başarmışlardır. Bu çalışmada müşteri ihtiyaçlarının işlevsel gereksinimlere, tasarım parametrelerine ve süreç değişkenlerine dönüşümünü sistematik olarak analiz eden matris yöntemlerini kullanarak bir sistem tasarım metodolojisi oluşturulmuş ve satın alma, stok yönetimi, nakliye ve dağıtım ve bakım fonksiyonları karşılanmıştır. Özbek [16] tarafından bir plastik enjeksiyon makinesi seçimi için aksiyomatik tasarım yaklaşımı uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada plastik enjeksiyon makinelerinin seçimini kolaylaştıracak ve daha önce makine ekipman seçiminde kullanılan bir yöntem olan bilgi aksiyomu kullanılarak plastik enjeksiyon makinesi seçimi yapılmıştır. Freyja ve arkadaşları [17], çok disiplinli bir projenin şekillendirilmesi ve yönlendirilmesi için aksiyomatik tasarım metodunu kullandılar. Söz konusu çalışma kapsamında fiziksel engelli bireylerin veya fiziksel olarak aynı ortamda bulunmayan bireylerin satranç oyununu karşılıklı oynayabilmeleri için bir satranç oyun robotu geliştirildi. Yapılan çalışma kapsamında aksiyomatik tasarım ilkeleri çoklu disiplin içeren bir proje kapsamında ilk olarak uygulanmış ve tasarımdaki zorlayıcı öğeler için rehberlik sağlamıştır.

Aksiyomatik tasarım çok farklı alanlarda kendine uygulama alanı bulmasına bir örnek de patent sistemi verilebilir. Teknik bir probleme çözüm getiren teknik çözümler buluş olarak tanımlanmaktadır. Buluşların korunması patent tescili ile mümkün olmaktadır. Patent başvuruları buluşun açıklandığı kısım olan tarifname, resimler, özet ve buluşun korunması talep edilen yeni ve teknik özelliklerinin belirtildiği istemler kısmından oluşmaktadır. İstemler kısmı koruma kapsamını

belirlediği için yazımı oldukça önemli ve hassas bir konudur. Petru Dusa ve arkadaşları [18] yaptıkları çalışmada bir patent ofisi tarafından tescil edilen bir patenti analiz ederek istemlerini aksiyomatik tasarım metodu prensiplerine göre revizyona tabi tutmuşlardır. Çalışmaya konu olan ürün bir esnek hortum sıkma makinesidir.

Abaş [19] yaptıkları çalışmada, sonlu elamanlar programı (ABAQUS) kullanarak silah ve içindeki mekanizmanın tasarımı ve modellenmesi gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma kapsamında, başlangıç ve sınır şartları uygulanarak hazırlanan tüfek modelinin atıştan gelen basınca ilişkin olarak analizi yapılmıştır. Analizde mekanizmaya fişğin patlaması ile oluşan basınçlı gazın bir piston mili vasıtasıyla etki ettirdiği kuvvetler, sürtünme kuvvetleri, silah tamponundan gelen sönümleyici kuvvet ve yerine getiren yay tarafından kuvvetler dikkate alınmıştır. Özyılmaz ve Çelik [20] yaptıkları çalışmada hafif silah tasarımına etki eden mühimmat tipinin seçimi, namlu tipi, mekanizmalar ve patlama anında gerçekleşen termodinamik etkileri inceleyerek, bu değişkenlerin etkinliği deneysel çalışmalar sonucu elde edilen veriler yardımıyla doğrulanmıştır. Zaloğlu [21] ise otomatik silahların icra yayının mekanik özelliklerini değerlendirmek için sonlu elemanlar analizi yöntemini kullanarak bir çalışma gerçekleştirmiştir.

Salonitis [22] aksiyomatik tasarım prensiplerini kullanarak eklemeli imalatla üretilen bir ürünün tasarımının geliştirilmesine yönelik bir çalışma sunmuştur. Schuh ve arkadaşları [23] ise tam entegre mekatronik ürünlerin modüler ürün platformlarının tasarımına yönelik olarak aksiyomatik tasarımın kullanıldığı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada örnek olarak elektromekanik kumanda sistemleri üzerine bir uygulama sunulmuştur. Shangguan ve arkadaşları [24] büyük tekerlekli traktörlerin dişli kutusu tasarımına yönelik olarak aksiyomatik tasarım prensiplerinin kullanıldığı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Porpiglio ve arkadaşları [25] ise ekstrüzyonlu modüler 3D yazıcıların tasarımlarının iyileştirilmesi için aksiyomatik tasarım yönteminden faydalanmışlardır. Çalışmada, aksiyomatik tasarım fonksiyonel ve teknik kriterler arasındaki ilişkilerin belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır.

#### 4. AKSİYOMATİK TASARIM YÖNTEMİNİN UYGULANMASI (APPLICATION OF THE AXIOMATIC DESIGN METHODOLOGY)

Bugüne kadar kullanıcı beklentilerine göre birçok silah sistemi geliştirilmiştir. Birçok farklı sistemde ilk seviyelerde benzer fonksiyonel gereksinimler olabilir. Silah sistemlerinde kullanılan dipçikler de kullanıcı ihtiyaçlarına göre ilk seviyelerde benzer fonksiyonel gereksinimler içerebilirken, ihtiyaç detaylandırıldıkça fonksiyonel gereksinimler de detaylandırılmaktadır. Bu durum tasarımdaki esnekliği alt seviyelere gittikçe azaltmaktadır. Bu nedenle sistem başlangıçta iyi

kurgulanmalıdır. Sivil veya askeri amaçlı kullanıcıların beklentileri öncelikle mermiyi hedefe göndermektir. Bu durumda en üst seviye müşteri ihtiyacı;

*Cr0:* Merminin hedefe gönderilmesi, olarak belirlenmektedir.

Söz konusu müşteri ihtiyacını karşılayacak fonksiyonel gereksinim;

*FR0:* Merminin harekete geçirilmesidir.

En üst seviye fonksiyonel gereksinimi karşılayacak bir tasarım parametresi gerekmektedir. Bu tasarım parametresinin oluşturulmasında önemli derecede esneklik bulunmaktadır. Örneğin mermiyi motor takılması, bir araç üzerinde hedefe ulaştırılması vb. Burada belirlenecek olan tasarım parametresi sistemin gideceği nihai hali belirleme hususunda oldukça önemlidir. DP0 aşağıdaki şekilde belirlenmiştir.

*DP0:* Silah sistemi

Belirlenen en üst seviye tasarım parametresi sonrasında daha detaylı müşteri ihtiyaçları ve bu ihtiyaçlardan türetilen fonksiyonel gereksinimler gelmektedir.

*Cr1:* Taşınabilir ve mevcut mühimmatlarla kullanımı yaygın olması

*FR1:* Yaygın mühimmat kullanan ve taşınabilen silah sisteminin sağlanması

*DP1:* Barut gazı ile çalışan bir tüfek

Barut gazı ile çalışan bir silah sisteminden kullanıcı beklentisi hedefi tutturmadaki kararlılıktır. Silahtaki kararlılığın artırılması için silahın bir noktadan desteklenerek sabitlenmesi gerekmektedir. Müşteri ihtiyacı;

*Cr2:* Atıştaki kararlılığın sağlanması olarak belirlenmektedir.

Söz konusu müşteri ihtiyacını karşılayacak ilk seviye fonksiyonel gereksinim;

*FR2:* Tüfeğin bir noktadan desteklenmesidir.

Belirlenen fonksiyonel gereksinim iki farklı tasarım alternatifi ile karşılanabilmektedir. Bunlar;

*1 numaralı alternatif DP2:*

Tüfeğin bir dipçik sistemi içermesi sayesinde omuzdan desteklenmesini sağlayan sistem

*2 numaralı alternatif DP2:*

Tüfeğin bir ayak veya platform üzerine konumlandırılması ile yerden destek alınmasını sağlayan sistem.

Bu çalışma kapsamında taşınabilirlik hususunda daha faydalı olacağı değerlendirildiğinden dolayı tüfeğin omuzdan destek alınarak bir noktaya sabitlenmesini sağlayan dipçik sistemi üzerinde durulacak ve yenilikçi dipçik tasarımı gerçekleştirilecektir.

#### 4.1. Müşteri İhtiyaçlarının Belirlenmesi

(Determination of Customer Requirements)

Bir tüfek kullanıcısının ideal bir dipçikten beklentileri aşağıda yer almaktadır;

*Cr2.1:* Her şeyden önce dipçik sağlam olmalıdır. Dışarıdan gelen darbelere, silah geri tepme şokuna, yere düşmelere ve dipçikleme darbelerine karşı dayanıklı olmalıdır.

*Cr2.2:* Dipçik hafif olmalıdır. Temas yeri ergonomik olmalıdır. Farklı silahlara takıldığında silahın toplam ağırlığında fazla artış sağlamamalıdır.

*Cr2.3:* Dipçik boyu ayarlanabilir olmalıdır. Kaynak yerinin atıcı kol-omuz boyuna uygun olarak ayarlanabilmesi ve en kısa ve en uzun atıcıların bile kendisine göre rahatlıkla kaynak yeri mesafesi ayarı yapabilmesine izin vermelidir.

*Cr2.4:* Dipçik silahın her ortamda taşınmasını kolaylaştırmalıdır. Taşımalarında, dar alanlarda hareket ve hava indirme /havadan atma hareketinde uçak ve helikopterlerde rahatça hareket etmeye uygun olmalıdır. Silah çalışma prensibi göz önünde bulundurularak katlanabilir olmalıdır.

*Cr2.5:* Dipçikte kaynak yeri yükseklik ayarı olmalıdır. Atış esnasında atıcının kaynak yerinin gez-göz hizalanması ve rahat kaynak yapması için kaynak mesafesi ayarının yanında, kaynak yükseklik ayarı ile atıcı yüz/kafa yapılarına göre ergonomi sağlanmalıdır.

*Cr2.6:* Dipçik tabanı tamponuna sahip olmalıdır. Dipçikte, atıcının omuzuna tam oturacak ve boşluk bırakmayacak şekilde, atıcıya özel kalıpların kullanılabilmesi tamponlar bulunmalıdır.

*Cr2.7:* Dipçik silahın geri tepme şokunu iyi sönmülemelidir. Böylelikle, atışın sıhhati artacağı gibi, aynı zamanda atıcının ürkmeye engellenecek ve ikinci atışta hedefe nişan alma süresi kısaltılabilecektir.

*Cr2.8:* Dipçik yapısı içerisinde boş kalan bölgeler iyi değerlendirilmeli, bakım kiti vb. gerekli malzemeler dipçik içerisinde taşınabilmelidir.

*Cr2.9:* Dipçik üzerinde silahın taşınması için gerektiğinde askı kayışının irtibatlandırılabilmesi halka veya pimler olmalıdır.

*Cr2.10:* Dipçik ergonomisi silahla uyumlu olmalı, kolaylıkla sökülüp takılmalıdır.

#### 4.2. Modelin Bağımsızlık Aksiyomu Açısından Analizi (Axiomatic Independence Analysis of the Model)

Aksiyomatik Tasarım Yöntemi için bağımsızlık analizi hiyerarşik yapı esas alınarak yapılmaktadır. Yani ilk seviyelerde bağımsızlık aksiyomu sağlandığında alt seviye kırılımlar da bu durum korunmalıdır. Müşteri ihtiyaçları için ilk seviye "0" rakamı ile kodlanmıştır ve ilk seviyede tek fonksiyonel gereksinim ve tek tasarım parametresi bulunmaktadır. İkinci seviye ise "1" rakamı ile kodlanmıştır. 2. Seviyede 2 adet fonksiyonel gereksinim ve bunları karşılayan 2 adet tasarım parametresi bulunmaktadır.

*FR1:* Yaygın mühimmat kullanan ve taşınabilen silah sisteminin sağlanması

*DP1:* Barut gazı ile çalışan bir tüfek

*Cr2:* Atıştaki kararlılığın sağlanması olarak belirlenmektedir.

**FR2:** *Tüfeğin bir noktadan desteklenmesidir.*

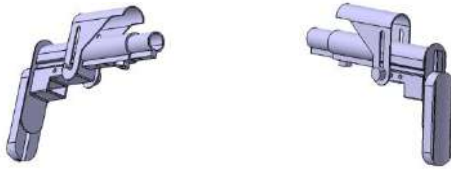
2. seviyede gerçekleştirilen bağımsızlık analizi için tasarım matrisi Eş.(9)'deki gibi oluşmaktadır.

$$\begin{Bmatrix} FR1 \\ FR2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP1 \\ DP2 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

Bu durumda tasarım matrisi ayrık tasarım ve bağımsızlık aksiyomunu sağlamaktadır. Yani bir başka deyişle DP1 tasarım parametresi, FR2 fonksiyonel gereksinimini etkilemezken DP2 fonksiyonel gereksinimi da FR1 fonksiyonel gereksinimini etkilememektedir. 2. seviye analizde gerçekleşen bağımsızlık kriterinin alt seviyelerde de gerçekleşmesi gerekmektedir. 3. Seviye de 10 adet Fonksiyonel gereksinim tanımlanmıştır.

#### 4.3. Geliştirilen Yenilikçi Model için yapılan analiz (Analysis of the Developed Innovative Model)

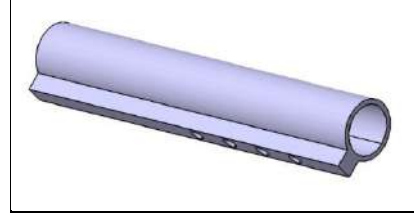
Oluşturulan modelin katı modeli Şekil 1'de yer almaktadır. Literatürde bugüne kadar yapılan dipçikler genellikle üçgen yapı ile oluşturulmuştur. Bu yapının atış kuvvetlerine karşı mekanik dayanım açısından avantajlı olduğu yapılan birçok analiz ile de ortaya çıkarılmıştır. Yine dipçikte ağırlığın azaltılması için çerçeve tip boşluklu yapılanma birçok uygulamada tercih edilmektedir.



**Şekil 1.** Yenilikçi Model'in montajlı görünümü (Assembled view of the innovative model)

Yenilikçi Model için kurulan yapılanmada iç içe geçen teleskobik boru kullanılmıştır. Şekil 2'de yer alan dış boru aynı zamanda dipçik gövdesini oluşturmaktadır. İç boru içerisinde ise geri tepme sönümleme ve irca yayı bulunmaktadır. Bu nedenle iç boru geri tepme kılavuz

borusu olarak adlandırılmıştır. Dipçik uzatılmak istendiğinde geri tepme kılavuz borusu sabit kalırken dipçik gövdesi yatay yönde hareket edebilmekte ve istenildiği pozisyonda vida-pim sistemi ile sabitlenmektedir.



**Şekil 2.** İç boru - Geri tepme kılavuz borusu (Inner pipe - Recoil guide pipe)

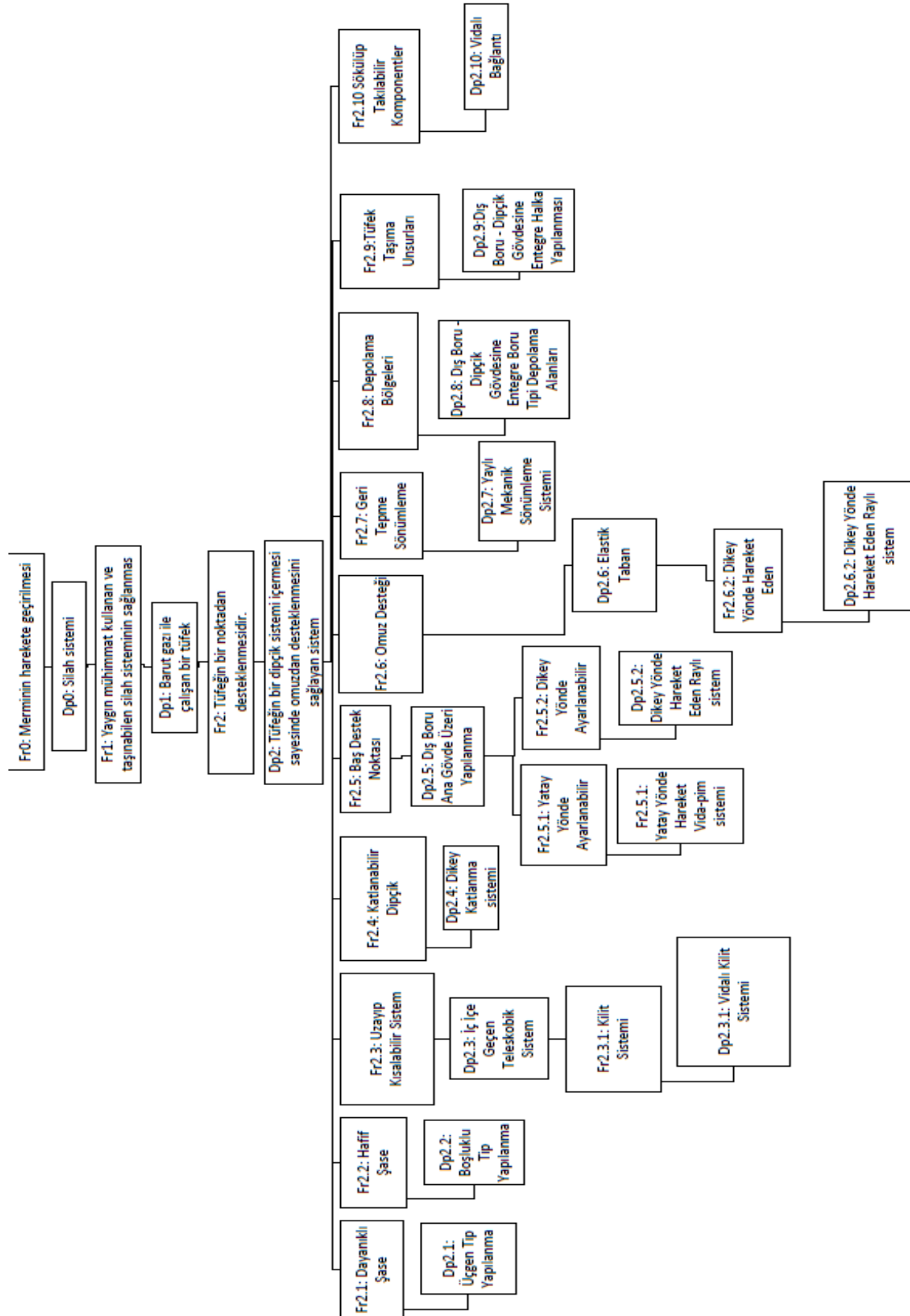
Baş destek noktası ise yatay ve dikey yönde harekete imkân tanıyan şekilde gövde üzerinde vida somun çifti ile konumlandırılmıştır. Vida somun çifti gevşetildiğinde baş destek noktası dikey yönde hareket edebilmektedir. Yine aynı şekilde yatay yönde bulunan 3 farklı pozisyon noktasına arasında hareket ettirilebilmektedir (Şekil 3). Yenilikçi Model'de dipçik gövdesinin arka yüzeyinde ise raylı mekanizma ile dikey yönde hareket edebilen omuz desteği yer almaktadır. Ayrıca bakım için gerekli olabilecek aparatların konumlanabilmesi için en alt kısımda bir boşluk oluşturulmuştur. Söz konusu boşluğun açık olan kısmı raylı kapı ile kapatılmaktadır. Yenilikçi Model için 3. Seviyede gerçekleştirilen fonksiyonel gereksinimler ve tasarım parametreleri Çizelge 1'de yer almaktadır.



**Şekil 3.** Dipçik gövdesi ve baş destek noktası – yanaklık (Butt body and head support – sidewall)

**Çizelge 1.** Yenilikçi model için 3. seviye fonksiyonel gereksinimler ve tasarım parametreleri (Functional requirements for Level 3 and design parameters for the innovative model)

Kodu	Fonksiyonel Gereksinimler	Tasarım Parametreleri
2.1	Dayanıklı şase	Üçgen tip yapılanma
2.2	Hafif şase	Boşluklu tip yapılanma
2.3	Uzayıp kısalabilir sistem	İç içe geçen teleskobik sistem
2.4	Katlanabilir yapı	Dikey katlanma sistemi
2.5	Ayarlanabilir baş destek noktası	Dış boru dipçik gövde üzeri yapılanma
2.6	Ayarlanabilir omuz desteği	Elastik taban
2.7	Geri tepme sönümleme	Yaylı mekanik sönümleme sistemi
2.8	Depolama bölgeleri	Dış boru - Dipçik gövdesine entegre depolama alanı
2.9	Tüfek taşıma unsurları	Dış boru - Dipçik gövdesine entegre halka yapılanması
2.10	Sökülüp takılabilir bileşenler	Vidalı bağlantı



Şekil 4. Yenilikçi Model yapılanmasının fonksiyonel gereksinim - tasarım parametresi ağacı (Functional requirement of innovative model configuration - design parameter tree)

				DP0	DP1	DP2	DP2.1	DP2.2	DP2.3	DP2.3.1	DP2.4	DP2.5	DP2.5.1	DP2.5.2	DP2.6	DP2.6.1	DP2.7	DP2.8	DP2.9	DP2.10	
FR0				X																	
	FR1				X																
		FR2				X															
			FR2.1				X														
			FR2.2					X													
			FR2.3						X												
			FR2.3.1							X											
			FR2.4								X										
			FR2.5						X			X									
			FR2.5.1						X				X								
			FR2.5.2											X							
			FR2.6												X						
			FR2.6.1													X					
			FR2.7								X						X				
			FR2.8															X			
			FR2.9					X		X									X		
			FR2.10																		X

Şekil 5. Yenilikçi Model yapılanmasına ait toplam tasarım matrisi (Total design matrix for innovative model construction)

Çizelge 2. Model yapılanmasında tespit edilen sorunlar ve çözüm önerileri (Problems identified for model structure and their solutions)

Tasarım Parametresi	Problem	Çözüm Önerisi
DP2.3: İç içe geçen teleskobik sistem	FR2.5.1 Yatay yönde ayarlanabilir baş destek noktası fonksiyonel gereksinimini etkilemesi	Baş destek noktasının konumlandırıldığı bölgenin hareketsiz bir yapıya sahip olması
	FR2.9 Tüfek taşıma unsurları fonksiyonel gereksinimini etkilemesi	Kayış halkasının sabit bir noktada konumlandırılması
	FR2.7 Geri tepme sönümleme fonksiyonel gereksinimini etkilemesi.	Geri tepme sönümleme ve irca yayının bulunduğu iç borunun katlanma sistemi dışına çıkarılması
DP2.4 Dikey katlanma sistemi	FR2.9 Tüfek taşıma unsurları fonksiyonel gereksinimini etkilemesi	Kayış halkasının sabit bir noktada konumlandırılması

Yapılan analiz sonucu oluşan tasarım matrisi ise Eş. (10)'daki gibi gerçekleşmiştir. Matris incelendiğinde tasarımın bağımsızlık aksiyomu kriterini 3. seviyede karşılamadığı görülebilmektedir. Yenilikçi Model yapılanmasında bazı fonksiyonel gereksinimler için alt kısımlar bulunmaktadır. Bu kısımlar ve gerçekleştirilen tasarım parametreleri aşağıda gösterilmektedir:

- FR2.5.1: Yatay yönde ayarlanabilir baş destek noktası

- DP2.5.1: Yatay yönde hareket eden vidalı sistem
- FR2.5.2: Dikey yönde ayarlanabilir baş destek noktası
- DP2.5.2: Dikey yönde hareket eden raylı sistem
- FR2.6.2: Dikey yönde hareket eden omuz desteği
- DP2.6.2: Dikey yönde hareket eden raylı omuz desteği



$$\begin{pmatrix} \text{FR2.1} \\ \text{FR2.2} \\ \text{FR2.3} \\ \text{FR2.4} \\ \text{FR2.5} \\ \text{FR2.6} \\ \text{FR2.7} \\ \text{FR2.8} \\ \text{FR2.9} \\ \text{FR2.10} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{DP2.1} \\ \text{DP2.2} \\ \text{DP2.3} \\ \text{DP2.4} \\ \text{DP2.5} \\ \text{DP2.6} \\ \text{DP2.7} \\ \text{DP2.8} \\ \text{DP2.9} \\ \text{DP2.10} \end{pmatrix} \quad (10)$$

Model ile ilgili olarak tasarım ağacı ve toplam tasarım matrisi Şekil 4 ve Şekil 5’de yer almaktadır. Model yapılanması aksiyomatik tasarım yönteminin ilk prensibi olan bağımsızlık aksiyomu açısından ele alındığında Şekil 5’te yer alan toplam tasarım matrisi elde edilmiştir.

Model yapılanmasının tasarım parametrelerinin birden fazla fonksiyonel gereksinimi etkilediği tasarım matrisinden görülebilmektedir. Ortaya çıkan bu durum tasarımı olumsuz yönde etkilemektedir. Şekil 5 ve Çizelge 2 analiz edildiğinde “FR2.3: Uzayıp kısılabılır sistem” fonksiyonel gereksinimi için oluşturulan “DP2.3: İç içe geçen teleskobik sistem” tasarım parametresinin aynı zamanda “FR2.5.1: Yatay yönde ayarlanabilir baş destek noktası” ve “FR2.9: Tüfek taşıma unsurları” fonksiyonel gereksinimlerini etkilediği görülebilmektedir. Bir başka fonksiyonel gereksinim “FR2.4: Katlanabilir dipçik” için oluşturulan “DP2.4 Dikey katlanma sistemi” tasarım parametresi ise FR2.7: Geri tepme sönümleme fonksiyonel gereksinimini etkilemektedir. Bununla birlikte dipçik katlandığında dipçik üzerinde yer alan kayış halkasının konumu değişeceği için FR2.9: Tüfek taşıma unsurları” fonksiyonel gereksinimini de etkilemektedir. Sonuç olarak 1 numaralı yapılanma bağımsızlık aksiyomu kriterini karşılamamaktadır.

### 4.3.Yenilikçi Model İçin Düzeltmesi Gereken Tasarım Parametreleri (Design Parameters for the Innovative Model that needs to be Corrected)

Tasarım matrisinin analizi sonrasında model yapılanmanın ayrı tasarım olmadığı anlaşılmıştır. Bu durum yani tasarım parametrelerinin birden fazla fonksiyonu etkileme durumu istenmeyen bir durumdur. Zira tasarım süreçleri uzun süreli ve canlı olmaları nedeniyle yapılan tasarımda zaman zaman değişiklikler yapılabilmektedir. Böyle bir değişikliğin yapılması gündeme geldiğinde sadece ilgili fonksiyonel gereksinimi etkileyen tasarım parametresinin değiştirilmesi sistemin diğer kısımlarının bozulmaması açısından oldukça önemlidir.

Yenilikçi Model yapılanmasında baş destek noktası aynı zamanda iç içe geçen teleskobik yapılanmanın dış borusunu da teşkil eden dipçik gövdesi üzerine konumlandırılmıştır. Bu noktada dış borunun iç boru üzerinde geriye doğru kayması ile dipçik boyu uzayıp kısalmaktadır. Ancak dış borunun konumu değiştiğinde baş destek noktasının da konumu değişmektedir. İstisnai durumlar olsa da bu durum istenmeyen bir durumdur. Bu noktada yapılması gereken en uygun yapılanma, baş destek noktasının konumlandırıldığı bölgenin hareketsiz bir yapıya sahip olması şeklinde değerlendirilmektedir.

Benzer şekilde Yenilikçi Model yapılanmasında askı kayışı halkası da dipçik gövdesinde yer almaktadır. Bu durumda dipçik gövdesi yatay yönde hareket ettiğinde askı kayışının boyu da değişmektedir. Yine dipçik katlandığında halkanın konumu değişeceğinden askı kayışının boyu etkilenmektedir. Bu problemin çözümü için en uygun yapılanmanın kayış halkasının sabit bir noktada konumlandırılması olarak değerlendirilmektedir. Yenilikçi Model yapılanmasında birden fazla fonksiyonel gereksinimi etkileyen bir diğer tasarım parametresi ise dipçığın dikey yönde katlanabilir yapıya sahip olmasıdır. Dipçik iç borusu içerisinde irca yayı ve sönümleme sistemi bulunmaktadır. Patlama esnasında oluşan basınç bu sönümleme sistemi ile sönümlenmekte ve tüfek tekrar kurulmaktadır. Ancak dipçik katlandığında sönümleme sistemi ile mekanizma arasındaki bağlantı devreden çıkarılmaktadır. Tüfek dipçığının muharebe veya kullanım ortamı tipine göre dipçığının katlanması taşıma ve kullanım kolaylığı sağlamaktadır. Ancak geri tepme sönümleme ve irca sistemi devreden çıkarıldığında tüfeğin kullanımı mümkün olmamaktadır. Bu noktada yapılması gereken düzeltme geri tepme sönümleme ve irca sistemini dipçik yapılanmasından çıkarıp tüfek gövdesi içerisine veya namlu üzerine taşınması olabilir.

Ancak bu durum beraberinde birçok değişikliği getireceği için istenen bir durum değildir. Sönümleme sisteminin dipçik yapılanması içerisinde olması da müşteri ihtiyacında belirtilmiştir. Bu nedenle geri tepme sönümleme ve irca yayının bulunduğu iç borunun katlanma sistemi dışına çıkarılması daha kabul edilebilir bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

### 4.4. Yenilikçi Modelin Geliştirilmesi (Development of the Innovative Model)

Fonksiyonel gereksinimleri karşılayacak tasarım parametrelerinin bazılarının birden fazla fonksiyonel gereksinimi etkilediği ve dolayısıyla bağımsızlık aksiyomu kriterinin sağlanamadığı tespit edilmiştir. Bu nedenle bir adet yenilikçi model geliştirilmiştir (Şekil 6). Söz konusu modelde geri tepme sisteminin yer aldığı kılavuz borusu ile dipçigi uzatmak için kullanılan dipçik uzatma borusunun konumlandırıldığı sabit bir ara parça kullanılmıştır. Bu sayede dipçigi oluşturan ana unsurlar olan geri tepme yayı kılavuz borusu ile dipçik uzatma borusu fonksiyonel olarak birbirinden ayrılmıştır. Dipçik üzerindeki bir diğer hareketli parça olan baş destek noktası (yanaklık) da sabit ara parça üzerinde

konumlandırılmıştır. Tasarlanan ara parça esnetilebilir bağlantı (İngilizce: snap-fit) yöntemi ile birbirine entegre olabilen iki parça kullanılarak oluşturulmuştur. Yanaklığın yatay konumda hareketli olabilmesi için ara parça üzerinde 3 farklı pozisyonlama deliği oluşturulmuştur. Hareketli olan bu unsurların fonksiyonel olarak birbirlerinden ayrılmaları aksiyomatik tasarım yönteminin bağımsızlık aksiyomu şartını sağlamak adına oldukça önemlidir. Dipçik katlanma hareketi ise ara parçayı oluşturan parçalardan alt kısmı oluşturan parçanın, üst kısmı oluşturan parçadan ayrılması ve kendi eksenini etrafından 180° döndürülüp tekrar takılması ile sağlanmaktadır. İki parça arasındaki esnetilebilir bağlantı (İngilizce: snap-fit) kolay sökülüp takılmaya imkân tanımaktadır. Şekil 7’de ara parça görülebilmektedir. Bununla birlikte dipçiğin katlanması esnasında taban kısmının geri tepme kılavuzuna çarpmasını önlemek adına bayonet bağlantı kullanılarak kendi eksenini etrafında 90° dönmesi sağlanmıştır. Şekil 8’de dipçik tabanı ile uzatma borusunun montajlanmış hali gösterilmektedir.

Uzatma borusunun ara parça ile entegrasyonu vida-pim sistemi ile gerçekleşmektedir. Bu anlamda kılavuz kanalları ara parça üzerinde oluşturulurken bu kanallar içinde hareket edecek çıkıntılar, uzatma borusu üzerinde konumlandırılmıştır. Bu durum uzatma işlemi esnasında pim yuvalarının kolaylıkla tespit edilmesini sağlamaktadır. Yenilikçi modelde uzatma sistemi sabit parça içerisinde hareket edebilen dipçik uzatma borusu üzerinde 5 farklı pozisyon için 10 mm aralıklarla vida-pim delikleri oluşturulmuştur. Bu sayede dipçik 5 kademe uzatılıp kısaltılabilmektedir. Dipçiğin katlama fonksiyonu ise Şekil 9’da görülebilmektedir. Dipçiğin katlanması öncesinde bayonet bağlantı ile dipçik tabanı yatay pozisyona getirilmektedir. Yenilikçi model yapılanmasında bazı fonksiyonel gereksinimler için alt kırılımlar bulunmaktadır. Bu kırılımlar ve gerçekleştirilen tasarım parametreleri aşağıda gösterilmektedir.

- *FR2.4.1: Yatay Yönde Ayarlanabilir Dipçik Tabanı*
- *FR2.4.2: Dönebilir Ara Parça*
- *DP2.4.1: Bayonet Bağlantı Katlanır Taban Sistemi*
- *DP2.4.2: Esnetilebilir Bağlantı İle 2 Parçalı Ara Parça*
- *FR2.5.1: Yatay Yönde Ayarlanabilir Baş Destek Noktası*
- *FR2.5.2: Dikey Yönde Ayarlanabilir Baş Destek Noktası*
- *DP2.5.1: Yatay Yönde Hareket Eden Raylı Sistem*
- *DP2.5.2: Dikey Yönde Hareket Eden Raylı Sistem*
- *FR2.6.2: Dikey Yönde Hareket Eden Omuz Desteği*

- *DP2.6.2: Dikey Yönde Hareket Eden Raylı Omuz Desteği*

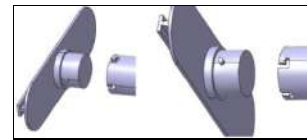
Yenilikçi model ile ilgili olarak tasarım ağacı ve toplam tasarım matrisi Şekil 10 ve Şekil 11’de yer almaktadır. Şekil 11’de yer alan toplam tasarım matrisi ele alındığında söz konusu matrisin ayrık tasarım şartlarını karşıladığı görülmektedir. Bu nedenle yenilikçi model için bağımsızlık aksiyomunun sağlandığı görülebilmektedir. Bir başka deyişle yenilikçi üründe her bir fonksiyonel gereksinim için üretilen tasarım parametreleri sadece bir adet fonksiyonel gereksinime etki etmektedir. Yenilikçi model için 3. Seviyede gerçekleştirilen fonksiyonel gereksinimler ve tasarım parametreleri Çizelge 3’de yer almaktadır.



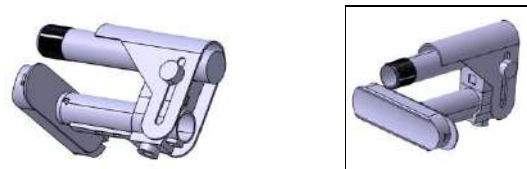
**Şekil 6.** Yenilikçi modelin arkadan ve alttan perspektif görüntüleri (Innovative model from the back and bottom perspective views)



**Şekil 7.** Yenilikçi modele ait iki parçadan oluşan ara parça (Two-piece spacer of the innovative model)



**Şekil 8.** Yenilikçi modele ait dipçik tabanı ve uzatma borusu bağlantısı (Innovative model’s butt base and extension tube connection)



**Şekil 9.** Yenilikçi model katlanmış halde üstten ve alttan perspektif görünüm (Innovative model’s folded view from top and bottom perspective)

Yapılan analiz sonucu oluşan tasarım matrisi ise Eş.(11)’deki gibi gerçekleşmiştir. Matris incelendiğinde tasarımın bağımsızlık kriterini 3. seviyede karşıladığı görülebilmektedir.

$$\begin{Bmatrix} \text{FR2.1} \\ \text{FR2.2} \\ \text{FR2.3} \\ \text{FR2.4} \\ \text{FR2.5} \\ \text{FR2.6} \\ \text{FR2.7} \\ \text{FR2.8} \\ \text{FR2.9} \\ \text{FR2.10} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \text{DP2.1} \\ \text{DP2.2} \\ \text{DP2.3} \\ \text{DP2.4} \\ \text{DP2.5} \\ \text{DP2.6} \\ \text{DP2.7} \\ \text{DP2.8} \\ \text{DP2.9} \\ \text{DP2.10} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

## 5. MODELİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE YAPISAL ANALİZİ (STRUCTURAL ANALYSIS OF THE MODEL USING FINITE ELEMENT ANALYSIS METHOD)

Cr1 müşteri ihtiyacında tüfek dipçığının atıştan gelen kuvvetlere ve düşmelere karşı dayanıklı olması gerektiği vurgulanmıştır. Yenilikçi model için atıştan gelen kuvvete dayanımı ve düşmeye karşı dayanımı hususunda sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir.

### 5.1. Boyutlandırma (Sizing)

Yenilikçi model boyutlandırılırken, gerek sportif gerekse askeri amaçla yaygın olarak kullanılan tüfeklere monte edilebilecek şekilde olmasına dikkat edilmiştir. Bu kapsamda sportif ve av tüfeği olarak silah üreticilerinin emsal aldığı AR15 tüfeğinin geri tepme yayının bulunduğu borunun ölçüleri kullanılmıştır. Bu sayede dipçığın AR15 ve AR15 temel alınarak üretilen benzer tüfeklerde kullanımı mümkün olabilecektir. Şekil 12'de yenilikçi dipçığın AR15 tüfeğine montajlı haldeki görüntüsü yer almaktadır. Geri tepme kılavuz borusuna ilişkin ölçüler Ek-1'de gösterilmektedir. Söz konusu kılavuz borusu dış yüzeyinde ara parçanın oturması amacıyla bir kademe verilerek yatak oluşturulmuştur. Standart parça kullanımını artırmak amacıyla uzayıp kısalmayı sağlayan dipçik taban borusu da boyutlandırılırken aynı ölçüler kullanılmıştır.

Geri tepme kılavuz borusu ile dipçik uzatma borusu (Ek-2) arasındaki bağlantı 2 parçadan oluşan ara parça ile sağlanmaktadır. Üst ara parça geri tepme kılavuz borusu dış yüzeyinde oluşturulan yatağa konumlandırılırken alt ara parça ile dipçik uzatma borusu vidalı şekilde bağlanmaktadır. Üst ara parçaya ilişkin boyutlar Ek-3'de yer almaktadır. Askı kayışının bağlanacağı halkayı da içeren alt ara parçaya ilişkin boyutlar Ek-4'de yer almaktadır. Askı kayışı halkası alt ara parçanın yan yüzeyine konumlandırılmıştır.

Dipçik uzatma borusunun bayonet bağlantı sayesinde kolayca çıkarılıp yönü değiştirilerek tekrar takılmasına

imkan tanıyan ve aynı zamanda elastik pedin kayar bir şekilde üzerine konumlandırılabilirdiği dipçik taban plakasına ait boyutlar Ek-5'de yer almaktadır. Yenilikçi modele ait tüm unsurların montajlı olduğu haldeki dış boyutlar Şekil Ek-6'da gösterilmektedir. Dipçik yaklaşık olarak 280 mm uzunluğa ve 201 mm yüksekliğe sahip olmuştur.

### 5.1. Atış Esnasında Dipçiğe Etki Eden Kuvvete

**Dayanım Analizi** (Strength Analysis of Rifle Butt during Firing)

#### 5.1.1. Kabuller ve Sınır Şartları (Assumptions and Boundary Conditions)

Atış esnasında tüfek dipçığıne etki eden 13,5 N (Abaş 2011) değerinde maksimum kuvvet, atış esnasında çok büyük basınçların oluşması ve bu nedenle geri tepme sisteminde bir sorun olması durumunda dipçığın parçalanıp kullanıcıya zarar vermemesi adına emniyet katsayısı 5 alınarak 67,5 N olarak uygulanmıştır. Analizde 6 adet parçadan oluşan montaj kullanılmıştır. Kuvvet irca yayının ve geri tepme tamponunun konumlandırıldığı geri tepme kılavuz borusunun iç taban yüzeyine uygulanmıştır. Dipçik elastik pedin konumlandırıldığı kısım olan ve dipçik taban plakası olarak adlandırılan parçanın, kullanıcının omuzu ile temas eden yüzeyinden sabitlenmiştir. Şekil 13'de uygulanan kuvvet yönü ve sabitlenme noktaları görülebilmektedir. Montajı oluşturan parçalar arası kontaklar lineer analiz için sıkça kullanılan kontak olarak seçilmiştir.

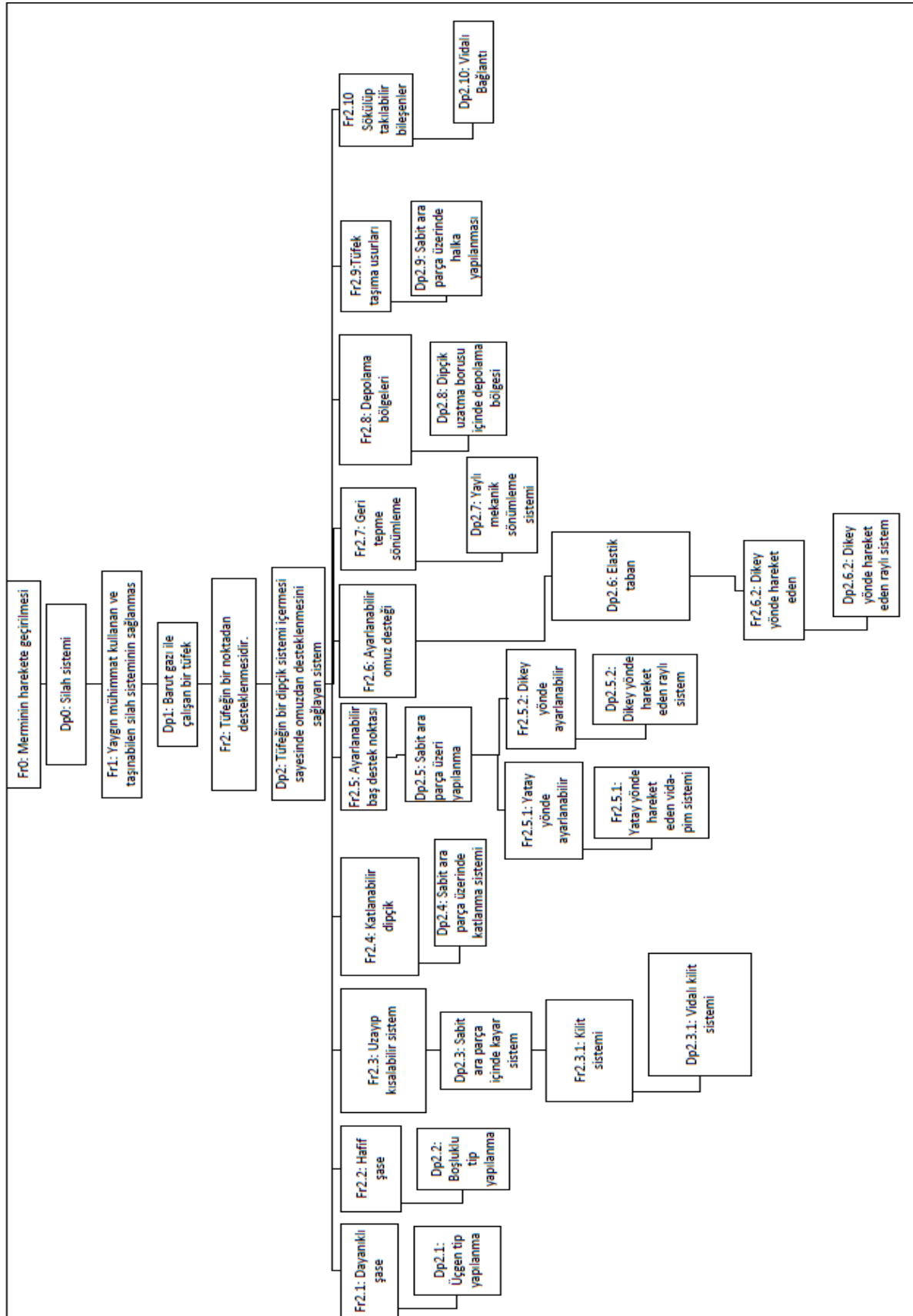
6 adet kontak oluşturulmuştur. Statik yapısal analiz esnasında dipçik tabanına yerleştirilecek olan elastik ped malzemesi ihmal edilmiştir. Ayrıca geri tepme kılavuz borusunda yer alan vida dişleri analiz esnasında ihmal edilmiş olup düz yüzey kullanılmıştır. Bununla birlikte yapılan çalışmanın teorik olması ve literatürde kullanımının yaygın olması sebebiyle Von-Misses hasar kriteri kullanılmıştır. Ayrıca atış anında tüfek kabze ve ön kundaktan tutularak desteklediği için yer çekimi ivmesi ihmal edilmiştir. Çözüm ağı oluşturulurken en iyi sonucu alabilmek adına analizi yapılan modelde tetrahedron mesh kullanılmıştır. Mesh yapısı 49385 eleman ve 93785 düğüm noktasından oluşmaktadır.

### 5.2. Atış Esnasında Dipçiğe Etki Eden Kuvvete

**Dayanım Analizi Sonuçları** (Strength Analysis Results for the Rifle Butt during Firing)

Gerçekleştirilen statik analiz sonuçlarına göre maksimum gerilme 7,0766 MPa olarak gerçekleşmiştir.

Söz konusu maksimum gerilmenin tüfeğin uzayıp kısalmasını sağlayan ve dipçik tabanı ile bağlantılı olan içi boş olarak modellenen dipçik uzatma borusunda olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 14-a'da analiz sonucu elde edilen gerilmeleri gösteren görüntüler yer almaktadır. Maksimum gerilmenin ortaya çıktığı dipçik uzatma borusu üzerindeki gerilme dağılımını gösteren görüntü Şekil 14-b'de yer almaktadır



Şekil 10. Yenilikçi modelin fonksiyonel gereksinim - tasarım parametresi ağacı (Functional requirement of the innovative model - design parameter tree)

**Çizelge 3.** Yenilikçi model için 3. seviye fonksiyonel gereksinimler ve tasarım parametreleri (Functional requirements for Level 3 and design parameters for the innovative model)

Seviye Kodu	Fonksiyonel Gereksinimler	Tasarım Parametreleri
2.1	Dayanıklı şase	Üçgen tip yapılanma
2.2	Hafif şase	Boşluklu tip yapılanma
2.3	Uzayıp kısalabilir sistem	Sabit ara parça içinde kayar sistem
2.4	Katlanabilir dipçik	Sabit ara parça üzerinde katlanma sistemi
2.5	Ayarlanabilir baş destek noktası	Sabit ara parça üzeri yapılanma
2.6	Ayarlanabilir omuz desteği	Elastik taban
2.7	Geri tepme sönmüleme	Yaylı mekanik sönmüleme sistemi
2.8	Depolama bölgeleri	Dipçik uzatma borusu içerisinde depolama bölgesi
2.9	Tüfek taşıma unsurları	Sabit ara parça üzerinde halka yapılanması
2.10	Sökülüp takılabilir bileşenler	Vidalı bağlantı

FR0	FR1	FR2	FR2.1	FR2.2	FR2.3	FR2.3.1	FR2.4	FR2.4.1	FR2.4.2	FR2.5	FR2.5.1	FR2.5.2	FR2.6	FR2.6.1	FR2.7	FR2.8	FR2.9	FR2.10
X																		
	X																	
		X																
			X															
				X														
					X													
						X												
							X											
								X										
									X									
										X								
											X							
												X						
													X					
														X				
															X			
																X		
																	X	
																		X

**Şekil 11.** Yenilikçi modelin toplam tasarım matrisi (Total design matrix of the innovative model)**Şekil 12.** Yenilikçi dipçığın AR15 tüfeğine montajlı haldeki görüntüsü<sup>1</sup> (Innovative butt assembled to the AR15 rifle)

Plastik malzeme kullanımının düşünüldüğü ara parçada ise analiz sonucunda gerilmeler çok düşük seviyelerde gerçekleşmiştir. Özellikle alt ara parçada görülen gerilme dağılımı Şekil 14-c'de yer almaktadır. Bununla birlikte maksimum deformasyon ise 3,7 mm olarak geri tepme kılavuz borusunun namlu tüfek gövdesi ile bağlandığı noktada gerçekleşmiştir. Bunun ana nedeni dipçik uzatma borusundaki eğilme olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte dipçik gövdesinin ihmal edilmesi bu sonucun ortaya çıkmasında etkili olduğu değerlendirilmektedir.

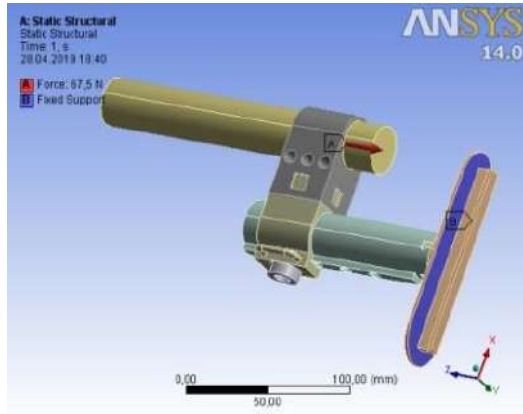
<sup>1</sup> [26] AR15 tüfeğinin gövde kısmına ait katı model internetten hazır olarak bulunup kullanılmıştır. Gövde kısmının katı modeli

[https://grabcad.com/library?sort=most\\_downloaded&tags=ar15](https://grabcad.com/library?sort=most_downloaded&tags=ar15) sayfasından sağlanmıştır.

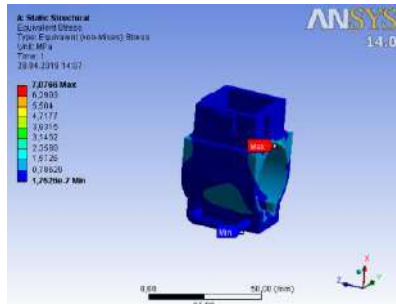
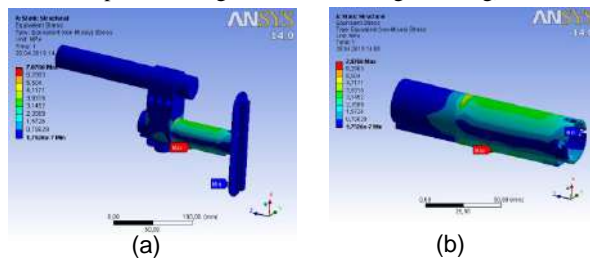


### 5.3. Düşme Test Analizi (Drop Test Analysis)

İlk olarak gerçekleştirilen dikey düşme analiz sonuçlarına göre maksimum gerilme 48,593 MPa olarak gerçekleşmiştir. Söz konusu maksimum gerilmenin tüfeğin uzayıp kışalmasını sağlayan dipçik uzatma borusunda olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 15'de analiz sonucu elde edilen maksimum gerilmeleri gösteren görüntü yer almaktadır. Eğik düşme analizinde ise maksimum gerilme 65,921 MPa olarak gerçekleşmiştir. Söz konusu maksimum gerilmenin dipçik tabanında olduğu gözlemlenmiştir. Dikey düşme analizindeki sonuçlara benzer şekilde ara parça üzerinde gerilmeler oldukça düşük çıkmıştır. Şekil 15-a'da analiz sonucu elde edilen maksimum gerilmeleri gösteren şekil yer almaktadır. Dipçiklerin tabanında esnek bir malzemeden sönümleyici ped kullanılmaktadır. Söz konusu ped sonlu elemanlar modeline dahil edildiğinde gerilme değerlerinde belirgin düşüşler sağlanmaktadır. Elastik ped ANSYS malzeme kütüphanesinde yer alan lastik malzeme ile modellenmiştir.

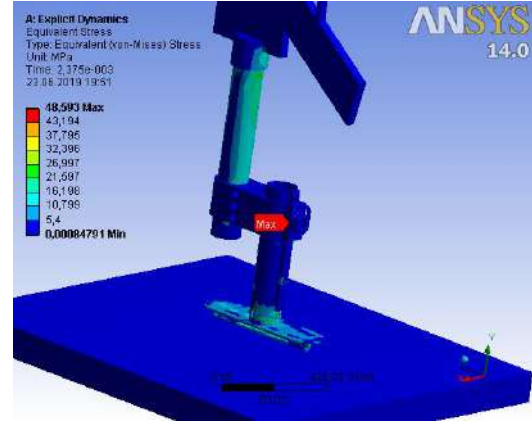


Şekil 13. Atış esnasında dipçiğe etki eden kuvvet yönü ve sabitlenen noktalar (Direction of force and fixed points acting on the butt during shooting)

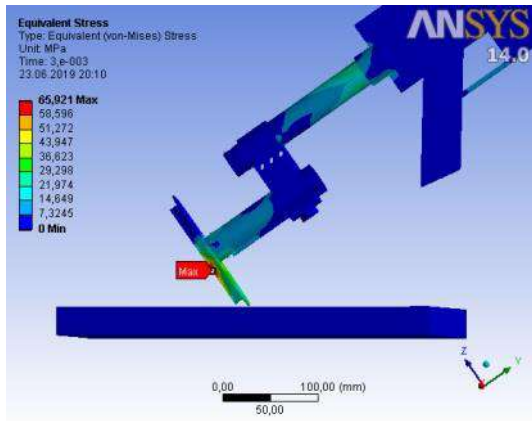


Şekil 14. Maksimum gerilme (Maximum stress)

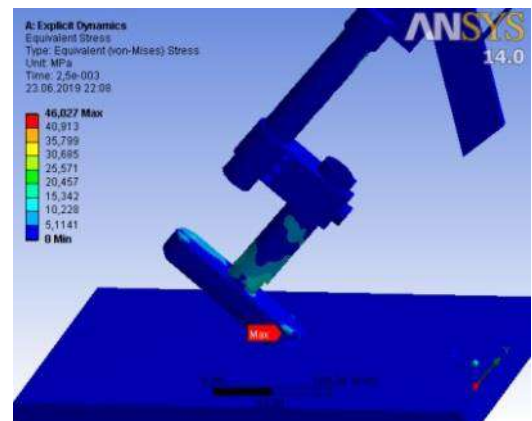
Şekil 15-b'de elastik ped içeren model ile yapılan analiz sonucu oluşan gerilmeler görülebilmektedir. Elastik ped içeren model ile yapılan eğik düşme analizinde maksimum gerilme 46,027 MPa olarak gerçekleşmiştir (Şekil 15-c). Söz konusu maksimum gerilmenin dipçik tabanında olduğu gözlemlenmiştir. Dikey düşme analizindeki sonuçlara benzer şekilde ara parça üzerinde gerilmeler oldukça düşük çıkmıştır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 15. Dikey ve eğik düşme analizi sonrası elde edilen maksimum gerilme (Maximum stress obtained from vertical and inclined fall analysis)

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışma kapsamında belirlenen müşteri ihtiyaçlarını karşılamak adına 1 adet dipçik yapılanması (Yenilikçi Model) oluşturulmuştur. Aksiyomatik tasarım yöntemi ile analiz edilen bu modellerin bağımsızlık aksiyomu kriterini sağlamadığı tespit edilmiştir. Modellerin bağımsızlık aksiyomu kriterini sağlamama konusunda ortak nedeninin, FR2.4 (Katlanabilir Dipçik) fonksiyonel gereksinimine yönelik oluşturulan DP2.4 (Dikey/Yatay Katlanma Sistemi) tasarım parametresinin FR2.4 dışında FR2.9 (Tüfek Taşıma Unsurları) ve FR2.7 (Geri Tepme Sönümleme) fonksiyonel gereksinimlerinin her ikisini de etkilemesi olarak tespit edilmiştir.

Bu problemleri ortadan kaldırmak adına 1 adet yenilikçi model geliştirilmiştir. Yenilikçi modelde geri tepme sisteminin yer aldığı geri tepme klavuz borusu ile uzatma ve kısaltmanın yapıldığı dipçik uzatma borusunun birbirinden ayrılması ve sisteme eklenen bir ara parça üzerine konumlandırılmışlardır. Yenilikçi modelde ara parça bayonet veya esnetilebilir bağlantı sistemi ile 2 parçadan oluşturularak istenildiği takdirde dipçığı katlamak üzere yönü değiştirilebilen bir yapı elde edilmiştir.

Sonlu elemanlar analizinde atış esnasında ve tüfeğin düşürülmesi durumunda dipçiğe gelecek olan kuvvetler nedeniyle oluşacak gerilmeler statik analiz modülü kullanılarak incelenmiştir. Atış esnasında dipçiğe etki eden kuvvet sonucu dipçikte oluşan gerilmeleri belirlemek adına yapılan statik analiz sonucunda maksimum gerilme 7,076 MPa olarak gerçekleşmiştir. Söz konusu maksimum gerilmenin tüfeğin uzayıp kılmasını sağlayan ve dipçik tabanı ile bağlantılı olan içi boş olarak modellenen dipçik uzatma borusunda oluştuğu gözlemlenmiştir.

Tüfeğin düşürülmesi sonucunda çarpma sonucu dipçik üzerinde oluşacak gerilmelerin tespit edilmesi amacıyla yapılan analizde tüfek dik olarak düşürülmüş ve maksimum gerilme 48,593 MPa olarak gerçekleşmiştir. Maksimum gerilme dipçik uzatma borusu üzerinde gerçekleşmiştir. Yapılan ikinci analizde ise tüfek 45° lik bir açı ile düşürülmüş ve maksimum gerilme 65,921 MPa olarak gerçekleştiği tespit edilmiştir. Yapılan ikinci analizde maksimum gerilme dipçik taban plakasında meydana gelmiştir. Her analiz sonucunda da gerçekleşen maksimum gerilme değerleri plastik malzemenin akma değerinin üstünde gerçekleşmiştir. Bununla birlikte plastik olması değerlendirilen ara parça üzerinde kayda değer bir gerilme oluşmamıştır. Gerilmelerin azaltılması kritik boyutlarda güçlendirme yapılarak veya dipçik üzerinde sönümleyici malzeme kullanılarak giderilebileceği değerlendirilmiştir. Bu etkiyi gözlemlemek adına yapılan üçüncü bir analiz daha yapılmış ve dipçik taban plakasına esnek malzemeden ped eklenerek eğik düşme analizi tekrarlanmıştır. Analiz sonucunda maksimum gerilme 46,027 MPa olarak dipçik taban plakasında gerçekleşmiştir. Bu sonuç esnek ped

kullanılmadan yapılan analize göre maksimum gerilmenin % 30 oranında azaldığını göstermiştir.

Yapılan bu çalışma ile aksiyomatik tasarım yöntemi uygulanarak elde edilen yenilikçi dipçik modellerinde gelecekte oluşabilecek müşteri ihtiyaçlarındaki değişimler için tasarım parametrelerinde yapılacak değişimler sistemin genelinde büyük değişimleri gerektirmeyecektir. Bu anlamda aksiyomatik tasarım metodunun uzun süren tasarım süreçlerinde olası değişikliklerde getirdiği verim bu çalışma ile ortaya konulmuştur. Çalışma kapsamında ortaya konulan yenilikçi dipçik modeli için patent ya da faydalı model başvurusu yapılabilir.

Bu çalışma temel alınarak yapılabilecek ilave çalışmalar ile iki adet yenilikçi model arasından aksiyomatik tasarım yönteminin bilgi aksiyomu kriteri kullanılarak maliyet, üretim, montaj gibi birçok konu açısından bir değerlendirme yapılarak ideal tasarımı karar verilebilir. Bununla birlikte gerilmelerin azaltılması veya farklı malzeme kullanımı hususunda bilgi aksiyomu kullanılarak seçim yapılabilir.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

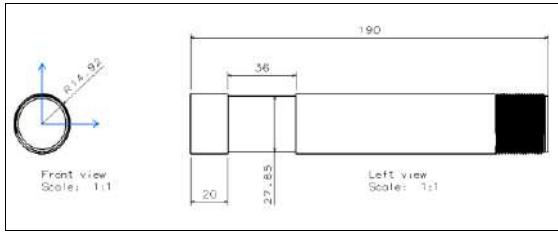
## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Suh N.P., *Axiomatic Design Advances and Applications*, Oxford University Press, (2001).
- [2] Suh N.P., *The Principles of Design*. Oxford University Press, (1990).
- [3] Suh N.P., "Design of thinking design machine", *Annals of the CIRP*, 39 (1):1990.
- [4] Martin B. & Kar K., "Developing E-Commerce Strategies Based on Axiomatic Design", *Marmara University Working Paper*, (2001).
- [5] Cochran, D. S. and Reynal, V. A., "Axiomatic Design of Manufacturing Systems, The Lean Aircraft Initiative Report Series", RP96-05-14, *Mass. Institute of Technology*, (1996).
- [6] Run-Jie, L., Yi-Xiong F., Hao Z., Jian-Rong T., "A Product Design Based On Interaction Design And Axiomatic Design Theory". *10th International Conference on Axiomatic Design- ICAD*, (2016).
- [7] Suh, N.P., Cochran, D.S., Paulo, C.L., "Manufacturing System Design", *Annals of the CIRP*, 47(2): 627-39, (1998).
- [8] Cochran, D. S; Eversheim, W.; Kubin, G.; Sesterhenn, M. L., "The Application of Axiomatic Design and Lean Management Principles in the Scope of Production System Segmentation", *The International Journal of Production Research*, 38 (6): 1377-1396, (2000).
- [9] Demirtaş, M., "An Axiomatic Design Approach to Mechanical Car Parking System Design", *M.Sc. Thesis*. Marmara University Institute For Graduate Studies In Pure And Applied Science, (2012).

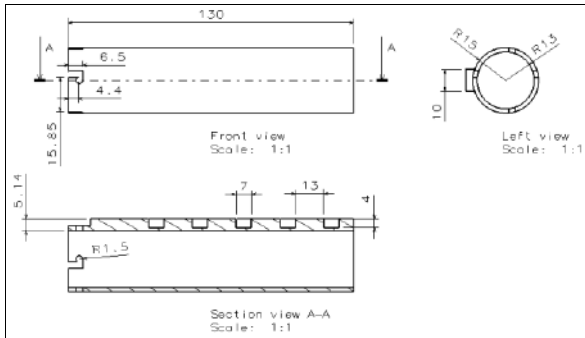
- [10] Kabadurmuş, Ö. ve Durmuşoğlu, M. B., “Aksiyomlarla Tasarım İlkelerini Kullanarak Çekme/Kanban Üretim Kontrol Sistemlerinin Tasarımı”, *V. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu*, Ticaret Üniversitesi, İstanbul, 313-317, (2005).
- [11] Tarcan, E., “Evaluation Of Sub-Component Alternatives in a Product Design”, *Yüksek Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2005).
- [12] Yılmaz, E., “Aksiyomlarla Tasarım İlkeleri Yardımıyla Kentiçi Toplu Taşıma Sistemlerinin Tasarımı”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 11(1): 9-26, (2006).
- [13] Özel, B. ve Özyörük, B. “Aksiyomatik Tasarım ve Analitik Hiyerarşi Prosesi ile Tedarikçi Seçimi”, *VI. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu*, İstanbul Kültür Üniversitesi 189-203, (2006).
- [14] Özel, B. “Bulanık Aksiyomatik Tasarım Yaklaşımı İle Hiyerarşik Bir Tedarikçi Seçim Modeli”, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2007).
- [15] Durmuşoğlu, M.B. ve Danacı T., “Military logics network design Via axiomatic design principles”, *M.Sc. Thesis*, İstanbul Technical University, Institute Of Science And Technology, (2011).
- [16] Özbek, İ., “Plastik Enjeksiyon Makinesi Seçiminde Aksiyomatik Tasarım Yaklaşımı”, *Yüksek Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi Fenbilimleri Enstitüsü, (2013).
- [17] Freyja Y.O., Róbert B. O., Joseph T. F., “The axiomatic design of Chessmate: a chess-playing robot”, *10th International Conference on Axiomatic Design- ICAD*, (2016).
- [18] Petru D., Eugen P., Gheorghe N., Oana D., Marius R. and Laurentiu S., “Construction of Patent Claims Using Axiomatic Design”, *11th International Conference on Axiomatic Design- ICAD*, (2017).
- [19] Abaş, A., “Tetik Mekanizmasına Gelen Dinamik Kuvvetlerin Sonlu Elamanlar Metoduyla İncelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2011).
- [20] Özyılmaz, Ö., “Hafif Silah Tasarımının Balistik Açidan İncelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2010).
- [21] Zaloğlu, H., “Finite Element Modelling and Analysis of Recoil Springs in Automatic Weapons”, *M.Sc. Thesis*, Middle East Technical University, Ankara, (2013).
- [22] Salonitis, K., “Design for additive manufacturing based on the axiomatic design method”, *Int J Adv Manuf Technol*, 87:989-996, (2016).
- [23] Schuh, G., Rudolf, S., Breunig, S., “Modular Platform Design for Mechatronic Systems using Axiomatic Design and Mechatronic Function Modules”, *Procedia CIRP*, 50:701-706, (2016).
- [24] Shangguan, L., Song, Z., Zhu, Z., Mao, E., Chen Y., “Axiomatic Design Principle Based Rapid Gearbox Design for Large Wheeled Tractors”, *Applied Engineering in Agriculture*, 31(5): 747-754, (2015).
- [25] Porpíglío, I., Scalice, Rk. Silveira, Z., “Axiomatic design and solution variants applied to a modular 3D printing head based in material extrusion”, *Procedia CIRP*, 84: 143-148, (2019).
- [26] [https://grabcad.com/library?sort=most\\_downloaded&tags=ar15](https://grabcad.com/library?sort=most_downloaded&tags=ar15) (2019).

## EKLER (APPENDICES)

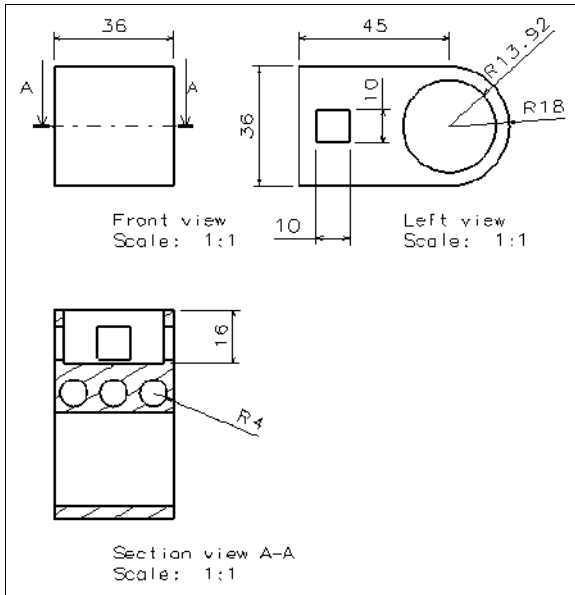
Ek-1. Geri tepme kılavuz borusuna ilişkin ölçüler (Dimensions for recoil guide tube)



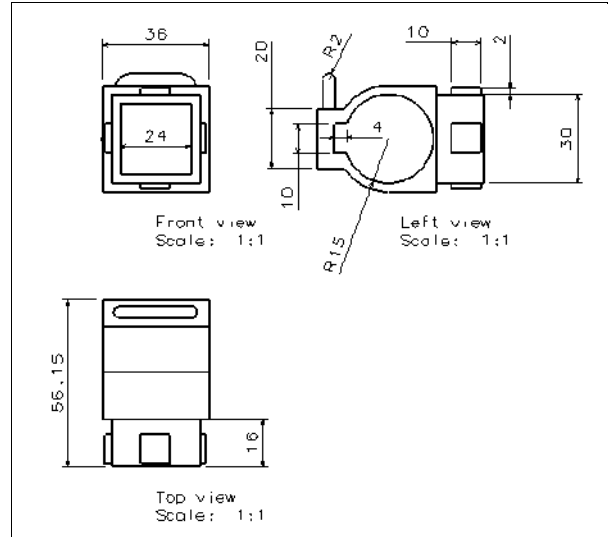
Ek-2. Dipçik taban borusu (Buttom tube for butt)



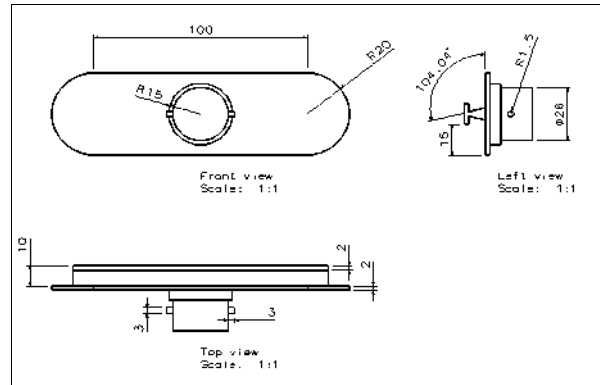
Ek-3. Üst ara parçaya ilişkin boyutlar (Dimensions for the upper spacer)



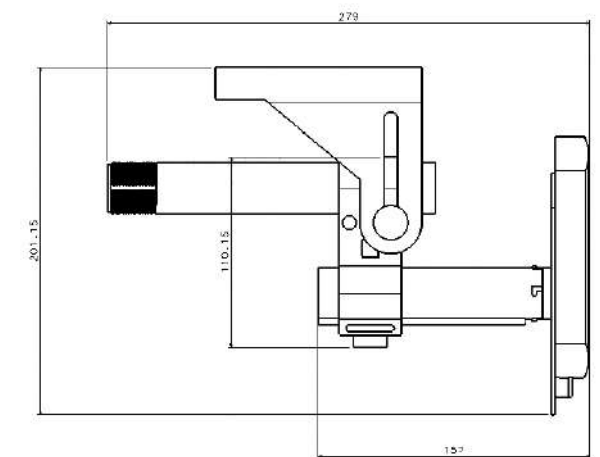
Ek-4. Askı kayışı halkası ve alt ara parça (Sling strap ring and lower spacer)



Ek-5. Dipçik taban plakası (Buttom plate for butt)



Ek-6. Yenilikçi modelin montajlı hali (Assembled version of the innovative model)





POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



## Nokta direnç kaynak yöntemi ile alüminyum ve titanyum alaşımı sacların IF çelik saclarla kaynak kabiliyetinin araştırılması

*Investigation of the welding capability of aluminum and titanium alloy sheets with IF steel sheets by resistance spot welding method*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Özer MUTLUSU<sup>1</sup>, Rukiye ERTAN<sup>2</sup>

*ORCID<sup>1</sup>:* 0000-0001-9459-3027

*ORCID<sup>2</sup>:* 0000-0002-9631-4607

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Mutlusu Ö. ve Ertan R., “Nokta direnç kaynak yöntemi ile alüminyum ve titanyum alaşımı sacların IF çelik saclarla kaynak kabiliyetinin araştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1003-1013, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.558297



# Nokta Direnç Kaynak Yöntemi ile Alüminyum ve Titanyum Alaşımı Sacların IF Çelik Saclarla Kaynak Kabiliyetinin Araştırılması

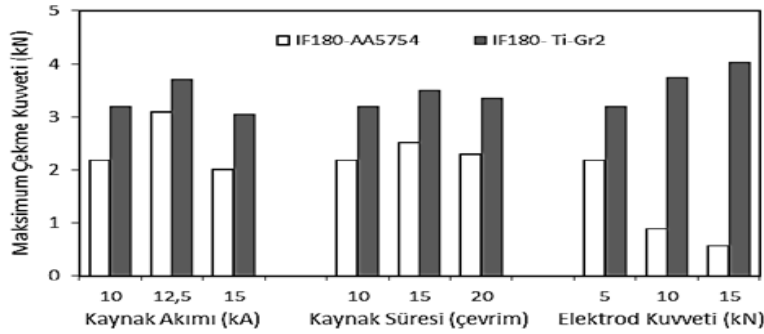
## Investigation of the Welding Capability of Aluminum and Titanium Alloy Sheets with IF Steel Sheets by Resistance Spot Welding Method

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Alüminyum ve titanyum alaşımlarının IF çelik saclarla noktasal kaynak edilebilirliği kıyaslanmıştır./ Spot weldability of aluminum and titanium alloys with IF steel sheets was compared.
- ❖ Kaynak parametrelerinin mekanik özellikler ve kaynak çekirdek boyutları üzerindeki etkisi incelenmiştir./ The effect of welding parameters on mechanical properties and nugget dimensions were investigated.
- ❖ Her bir malzeme çifti için optimum kaynak parametreleri tespit edilmiştir./ Optimum welding parameters have been determined for each pair of materials.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

IF 180 çeliğinin ticari saf titanyum ve 5754 alüminyum alaşımı ile noktasal kaynak edilebilirliği farklı kaynak parametrelerinde mekanik özellikleri kıyaslanarak incelenmiştir.



Şekil. Kaynaklı numunelerin mekanik özellikleri / **Figure.** Mechanical properties of welded samples

### Amaç (Aim)

IF 180 çeliğinin ticari saf titanyum ve 5754 alüminyum alaşımı ile noktasal kaynak edilebilirliği araştırılması amaçlanmıştır./ It is aimed to investigate spot weldability of IF 180 steel with commercial pure titanium and 5754 aluminum alloy.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Kaynak işlemleri elektrik direnç nokta kaynağı yöntemiyle farklı kaynak parametrelerinde gerçekleştirilmiştir./ Welding operations were carried out by using electric resistance spot welding method in different welding parameters.

### Özgünlük (Originality)

Bu çalışmada farklı malzemelerin birbirleriyle ara malzeme kullanmadan noktasal kaynak edilebilirliği araştırılmıştır./ In this study, the spot weldability of different materials without using intermediate materials was investigated.

### Bulgular (Findings)

Kaynaklı numunelerin çekirdek çapı, elektrod dalma derinliği, sertlik ve çekme-makaslama testi sonuçları irdelenmiştir./The nugget diameter, electrode depth, hardness and tensile-shear test results were examined.

### Sonuç (Conclusion)

Kaynak akımı ve elektrod kuvvetinin çekirdek çapı, elektrod dalma derinliği ve maksimum çekme kuvvetini önemli oranda etkilediği tespit edilmiştir./It has been determined that the welding current and electrode force significantly affect the nugget diameter, electrode immersion depth and maximum tensile force.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Nokta Direnç Kaynak Yöntemi ile Alüminyum ve Titanyum Alaşımı Sacların IF Çelik Saclarla Kaynak Kabiliyetinin Araştırılması

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Özer MUTLUSU<sup>1</sup>, Rukiye ERTAN<sup>2\*</sup>**

<sup>1</sup>Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., İstanbul Cad., No:574, Osmangazi-16110, Bursa, Türkiye

<sup>2</sup>Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fak., Otomotiv Müh. Böl., Grütke-16059, Bursa, Türkiye

(Geliş/Received : 26.04.2019 ; Kabul/Accepted : 02.10.2019)

## ÖZ

Bu çalışmada, 1 mm kalınlığındaki yüksek mukavemetli ve derin çekilebilir IF 180 çeliğinin yine 1 mm kalınlığındaki ticari saf titanyum (ASTM Grade 2) ve 5754 alüminyum alaşımı ile noktasal kaynak edilebilirliği araştırılmıştır. Kaynak işlemleri elektrik direnç nokta kaynağı yöntemiyle farklı kaynak akımları (10 kA, 12,5 kA ve 15 kA), kaynak süreleri (10, 15 ve 20 çevrim) ve elektrod kuvvetlerinde (5 kN, 10 kN ve 15 kN) gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı numunelerin kaynak çekirdek çapı, elektrod dalma derinliği, sertlik ve çekme-makaslama testi sonuçları incelenerek mekanik özellikleri irdelenmiştir. Sonuç olarak, kaynak parametrelerinin IF 180 - 5754 Al alaşımı kaynak çiftinin mekanik özellikleri üzerinde IF 180 - Ti-Gr2 alaşım çiftine göre daha büyük etkiye sahip olduğu görülmüştür. Kaynak akımı ve elektrod kuvvetinin her iki kaynak çiftinde çekirdek çapı, elektrod dalma derinliği ve maksimum çekme kuvvetini önemli oranda etkilediği tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** IF180, Titanyum Gr2, 5754 Al alaşımı, nokta direnç kaynağı, mekanik özellikler.

## Investigation of the Welding Capability of Aluminum and Titanium Alloy Sheets with IF Steel Sheets by Resistance Spot Welding Method

### ABSTRACT

In this study, spot weldability of 1 mm thick IF 180 deep drawn high strength steel with 1 mm thick commercial pure titanium (ASTM Grade 2) and 5754 aluminum alloy was investigated. The welding operations were performed with different welding currents (10 kA, 12.5 kA and 15 kA), welding times (10, 15 and 20 cycles) and electrode forces (5 kN, 10 kN and 15 kN) by electrical resistance spot welding. The welding nugget diameter, electrode immersion depth, hardness and tensile-shear test results of the welded samples were examined and the mechanical properties were compared. As a result of the tests, it was seen that the welding parameters had a greater effect on the mechanical properties of the IF 180 -5754 Al alloy welding pair than the IF 180 - Ti-Gr2 alloy pair. It has been determined that the welding current and electrode force significantly affect the nugget diameter, electrode immersion depth and the maximum tensile force in both welding pairs.

**Keywords:** IF180, Titanium Gr2, 5754 Al alloy, resistance spot welding, mechanical properties.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Otomotiv ve havacılık sektörlerinin enerji ihtiyacı giderek artarken, yakıt ekonomisini iyileştirmek, iklim değişikliğini, çevreye verilen zararı ve insan sağlığına olan olumsuz etkileri azaltmak amacıyla araçların hafifletilmesi üzerine yoğun olarak çalışılmaktadır. Bu çalışmalar, çoğunlukla alüminyum, magnezyum ve titanyum gibi hafif alaşımların kullanımını içermektedir [1-3]. Ancak araç üzerinde yüksek mukavemeti ekonomik kriterler çerçevesinde sağlamak için çelik hala en çok tercih edilen metal malzeme grubundadır. Daha radikal bir yaklaşım ise, çeliğin yoğunluğundan daha düşük yoğunluğa sahip olan alüminyum ve titanyum

alaşımlarının çelik ile birlikte kullanılması ve daha hafif sistemler üretilmesidir [3]. Otomotiv endüstrisinde farklı metallerin noktasal kaynağında genellikle elektrik direnç veya sürtünme - karıştırma nokta kaynağı kullanılmaktadır. Sürtünme - karıştırma nokta kaynağı, uygulamadaki bazı sıkıntıları nedeniyle kısıtlı kullanım alanına sahiptir [4]. Nokta direnç kaynağı ise su soğutmalı elektrotlar arasında bindirme şeklinde pozisyonlanmış plakaların, belirli bir süre boyunca akıma maruz bırakılarak ısıtılması şeklinde basit bir çalışma prensibi ile gerçekleştirilir. İşlem hızı oldukça yüksek, kontrol edilebilir bir imalat süreci ve düşük ilk yatırım maliyetine sahip olmasından dolayı bu yöntem otomotiv endüstrisinde vazgeçilmez olmuştur [5]. Elektrik direnç nokta kaynağı çelik, paslanmaz çelik, nikel, alüminyum veya titanyum alaşımlarının birleştirilmesinde en fazla

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : rukiye@uludag.edu.tr

kullanılan yöntemdir [6]. Ancak ara yüzeyde oluşan yüksek sıcaklığın etkisiyle kaynaklı bölgede mekanik ve metalurjik özelliklerde önemli değişiklikler meydana gelir. Bağlantı kalitesini önemli oranda etkileyen bu değişiklikler uygun parametre ile yapılan kaynak işlemlerinde minimum düzeyde kalır [7]. Kaynak akımı başta olmak üzere kaynak süresi ve elektrod kuvveti mekanik özellikleri belirleyen önemli parametrelerdir.

Araç üzerinde kullanılan çelik alaşımın türü parçadan beklenen performansa, maliyetine ve tasarıma uygun imalatı göz önünde bulundurularak seçilir. Çelik türleri arasında ultra düşük karbonlu (<%0,003) [8] çelikler derin çekilebilir özelliklere sahip olup otomotiv endüstrisinde yumuşak çeliklerin yerini almıştır. Bu çelikler kolay şekillendirilebilir olmalarının yanı sıra iyi kaynak edilebilir özelliklere sahiptir ve çeşitli kaynak yöntemleriyle birleştirilebilir [9, 10]. Yüksek mekanik mukavemete, iyi yorulma ve darbe direncine sahip olan bu çelikler, yapısal parçalar (uzunlamasına kirişler, traversler, B direkleri vb.) için farklı metaller ile birlikte kullanılmaktadır [11]. Özellikle Al alaşımları hafiflikleri ve sergiledikleri yüksek mekanik özellikler sebebiyle en fazla tercih edilen farklı metaller grubundadır. Bundan başka titanyum alaşımları da yüksek maliyetlerine rağmen hafif olmaları ve Al alaşımlarından daha yüksek mekanik özellikler sergilemeleri nedeniyle kullanımı gittikçe artan farklı metaller arasından sayılabilmektedir. Ancak farklı metallerin ergitme kaynağı ile birleştirilmesinde çeşitli problemler ortaya çıkmaktadır. Bunlardan en önemlisi ara yüzeyde meydana gelen intermetalik faz tabakası ve sıcak çatlak oluşumudur.

Çeliklerin hafif metaller ile elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilebilirliği konusunda literatürde kısıtlı sayıda çalışmaya rastlanmıştır [12-19]. Kang ve ark. (2017) [14] yaptıkları çalışmada farklı kalınlıklardaki AA6022-T4 ve IF çelik sacları elektrik direnç nokta kaynağı yöntemiyle kaynak etmişlerdir. Yorulma ve çekme-makaslama testleri, SEM görüntüleri ve kaynak çekirdek çapları ile birlikte değerlendirilerek mekanik özellikler AA6022-T4 ve AA6022-T4 kaynak çifti ile kıyaslanmıştır. Farklı metallerin kaynağında oluşan intermetalik faz ve çatlaklara rağmen aynı metallerin kaynağına göre daha yüksek mekanik özellikler elde edilmiştir. Literatürde farklı metallerin kaynağı konusunda yapılan çalışmalarda kaynak işlemi genellikle kaplama veya ara yüzey tabakası yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardan, Sun ve ark. (2004) [15] yaptıkları çalışmada SAE1008 çeliğini 5182-O alüminyum alaşımı ile elektrik direnç nokta kaynağı yöntemiyle ara yüzey tabakası kullanarak birleştirmişlerdir. Kaynak birleştirmelerinin statik ve dinamik dayanımları, aynı yükleme koşulları altında perçinli birleştirmeler ile kıyaslanmıştır ve perçinli birleştirmelerin daha yüksek enerji absorbe etme yeteneğine ve yorulma dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Satonaka ve ark. (2006) [16] ve Qui ve ark. (2008) [17] yaptıkları çalışmada 5052 alüminyum alaşımını direnç nokta kaynağı kullanarak SUS304 paslanmaz çelik ve SPCC soğuk haddelenmiş çelik

alaşımı ile SPCC alaşımı ara tabaka sacı kullanarak birleştirmişlerdir. Sonuç olarak kaynak mukavemeti elektrod çapının artmasıyla arttığı tespit edilmiştir. Al alaşımının SUS304 ile kaynak edilmesi durumunda kaynak ara yüzeyinde oluşan sert intermetalik faz ( $Fe_2Al_5$  ve  $FeAl_3$ ) tabakası 1-2 $\mu$ m gibi çok ince kalınlıklarda meydana gelirken, SPCC alaşımı ile yapılan kaynak işlemlerinde tabaka kalınlığı 7-8 $\mu$ m'ye ulaşmıştır. Bu faz tabakasının çekme-makaslama testi sonuçları üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı, ancak çapraz çekme testi sonuçlarını önemli miktarda etkilediği tespit edilmiştir.

Farklı malzemelerin kaynağında meydana gelen problemleri minimize etmek amacıyla literatürdeki bazı çalışmalarda elektrik direnç kaynak yöntemi üzerinde çeşitli iyileştirmeler yapılmıştır. Kim ve ark. (2016) [18] yaptıkları çalışmada DP590 ve A5052 alaşımlarını Delta-direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesi durumundaki elektrod morfolojisinin ve kaynak parametrelerinin kaynak mukavemeti üzerindeki etkisi incelemişlerdir. Zhang ve ark. (2015) [19] yaptıkları çalışmada 6008-T66 Al alaşımı ile H220YD yüksek mukavemetli çelik sacları elektrik direnç nokta kaynağı ile elektrod morfolojisini optimize ederek birleştirmişlerdir. Geliştirdikleri elektrod ile yapılan kaynaklı bağlantıların mukavemeti sıradan (F tipi) elektrodlar ile yapılanlara göre daha yüksek elde edilmiştir. Ayrıca geliştirilen elektrod ile yapılan kaynaklarda ara yüzeyde oluşan intermetalik faz tabakasının kalınlığı 4  $\mu$ m'yi aşmamıştır.

Bu çalışmada, 1 mm kalınlığındaki IF 180 çelik sac ile 1 mm kalınlığındaki ticari saf titanyum (Grade2) ve 1 mm kalınlığındaki 5754 Al alaşımı saclar herhangi bir kaplama veya ara yüzey tabaka malzemesi kullanmadan farklı kaynak akımları, süreleri ve elektrod kuvvetlerinde elektrik direnç nokta kaynağıyla birleştirilmesi durumundaki mekanik özellikleri detaylı olarak incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışmada IF 180 çelik alaşımı, ticari saf titanyum (Ti-Gr2) ve 5754 alüminyum alaşımı saclar 1 mm kalınlığında elektrik direnç nokta kaynağı yöntemi kullanılarak bindirme şeklinde kaynak edilmiştir. Bu malzemelere ait kimyasal kompozisyonlar ve mekanik özellikler, sırasıyla Çizelge 1 ve Çizelge 2'de verilmiştir.

Kaynak işlemi, elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak süresi ayarlanabilir, 180 kVA gücündeki su soğutmalı, sabit direnç nokta kaynağı makinesi ile zirkonyum alaşımli 8 mm çapında bombeli elektrotlar kullanılarak yapılmıştır. Birleştirilecek numunelerin yüzeyleri kaynak öncesi, kaynağı olumsuz etkileyebilecek kir, pas, yağ vb. maddelerden arındırılmış ve ayrıca kaynak yapılacak nokta asetona ile temizlenmiştir.

**Çizelge 1.** Malzemelerin kimyasal kompozisyonları (% ağırlıkça) (The chemical composition of the materials (weight %))

Malzeme	C	Mn	S	Si	Al	Cr	Ni	Ti	Mg	Fe	Cu	O
IF 180	0,002	0,05	0,008	0,011	0,046	0,019	0,012	0,07		98,9		
AA5754		0,35		0,21	95,4	0,03		0,15	2,8	0,4	0,05	
Ti-Gr2	0,1							99,2		0,3		0,25

**Çizelge 2.** Malzemelerin temel mekanik özellikleri (The basic mechanical properties of the materials)

Malzeme	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Vickers Sertlik (HV0,5)
IF 180	228	290	35	118
AA5754	195	225	12	90
Ti-Gr2	278	344	20	155

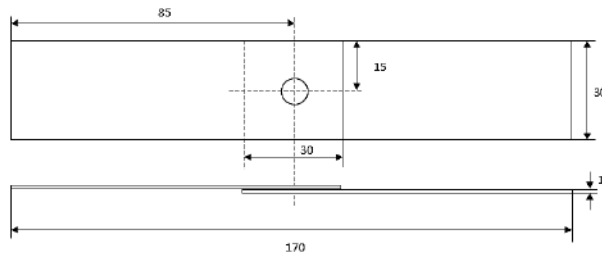
**Çizelge 3.** Çalışmada kullanılan kaynak parametreleri (Welding parameters used in this study)

	Akım (kA)	Kuvvet (kN)	Süre (çevrim)*		Akım (kA)	Kuvvet (kN)	Süre (çevrim)*
	IF180 – Ti-Gr2	10	5		10	IF180 – AA5754	10
15				15			
20				20			
10				10			
15				10			
12.5		5	10	12.5	5		10
15		5	10	15	5		10

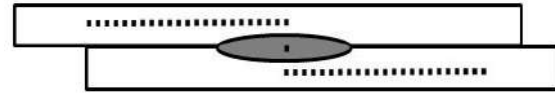
\*1 çevrim = 0,02 sn

Optimum kaynak parametre aralığını tespit etmek amacıyla ön çalışmalar yapılmıştır. Numuneler Çizelge 3’de verilen kaynak parametrelerine göre direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ve her bir malzeme çifti için 7 farklı numune elde edilmiştir

Kaynak sonrasında numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çekme-makaslama ve mikrosertlik testleri yapılmıştır. Çekme-makaslama testleri 250 kN yük kapasiteli UTEST universal çekme cihazında 10 mm/dk çekme hızında oda sıcaklığında yapılmıştır. Teste tabi tutulan numunelerin teknik resmi Şekil 1’de verilmiştir.

**Şekil 1.** Elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilen çekme numunelerinin boyutları (Dimensions of tensile specimens welded by electrical resistance spot welding)

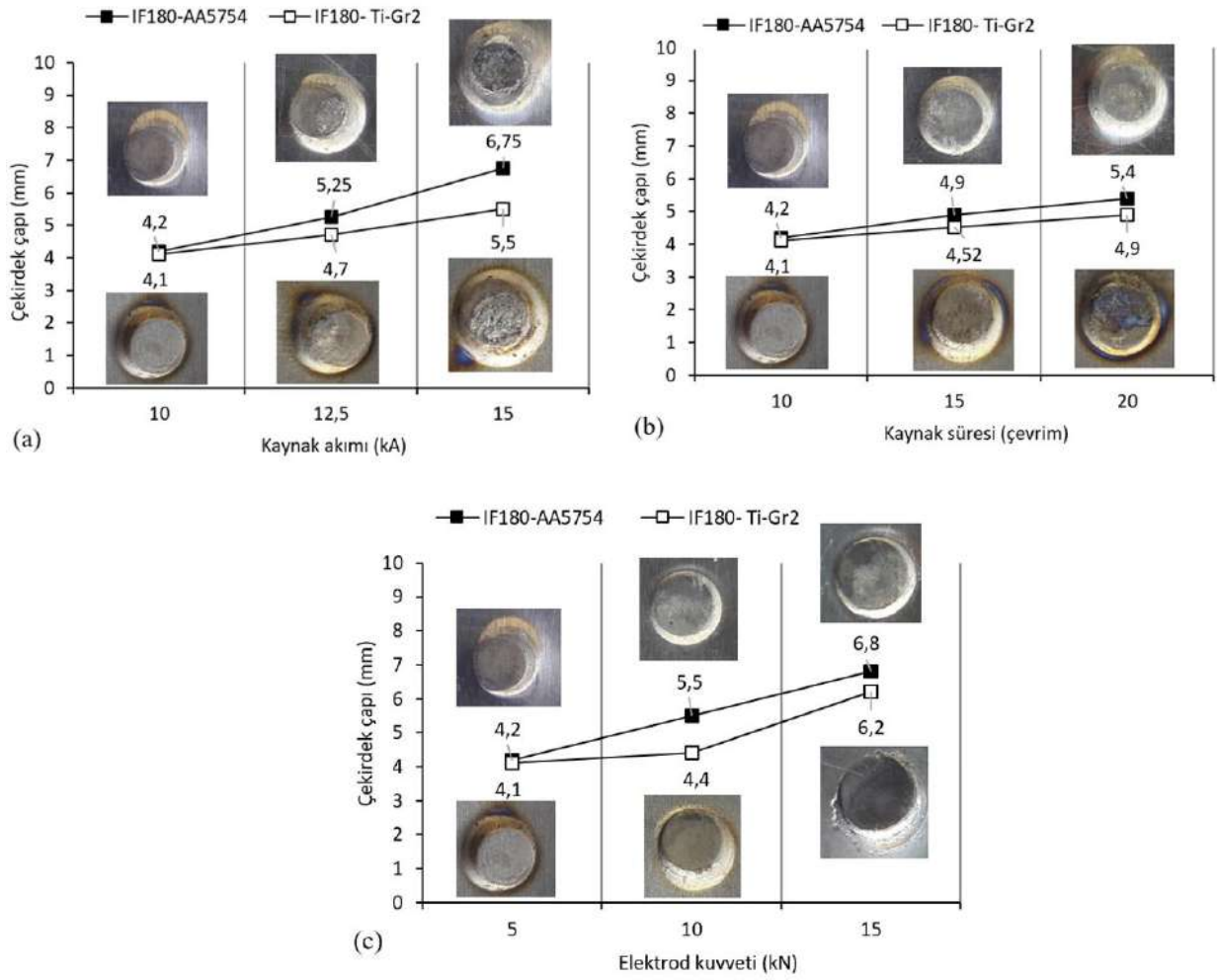
Sertlik ölçümleri Metkon marka Vickers sertlik ölçme cihazında 500 g’lık yük altında Şekil 2’de verilen noktalardan kaynak kesiti boyunca 1 mm aralıkla yapılmıştır. Çekme ve sertlik testleri aynı şartlardaki dört adet numunenin ortalaması alınarak değerlendirilmiştir.

**Şekil 2.** Vickers sertlik ölçüm noktaları (Vickers hardness measurement points)

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

#### 3.1. Kaynak Çekirdeği Çapı ve Elektrod Dalma Derinliği Ölçümleri (Weld Nugget Diameter and Electrode Dept Intensity Dimensions)

Kaynaklı bağlantılara ait çekirdek çapı ölçümü sonuçları çekirdek makro görüntüleri ile birlikte Şekil 3’de ve elektrod dalma derinlikleri sonuçları Şekil 5’te grafik olarak verilmiştir. Çekirdek çaplarının kaynak parametrelerine bağlı değişimi grafiklerinde Ti-Gr2 alaşımının sertlik değerinin yüksek olması nedeniyle çekirdek çapı değerleri tüm kaynak parametrelerinde IF 180-5754 Al alaşımı kaynak bağlantılarına göre daha düşük elde edilmiştir. Her iki malzeme çiftinde de kaynak akımı, kaynak süresi ve elektrod kuvveti artışıyla birlikte çekirdek çapı da artmıştır. Kaynak akımı ve elektrod kuvvetinin çekirdek çapı değişimi üzerinde daha önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.



**Şekil 3.** 5754 Al alaşımının ve Ti-Gr2 alaşımının IF 180 çelik alaşımı ile farklı (a) kaynak akımlarında, (b) kaynak sürelerinde ve (c) elektrod kuvvetlerinde elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilmesi durumundaki çekirdek çapları (Nugget diameters of the 5754 Al alloy and Ti-Gr2 alloy welded with IF 180 steel alloy under different (a) welding currents, (b) welding times and (c) electrode forces)

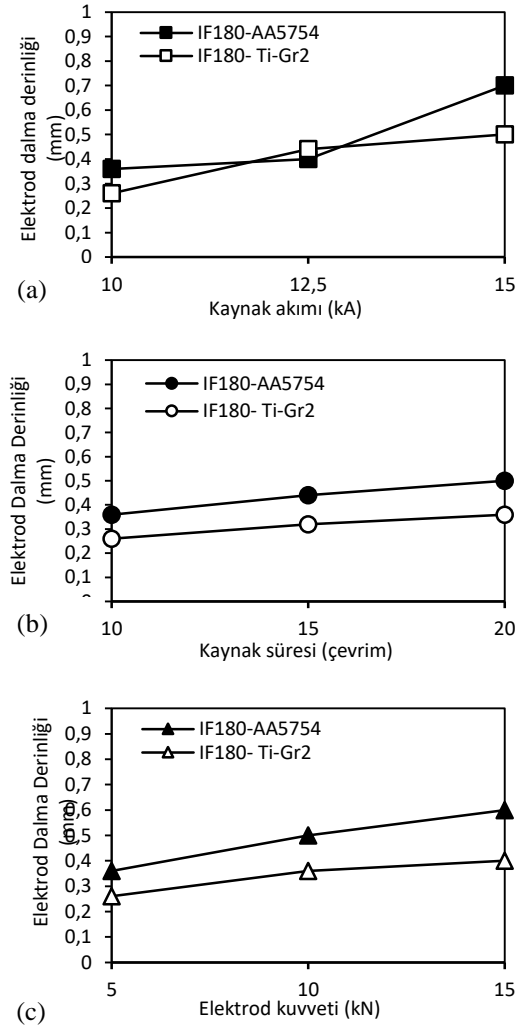
Şekil 4'te görüldüğü üzere en büyük elektrod dalma derinliği IF 180 - AA5754 malzeme çiftinde 15 kA kaynak akımı, 5 kN elektrod kuvveti ve 10 çevrim kaynak zamanında 0,7 mm elektrod dalma derinliği olarak ölçülmüştür. En küçük elektrod dalma derinliği ise IF 180 - Ti-Gr2 malzeme çiftinde, 10 kA kaynak akımı, 5 kN elektrod kuvveti ve 10 çevrim kaynak zamanında 0,26 mm elektrod dalma derinliği olarak ölçülmüştür. Kaynak süresi ve elektrod kuvveti artışıyla birlikte elektrod dalma derinliği IF 180 – AA5754 ve IF 180 - Ti-Gr2 her iki malzeme çiftinde birbirine paralel bir artış meydana gelmiştir. Ancak kaynak akımının artması IF-180 – AA5754 malzeme çiftini daha fazla etkilemiştir ve özellikle 15 kA kaynak akımında ani bir artış meydana gelmiştir. Bunun en önemli sebebi Al alaşımının sıcaklık artışıyla sünekliliğinin Ti alaşımına göre daha fazla artması olduğu düşünülmektedir. Literatürde kaynak akımı, kaynak süresi ve elektrod kuvveti artışına bağlı olarak çekirdek çapı ve elektrod dalma derinliği değişimi ile ilgili birçok çalışma mevcuttur. Bunlardan Durgut ve

Kaçar [20] yaptıkları çalışmada AISI 2205 çift fazlı paslanmaz çelik sacların nokta direnç kaynak kalitesine, kaynak zamanı ve akım şiddetinin etkisi araştırmıştır. Kaynak akımı ve süresi ile birlikte çekirdek çapının da arttığı görülmüştür. Hayat ve Demir [21] yaptıkları çalışmada DP 600 çelik sacların nokta direnç kaynağında kaynak süresi arttıkça elektrod dalma derinliğinin de arttığını 30 çevrimden sonra da azalmaya başladığını göstermişlerdir.

### 3.2.Sertlik Testleri (Hardness Tests)

Bu çalışmada, farklı kaynak akımları, çevrim ve elektrod kuvvetlerinde kaynağı gerçekleştirilen IF 180 çelik alaşımı ve 5754 Al alaşımı malzeme çifti için noktasal birleştirmelerinin sertlik dağılımı Şekil 5'te verilmiştir. IF 180 çelik alaşımı ve Ti-Gr2 malzeme çifti için de Şekil 6'da verilmiştir.

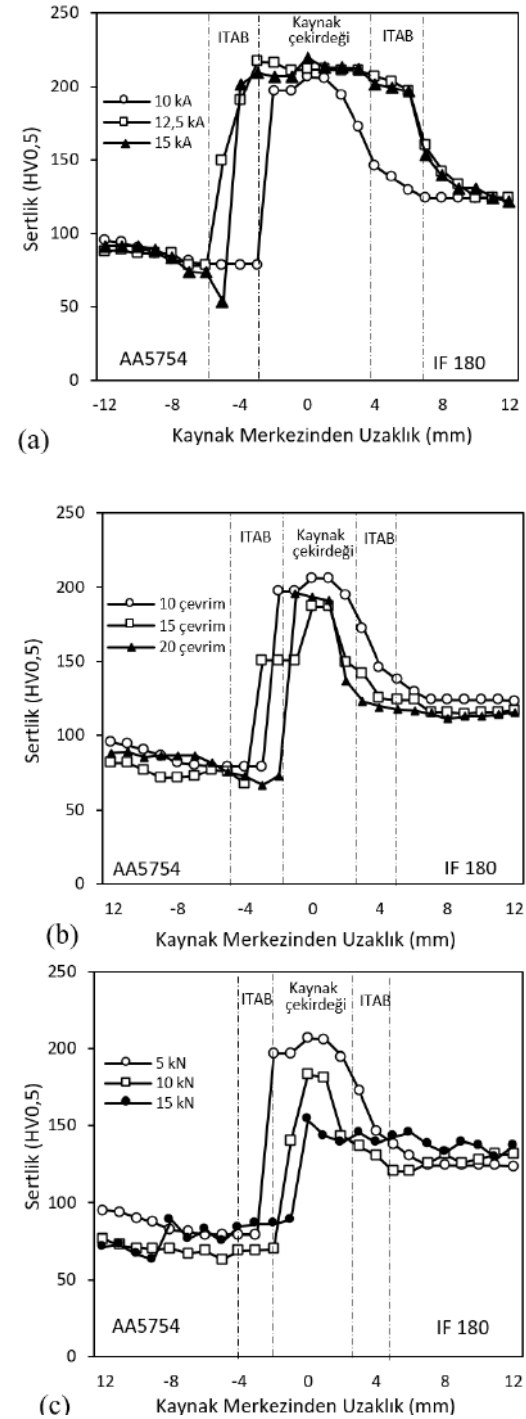




**Şekil 4.** 5754 Al alaşımının ve Ti-Gr2 alaşımının IF 180 çelik alaşımı ile farklı (a) kaynak akımlarında, (b) kaynak sürelerinde ve (c) elektrod kuvvetlerinde elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilmesi durumundaki elektrod dalma derinliği (Electrode immersion depth of the 5754 Al alloy and Ti-Gr2 alloy spot welded with IF 180 steel alloy under different (a) welding currents, (b) welding times and (c) electrode forces)

Şekil 5 (a)'da IF 180 ve AA5754 malzeme çiftinin 10 kaynak çevrimi ve 5 kN elektrod kuvvetinde kaynak bölgesindeki (ITAB ve kaynak çekirdeği) sertlik değişimi kaynak akımı değişimine bağlı olarak verilmiştir. Alüminyum alaşımının esas metal bölgesindeki sertlik değerleri tüm numunelerde yaklaşık 90 HV civarında iken IF 180 tarafındaki esas metal bölgesindeki sertlik değerleri 120 HV civarında elde edilmiştir. Kaynak merkezinde (kaynak çekirdeği) sertlik değerleri 12,5 kA ve 15 kA akımları için yaklaşık 215 HV civarında iken akımın 10 kA'ye düşmesiyle birlikte sertlik yaklaşık 195 HV değerine düşmüştür. kaynak çekirdeğinin ortalama sertlik değeri 5754 Al alaşımı esas metal bölgesine göre 2,3 kat ve IF 180 alaşımına göre 1,7 kat daha yüksektir. Literatürde, IF çeliklerinin kaynak çekirdeği bölgesindeki yüksek sertlik davranışı intermetalik faz çökeltilerinin yanısıra

plastik deformasyon ve hızlı soğuma sebebiyle dislokasyon yoğunluğunun artması olarak ifade edilmiştir [22, 23].



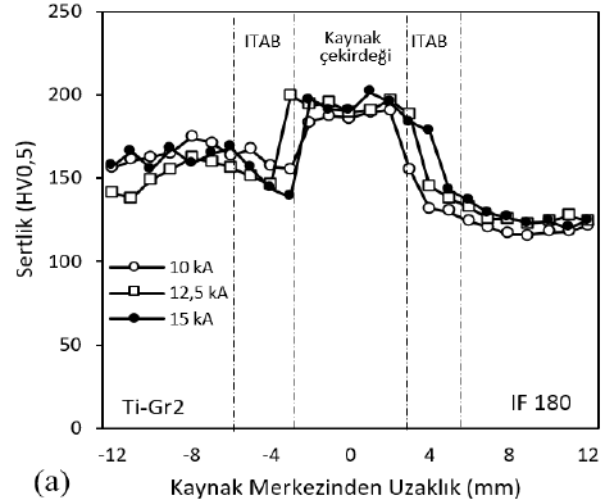
**Şekil 5.** 5754 Al alaşımının IF 180 çelik alaşımı ile farklı (a) kaynak akımlarında, (b) kaynak süresi ve (c) elektrod kuvvetlerinde elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilmesi durumundaki sertlik profili (Hardness profile of the 5754 Al alloy spot welded with IF 180 steel alloy under different (a) welding currents, (b) welding times and (c) electrode forces)

Ergiyen bölgenin bitiminden başlayarak içeriye doğru uzanan ve ısı etkisiyle mikro ve makro yapısında önemli değişikliklerin meydana geldiği bölge olarak adlandırılan ısı tesiri altında kalan bölgede (ITAB) IF 180 tarafında belirgin bir sertlik düşüşü sergilemezken 5754 tarafında özellikle 15 kA akım değerinde 53 HV değerine düşmüştür. ITAB'daki düşüş, literatürde yapılan benzer çalışmalarda da 5000 serisi alüminyum alaşımlarında görülen bir davranıştır [24, 25]. IF180 çeliklerinde ise ITAB'da malzemede tane irileşmesine bağlı olarak daha yavaş bir düşüş meydana gelmiştir [22]. Kaynak çekirdeğinin sertlik profili genişliği açısından numuneler değerlendirildiğinde kaynak akımı artışıyla birlikte genel olarak yüksek sertliğe sahip bölgenin genişliği de artmıştır.

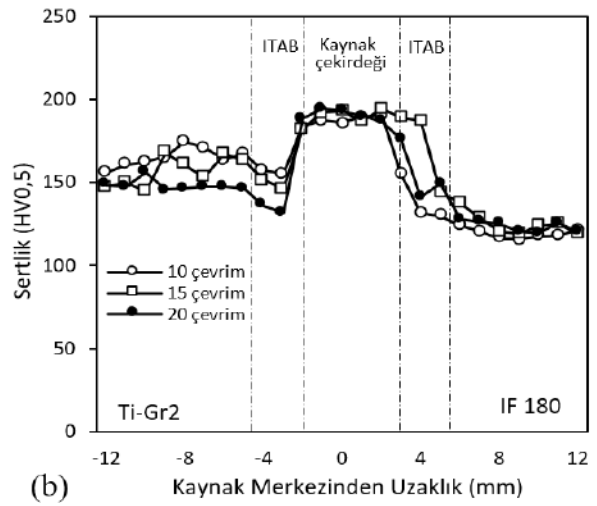
Elektrik direnç nokta kaynağı ile 10 kA kaynak akımında ve 5 kN elektrod kuvvetinde kaynak edilen IF 180 çeliği ve 5754 Al alaşımının kaynak çevrim sayısına bağlı olarak sertlik değişim profili Şekil 5 (b)'de verilmiştir. Kaynak çekirdeğinde elde edilen maksimum sertlik değeri 10 çevrim'de 216 HV ve minimum sertlik değeri 15 çevrim'de 193 HV'dir. Çevrim sayısının en yüksek olduğu 20 çevrim'de ise sertlik 197 HV olarak ölçülmüştür. Kaynak çekirdeğinin sertlik profili genişliği açısından numuneler değerlendirildiğinde kaynak akımı değişiminin kıyaslandığı Şekil 5 (a)'ya göre daha dar bir bölgeyi kapsamaktadır. Çevrim sayısı ile sertlik arasında doğrudan bir bağlantı bulunamamıştır. Benzer sonuçlar literatürde de elde edilmiştir [26]. Al alaşımı ve IF 180 tarafındaki ITAB'daki sertlik değişimi 20 çevrim'de 10 ve 15 çevrime kıyasla daha düşük değerlerde ve daha geniş bir alanda yer almıştır.

Şekil 5 (c)'de IF 180 çeliği ve 5754 Al alaşımının 10 kA kaynak akımında ve 10 kaynak çevriminde, elektrod kuvveti değişimine bağlı olarak kaynak bölgesindeki sertlik değişimi grafiği verilmiştir. Elektrod kuvvetinin sertlik üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu kaynak çekirdeğinde kuvvet artışıyla sertlik değerinin %25 (5 kN ve 15 kN karşılaştırıldığında) düştüğü görülmüştür. Literatürde de farklı çelik alaşımları ile yapılan çalışmalarda benzer sonuçlar elde edilmiştir [27].

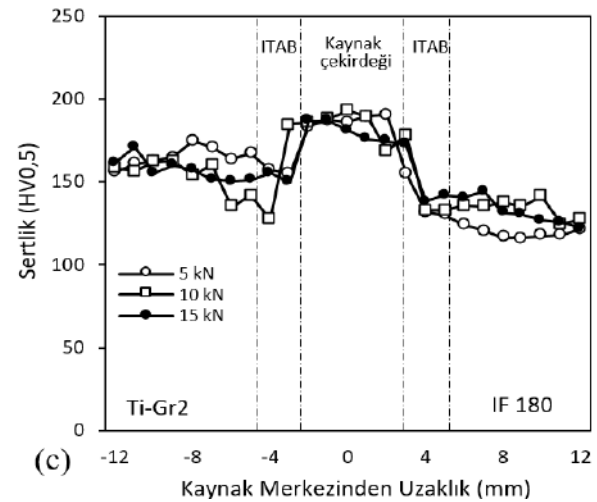
IF 180 çeliğinin Ti-Gr2 ile farklı kaynak akımlarında, 10 kaynak çevrimi ve 5 kN elektrod kuvvetinde elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilmesi durumundaki sertlik değişimi Şekil 6 (a)'da verilmiştir. Kaynak çekirdeğinde akıma bağlı olarak sertlikte önemli bir farklılık görülmemekle birlikte, maksimum sertlik değerleri 12,5 ve 15 kA için yaklaşık 201 HV civarında, 10 kA akım değeri için ise sertlik yaklaşık 193 HV olarak elde edilmiştir. Kaynak çekirdeğinin sertlik profili genişliği 10 kA'de daha düşük olmak üzere daha yüksek akım değerlerinde genişlik de artmıştır. ITAB'da, Ti-Gr2 tarafında esas metale yakın bölgede 15 kA'de daha belirgin olmak üzere sertlikte düşüş meydana gelmiştir. Genel olarak kaynak parametrelerinin (akım, çevrim ve elektrod kuvveti) IF 180 ve Ti-Gr2 sertliklerini önemli oranda etkilemediği tespit edilmiştir (Şekil 6).



(a)



(b)



(c)

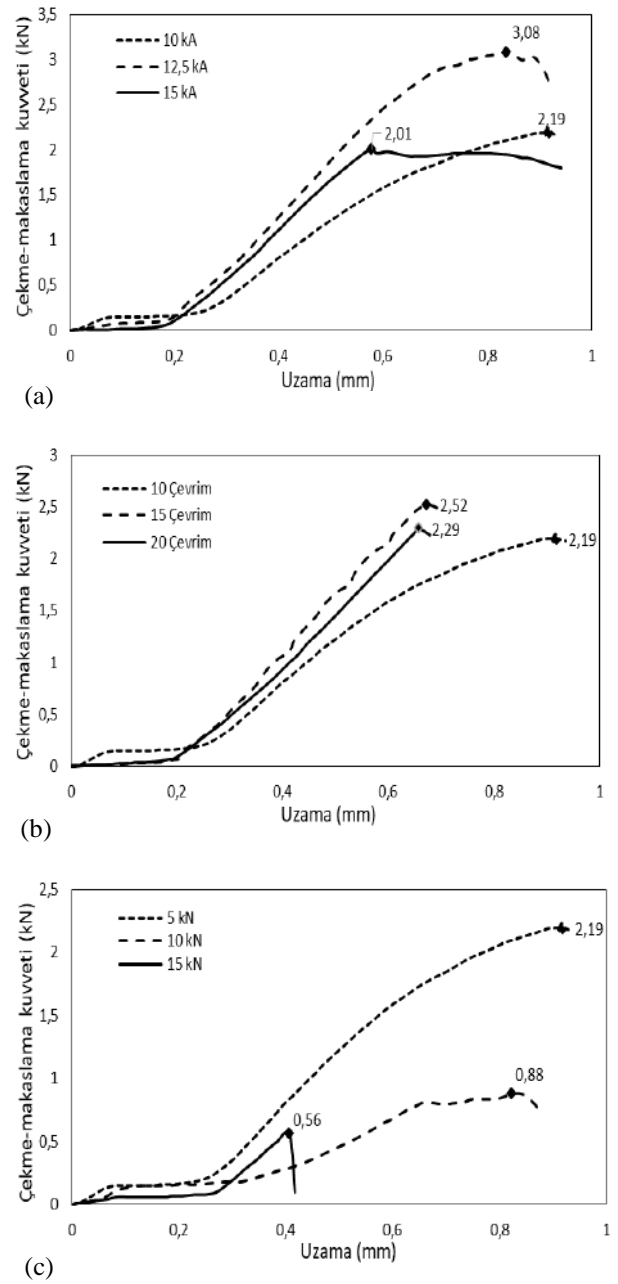
Şekil 6. Ti-Gr2 alaşımının IF 180 çelik alaşımı ile farklı (a) kaynak akımlarında, (b) kaynak süresi ve (c) elektrod kuvvetlerinde elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilmesi durumundaki sertlik profili (Hardness profile of the Ti-Gr2 alloy spot welded with IF 180 steel alloy under different (a) welding currents, (b) welding times and (c) electrode forces)

### 3.2. Çekme-Makaslama Testleri (Tensile-shear tests)

Farklı kaynak akımları, süreleri ve elektrod kuvvetlerinde elektrik direnç nokta kaynağı gerçekleştirilen IF 180 çelik alaşımı ile 5754 Al alaşımı için çekme-makaslama testi sonuçları Şekil 7'de verilmiştir. IF 180 çelik alaşımı ile Ti-Gr2 alaşımı için de Şekil 8'de verilmiştir.

Şekil 7 (a)'da IF 180 ile 5754 Al alaşımının 5 kN elektrod kuvveti, 10 kaynak çevrim sayısında ve farklı kaynak akımlarında çekme-makaslama testi sonuçları karşılaştırılmıştır. Buna göre en yüksek çekme kuvveti 3,08 kN değerinde 12,5 kA kaynak akımında ve en düşük olanı da 2,01 kN değerinde 15 kA'de ölçülmüştür. Çekme mukavemetinin kaynak akımı artışıyla ilk etapta artması ve 15 kA'de tekrar düşmesi kaynak ara yüzeyinde oluşan intermetalik fazın etkisiyle olduğu düşünülmektedir [28]. Sabit kaynak akımı (10 kA) ve elektrod kuvvetinde (5 kN), kaynak süresine bağlı olarak elektrod kuvveti değişimi grafiği Şekil 7 (b)'de verilmiştir. En yüksek çekme kuvveti 15 çevrim sayısında elde edilmiştir. Kaynak süresinin daha da artmasıyla birlikte kuvvette azalma meydana gelmiştir. Maksimum kuvvette meydana gelen uzamalar açısından 10 kaynak çevriminde en yüksek uzama meydana gelmiştir. Çevrim sayısı arttıkça uzama miktarı da azalmıştır. Farklı elektrod kuvvetlerinde sabit kaynak akımı ve çevriminde yapılan kaynak bağlantılarının çekme-makaslama testi sonuçları Şekil 7 (c)'de verilmiştir. Elektrod kuvveti artışıyla birlikte çekme kuvvetinde ve maksimum çekmedeki uzama miktarında önemli oranda azalma meydana gelmiştir. Elektrod kuvvetinin 5 kN'dan 15 kN'a çıkması durumunda çekme kuvvetinde % 74 düşüş, maksimum çekmedeki uzama miktarında %54 düşüş ölçülmüştür. Şekil 5(c)'de verilen sertlik sonuçlarıyla ilişkilendirildiğinde elektrod kuvveti artışıyla birlikte sertlik değeri de çekme kuvvetiyle paralel olarak azalmıştır. Elektrod kuvvetinin belirli bir değeri aşmasıyla sacların kaynak bölgesinde (özellikle Al alaşımı tarafında) daha fazla deformasyon ve bölgesel incelmeyle birlikte çentik etkisi oluşur [29, 30]. Bu durum çekme kuvvetinin düşmesine sebep olur.

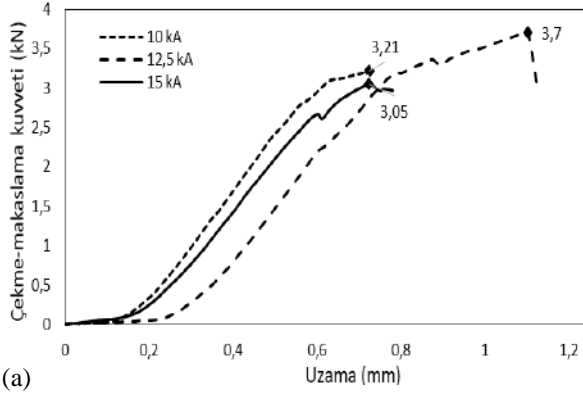
IF 180 çelik alaşımının Ti-Gr2 alaşımı ile 5 kN elektrod kuvveti ve 10 kaynak çevrimi süresince farklı kaynak akımlarında yapılan elektrik direnç nokta kaynağı işlemi sonucunda numunelerin çekme makaslama testi sonuçları Şekil 8 (a)'da verilmiştir. Kaynak akımının 12,5 kA olduğu durumda çekme kuvveti (3,7 kN) en yüksek değerini almıştır. Akım değerinin 15 kA'e yükselmesi çekme kuvvetini % 17,5 oranında düşürmüştür. Kaynak akımı artışıyla birlikte kaynak bölgesindeki ısı miktarı ve dolayısıyla nüfuziyet artar. Ancak çok yüksek kaynak akımlarında kaynak ara yüzeyinde Ti alaşımı ve çelik alaşımı arasında TiFe intermetalik faz oluşumu da hız kazanır [31]. Şekil 6 (a)'da sertlik değerlerindeki artış da bunu desteklemektedir.



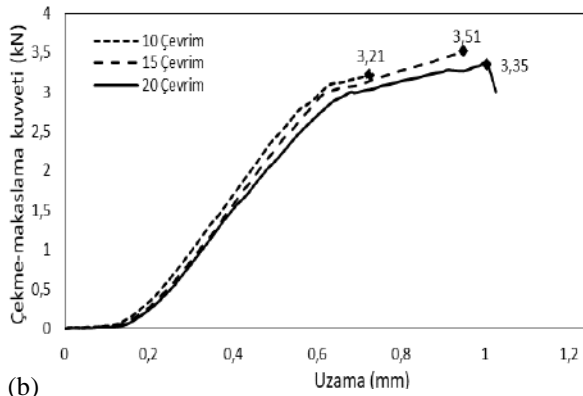
**Şekil 7.** 5754 Al alaşımının IF 180 çelik alaşımı ile farklı (a) kaynak akımlarında, (b) kaynak çevrimi ve (c) elektrod kuvvetlerinde elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilmesi durumundaki çekme-makaslama testi sonuçları (Tensile-shear test results of the 5754 Al alloy spot welded with IF 180 steel alloy under different (a) welding currents, (b) welding times and (c) electrode forces)

Elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilen IF 180 çelik alaşımı ve Ti-Gr2 alaşımında kaynak çevrim sayısının çekme-makaslama testi sonuçlarına etkisi Şekil 8 (b)'de verilmiştir. Kaynak akımı 10 kA ve elektrod kuvveti 5 kN'da sabit tutulmuştur. Çevrim sayısındaki artış ile birlikte çekme kuvvetinde elde edilen değişim kaynak akımı değişimi ile benzer gidişat sergilemiştir (Şekil 8 (a)). Her üç kaynak çevrim sayısı için elde edilen çekme

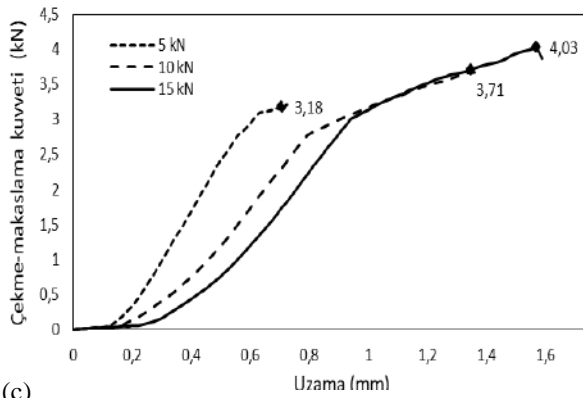
kuvveti değerleri arasında önemli bir farklılık görülmemiştir. En yüksek çekme kuvveti 15 çevrimde ve en düşük çekme kuvveti 10 çevrimde % 8'lik bir farkla elde edilmiştir.



(a)



(b)

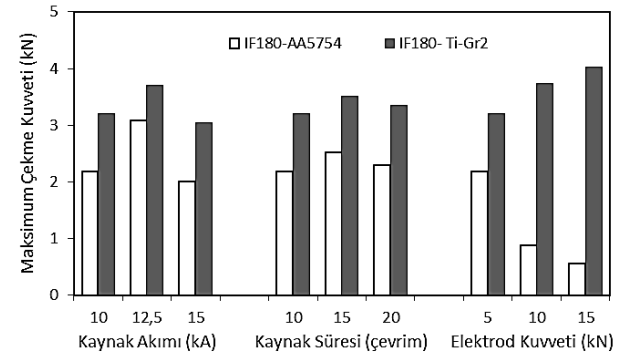


(c)

**Şekil 8.** Ti-Gr2 alaşımlarının IF 180 çelik alaşımı ile farklı (a) kaynak akımlarında, (b) kaynak çevrimi ve (c) elektrod kuvvetlerinde elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilmesi durumundaki çekme-makaslama testi sonuçları (Tensile-shear test results of the Ti-Gr2 alloy spot welded with IF 180 steel alloy under different (a) welding currents, (b) welding times and (c) electrode forces)

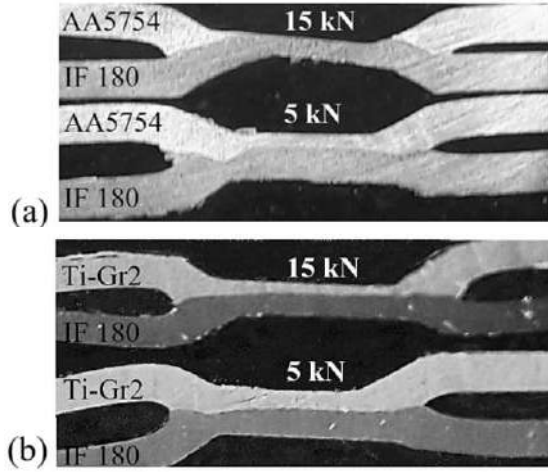
Elektrod kuvvetinin çekme kuvveti üzerindeki etkisi sabit kaynak akımı ve çevriminde Şekil 8 (c)'de verilmiştir. IF 180 çeliğinin Al alaşımı ile kaynağında sergilemiş olduğu davranışın tam tersi, IF 180 çeliği Ti alaşımı ile kaynağında elektrod kuvvetinin artmasıyla birlikte çekme kuvveti de artmıştır. Ti alaşımının Al alaşımına kıyasla daha yüksek sertliğe sahip olması (%75 daha yüksek) ve elektrodun yüksek basma kuvvetlerine karşı daha fazla direnç sergilemesiyle birlikte kaynak bölgesinde daha az kesit incelmeleri ve çentik oluşumunun minimum düzeyde kalması bu davranışı açıklamaktadır. Yeterli kaynak akımı ve sürelerinde, elektrod kuvveti artışıyla çekme kuvvetinin artışı kaynak bölgesinde daha geniş bölgede bir nüfuziyet sağlamıştır.

Şekil 7 ve Şekil 8'de verilen çekme-makaslama test sonuçlarına göre maksimum çekme kuvveti IF 180 – 5754 Al ve IF180 - Ti-Gr2 alaşımı çiftleri için Şekil 9'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Kaynak akımı ve kaynak süresine bağlı olarak IF 180 – 5754 Al ve IF180 - Ti-Gr2 kaynak çiftlerinin her ikisinde de benzer değişim görülürken, elektrod kuvvetinin tam tersi etkisi olmuştur. IF180 - Ti-Gr2 alaşımı çiftinde elektrod kuvvetinin artması maksimum çekme kuvvetini de artırırken, IF 180 – 5754 Al alaşımı çiftinde düşüş meydana gelmiştir. Al alaşımının sertlik değerinin düşük olması ve uygulanan elektrod kuvveti artışı ile birlikte bölgesel çentik etkisi ve kaynak noktasında inceltme meydana gelmesi bu davranışın sebebi olarak açıklanabilir.



**Şekil 9.** IF 180 – 5754 Al ve IF180 - Ti-Gr2 alaşımı kaynak çiftlerinde kaynak parametrelerinin maksimum çekme kuvveti üzerindeki etkisi (Effect of welding parameters on the maximum tensile force of IF 180 - 5754 Al and IF180 - Ti-Gr2 alloy welding pairs)

Şekil 10'da IF 180 çelik alaşımının AA5754 ve Ti-Gr2 sacları ile 5 kN ve 15 kN elektrod kuvvetlerindeki noktasal kaynağı sonucunda meydana gelen kaynak bölgesi kesit incelmeleri fotoğrafından da bu durum net olarak görülebilmektedir. 15 kN'da alüminyum alaşımı sacın kaynak çekirdeğinde sıcaklığın ve basmanın etkisiyle mikron boyutlara kadar incelendiğini, titanyum alaşımı sacın ise bundan çok fazla etkilenmediğini görmek mümkündür.



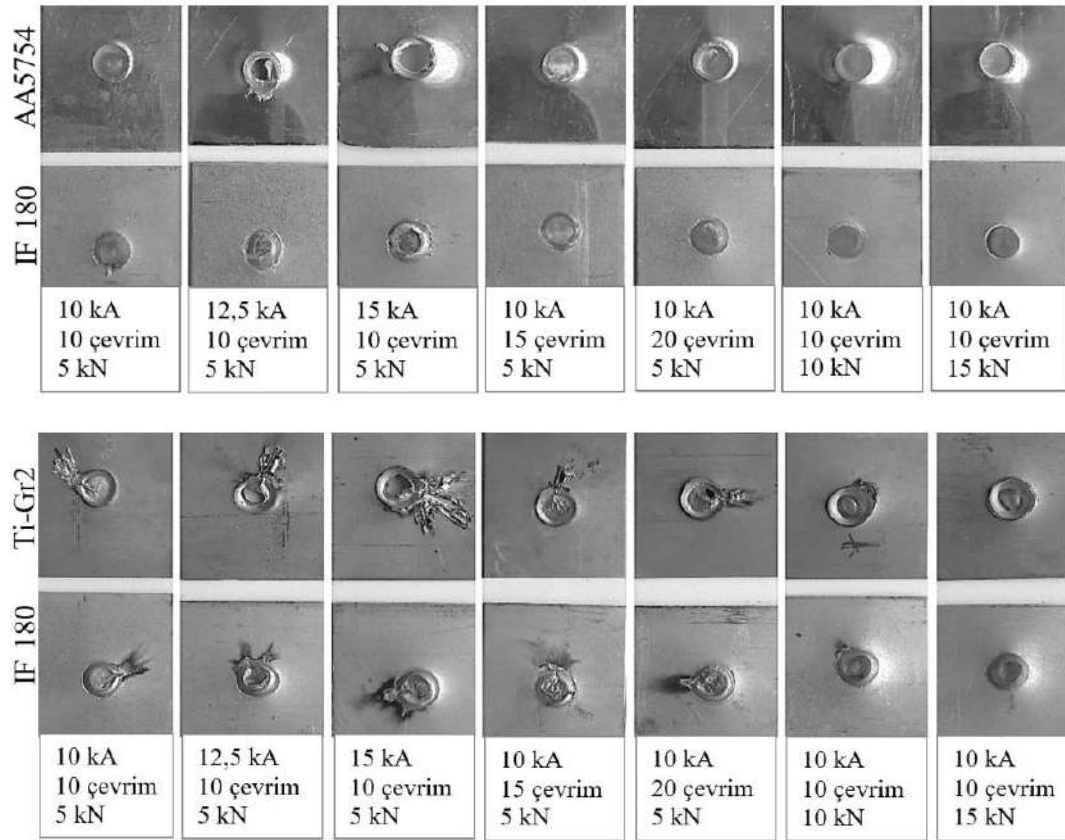
**Şekil 10.** 5 kN ve 15 kN elektrod kuvvetinde kaynak edilen (a) IF 180 – 5754 Al ve (b) IF 180 – Ti-Gr2 kaynak çiftinde kaynak çekirdeğinde meydana gelen incelme (Nugget region thinning of (a) IF 180 - 5754 Al and (b) IF 180 - Ti-Gr2 welding pairs under 5 kN and 15 kN electrode force)

Bu çalışmada çekme-makaslama testi sonucunda numunelerde iki tip kırılma görülmüştür. Hem IF 180 – AA5754 malzeme çiftinde hem de IF 180 – Ti-Gr2

malzeme çiftinde farklı parametrelerde kaynak edilen numunelerde sadece yüksek akım değerlerinde (12,5 kA ve 15 kA) birleştirilen numunelerde kopmanın düğme tipi kopma şeklinde ve ITAB’da meydana geldiği görülmüştür (Şekil 11). Diğer numunelerin hepsinde ayrılma tipi kopma meydana gelmiştir. Buradan da kaynak akımının gerekli nüfuziyetin sağlanması açısından kritik öneme sahip olduğu ve çekme-makaslama dayanımları da göz önünde bulundurularak optimum değerde seçilmesi gerektiği görülmüştür. Kaynak çevrim sayısı ve elektrod kuvvetinin akımın düşük olması durumunda kopma tipini etkilemediği ortaya çıkmıştır. Bunun yanında Şekil 11(b)’de IF 180 çeliğinin Ti-Gr2 alaşımı ile kaynak edilmesi durumunda kaynak ara yüzeyinde belirgin sıçramaların meydana geldiği, kaynak akımı ve kaynak süresindeki artış ile birlikte bu sıçramaların arttığı, elektrod kuvveti artışıyla da azaldığı görülmüştür.

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, elektrik direnç nokta kaynağı ile derin çekilebilir IF 180 çelik alaşımı sacların 5754 Al alaşımı ve Ti-Gr2 alaşımı saclar ile farklı kaynak parametrelerinde kaynak edilmesi ve mekanik özelliklerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi ele



**Şekil 11.** Farklı parametrelerde elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilen (a) IF 180 – AA5754 ve (b) IF 180 – Ti-Gr2 kaynak çiftlerinde çekme-makaslama testi sonrası kopma görüntüleri (Fractured specimen images after tensile shear test of (a) IF 180 – AA5754 and (b) IF 180 – Ti-Gr2 welding pairs spot welded under different parameters)

alınmıştır. Yapılan testler sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Kaynak akımı, kaynak süresi ve elektrod kuvveti artışına bağlı olarak kaynak çekirdek çapı IF180-5754 Al alaşımı çiftinde daha belirgin olmak üzere IF180 - Ti-Gr2 çiftinde de artış meydana gelmiştir. Kaynak akımı ve elektrod kuvvetinin çekirdek çapı üzerinde kaynak süresine göre daha fazla etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.

- Sertlik testleri sonucunda, her iki IF180-5754 Al ve IF180 - Ti-Gr2 alaşımı çiftinde de en yüksek sertlik değerleri kaynak çekirdeğinde ölçülmüştür. IF180-5754 Al alaşımı çiftinde kaynak parametrelerine bağlı olarak kaynak çekirdeğindeki sertlik profili büyük oranda değişim sergilemiştir.

- Çekme-makaslama testleri sonuçlarına göre IF180-5754 Al alaşımı çiftinde kaynak parametrelerine bağlı olarak maksimum çekme kuvveti ve uzama miktarları kaynak parametreleri değişiminden IF180 - Ti-Gr2 alaşımı çiftine göre daha fazla etkilenmiştir.

- IF180- Ti-Gr2 alaşımı çiftinde elektrod kuvvetinin artması maksimum çekme kuvvetini de arttırırken, IF 180 – 5754 Al alaşımı çiftinde düşüş meydana gelmiştir. Kaynak kesiti incelendiğinde alüminyum alaşımı tarafında sıcaklık ve basıncın etkisiyle önemli miktarda incelmeye meydana geldiği görülmüştür. Bu durum çentik etkisi ve kaynak bağlantı mukavemetinde azalmaya sebep olmuştur.

- IF 180 – AA5754 ve IF 180 – Ti-Gr2 her iki kaynak çiftinde farklı parametrelerde kaynak edilen numunelerde sadece yüksek akım değerlerinde (12,5 kA ve 15 kA) birleştirilen numunelerde kopmanın düğme tipi kopma şeklinde olduğu, düşük kaynak akımında (10 kA) kaynak edilen diğer tüm numunelerde ise ayrılma tipi kopma meydana geldiği görülmüştür.

- IF 180 – Ti-Gr2 kaynak çiftinde kaynak akımı ve süresinin artması ile birlikte kaynak ara yüzeyinde sıçramanın arttığı, elektrod kuvveti artışı ile birlikte kaynak sıçramasının azaldığı tespit edilmiştir.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Wang S.Q., Patel V.K., Bhole S.D., Wenc G.D. and Chen D.L., "Microstructure and mechanical properties of ultrasonic spot welded Al/Ti alloy joints", *Materials and Design*, 78: 33–41, (2015)
- [2] Kaya Y. and Kahraman N., "Titanium sacların nokta direnç kaynağı ile birleştirilmesinde kaynak parametrelerinin çekirdek oluşumuna etkisi", *Journal of Polytechnic*, 14: 263-270, (2011)
- [3] Han L., Thornton M., Li D. and Shergold M., "Effect of governing metal thickness and stack orientation on weld

quality and mechanical behaviour of resistance spot welding of AA5754 aluminium", *Materials and Design*, 32: 2107–2114, (2011)

- [4] Che Y., Wang L., Sun D., Li H. and Geng W., "Microstructures and Mechanical Properties of Resistance Spot-Welded Steel/Aluminum Alloy Joints with Process", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27: 5532–5544, (2018)
- [5] Kianersi D., Mostafaei A. and Amadeh A.A., "Resistance spot welding joints of AISI 316L austenitic stainless steel sheets: Phase transformations, mechanical properties and microstructure characterizations", *Materials and Design*, 61: 251–263, (2014)
- [6] Pereira A.M., Ferreira J.M., Loureiro A., Costa J.D.M. and Bártolo P.J., "Effect of process parameters on the strength of resistance spot welds in 6082-T6 aluminium alloy", *Materials and Design*, 31: 2454–2463, (2010)
- [7] Vural M. and Akkus A., "On the resistance spot weldability of galvanized interstitial free steel sheets with austenitic stainless steel sheets", *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154: 1-6, (2004)
- [8] Santos A.P.R., Mota T.C., Segundo H.V.G., Almeida L.H., Araújo L.S. and Rocha A.C., "Texture, microstructure and anisotropic properties of IF-steels with different additions of titanium, niobium and phosphorus", *Journal of Materials Research and Technology*, 7: 203-402, (2018)
- [9] Hoile S., "Processing and properties of mild interstitial free steels", *Materials Science and Technology*, 16: 1079-1093, (2000)
- [10] Campos C.A., Guerrero M., Colás R. and Garza R., "Weldability of Galvannealed Interstitial Free Steel", *ISIJ International*, 42: 876-881, (2002)
- [11] ArcelorMittal Automotive Worldwide. "High strength IF steels", <https://automotive.arcelormittal.com/europe/products/HYTSS/IF/EN>, (03.05.2018)
- [12] Hasanbaşoğlu A., "Direnç kaynak yöntemi ile birleştirilen IF çelikleri ile ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyetlerinin belirlenmesi", *Yüksek Lisans Tezi*, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2005)
- [13] Coşkun M.H., "Otomotiv endüstrisinde kullanılan IF 7114 ve DP 600 çelik sacların direnç nokta kaynağı (RSW) ve sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) yöntemleri ile birleştirilmesi", *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi, (2009)
- [14] Kanga J., RAO H.M., Sigler D.R. and Carlson B.E., "Tensile and Fatigue Behaviour of AA6022-T4 to IF Steel Resistance Spot Welds", *Procedia Structural Integrity*, 5: 1425-1432, (2017)
- [15] Sun X., Stephens E.V., Khaleel M.A., Shao H. and Kimchi M., "Resistance Spot Welding of Aluminum Alloy to Steel with Transition Material-From Process to Performance", *Welding Journal*, 83: 188-195, (2004)
- [16] Satonaka S., Iwamoto C., Qui R. and Fujioka T., "Trends and new applications of spot welding for aluminium alloy sheets", *Welding International*, 20: 858-864, (2006)
- [17] Qiu R., Iwamoto C. and Satonaka S., "Interfacial Microstructure and Strength of Steel/Al Alloy Joints Welded by RSW with Cover Plate", *Journal of Materials Processing Technology*, 209: 4186-4193, (2009)
- [18] Kim J.-S., Kim I.-J. and Kim Y.-G., "Optimization of welding current waveform for dissimilar material with



- DP590 and Al5052 by Delta-spot welding process”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30: 2713–2721, (2016)
- [19] Zhang W., Sun D., Han L. and Li Y., “Optimised design of electrode morphology for novel dissimilar resistance spot welding of aluminium alloy and galvanised high strength steel”, *Materials and Design*, 85: 461–470, (2015)
- [20] Durgut E. and Kaçar R., “Dubleks paslanmaz çeliklerin nokta direnç kaynağına akım şiddeti ve kaynak zamanının etkisi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26: 341-348, (2011)
- [21] Hayat F. and Demir, B., “Ticari DP600 çelik sacı NDK birleştirmelerinde kaynak süresinin dalma derinliği ve dayanıma etkisi”, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye
- [22] Rao S.S., Chhibber R., Arora K.S. and Shome M., “Resistance spot welding of galvanized high strength interstitial free steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, 246: 252-261, (2017)
- [23] Chakraborty G., Pal T.K. and Shome M., “Microstructure development in resistance spot welded galvanized IF steel sheet”, *Materials Science and Technology*, 27: 382-386, (2011)
- [24] Chen J., Yuan X., Hu Z., Sun C., Zhang Y. and Zhang Y., “Microstructure and mechanical properties of resistance-spot-welded joints for A5052 aluminum alloy and DP 600 steel”, *Materials Characterization*, 120: 45-52, (2016)
- [25] Manladan S.M., Yusof F., Ramesh S., Fadzil M., Luo Z. and Ao S., “A review on resistance spot welding of aluminum alloys”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90: 605-634, (2016)
- [26] Hayat F., Demir B., Acarer M. and Aslanlar S., “Effect of weld time and weld current on the mechanical properties of resistance spot welded IF (DIN EN 10130-1999) steel”, *Kovove Materialy*, 47: 11-17, (2009)
- [27] Zhou K. and Cai L., “Study on effect of electrode force on resistance spot welding process”, *Journal of Applied Physics*, 116: 1-7, (2014)
- [28] Cui L., Qiub R., Hou L.L., Shen Z. and Li Q., “Resistance spot welding between steel and aluminum alloy.” *5th International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering*, Shenzhen, China, September 19-20, (2015)
- [29] Safari M., Mostaan H., Yadegari Kh. H. and Asgari D., “Effects of process parameters on tensile-shear strength and failure mode of resistance spot welds of AISI 201 stainless steel”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89: 1853–1863, (2017)
- [30] Zhang H., Qiu X., Bai Y., Xing F., Yu H. and Shi Y., “Resistance spot welding macro characteristics of the dissimilar thickness dual phase steels”, *Materials and Design*, 63: 151–158, (2014)
- [31] Satoh G., Lawrence Y. and Qiu Y.C., “Strength and microstructure of laser fusion-welded Ti–SS dissimilar material pair”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66: 469–479, (2013)



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Finite element analyzing of the effect of crack on mechanical behavior of honeycomb and re-entrant structures

*Çatlağın re-entrant ve balpeteği yapıların mekanik davranışlarına etkisinin sonlu eleman analizi*

*Yazar(lar) (Author(s)): Berkay ERGENE<sup>1</sup>, Bekir YALÇIN<sup>2</sup>*

*ORCID<sup>1</sup> : 0000-0001-6145-1970*

*ORCID<sup>2</sup> : 0000-0002-3784-7251*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Ergene B. And Yalçın B., “Finite element analyzing of the effect of crack on mechanical behavior of honeycomb and re-entrant structures”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1015-1025, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.534103

# Finite Element Analyzing of the Effect of Crack on Mechanical Behavior of Honeycomb and Reentrant Structures

## Highlights

- ❖ Regular honeycomb and re-entrant structures with rib thickness of 1mm, 1.5mm and 2mm were designed.
- ❖ The effect of presence of crack and crack propagation in these structures were investigated.
- ❖ Finite element analysis were examined by using Ansys Apdl.
- ❖ The effect of crack on stress intensity factor, stresses, strains and displacement were obtained.

## Graphical Abstract

The effect of crack on the mechanical behavior of honeycomb and reentrant structures was analyzed by using the finite element method. The results emphasize that the presence of crack influences the stress and displacements of cellular structures significantly.

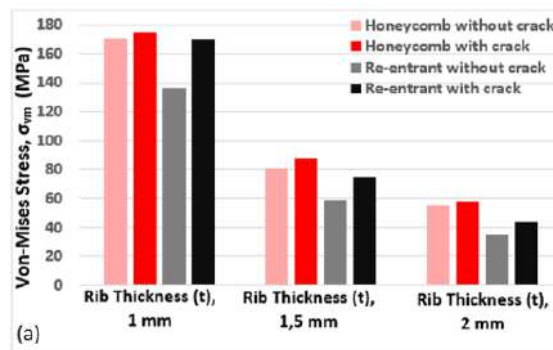


Figure. Equivalent stress ( $\sigma_{vm}$ ) results

## Aim

The effect of crack on stress, stress distribution and displacement of honeycomb and re-entrant structures were studied and its analyzed that in which cases the crack could advance or not.

## Design & Methodology

Honeycomb structure with positive Poisson's ratio and re-entrant structure with negative Poisson's ratio were designed and subsequently analyzed with finite element method.

## Originality

The effect of crack and crack propagation was examined in popular cellular structures which can be also additively manufactured.

## Findings

The stress intensity factor ( $K_I$ ) obtained from the FE analyses showed that increase in rib thickness provides decreasing the  $K_I$  values at crack tip. Increment in relative density increased the fracture toughness as well.

## Conclusion

In this study, the crack propagation is expected only at honeycomb structure with  $t$  of 1 mm. Because the value of the stress intensity factor is greater than the fracture toughness.

## Declaration of Ethical Standards

The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Finite Element Analyzing of the Effect of Crack on Mechanical Behavior of Honeycomb and Re-entrant Structures

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Berkay ERGENE<sup>1\*</sup>, Bekir YALÇIN<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Pamukkale University, Faculty of Technology, Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, Turkey

<sup>2</sup>Isparta Applied Sciences University, Technology Faculty, Mechanical Engineering Department, Türkiye

(Geliş/Received : 01.03.2019 ; Kabul/Accepted : 02.10.2019)

## ABSTRACT

Developments in technology require the new materials, lighter and more efficient structures and also new manufacturing methods. In this study, after doing researches about topology optimization, regular honeycomb and re-entrant structures; the regular honeycomb and re-entrant structures were designed, and then Ti-6Al-4V material was chosen for these structures in finite element (FE) analyzing. The three different rib thickness values ( $t$ ) of 1 mm, 1.5 mm and 2 mm were assigned for honeycomb and re-entrant structures in FE analyses. Also, the crack was created on the models, and then 2-D FE analyses were done for both cracked and un-cracked honeycomb and re-entrant structures under tensile forces through  $y$  axis. Afterwards, the effect of crack on stress intensity factor, stresses, strains and displacement were obtained and characterized the auxetic behavior of the regular honeycomb and re-entrant structures. Furthermore, increase in rib thickness decreases stress and strains for each structure. Moreover, re-entrant structures have negative Poisson's ratio due to their geometric properties and the notable effect of crack on the equivalent stress in re-entrant was emerged in comparison with honeycomb structure. As a result, the only possible fracture in honeycomb for thickness of 1 mm might be observed owing to stress intensity factor obtained from analyses bigger than fracture toughness of honeycomb structure.

**Keywords:** Auxetic behavior, crack, negative Poisson's ratio, stress intensity factor.

## Çatlağın Re-entrant ve Balpeteği Yapıların Mekanik Davranışlarına Etkisinin Sonlu Eleman Analizi

### ÖZ

Teknolojideki gelişmeler yeni malzemeler, daha hafif ve daha verimli yapıları ve ayrıca yeni üretim yöntemlerini gerektirmektedir. Bu çalışmada, topoloji optimizasyonu, düzenli balpeteği yapıları ve re-entrant yapılar hakkında araştırmalar yapıldıktan sonra düzenli balpeteği ve re-entrant yapılar tasarlanmış ve sonrasında Ti6Al4V malzeme, sonlu elemanlar analizinde kullanılmak üzere seçilmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinde balpeteği ve re-entrant yapılara 1 mm, 1,5 mm ve 2 mm olmak üzere üç farklı giriş kalınlığı atanmıştır. Ayrıca, modellerde çatlak oluşturulmuş ve sonrasında 2 boyutlu sonlu elemanlar analizleri  $y$  eksenini boyunca uygulanan çekme kuvvetleri altında hem çatlaklı hem çatlaksız balpeteği ve re-entrant yapılar için yapılmıştır. Daha sonra, çatlağın gerilme yığılma faktörü, gerilmeler, gerinimler ve yer değiştirmelere etkileri elde edilmiş ve düzenli balpeteği yapıların ve re-entrant yapıların ökzetik davranışı karakterize edilmiştir. Ayrıca, her bir yapı için giriş kalınlığındaki artış gerilme ve gerinimleri azaltmaktadır. Dahası, re-entrant yapılar geometrik özelliklerinden dolayı negatif poisson oranına sahiptirler ve çatlağın re-entrant yapıdaki eşdeğer gerilmeye etkisi balpeteği yapısına kıyasla dikkate değer bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Sonuç olarak, sadece 1mm giriş kalınlığına sahip balpeteği yapısında analizlerden elde edilen gerilme yığılma faktörünün balpeteği yapının kırılma tokluğundan büyük olmasından dolayı kırılma gözlemlenmesi beklenmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Ökzetik davranış, çatlak, negatif Poisson oranı, gerilme yığılma faktörü.

### 1. INTRODUCTION

Today, industrial firms are in competition to develop and manufacture specific products at a high level flexibility and quality, lighter, low cost and machining time. This competition reveals the new manufacturing method like additive manufacturing (AM) technologies and the new engineering materials and design like auxetic and foam structures for aircraft industry, automotive, medical, sports and leisure sectors.

Also, the first auxetic structure was introduced by Lakes [1] and these structures have potential applications such as sandwich panel cores, energy and sound damping, aerospace filler foams, radome frames, bioimplants, arterial prosthesis, composite tails, defense personal protective equipment, human wearing helmet, seat belts and safety harnesses etc. due to their unique properties such as energy absorption for crash and impact protection, and thermal transfer, excellent shear stiffness and strength, indentation resistance, high fracture toughness and low relative density [2-7]. Some of the

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : berkay\_ergene@hotmail.com

applications for auxetic materials were tabulated in Table 1.

**Table 1.** Some applications for auxetic materials [8].

Field	Existing and potential applications
Aerospace	Vanes for gas turbine engines, thermal protection, aircraft nose cones, wing panel, sounds and vibrations absorber, rivet.
Automotive	Bumper, cushion, thermal protection, sounds and vibrations that need shear resistant, fastener.
Biomedical	Bandage, wound pressure pad, dental floss, artificial blood vessel, artificial skin, drug release unit, ligament anchors, surgical implants, similar to that of bone characteristic.
Composite	Fiber reinforced for reducing the cracking between fiber and matrix.
Military	Helmet, bullet proof vest, knee pad, glove, protective wear having better impact property.
Sensor/actuators	Hydrophone, piezoelectric devices, various sensors having the low bulk modulus which make them more sensitive to hydrostatic pressure.
Textile	Fibers, functional fabric, color change straps

One of the new class of engineering materials is auxetic material, providing the further advantages [2-7]. Generally, when the tensile force is applied to conventional structure in x axis direction, the shrinkage in the perpendicular direction (y axis) occurs at the structure according to elasticity theory. On the contrary, the auxetic structure exhibits expanding in perpendicular direction when load is applied to the structure in horizontal direction (x axis). So, the expression of negative Poisson's ratio in the auxetic structure has been emerged [8].

It is known that many properties depend on the Poisson's ratio of the material from classical elasticity theory. So, the shear modulus (G) and the bulk modulus (K) are obtained with well-known Eq. (1 and 2).

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \tag{1}$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \tag{2}$$

Where, E and  $\nu$  are the Young's modulus and Poisson's ratio, respectively. According to continuum mechanics, K is named as bulk module which determines most materials resist a change in volume; G determines most materials resist a change in shape [8].

It can clearly be seen from Eq. (1) that when  $\nu$  approaches to  $-1$ , which is the limit for an isotropic material, the shear modulus will become infinitely. Also, when this tendency approaches to infinite extremes as  $\nu \rightarrow -1$ , the properties such as indentation resistance, thermal shock resistance, and fracture toughness have been improved. Thus, auxetic materials show certain enhanced properties because of their negative Poisson's ratio [9]. Eq. (3) is obtained by combining the Eq. (1 and 2), so the materials can be classified with respect of Poisson's ratio (Fig. 1).

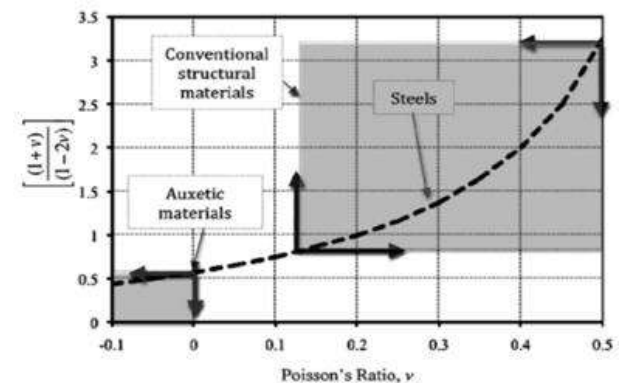
$$\left( \frac{1+\nu}{1-2\nu} \right) \geq \frac{3}{2} \tag{3}$$

According to Eq. (3), Poisson's ratio of conventional materials can't be less than 0.125. When the Poisson's ratio value is less than zero, the bulk modulus must be much less than shear modulus. Eq. (4) is obtained by combining the Eq. (1 and 2), and then Poisson's ratio can be obtained with Eq. (5) [8].

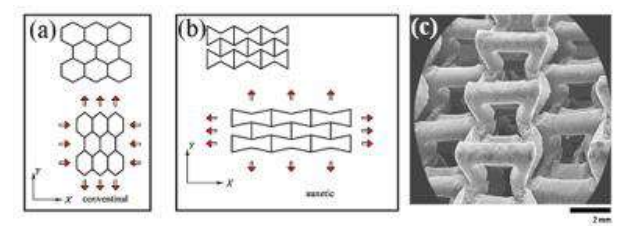
$$\left( \frac{1+\nu}{1-2\nu} \right) \geq \frac{3K}{2G} \tag{4}$$

$$\nu = \left( \frac{3K - 2G\nu}{2G - 6K} \right) \tag{5}$$

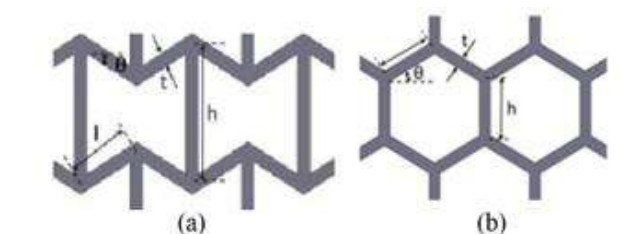
A material having negative Poisson's ratio is known as auxetic material, shown in Fig. 1. Generally, while conventional honeycomb structures expand with compression loads, re-entrant structures expand in all directions under the tensile loads, as shown in Fig. 2-a and 2-b. Therefore, the re-entrant auxetic structure will have a negative Poisson's ratio close to  $-1$ , and by this way, this structure gains the higher shear stiffness, strength, damping capacity, indentation resistance and fracture toughness.



**Figure 1.** The relation between the Poisson's ratio and the value of y axis for conventional and auxetic materials [8].



**Figure 2.** a) Non auxetic conventional honeycomb structure with positive Poisson's ratio, b) Re-entrant auxetic structure with negative Poisson's ratio [10], c) Re-entrant auxetic structure by 3D printing [11].



**Figure 3.** a) The dimensional definition for re-entrant auxetic structure, b) for conventional honeycomb structure

To understand the mechanical and fracture behavior of auxetic structure, its fracture mechanic has to be comprehended. In this context; the fracture mechanic formulas of any auxetic structure are as follows;

According to Maiti et al. [12]; works; stress intensity factor (KI) is,

$$\sigma = \left( \frac{(K_I)}{\sqrt{2\pi r}} \right) + \left( \frac{(K_I)}{\sqrt{2\pi r}} \right) \left( \frac{(r_{tip})}{2r} \right) \quad (6)$$

Where,  $K_I$  is stress intensity factor,  $r_{tip}$  is crack tip radius,  $r > r_{tip}$ . The force acting on each cell rib;

$$F = \int_{\frac{r_{tip}}{2}}^{\frac{r_{tip}+1}{2}} \left[ \frac{(K_I)}{\sqrt{2\pi r}} + \frac{(K_I)}{\sqrt{2\pi r}} \left( \frac{r_{tip}}{2} \right) \right] r_{tip} \partial r \quad (7)$$

In Eq. (7),  $t$  is the thickness of rib, Also, Green [13] developed an equation for cellular material semi-empirical, can be seen in Eq. (8).

$$\frac{K_{IC}}{\sigma_f \sqrt{\pi l}} = 0.28 \left( \frac{\rho}{\rho_s} \right)^{1.3} \quad (8)$$

Where,  $K_{IC}$  is the fracture toughness of cellular material,  $\sigma_f$  is the failure stress. It can be seen in Fig. 3 that  $l$  is the length of cell rib,  $\rho$  is the density of cellular material,  $\rho_s$  is the density of solid material [13]. Moreover, similar fracture toughness for the re-entrant auxetic structure was given in Eq. (9) [14];

$$\frac{K_{IC}}{\sigma_f \sqrt{\pi l}} = 0.1 \left( \sqrt{\frac{1 + \sin\left(\frac{\pi - \theta}{2}\right)}{1 + \cos^2 \theta}} \frac{\rho}{\rho_s} \right) \quad (9)$$

$K_{IC}$  is the fracture toughness for the re-entrant auxetic structure and  $\theta$  is the rib angle in Eq. (9). Moreover, the elasticity modulus changes with a change in the density of materials. Therefore, the density and elasticity modulus of auxetic structure were respectively calculated with Eq. (10 and 11) depending on the solid material. According to the accepted mechanic of auxetic structure, the density ( $\rho$ ) and elasticity modulus ( $E_y$ ) were followed [15, 16];

$$\left( \frac{\rho}{\rho_s} \right) = \frac{\frac{t}{l} \left( \frac{h}{l} + 2 \right)}{2 \cos \theta \left( \frac{h}{l} + \sin \theta \right)} \quad (10)$$

$$E_y = \left( \frac{\left( \frac{h}{l} - \cos \theta \right)}{2 \frac{h}{l} l^2 \sin^2 \theta + \frac{l^4}{2E_s t^4} + \frac{3l^2}{2G_s t^2} \sin^4 \theta} \right) \quad (11)$$

In Eq. (11),  $E_s$  and  $G_s$  are the elasticity and shear modulus of solid materials. It can be seen from Eq. (6-11) that the performance of auxetic structure could be largely affected by its geometric properties such as cellular

shape, rib thickness and angle, relative density together with cellular material and manufacturing method.

When the cell is the regular hexagons, then then  $\theta=30^\circ$  and  $h=l$ , the relative density is that [17];

$$\left( \frac{\rho}{\rho_s} \right) = \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{t}{l} \right) \quad (12)$$

Where,  $t$  is rib thickness,  $h$  and  $l$  are length of rib for cell of regular honeycomb in Eq. (12). The elasticity modulus of regular honeycomb through  $y$  axis ( $E_y$ ) can be obtained by the following Eq. (13).  $E_s$  is the elasticity modulus of solid material [17]. In addition, the fracture toughness ( $K_{IC}$ ) of regular honeycomb structure was expressed in Eq. (14).

$$\left( \frac{E_y}{E_s} \right) = \frac{4}{\sqrt{3}} \left( \frac{t}{l} \right)^3 \quad (13)$$

$$K_{IC} = 0.3 \sigma_f \sqrt{\pi l} \left( \frac{t}{l} \right)^2 \quad (14)$$

Ability to manufacture the various porous and auxetic structure designs from different materials with AM methods have been investigated in the literature. For example, any auxetic structure was designed with the following topology optimization steps: the determining the forces exposed to structure, the calculation of effective structure properties, converge of structure optimization, the determining the structure shape sensitive to forces and optimization the structure [18].

In new one [19], plastic analyses on re-entrant and non-entrant thin walled steel honeycombs structure were carried out. They impressed that the re-entrant has better energy absorption than the honeycomb. Yang et al. [15] investigated on compressive properties of Ti-6Al-4V auxetic mesh structures made by electron beam melting (EBM). A Ti-6Al-4V 3-D re-entrant lattice auxetic structure having two relative density and two Poisson's ratios were manufactured by EBM, and then compressive tests were performed in their work. They impressed that re-entrant lattice structure has superior mechanical properties compared to regular foam structures. Ingrole et al. [16] realized on design and modeling of auxetic and hybrid honeycomb structures for in-plane property enhancement. They reported that the new design of auxetic structure has 65% high compressive strength than the re-entrant auxetic structure and 300% more than that of honeycomb structure. Besides, Bates et al. [20] manufactured the honeycomb structures from polyurethane with fused filament method which is one of the AM methods, and then the energy absorption behavior of all structures was experimentally investigated. Their research demonstrated the potential for 3D printed, hyperplastic honeycombs as energy absorbing structures, with the structures created meeting the criteria of resiliency, good energy absorbing efficiency and quality of manufacture. Carneiro et al. [21] also reported that, the auxetic structures have a superior capacity of acoustic absorption than conventional honeycomb structure. Argatov et al. [22] noted that the auxetic materials have an improved indentation



resistance, when compared to conventional materials. Moreover, Bianchi et al. [23] mentioned that, the auxetic structure can be reverted to conventional honeycomb structure several times without loss of mechanical characteristics at desirable temperatures. Also, Yalçın and Ergene [24] analyzed the effect of crack on mechanical behavior of hybrid composites and presented that the shear stresses increase with increasing the crack angle. Additionally, Akkuş et al. [25] investigated the mechanical behavior of aluminum honeycomb structures under compression with experimental and finite element methods. They found 85% accuracy between experimental and analysis results.

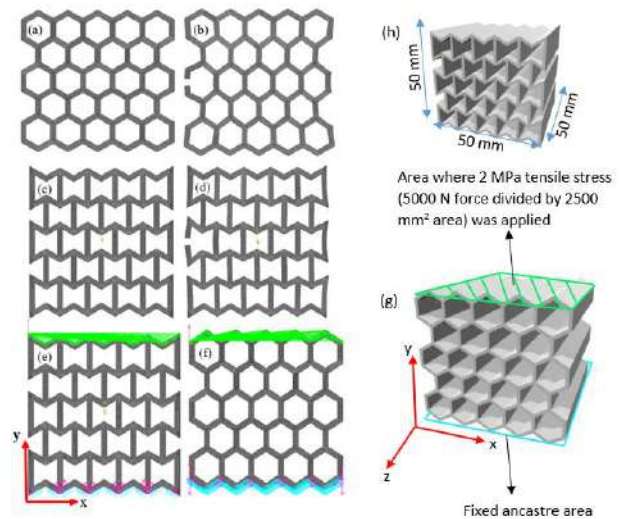
In this study, the auxetic behavior is primarily determined for conventional honeycomb and re-entrant structures with FE analyses. Secondly, the cracks on each cellular structure were formed and then vertical tensile force was applied through y axis to crack. The cellular material constants such as elasticity modulus and Poisson's ratio were calculated by using Eq. (10-13) with respect of solid Ti-6Al-4V material constants and auxetic mechanic in FE analyses. The stress intensity factor ( $K_I$ ), the normal stresses ( $\sigma_x$  and  $\sigma_y$ ), von Mises stresses ( $\sigma_{vm}$ ), shear stresses ( $\tau_{xy}$ ), displacement values ( $\Delta l_x$  and  $\Delta l_y$ ) and stress concentrations on the cell rib were obtained from the analyses. The results of stress, strain, displacement and Poisson's for regular honeycomb and re-entrant structures were interpreted.

## 2. MATERIALS AND METHOD

### 2.1 Finite Elements Modelling Procedure

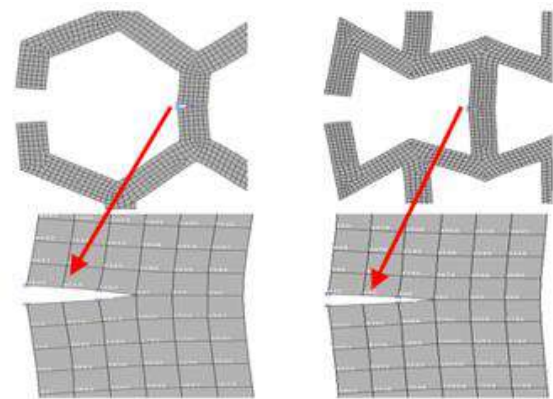
After doing literature survey [10, 11, 16 and 25], the honeycomb and re-entrant structures were designed with engineering design program and then these models were exported to the finite element based program (ANSYS). Models were created as with and without crack and also three different rib thicknesses of 1 mm, 1.5 mm and 2 mm were assigned for each honeycomb and re-entrant structures. Also, length of rib ( $l$ ), height of rib ( $h$ ) and rib angle ( $\theta$ ) is 5.2 mm, 5.2 mm and  $30^\circ$ , respectively. In re-entrant structure,  $l$ ,  $h$  and  $\theta$  are respectively followed as 5 mm, 10 mm and  $30^\circ$ .

The cracks on FE models were located to left of structures. The materials of re-entrant and honeycomb structures were chosen as Ti-6Al-4V which has elasticity modulus ( $E$ ) of 114000 MPa, Poisson's ratio ( $\nu$ ) of 0,342 and density ( $\rho$ ) of 4,43 g/cm<sup>3</sup>. Subsequently, the FE models were homogeneously meshed with element type Quad 4 node 42 and optimized. Also, the bottom of model was fixed as ancastre; the tensile stress of 2 MPa was applied to top of the structures by applying 5000N to all nodes at the top of the structure (Fig. 4g). FE models and the cracked model were show in Fig. 4. Then, 2-D FE analyses option were carried out in ANSYS program by using selected element type's plane stress with thickness input option.



**Figure 4.** Finite element models a) un-cracked honeycomb, b) cracked honeycomb, c) un-cracked re-entrant, d) cracked re-entrant, e) boundary conditions on re-entrant, f) boundary conditions on honeycomb, g) view of boundary conditions on 3D model, h) dimensions of the models.

Afterwards,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\sigma_{vm}$ ,  $\Delta l_x$ ,  $\Delta l_y$  and stress concentrations on the cell rib were obtained from the analyses. Moreover, stress intensity factor of  $K_I$  was obtained from analyses. The results of stress and strain for conventional honeycomb and re-entrant auxetic structures were interpreted with respect of stress concentrations, the effect of crack on the  $K_I$ ,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_{vm}$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\Delta l_x$ ,  $\Delta l_y$  and Poisson's ratio. Moreover, stress intensity factors in crack tip of  $K_I$  were achieved for each structure in FE analysis. Fig. 5 shows the selected nodes on path to calculate  $K_I$  values. It is known that  $K_I$  significantly determines the possible crack advance with effect of stresses on structure.



**Figure 5.** The selected nodes on path to calculate  $K_I$  values

## 3. RESULTS

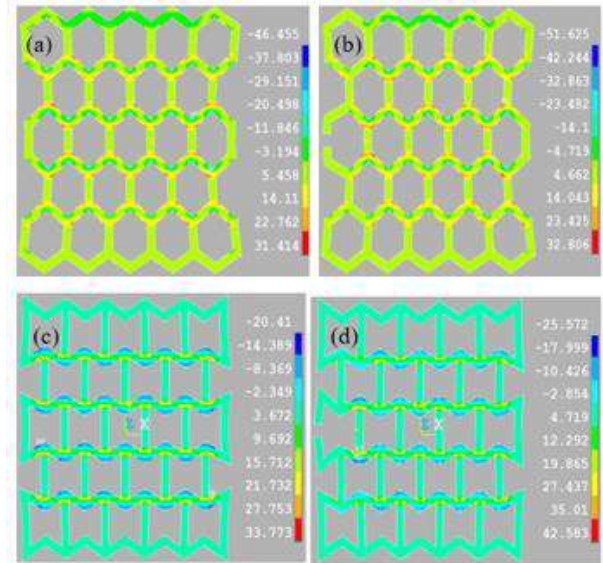
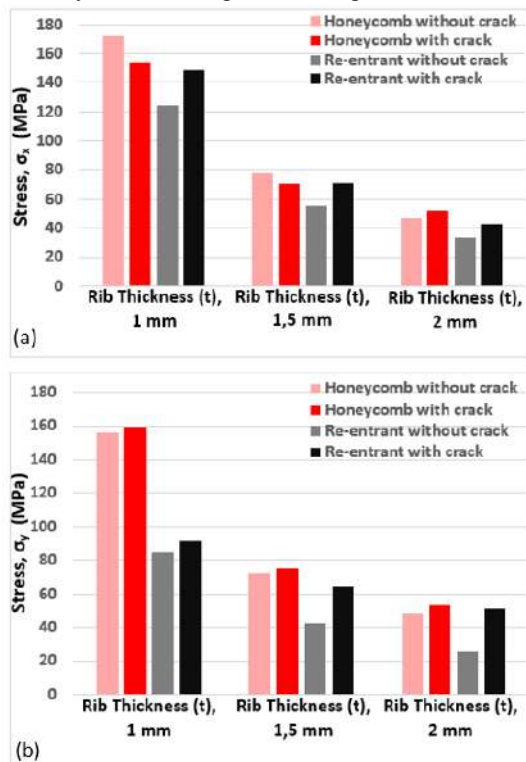
### 3.1 Stress Results and Auxetic Behaviour

Fig.6-a and Fig 6-b present normal stresses in x and y axes for honeycomb and re-entrant structures. According to Fig. 6-a, the lowest stress of max  $\sigma_x$  occurs on the un-

cracked re-entrant structure, and the highest max  $\sigma_x$  happens on the un-cracked honeycomb structure for  $t$  of 1 mm. Also, when rib thickness ( $t$ ) is 2 mm, the most  $\sigma_x$  consisted in the cracked honeycomb structure. The max  $\sigma_x$  in un-cracked honeycomb for rib thickness of 1 mm is 11.4 % more than that of the cracked honeycomb structure.

On the other hand, the max  $\sigma_x$  in un-cracked re-entrant for rib thickness of 1 mm is 19.6 % lower than that of the cracked honeycomb structure. As can be seen Fig 6-a, decreasing trend in the normal stresses through  $x$  axis were observed for all structures from FE analyses. For instance, when  $t$  increases from 1 mm to 2 mm for un-cracked honeycomb structure, the max  $\sigma_x$  decreases from 172.84 MPa to 46.45 MPa for un-cracked honeycomb,  $\sigma_x$  decreases from 153.78 MPa to 51.62 MPa for cracked honeycomb, and also max  $\sigma_x$  decreases from 123.73 MPa to 33.77 MPa for un-cracked re-entrant structure, in addition, max  $\sigma_x$  decreases from 149.02 MPa to 42.58 MPa for cracked re-entrant structure, respectively.

Moreover, the max  $\sigma_x$  in honeycomb structure occurred as compression; on the other hand, the max  $\sigma_x$  in re-entrant structure eventuated as tension. This state can be shown in Fig. 7 for un-cracked and cracked structures,  $t$  of 2 mm. This is very important results that while the maximum stresses through  $x$  axis cause shrinkage of the honeycomb structure and leads expansion of the re-entrant structure through  $x$  axis. This result gives information that the re-entrant structure shows exhibiting the auxetic behavior. Screenshots from FE analyses about expansion of the re-entrant structure for  $t$  of 1 mm and the shrinkage of honeycomb structure for  $t$  of 1 mm under tensile forces applied in  $y$  direction which were respectively shown in Fig 8-a and Fig 8-b.

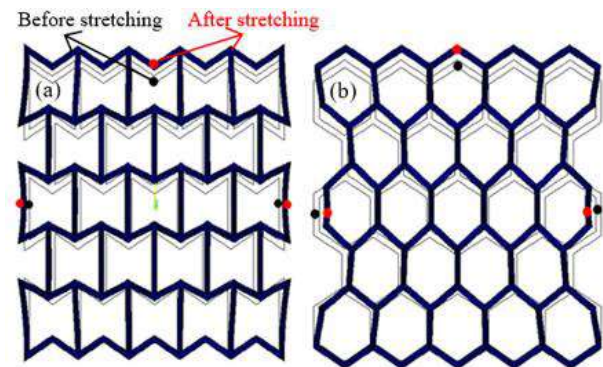


**Figure 6.** The max  $\sigma_x$  (a) and max  $\sigma_y$  (b) values obtained from FE analysis.

**Figure 7.** The maximum tension of  $\sigma_x$  in a) un-cracked and b) cracked honeycomb and the maximum compression of  $\sigma_x$ , c) in un-cracked and d) cracked re-entrant for 2 mm thickness.

**Figure 8.** Screenshots from FE analyses about, a) re-entrant structure expansion, b) the shrinkage of honeycomb structure under tensile loads.

According to the Fig 8, while the re-entrant structure possessing  $t$  of 1 mm, 1.5 mm, 2 mm expanded through  $x$  axis as 5.122 mm, 0.333 mm and 0.038 mm; the honeycomb structures for  $t$  of 1 mm, 1.5 mm, 2 mm shortened through  $x$  axis as 4.1 mm, 0.435 mm and 0.092 mm, respectively. Also, as rib thickness increased, the elongation and shortening values decreased for re-entrant and honeycomb structures, respectively. When evaluating the elongation and shrinkage values in  $x$  direction, the elongation for re-entrant for rib thickness of 1 mm is 19.95 % higher than shrinkage of honeycomb structure for thickness of 1 mm. However, as rib thickness increases, the auxetic behavior drops sharply owing to decrease in  $\Delta\max_x$  (expansion) in re-entrant



structure. For example, when rib thickness increases from 1 mm to 1.5 mm, the expansion of re-entrant trough  $x$  axis decreases from 5.122 mm to 0.333 mm. This result is important for topology optimization and to obtain the higher indentation resistance of any auxetic structure.



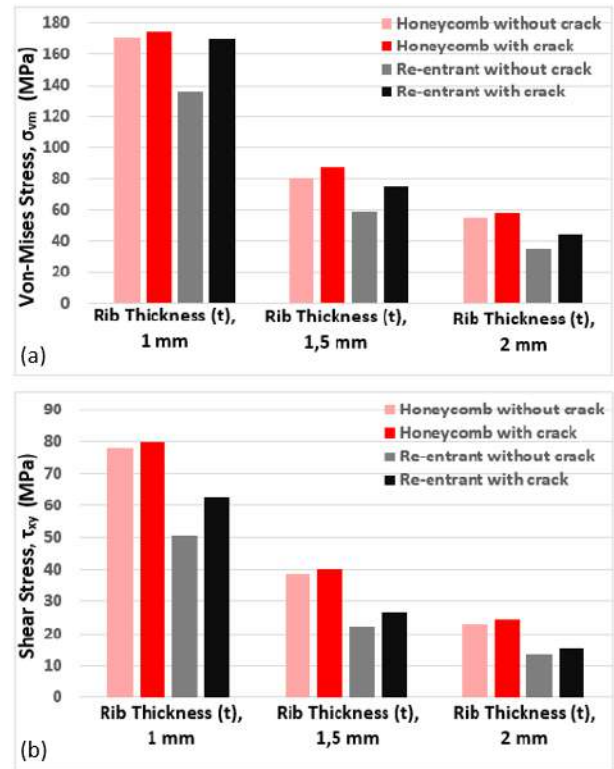
**Table 2.** The calculated constants for honeycomb and re-entrant structures

The calculated constants of the honeycomb structure				
Rib thickness (mm)	E (MPa)	$\nu$	$\rho$ (kg/mm <sup>3</sup> )	Relative density (%)
1	1863.08	0.342	$9.83 \times 10^{-7}$	22.18
1.5	6287.908	0.342	$14.74 \times 10^{-7}$	33.27
2	14976.40	0.342	$19.66 \times 10^{-7}$	44.37
The calculated constants of the re-entrant structure				
1	622.345	0.342	$13.64 \times 10^{-7}$	30.79
1.5	2172.022	0.342	$20.46 \times 10^{-7}$	46.18
2	4783.59	0.342	$27.28 \times 10^{-7}$	61.58

The density ( $\rho$ ) and elasticity modulus (E) values for the re-entrant and honeycomb structures in analyses were respectively calculated with Eq. (10-13), which were shown Table 2 and used in analysis. As can be seen Table 2, when rib thickness increases, the relative density increases. In this context, increase in relative density provides decreasing the normal stresses through x and y axes. Aslam et al. [26] reported that increasing of the relative density in auxetic structures decreases stresses in structure occurred under tension loads. Besides, the maximum stresses ( $\sigma_y$ ) through y axis in each cracked structure are higher than those of each un-cracked structure. It is obvious that there is higher effect of crack on  $\sigma_y$  for re-entrant structure than that of honeycomb structure. Also, the crack of re-entrant structure for t of 1.5 mm and 2 mm has higher influence on  $\sigma_y$  when comparing the t of 1 mm. On the other hand,  $\sigma_y$  values in honeycomb linearly change; in addition, there is a linear effect of crack on  $\sigma_y$  values in honeycomb structure for all rib thicknesses. For example, when the rib thickness is 1 mm, the crack effect increased the  $\sigma_y$  2.5%, for rib thickness of 1,5 mm 4% increment, and for rib thickness of 2 mm 9.4% increment observed on honeycomb structure. Also, as rib thickness is 1 mm, the crack effect increased the  $\sigma_y$  8.5 %, for rib thickness of 1,5 mm 52% increment, and for rib thickness of 2 mm 93% increment observed on re-entrant structure. Ingrole et al. [16] showed that the absorption capacity of re-entrant structure is 19% more than honeycomb structure. Also, Scarpa and Smith [4] expressed auxetic structures possess energy and sound dampening. Equivalent stress ( $\sigma_{vm}$ ) results were given in Fig. 9-a. As similar tendency was obtained from FE analyses about equivalent and shear stresses (Fig. 9a and Fig. 9b). The equivalent and shear stresses in un-cracked and cracked honeycomb structure are higher than those of in un-cracked and cracked re-entrant structure.

Generally, maximum  $\sigma_{vm}$  stress concentrated on the nearest rib and rib joint to crack in the cracked honeycomb and re-entrant structures, which were given in Fig. 10 for t of 1 mm. As can be seen in Fig 10, the maximum  $\sigma_{vm}$  didn't occur at the crack tip; however, at the top rib joint of the cracked cell exposed the maximum  $\sigma_{vm}$  of 174.595 MPa. Moreover, the maximum Von mises

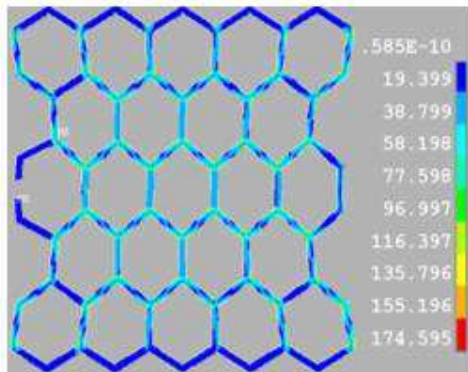
stress ( $\sigma_{vm}$ ) of 169.966 MPa occurred on bottom rib joint of the cracked cell in re-entrant structure. As similar honeycomb, the maximum  $\sigma_{vm}$  did not occur at the crack tip of re-entrant structure.



**Figure 9.** a) Equivalent stress ( $\sigma_{vm}$ ) results, b) Shear stress ( $\tau_{xy}$ ) results

If Fig. 10 and Fig. 11 are examined, the  $\sigma_{vm}$  stresses change between 37.77 MPa and 56.655 MPa at the crack tip of re-entrant, between 38.799 MPa and 58.198 MPa at the crack tip of honeycomb structure. These values decrease with an increase in rib thickness. It is known that the stresses extremely increase at crack tip in homogeneous materials as different from foam structures [27]. Also, the maximum stresses concentrated at the crack tip leads advancing the crack when stress intensity factor ( $K_I$ ) equals or higher than the fracture toughness ( $K_{IC}$ ) of the material. Moreover, in homogeneous materials, the possible crack starts from the crack tip lay on continuous patch in literature [27]. As can be seen in Fig. 10 and Fig. 11 that the crack propagation in foam structures such as re-entrant and honeycomb are lower than homogeneous materials due to fact that the maximum stresses did not enforce to the crack tip. Therefore, the possible crack advance doesn't occur on the continuous patch. Fleck et al. [28] mentioned that the crack propagation in foam structure doesn't lie on continuous patch, but the crack advances on sinuous patch. Also, they impressed that the crack growth behavior depends on the cell wall materials and geometric properties of honeycomb structures. The maximum stresses at crack tip of re-entrant structure are lower than those of honeycomb in this FE analysis, which

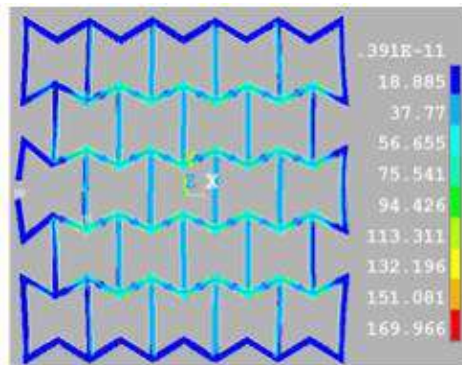
can be seen in Fig.10 and Fig. 11. Therefore, it is conceivable that the crack advance in re-entrant structure may lower than that of honeycomb structure. Ravirala, et al. [29] reported that the crack resistance to fracture of re-



entrant structure is higher than non-auxetic structure like honeycomb.

**Figure 10.**  $\sigma_{vm}$  stress distributions in cracked honeycomb structure

In the context of this study, the fracture toughness values for re-entrant and honeycomb structures were respectively calculated with Eq. 9 and 14. Besides, the stress intensity factor values ( $K_I$ ) at crack tip were obtained from FE analyses, which can be seen in Table 3. According to the fracture mechanics [27], when  $K_I=K_{IC}$ , the fracture takes place and leads to the crack propagation. According to Table 3, stress intensity factors obtained from the FE analyses showed that the increase in rib thickness provides the decrease of  $K_I$  values at crack tip. Also, when rib thickness increases, relative density increase, which can be seen in Table 2.



**Figure 11.**  $\sigma_{vm}$  stress distributions in cracked re-entrant structure

**Table 3.**  $K_I$  values obtained from FE Analyses and the calculated  $K_{IC}$  values with Eq. (9, 14)

t (mm)	Honeycomb Structure		Re-entrant Structure	
	Obtained $K_I$ from FEA (MPa $\sqrt{m}$ )	Calculated $K_{IC}$ by formulas (MPa $\sqrt{m}$ )	Obtained $K_I$ from FEA (MPa $\sqrt{m}$ )	Calculated $K_{IC}$ by formulas (MPa $\sqrt{m}$ )
1	64,392	38,634	51,608	82,086
1.5	48,823	86,930	44,168	123,130
2	41,666	154,544	39,870	164,173

According to the fracture mechanics, if the stress intensity factor equals ( $K_I=K_{IC}$ ) or higher than fracture toughness, the fracture resistant decreases, fracture starts in structure, and crack propagation goes on [27]. Otherwise, when the obtained stress intensity factor value is lower than fracture toughness, the crack doesn't advance or occur in un-crack structure. If this situation is commented, crack propagation in honeycomb structure with t of 1 mm will be expected due to fact that its stress intensity factor value is higher than its fracture toughness. On the other hand, the crack in re-entrant structure doesn't advance because of the stress intensity factor is lower than its fracture toughness (Table 3). It means that the re-entrant structure possesses resistant to fracture more than honeycomb structure. Furthermore, it doesn't seem the crack propagation in rest of cracked honeycomb and re-entrant structures for the reason of much less stress intensity factor value than the calculated fracture toughness values. Rehme et al. [30] expressed that the fracture toughness of the re-entrant open-cell copper sponge is 1.5 times of the fracture toughness value of conventional open-cell copper sponge. As an example, from this study, the calculated fracture toughness of re-entrant structure and honeycomb structure for rib thickness of 1.5 mm is 123,130 MPa $\sqrt{m}$  and 86,930 MPa $\sqrt{m}$  respectively so fracture toughness of re-entrant structure is found 1.4 times of the fracture toughness of honeycomb structure. Also, the stress intensity factor in crack tip of re-entrant structure is 8.3 % lower than that of honeycomb structure.

### 3.2 Strain and Displacement Results

In order to better characterize the behavior of re-entrant and honeycomb structures, displacement, strain and Poisson's ratio values were respectively shown in Fig. 12, Fig. 13 and Fig 15. Fig. 12 presents the maximum displacement values of  $\Delta x$  and  $\Delta y$  through x and y axes, respectively. The most important result was obtained from analyses that while the maximum shrinkage ( $-\Delta \max_x$ ) in honeycomb structure occurred, the maximum expansion ( $+\Delta \max_x$ ) took place in re-entrant structure through x axis under tension loads through y axis, which can obviously be seen in Fig. 12-a. This result exhibits the auxetic behavior of re-entrant structure. Especially, in case of rib thickness decreasing to 1 mm, more expansion through x axis occurred than other rib thicknesses of re-entrant structure. The effect of crack on shrinkage through x axis in honeycomb structure is less than the effect of crack on expansion in re-entrant structure. Also, the maximum elongation ( $+\Delta \max_y$ ) was observed for each structure under tension loads through y axis. This state can be seen in Fig 12-b. Moreover, the maximum  $\Delta y$  values of re-entrant structure are higher than those of honeycomb structure. The reason of this phenomena can be explained that the re-entrant structure possesses less elasticity modulus than honeycomb structure. In addition, high movement ability of angled struts in re-entrant structure through y axis and the effect of this movement to vertical struts lead to have more displacement on y axis.

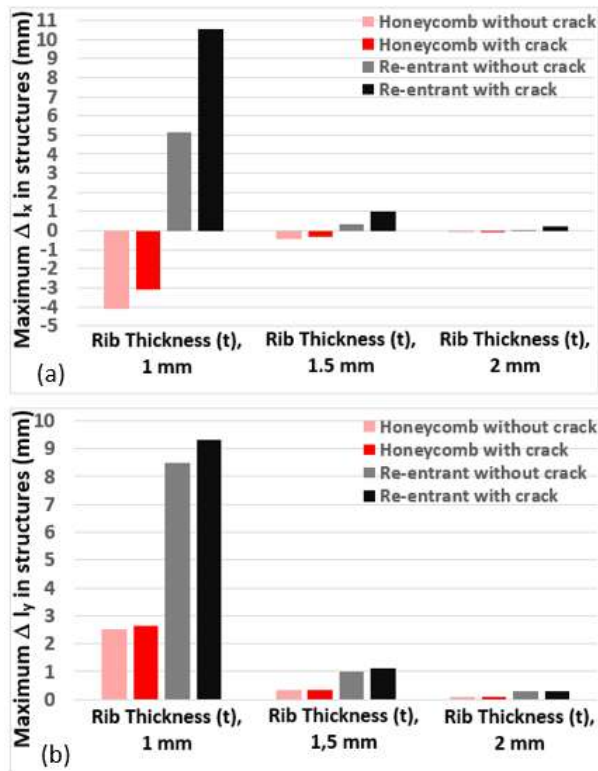


Figure 12. a) Maximum displacement through x axis,  $\Delta x$   
 b) maximum displacement through y axis,  $\Delta y$

Fig. 13 presents maximum strains through x and y axis for each structure. It is mainly known that the strain is the ratio of dimensional change to initial size ( $\Delta L/L_0$ ). So, a similar tendency in strains was obtained with displacement values. As can be seen in Fig 13, decrease in rib thickness cause increasing the strain values. The maximum strain of  $\epsilon_{maxx}$  ( $+\Delta L_{maxx}/L_x$ ) in re-entrant structure gets positive value because of the elongation in x axis different from honeycomb structure. On the other hand, the negative maximum strains ( $-\Delta L_{maxx}/L_x$ ) through x axis in honeycomb structure were obtained due to shrinkage on x axis. Also, when rib thickness is 1 mm, the evident increment in max  $\epsilon_x$  observed for each re-entrant and honeycomb structure. Also, maximum strains of  $\epsilon_{maxy}$  ( $+\Delta L_{maxy}/L_y$ ) in both re-entrant and honeycomb structures get positive values because of the elongation behavior in y axis under stretch through y axis. It is known that some materials properties such as shear and bulk modulus depend on Poisson's ratio ( $\nu$ ). The Poisson's ratio of the honeycomb and re-entrant structures were determined by Gibson and Ashby theory [31] which is accepted to determine for cellular structure. As similar, Joseph et al. [32] expressed that Poisson's ratio can be calculated with determining the  $\epsilon_x$  and  $\epsilon_y$  in the group of centermost cells instead of  $\epsilon_{maxx}$  and  $\epsilon_{maxy}$  in honeycomb and re-entrant structures. The reason selection this centermost cell to determine Poisson ratio is attempting to minimize edge effect. In this study, the Poisson ratio was determined according to the accepted theory [31, 32].

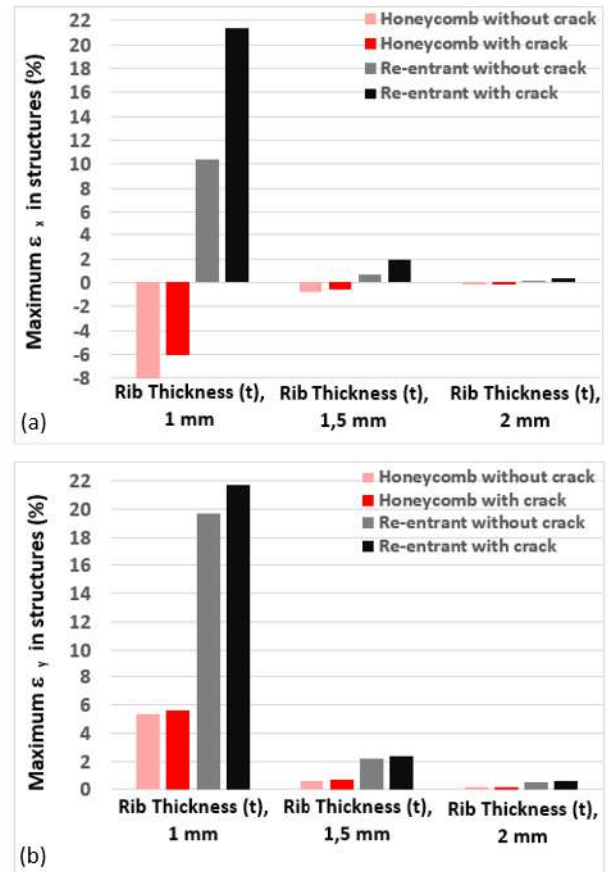


Figure 13. a) Maximum strain values through x axis,  $\epsilon_x$   
 b) maximum strain values through y axis,  $\epsilon_y$

Fig. 14 shows the method of calculating Poisson's ratio and definition on key points used to determine  $\epsilon_x$  and  $\epsilon_y$  for centermost cell. According to the accepted theory to determine the Poisson's ratio,  $\epsilon_x$  values were calculated with displacement values on .1 nodes through x axis in group of centermost cells for each structure, in addition,  $\epsilon_y$  values were calculated with displacement values on .2 nodes through y axis in group of centermost cells for each structure.

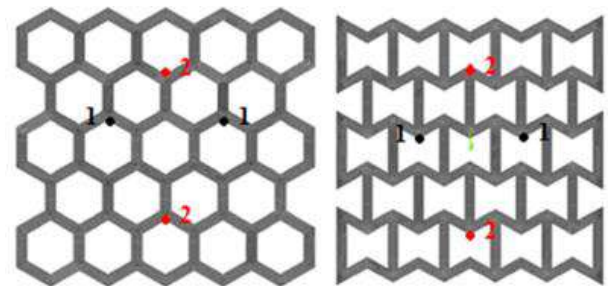


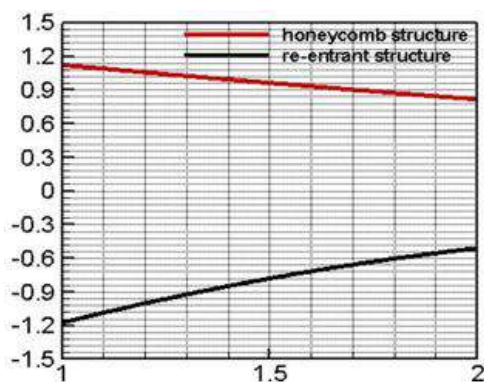
Figure 14. Definition of key points to determine the Poisson's ratio in FE analyses

The obtained Poisson's ratio as  $\nu = -(\epsilon_x/\epsilon_y)$  from FE analyses were given in Fig. 15. As can be seen in Fig 15, the re-entrant structure possess negative Poisson's ratio due to expansion in x axis; while the positive Poisson's ratio obtained due to happening the shrinkage through x axis in honeycomb structure when stretching,



Therefore, the re-entrant structures exhibits auxetic behavior because of possess the negative Poisson's ratio with expansion in x direction under scratching through y axis. Moreover, re-entrant structures having negative Poisson's ratio can be recommended in applications required the indentation resistant and absorption. Because, although the re-entrant structure has the low elasticity modulus, it shows conducting the low stress concentrations, high strain values, and the expansion through x axis under tension load applied in y direction. Because of auxetic behavior in re-entrant structure, high indentation resistant was observed from FE analyses.

Recent studies showed that these structures attract attention of researchers and industrial company. For instance, Joseph et al. [32] compared the Poisson's ratio values of honeycomb and re-entrant structures, experimentally. They found the negative Poisson's ratio for re-entrant structure and positive Poisson's ratio for honeycomb structure in case of stretch in y direction. It can be obviously seen in their study, the Poisson's ratio values in honeycomb can be bigger than 1, and also the Poisson's ratio values in re-entrant can be bigger than -1 depending on rib length and height.



**Figure 15.** Poisson's ratio of honeycomb and re-entrant structures,  $\nu$

Furthermore, Osama et al. [33] reported that when the porosity of the cellular structure increases depending on decrease of strut thickness, Poisson's ratio value of honeycomb and re-entrant structure approaches to 1 and -1 from absolute lower values respectively. Lee et al. [34] expressed that Poisson's ratio of the regular honeycomb structure decreased when volume fraction increased. Moreover, Whitty et al. [35] emphasized about changing the rib thickness leads to a change in the Poisson's ratio for honeycomb and re-entrant structures. Greaves et al. [36] emphasized that for the future, the numerical metric that Poisson's ratio provides will be advantageous in researching and developing new materials, marrying the mechanical response of diverse components, from the nano to the macro scale through variable changes in shape and volume.

#### 4. CONCLUSIONS

It is obviously understood that the modern structure was designed by topology optimization possessing more efficient, low density, high absorber capacity, indentation

resistant and shear strength for specific industrial applications. Nowadays, they have been also manufactured by additive manufacturing methods. So, in order to estimate the effect of crack on mechanical and auxetic behaviors for regular honeycomb and re-entrant structures from Ti-6Al-V materials, FE analyses were realized with respect of the accepted auxetic mechanic in this search. In the literature, investigations focus on mechanical behavior of these materials under compression load. Likewise, Ergene and Yalçın conducted some studies [37, 38] to determine the compression behavior of honeycomb and re-entrant structures. On the other hand, as different from other researches, the mechanical behavior of honeycomb and re-entrant structures were analyzed under tensile force through y direction in this study. We have presented that increase in the rib thickness rises to the relative density for each structure. Besides, the re-entrant structure possesses much less relative density than honeycomb structure. Also, the fracture toughness values of both structures according to formula of the accepted cellular solid mechanic theory [11-19] were calculated. The  $K_{IC}$  of re-entrant structure is greater than that of honeycomb structure, and  $K_{IC}$  values are getting higher while increasing the rib thickness. Moreover, following are the major conclusion of this study;

- Firstly, increment in rib thickness decrease stresses and strains for each structure.
- The maximum  $\sigma_x$  in honeycomb structure occurred as compression; on the other hand, the max  $\sigma_x$  in re-entrant structure occurred as tension. This phenomenon causes expansion in re-entrant structure and leads shrinkage in honeycomb structure through x axis (Fig. 8).
- The crack increase in y direction stresses ( $\sigma_y$ ) values comparing the un-cracked honeycomb and re-entrant structure; much less  $\sigma_y$  consisted in un-cracked re-entrant structure than honeycomb structure.
- The equivalent stresses ( $\sigma_{vm}$ ) in re-entrant structure obtained lower than those of honeycomb structure. The notable effect of crack on stress  $\sigma_{vm}$  in re-entrant revealed in comparison with honeycomb structure. For example, increment ratio in von-Mises stress were respectively obtained as 6.89% and 22.97% with the effect of crack in honeycomb and re-entrant structures. Maximum  $\sigma_{vm}$  mostly concentrated on the closest rib joint of cracked cell for each structure.
- The stress intensity factor ( $K_I$ ) obtained from the FE analyses showed that increase in rib thickness provides decreasing the  $K_I$  values at crack tip. Increment in relative density increased the fracture toughness.
- In the literature [28], if  $K_I=K_{IC}$  equal or greater than fracture toughness, the crack resistance decreases, the fracture in structure starts and crack propagation continues. In this study, the crack propagation in honeycomb structure with t of 1 mm will be expected because the value of the stress intensity factor is greater than the fracture toughness. The crack propagation is



not expected in the rest of cracked honeycomb and re-entrant structures, because the stress intensity factor is less than the calculated fracture toughness.

- From the FE analyses, it is observed that the re-entrant structure possesses negative Poisson's ratio although honeycomb structure exhibits positive Poisson's ratio (Fig. 15).

## Nomenclature

$E_y$	: Elasticity modulus through y axis of auxetic structure
$E_s$	: Elasticity modulus of solid material
$G_s$	: Shear modulus of solid material
$K_{IC}$	: Fracture toughness of auxetic structure
$K_I$	: Intensity factor
$\theta$	: Rib angle
$t$	: Rib thickness
$F$	: The force acting on each cell rib
$\sigma_f$	: Fracture strength
$\rho_s$	: Density of solid material
$\rho$	: Density of auxetic structure
$L$	: Rib length
$\nu$	: Poisson's ratio
$K$	: Bulk modulus

## DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS

The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission..

## REFERENCES

- [1] Lakes R., "Foam structures with a negative Poisson's ratios", *Science*, 235:1038–1040, (1987)
- [2] Undershill R.S., "Defense applications of auxetic materials", *Advanced Materials*, 1(1):7-12, (2014)
- [3] Novak N., Vesenjajk M., Ren Z., "Auxetic cellular materials - a review", *Journal of Mechanical Engineering*, 62(9): 485-493, (2016)
- [4] Scarpa F., Smith F.C., "Passive and MR fluid-coated auxetic PU foam –mechanical, acoustic, and electromagnetic properties", *Int. Journal Mater. Syst. Struct.*, 15: 973–979, (2004)
- [5] Yang L., Harrysson O., West H., Cormier D., "Mechanical properties of 3D re-entrant honeycomb auxetic structures realized via additive manufacturing", *Int. Journal of Solids and Structures*, 69–70: 475–490, (2015)
- [6] Choy Y.S., Sun C.N., Leonga K.F., Weia J., "Compressive properties of Ti-6Al-4V lattice structures fabricated by selective laser melting: Design, orientation and density", *Additive Manufacturing*, 16: 213–224, (2017)
- [7] Yan C., Hao L., Hussein A., Young P., Raymond D., "Advanced lightweight 316Lstainless steel cellular lattice structures fabricated via selective laser melting", *Materials&Design*, 55: 533–541, (2014)
- [8] Prawota Y., "*Solid Mechanics for Materials Engineers: Auxetic Materials Seen from the Mechanics Point of View*", Chapter 15, USA (2013).
- [9] Alderson A., and Alderson K.L., "Auxetic materials", *Journal of Aerospace Engineering*, 221 G: 565-575, (2007)
- [10] Budarapu P.R., Sudhir Sastry Y.B., Natarajan R., "Design concepts of an aircraft wing: composite and morphing airfoil with auxetic structures", *Front. Struct. Civ. Eng.*, 10(4): 394–408, (2016)
- [11] Critchley R., Corni I., Wharton J.A., Walsh F.C., Wood R.J.K., Stokes K.R., "The preparation of auxetic foams by three-dimensional printing and their characteristics", *Adv. Eng. Mat.*, 15 (10): 980–985, (2013)
- [12] Maiti K., Ashby M.F., Gibson L.J., "Fracture toughness of brittle cellular solids", *Scripta Metallurgica*, 18: 213-217, (1984)
- [13] Green D., "Fabrication and mechanical properties of lightweight ceramics produced by sintering of hollow spheres", *Journal of Am. Ceram. Soc.*, 68: 403–409, (1985)
- [14] Choi J., and Lakes R, "Fracture toughness of re-entrant foam materials with a negative Poisson's ratio: Experiment and analysis", *Int. Journal of Fracture*, 80: 73–83, (1986)
- [15] Yang L., Harrysson O., West H., Cormier D., "Compressive properties of Ti–6Al–4V auxetic mesh structures made by electron beam melting", *Acta Materialia*, 60: 3370–3379, (2012)
- [16] Ingrole A., Hao A., Liang R., "Design and modeling of auxetic and hybrid honeycomb structures for in-plane property enhancement", *Materials & Design*, 117: 72–83, (2017)
- [17] <http://www.mse.mtu.edu/~drjohn/my4150/honey/h1.html>
- [18] Vogiatzis P., Chen S., "Topology optimization of 3d auxetic meta materials using reconciled level-set method", *Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, USA (1986).
- [19] Zhou Z., Zhou J., Fan H., "Plastic analyses of thin-walled steel honeycombs with re-entrant deformation style", *Materials Science & Engineering*, A 688: 123–133, (2017)
- [20] Bates S.R.G, Farrow I.R., Trask R.S, "3D printed polyurethane honeycombs for repeated tailored energy absorption", *Materials & Design*, 112: 172–183, (2016)
- [21] Carneiro V.H., Meireles J., Puga H., "Auxetic materials – a review", *Materials Science-Poland*, 31(4): 561-571, (2013)
- [22] Argatov I.I., Diaz R.G., Sabina F.J., "On local indentation and impact compliance of isotropic auxetic materials from the continuum mechanics viewpoint", *Int. Journal of Engineering Science*, 54: 42-57, (2012)
- [23] Bianchi M., Scarpa F., Smith C.W., "Shape memory behaviour in auxetic foams: Mechanical properties", *Acta Materialia*, 58: 858–865, (2010)
- [24] Yalçın B., and Ergene B., "Analyzing the effect of crack in different hybrid composite materials on mechanical behaviors", *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 24(4): 616-625, (2018)
- [25] Akkuş H., Düzcükoğlu H., and Şahin Ö.S., "Experimental research and use of finite elements method on mechanical behaviors of honeycomb structures assembled with

- epoxy-based adhesives reinforced with nanoparticles”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31(1): 165-170, (2017)
- [26] Usman Aslam M., Darwish S.M., “Development and analysis of different density auxetic cellular structures”, *Int. Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 3(1): 27-32, (2015)
- [27] Hertzberg R.W., “*Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*”, 3. Edition, John Wiley, USA, (1989)
- [28] Schmidt I., Fleck N.C., “Ductile fracture of two dimensional cellular structures”, *International Journal of Fracture*, 111: 324-342, (2001)
- [29] Ravirala N., Alderson A, Alderson K, and Davies P., “Auxetic polypropylene films”, *Polym. Eng. and Sci.*, 45: 517-528, (2005)
- [30] Rehme O., Emmelmann C., “Selective laser melting of honeycombs with negative poisson’s ratio”, *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, 4(2): 128-134, (2009)
- [31] Gibson L.J., Ashby M.F., Schajer G.S., Robertson C.I., *Proc. R. Soc. Lond. A*, 382, 25, (1982)
- [32] Joseph N.G., Oliveri L., Attard D., Ellul B., Gatt R., Cicala G. and Recca G., “Hexagonal honeycombs with zero poisson’s ratios and enhanced stiffness”, *Advanced Engineering Materials*, 12(9): 855-862, (2010)
- [33] Osama A.M.A, and Darwish S.M.H., “Analysis, fabrication and a biomedical application of auxetic cellular structures”, *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, 2(3): (2012)
- [34] Lee J., Choi J.B., and Choi K., “Application of homogenization FEM analysis to regular and re-entrant honeycomb structures”, *Journal of Materials Science*, 31: 4105- 4110, (1996)
- [35] Whitty J.P.M., Nazare F., and Alderson A., “Modelling the effects of density variations on the in-plane poisson’s ratios and young’s moduli of periodic conventional and re-entrant honeycombs - part 1: Rib thickness variations”, *Cellular Polymers*, 21(2): 69-98, (2005)
- [36] Greaves G.N., Greer A.L., Lakes R.S., and Rouxel T., “Poisson’s ratio and modern materials”, *Nature Materials*, 10: 823-838, (2011)
- [37] Ergene B., Yalçın B., “Finite element analysis for compression behaviour of polymer based honeycomb and re-entrant structures”, 4th International Conference on Engineering and Natural Sciences, 549-556, 2-4 May, Kiev-Ukraine, 2018.
- [38] Yalçın B., Ergene B., Karakılınç U., “Modal and stress analysis of cellular structures produced with additive manufacturing by finite element analysis (FEA)”, *6th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, 263-272, 9-11 November, Antalya-Turkey, 2018



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Performance analysis of thermal storage assisted cooling tower with night cooling

## *Termal depolama destekli soğutma kulesinin gece soğutmalı performans analizi*

*Yazar(lar) (Author(s)): Kasım TOPRAK<sup>1</sup>, Kiswendsida Elias OUEDRAOGO<sup>2</sup>*

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-0043-2941

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-1615-1693

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Toprak K. and Ouedraogo K. E., "Performance analysis of thermal storage assisted cooling tower with night cooling", *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1027-1035, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.517603

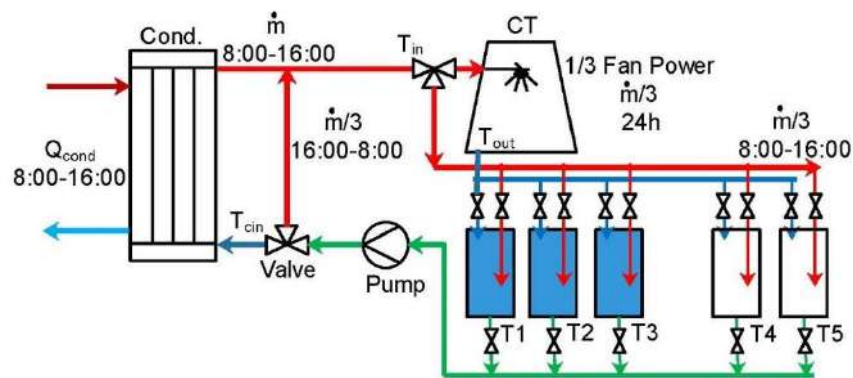
# Performance Analysis of Thermal Storage Assisted Cooling Tower with Night Cooling

## Highlights

- ❖ Integrating two water storage tanks to the new cooling systems enable to use low continuous flow rate.
- ❖ The new models reduce the mass flow rate to 1/3 and air mass flow rate to 0.69 of the regular models.
- ❖ The water storage tank capacity can be reduced by increasing the number of tanks.
- ❖ The new cooling systems provide lower condenser inlet water temperature and higher performance.

## Graphical Abstract

In this study, the low night temperature and thermal storage tanks effects on the cooling tower is studied using TRNSYS.



**Figure.** Proposed five thermal storage tanks cooling system

## Aim

The aim of this study is exploring a feasible technique for a cooling system that lowers the cooling water temperature and enhances the performance.

## Design & Methodology

Low continuous flow rate and contribution of the number of water storage tanks on the modeled cooling system is analyzed and optimized using TRNSYS.

## Originality

This paper explores a feasible technique for a cooling system that lowers the cooling water temperature and enhances the performance.

## Findings

The new modeled cooling systems enable to lower continuous flow rate. Their condenser inlet water temperature is reduced and the performance is increased compared to that regular model.

## Conclusion

The required storage volume can be reduced up to 50% by using multiple smaller tanks and a control mechanism that alternately fills/drains tanks. For 12 tanks, storage capacity becomes 40% lower than the 2 tanks model. The new modeled cooling systems' condenser inlet water temperature is 20% lower and the performance are 36% higher than regular model.

## Declaration of Ethical Standards

The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Performance Analysis of Thermal Storage Assisted Cooling Tower with Night Cooling

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Kasım TOPRAK<sup>1\*</sup>, Kiswendsida Elias OUEDRAOGO<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Izmir Institute of Technology, Izmir 35430, Turkey

<sup>2</sup>Department of Energy System Engineering, Izmir Institute of Technology, Izmir 35430, Turkey

(Geliş/Received : 25.01.2019 ; Kabul/Accepted : 03.10.2019)

## ABSTRACT

As global warming and water scarcity issues continue to grow, it is essential to increase resources efficiency for air conditioners and power plants. In order to increase the efficiency, the systems need to be modified to take the advantages of the low night temperature and thermal storage tanks. In this study, the low night temperature and thermal storage tanks effects on the cooling tower is studied using TRNSYS. Using a chiller operating from 8:00 to 16:00 as a case study, hot water from the condenser is partially stored on daytime and cooled slowly during the night. The storage tank volume is optimized by considering two big tanks and five small tanks. The results show that night cooling reduces cooling water temperature by 5.8 °C or 21.8% while the cooling efficiency is increased by 36%. The thermal storage tanks enable to have the low continuous flow rate and help to reduce the fan power by 67.1%. On the storage side, compared to two tanks system, the tanks volume is reduced by 16.5% when 5 tanks are used. In theory this reduction can go up to 50% by increasing the number of tanks and reducing their individual size.

**Keywords:** Cooling tower, thermal storage, night cooling.

## Termal Depolama Destekli Soğutma Kulesinin Gece Soğutmalı Performans Analizi

### ÖZ

Küresel ısınma ve su kıtlığı sorunları artmaya devam ettikçe, klimalar ve enerji santralleri için kullanılan kaynakların verimliliğini artırmak esastır. Verimliliği artırmak için, düşük gece sıcaklığı ve termal depolama tanklarının avantajlarından yararlanmak için sistemlerde değişiklikler yapılması gerekir. Bu çalışmada, düşük gece sıcaklığı ve termal depolama tanklarının soğutma kulesi üzerindeki etkileri TRNSYS kullanılarak incelenmiştir. Bir vaka çalışması olarak sabah 8'den akşam 4'e kadar çalışan bir soğutucu kullanan kondansatörden gelen sıcak su kısmen gündüz depolanır ve gece boyunca yavaşça soğutulur. Depolama tankı hacmi iki büyük tank ve beş küçük tank dikkate alınarak optimize edilmiştir. Sonuçlar, gece soğutmanın soğutma suyu sıcaklığını 5,8 °C veya % 21,8 oranında azalttığını, soğutma verimliliğinin %36 oranında arttığını göstermektedir. Termal depolama tankları düşük sürekli akış hızına sahip olmayı ve fan gücünün %67,1 oranında azaltılmasını sağlar. Depolama tarafında, iki tank sistemine kıyasla, 5 tank kullanıldığında tank hacmi % 16,5 azalmıştır. Teoride bu azalma, tank sayısını artırarak her bir tank boyutunda ki azalma % 50'ye kadar çıkabilir.

**Anahtar Kelimeler:** Soğutma kulesi, termal depolama, gece soğutma.

### 1. INTRODUCTION

Energy consumption of air-conditioning (AC) is increasing globally because of climate change and the growth of urbanization. According to Morna et al. [1], the global residential air-conditioning energy demand is forecasted to increase by 30% for heating and 70% for cooling during the period 2000-2100. In the agriculture sector as well, air conditioning is becoming more and more important as greenhouse farming are promoted worldwide [2]. Xu et al. [3] analyzed subtropical greenhouse cooling performance and realized that daily high temperature of 30 °C - 40 °C combined to a humidity level over 70% were the most challenging parameters for an effective cooling. Nidal et al. [4] lowered the humidity lever using a liquid desiccant to enhance the cooling efficiency of the greenhouse.

A cooling water temperature above the standard 30 °C design inlet temperature of AC reduces the performance of the machines and drops of coefficient of performance (COP) 1% - 2% every per degree. Three types of cooling techniques are employed to chillers or thermal power plants to remove heat from their condensers: dry cooling (air cooled), liquid cooling (water cooled), and evaporative cooling [5]. Dry air cooling has the advantage of using free air but has poor performance when the ambient temperature is high. Fan energy consumption is also a drawback for dry cooling. Liquid cooling using a large body of water has a stable performance as cooling temperature is nearly constant. However, not all applications are located near a large water body such as a river or a sea. In the evaporative cooling technique, cooling effect in the cooling tower (CT) is achieved by evaporating a relatively small fraction (1% to 5%) of the water flowing through the

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



system [6]. In the evaporation process, latent heat is removed by the water. Depending on the air-water temperature difference, sensible heat may also be removed by water. The water consumption as well as fan energy consumption are the drawbacks of evaporative CTs [7–9].

Ayoub et al. [10] studied the effect of long-term climate change on thermal power plant performance in France and concluded that increment in the air temperature will drop the efficiency of evaporative cooling tower that lead to a 50% loss in power generation. Following a system upgrade cost analysis, they found out that building additional cooling towers to meet the plant temperature requirement is not economical. The only viable solution is to redesign the cooling tower to operate at higher temperature/humidity. Condensers in cooling systems or thermal power plants got more attention since its mismanagement can drastically reduce the performance of the systems [11].

Night cooling has already been investigated by numerous researchers. Miguel et al. [12] showed that a good slab design for night ventilation is an efficient solution to lower indoor daytime temperature for an office building. In a similar study, Jiang et al. [13] found that night roof ventilation can reduce 10% - 24% of the AC energy consumption while reducing the indoor peak temperature by 3 °C - 5 °C. An experimental study of night sky cooling of water tank by natural convection and sky radiation by Ali [14] showed that water temperature can be lowered by 6.6 °C during the night. However, this result is obtained by keeping the deep of the water at 0.5 m, meaning a large area may be necessary to achieve cooling. Also, water consumption was as high as 4.5%. To avoid the use of water for cooling, Dyreson et al. [15] studied night sky cooling for a CSP plant and found that 80% - 90% of the cooling load can be satisfied with this technique.

In some places where the system is not running 24 hours, the cooling efficiency of a CT can be improved by changing the cooling schedule to take advantage of environmental and resource parameters such as low ambient temperature through the night, off-peak electricity rate, and by using variable speed fan to dynamically optimize fluids flow ratio. In a hybrid wet/dry CT operation, Dehaghani et al. [16] reduced the fan power to 64% and water consumption to 9.4% by using variable speed fans. Naik et al. [17] found that both air/water mass flow rates are proportional to water losses. Belmonte et al. [18] replaced CT of a chiller with a dry cooling device and a phase change material tank in an attempt to stabilize cooling water temperature. The result showed a 21% - 38% decrease in the COP of the chiller when the ambient temperature is greater than 30 °C.

In the literature, night sky cooling principle whether by convection or sky radiation is limited to passive system operation. This paper attempt to apply night sky cooling principle in an active way through a mechanical draft cooling tower. In the paper, the effects of low continuous

flow (LCF) rates on cooling system performance are studied by using TRNSYS. Low night sky temperature and low fan power effect on the cooling efficiency are investigated. System performance obtained by LCF versus intermittent fluid flow rates is analyzed. Also, the storage tanks that allow storing circulating hot and cool water is optimized in term of volume requirement.

## 2. SYSTEM MODELING & WORKING PRINCIPLE

In this section, three different cooling systems are created and modeled in TRNSYS. It is assumed that the working hours are from 08:00 to 16:00; in other words, the ON time period which space cooling is required. The first system is a regular cooling system having a condenser and a CT. Next two systems are newly modeled cooling systems using the LCF introduced earlier.

### 2.2. Model 1 (Regular System)

Figure 1 A regular cooling system formed by a condenser, a CT, a pump and connecting pipes. Since the goal in this study is to lower cooling water temperature, the internal configuration of the condenser is not taken into account. It is assumed that the heat transfer area of the condenser as well as its material is designed to exchange the required heat load,  $Q_{cond}$ .

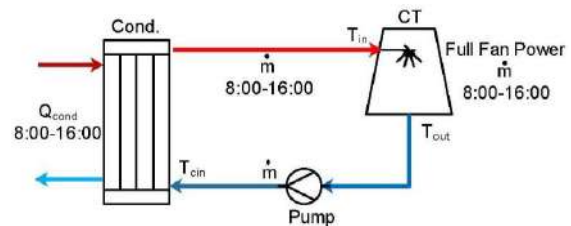


Figure 1. Cooling system of model 1

A mechanical draft CT is used in this study. Warm water entering the CT is spread over a fill to increase the contact area between water and the air being forced through the fill by the electric fan. In this regular cooling system, the CT and the condenser are switched ON/OFF simultaneously during the operation hours. This is a single loop intermittent flow system. From 08:00 to 16:00, the condenser is under heat load ( $Q_{cond} = 22.5 \text{ kW}$ ). The pump maintains a mass flow rate ( $\dot{m} = 2000 \text{ kg/h}$ ) through the system while the CT fan is kept at its rated speed with a power of 3 kW. From 16:00 to 08:00, the condenser heat load is zero meaning the chiller is turned OFF. This simultaneous start-stop is the typical operation mode of commercial or industrial cooling system.

### 2.2. Model 2 (Two Tanks System)

The system of model 1 has been modified by adding 2 identical tanks (T1 and T2) as illustrated in Figure 2. The rest of the components are the same as the previous model. The working principle is explained as follows: In the new system, tank T1 (cool tank) contains cool water

with a mass  $M_i$  (volume  $V_i$ ) and tank T2 (Hot tank) is empty at 08:00. The condenser is under a base heat load  $Q_{cond} = 22.5 kW$  from 08:00 to 16:00. Hot water from the condenser ( $\dot{m} = 2000 \text{ kg/h}$ ) is partially ( $2\dot{m}/3$ ) stored in tank T2, the remaining ( $\dot{m}/3$ ) being cooled in the CT then discharged in tank T1. The condenser doesn't operate from 16:00 to 08:00. During these hours, hot water in tank T2 is cooled at a rate of  $\dot{m}/3$  and stored in tank T1 for the next cycle. In this system, LCF is achieved by reducing the mass flow rate through the CT to 1/3 of the flow rate of the regular system. Also, the air mass flow rate is reduced by setting the fan power to 1/3 of its rated value. In model 2, tank T1 initially stores water of mass  $M_i$  for only 6 working hours with a flow rate  $\dot{m}$  for the cooling system. During this 6 hours period, CT provides cool water for the remaining 2 hours in order to complete the ON time period of 8 hours. This is done by cooling  $\dot{m}/3$  of hot water out of the condenser. The total required cooling water for the condenser  $\dot{m}\Delta t_{ON}$  can be expressed as:

$$\dot{m}\Delta t_{ON} = M_i + \frac{1}{3}\dot{m}\Delta t_{ON} \quad (1)$$

where  $\Delta t_{ON}$  is the working hours,  $M_i$  the initial water mass in tank T1. Since, it is assumed all cool water in T1 has been used by 16:00, the initial cool water  $M_i$  in the storage tank T1 can also be regarded as being produced

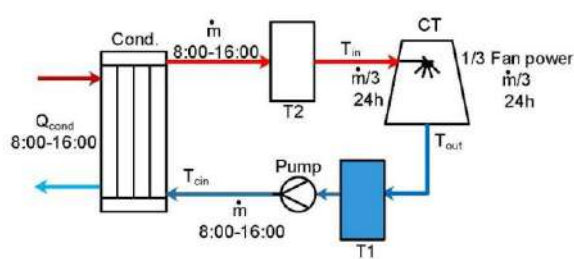


Figure 2. Cooling system of model 2

only during the OFF-time period (16:00-08:00) as given in the equation below.

$$M_i = \frac{1}{3}\dot{m}\Delta t_{OFF} \quad (2)$$

where  $\Delta t_{OFF}$  is the total OFF time hours. The volume of cool water at the end of the condenser working period must be as low as possible. The capacity of each tank is  $M_i = 2\dot{m}\Delta t_{ON} / 3$ . For  $\dot{m} = 2000 \text{ kg/h}$ , this corresponds to  $M_i = 10666.67 \text{ kg}$  or  $V_i = 10.67 \text{ m}^3$  of water.

### 2.3. Model 3

Model 2 enables to reduce the fan power and flow rate to 1/3 compared to model 1. However, it requires 2 identical storage tanks, each with a volume of  $V_i$ . Model 3 proposes a solution to reduce the total storage tank volume of model 2. Thus, the total mass capacity of tanks  $2M_i$  is reduced in the new model. In terms of flow rates and fan capacity, model 3 works as model 2. The idea is to reduce the tanks volume by using multiple smaller size

tanks. In this model, in addition to three water-filled tanks which total a capacity of  $M_i$  as in model 2, two identical empty tanks are included to store the discharged cool water from the CT ( $\dot{m}/3$ ) as well as hot water from the condenser ( $2\dot{m}/3$ ). Individual tank and total tanks capacities can be calculated as:

$$M_{\text{tank}} = \frac{M_i}{n} \quad (3)$$

$$\text{Total tanks capacity} = (n + 2)M_{\text{tank}} \quad (4)$$

Since preliminary calculation showed that tanks number affect only the storage volume but not the cooled water average temperature, calculations of model 3 have been done for a total 5 storage tanks for simplicity of charge/discharge scheduling. Figure 3 shows the new proposed model and the added 5 storage tanks. First, three tanks (T1, T2, and T3) are filled with water and colored in blue at 08:00. Next, two tanks (T4 and T5) are empty and colored in white.

Figure 4 shows the flow schedule of tanks and whether they are filled with hot or cool water. Each column represents the state of the tank at different time of the day. Flow schedule for the tanks helps to use LCF and low fan power while keeping the required tanks capacity at a

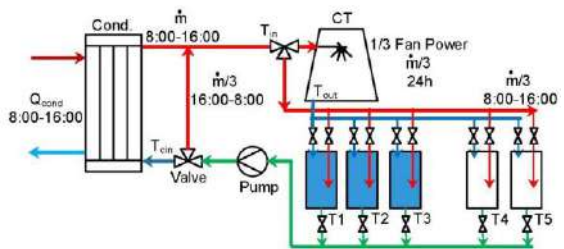


Figure 3. Cooling system of model 3

minimum. The beginning of the day at 08:00, the first three tanks are filled with cool water and the remaining two tanks are empty. During the first two hours, cool water at first tank is circulated through the cooling system at  $\dot{m}$  mass flow rate. Hot water from the condenser is cooled and stored in tank number 4 with the mass flow rate  $\dot{m}/3$ . The remaining  $2\dot{m}/3$  hot water is stored in tank 5. This process is continued for all tanks until 16:00. After 16:00, the condenser operation is stopped, and CT cools all the stored hot water until 08:00 of the next day.

### 3. CT SIMULATION TOOL AND PARAMETERS

TRNSYS software is used to model the proposed cooling systems. The software is well suited for thermal system simulation as its library has all the necessary thermal components. The weather data for the first week of July

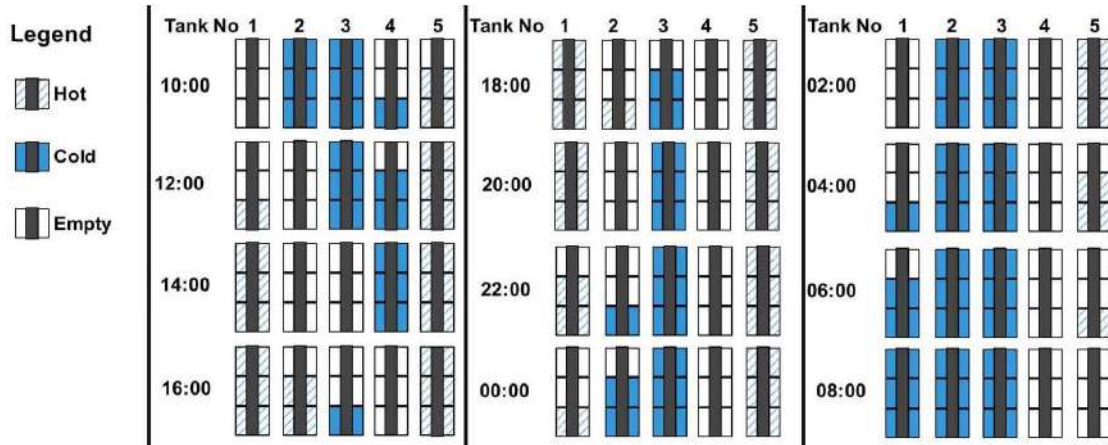


Figure 4. Flow schedule schema of cooling system of model 3

for Izmir, Turkey has been used for the simulation because it is within the hottest period of the year for the selected location. Figure 5 shows the weather data obtained from TRNSYS for the given location through the month of July.

The modeled CT has been calibrated to cool water from

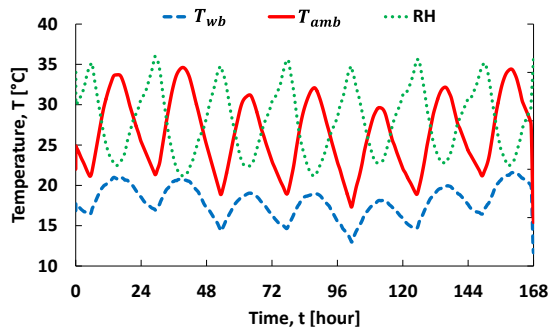


Figure 5. Meteorological input data

40 °C to 30 °C at 25 °C wet bulb temperature. Heat load is taken as the sum of two components; a base load of 22.5 kW and 0.5 kW per degree above 25 °C as given in the following equation.

$$Q_{cond} = Q_{base} + 0.5(T_{amb} - 25) \quad \text{for } T_{amb} > 25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5)$$

$$Q_{cond} = Q_{base} \quad \text{for } T_{amb} \leq 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

This heat rejection rate represents the condenser heat load of a 10 kW cooling capacity water-lithium bromide absorption chiller. Using equation 5 and ambient temperature data from figure 5, the heat load profile of the condenser for the given location is shown in figure 6. An energy balance and predefined parameters are the basis of condenser analysis [19]. A shell-and-tube heat exchanger is modeled as a condenser. A simplified model for shell-and-tubes heat exchanger developed by Vera-Garcia et al. [20] is adopted. The maximum heat transfer  $Q_{max}$  in the heat exchanger is

$$Q_{max} = m_w c_{pw} (T_{vi} - T_{wi}) \quad (6)$$

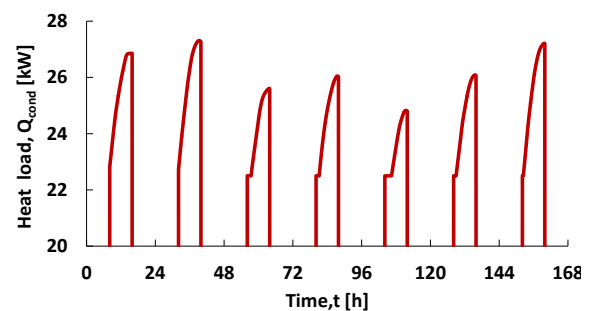


Figure 6. Condenser daily heat load

where  $m_w$ ,  $c_{pw}$ ,  $T_{vi}$ , and  $T_{wi}$  are water mass flow rate, water specific heat, the water vapor and water inlet temperatures, respectively. The heat transfer for the condenser,  $Q_{cond}$  is related to  $Q_{max}$  and calculated as

$$Q_{cond} = \varepsilon Q_{max} \quad (7)$$

where  $\varepsilon$  is the heat exchanger effectiveness assumed to be  $\varepsilon = 0.8$ . The latent heat removed by the condenser is

$$Q_{cond} = m_v h_{fg} \quad (8)$$

where  $m_v$  is the vapor flow rate and  $h_{fg}$  water latent heat of condensation. Finally, the cooling water outlet temperature  $T_{wo}$  is calculated by

$$T_{wo} = T_{wi} + \frac{Q_{cond}}{m_w c_{pw}} \quad (9)$$

Following the condenser analysis, CT is the next component of interest in the cooling system. According to the CT report of SPX cooling technologies company [21], the CT fan is sized at 0.85 hp/ton of cooling capacity of a vapor compression cooling system. Taking into account the COP of these devices (assumed COP = 4), the heat rejection rate is 1.25 ton. By assuming a COP of 0.5 for an absorption chiller and using the sizing scheme of 0.85 hp/1.25 ton of heat rejected, a 3 kW fan is used for the CT under study. In the results, the fan power of the proposed models is expressed as a fraction of the regular system fan power by using the fan law given in Fantech datasheet, rewritten as [22]

$$P_2 = P_1 \left( \frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} \right)^3 \tag{10}$$

where P and V are fan power and air volume flow rate at the specific state of operation. This makes the sizing accuracy to visualize the exact effect of fan speed reduction on system performance. Table 1 summarizes the CT parameters. The following assumptions have been made to simplify the study of the systems:

- Water temperature in the tanks is uniform
- Tanks heat loss/gain is negligible
- Cooling tower parameters change negligibly within the operation range
- Makeup water temperature is equal to the ambient temperature

**Table 1.** Cooling tower parameters

	Model 1	Model 2 & 3
Flow geometry	Counterflow	Counterflow
Water flow rate	2000 kg/h	666.67 kg/h
Cell rated air flow	1280 m <sup>3</sup> /h	1280 m <sup>3</sup> /h
Mass transfer coefficient [4]	1.96	1.96
Mass transfer exponent	-0.69	-0.69
Air velocity ratio	1	0.69
Power	3 kW	3 kW

#### 4. COOLING SYSTEM PERFORMANCE PARAMETERS

The performance of CT is commonly measured through its cooling efficiency. The cooling efficiency,  $\eta$  defined in equation 11 is a measurement of how much the CT outlet temperature is close to the theoretical possible temperature which is the wet bulb temperature. In the literature, the CT inlet-outlet temperature difference is

known as its range and the temperature difference between the outlet and the wet bulb temperature is known as the approach. With these definitions, the efficiency of CT is the ratio of the range over the sum of the range and the approach as given as

$$\eta = \frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in} - T_{wb}} \tag{11}$$

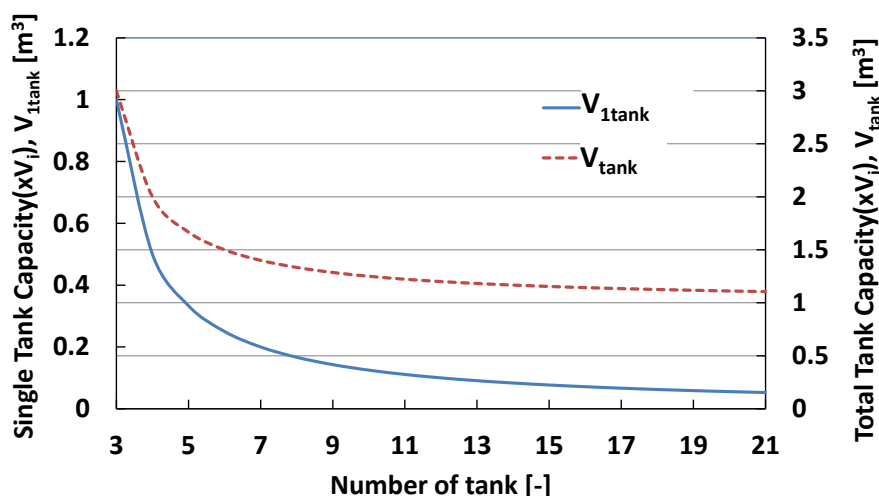
On the fan side, the ratio of the heat rejection by the condenser,  $Q_{reject}$  to per unit work input of the fan,  $W_{fan}$  gives the information about the electric energy performance of the cooling system,  $\Phi$ .

The water loss rate from the CT,  $wl$  is considered as a performance indicator as well. For applications that cannot rely on abundant seawater, the water loss rate can increase the water expenditure.

### 5. RESULTS AND DISCUSSION

#### 5.1. Storage Volume Size Optimization

Figure 7 shows the variation of single tank capacity and the total storage capacity along with the number of tanks for the system of model 3. Model 2 uses only two tanks and the total required storage capacity is  $2V_i$ . Even though, the control scheme of model 3 suggests to reduce the storage capacity, it is increased to  $3V_i$  when only 3 tanks are used. This happens because of the change in the operation mode; two empty tanks being added. Effective volume reduction is obtained by using at least 5 tanks. With 5 tanks, the capacity becomes  $1.67V_i$  in model 3 against  $2V_i$  in model 2. As the number of tanks further increases, storage capacity is getting reduced toward  $V_i$  which is the theoretical minimum capacity. However, splitting water into more tanks reduces drastically the size of the single tank which may become expensive or impractical to use. The single tank size is only 10% of  $V_i$  with 12 tanks. Given the mass flow rate in this study, this represents 12 tanks of  $1.067 \text{ m}^3$  each.



**Figure 7.** Storage capacity as a function of number of tanks



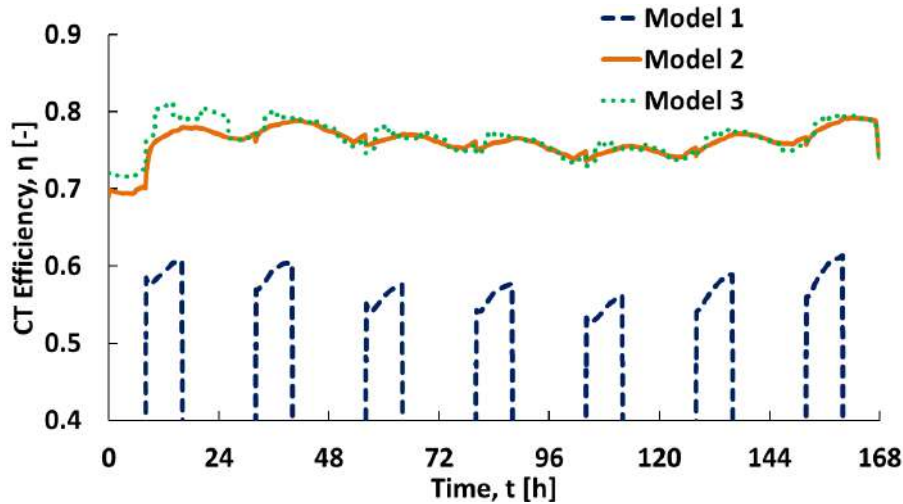


Figure 8. Cooling tower efficiency

5.2. Thermal Response

Figure 8 shows the cooling efficiencies of CT for the three systems. The results show that the cooling efficiencies of model 2 and 3 are approximately 36% higher than that of model 1. Furthermore, unlike model 1, the cooling efficiencies curves for model 2 and 3 are nearly flat during the month since they are working 24 hours/day. Model 1 cooling efficiency is rising steadily from 08:00 to 16:00.

Figure 9 shows the changes in the heat rejection per unit fan power of the systems with time. The heat rejected per unit fan input power for model 2 and 3 is greater than that of model 1. The results show that more heat is rejected per unit fan power during the OFF time. In fact, the wet bulb temperature is lower during the OFF time as shown in the weather data in figure 5, which allows more heat rejection. Still, from the weather data, the low night ambient temperature contributes to the lower CT outlet temperature since water temperature is lowered by the action of both latent heat loss and sensible heat loss.

Ultimately the CTs outlets temperatures must be lower as well.

In table 2, both models 2 and 3 have a condenser inlet water temperature around 20% lower than model 1. Model 2 and 3 give nearly the same average temperature results which means that using multiple tanks only reduce the total storage volume. Using more tanks gives less uniform curves since each tank has a distinct discrete temperature profile. Additionally, the water mass flow

Table 2: Condenser inlet temperature and fan power

	Model 1	Model 2	Model3
Condenser inlet, $T_{wi}$ [C]	26.9	21.03	21.6
T decrease [%]	-	21.82	19.70
Fan power [kW]	3	1	1
Fan power decrease %	-	67.16	67.16

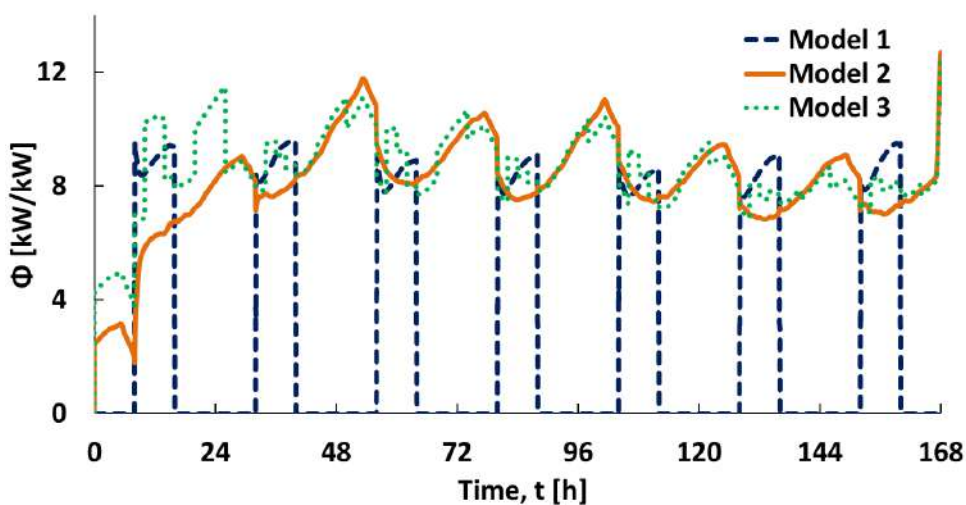


Figure 9. Heat rejection to fan power ratio as a function of time

rate of model 2 and 3 is reduced to 1/3 and the air mass flow rate is reduced to 0.69 of the value of model 1. The NTU being a function of the ratio  $\dot{m}_{water}/\dot{m}_{air}$  in CT, reducing this ratio in turn increases the NTU of the CT which increases the cooling efficiency. The ratios of  $\dot{m}_{water}/\dot{m}_{air}$  for model 2 and 3 are reduced to 0.47 of its reference value in model 1. Physically, the higher relative air velocity in model 2 and model 3 removes the humid air at the water-air interface faster, creating a higher potential for mass transfer by evaporation.

### 5.3. Water Loss And Fan Power

There is no significant difference in water loss for all 3 models as illustrated in figure 10. The average water losses are 1.64%, 1.66% and 1.74% for the model 1, 2, and 3 respectively. However, a small amount of water loss has a significant effect on temperature drop since the loss is accompanied by latent heat removal. Also, from the weather data in figure 5, the lowest relative humidity coincides with the peak ambient temperature which gives the dry air more water absorption potential. As a result of the increasing ambient temperature, water will be absorbed easily. For model 2 and 3, fan power has been reduced by 67% as stated in table 2. This result was expected since fan power drops from 3 kW to 1 kW when air velocity is reduced from 100% to 69% according to fan law.

## 6. CONCLUSION

The cooling performance of regular cooling tower that switches ON/OFF simultaneously with a condenser has been compared with a LCF cooling system. From the two tanks operation, the required storage volume can be reduced up to 50% by using multiple smaller tanks and a control mechanism that alternately fills/drains tanks. As the number of tank increases, they become smaller and may represent handling or economical drawbacks. For 12 tanks, storage capacity becomes 40% lower than the initial 2 tanks model. This can be a good arbitrary cut off number in this study if a practical implementation is

sought. The number of tanks appears not to have an impact on the thermal response of the system.

When the working hours considered, the heat rejection to fan power ration for three systems shows similar values; 8.46, 8.11, and 8.57. Even though the fan power is 3 kW in model 1 and 1 kW in model 2 and 3, since model 1 working hours is 8 hours and model 2 and 3 working hours is 24 hours, the total electric power consumption of fans for all three systems is 24 kWh. The amount of rejected heat from CT is 203.04 kWh for model 1, 196.64 kWh for model 2, and 205.68 kWh for model 3. The power consumption of the pump has not been recorded since the power being function of flow rate and reducing the flow rate to 1/3 will reduce pump power consumption.

The most significant outcome of the study is the reduction of condenser inlet temperature by 5.8 °C or 21.8%. For a heat driven engine, this translates into a system overall efficiency improvement as the heat source and the heat sink temperature gap gets wider. Therefore, using low night temperature is an efficient way to boost the performance of thermal devices. This is done with no penalty of water loss which is nearly the same for both systems. Both sensible heat and latent heat can be removed from the water at night while only latent heat can be significantly removed on daytime because of the high ambient temperature. From the power side, delayed cooling has the advantage of running at 33% of the regular CT fan power. For a big cooling tower, this can represent a saving in power demand charge. From an energy point of view, there is no saving since fans in model 2 and 3 are running 24 h/day. However, fan in the proposed models can be replaced by a smaller one to save money and improve electrical performance.

The disadvantage of delayed cooling is the requirement for storage tanks. The working principle can be used for others applications where storage is freely available or where the condenser heat is valuable. Cogeneration system which outputs cool water for the condenser and thermal energy for domestic hot water production for

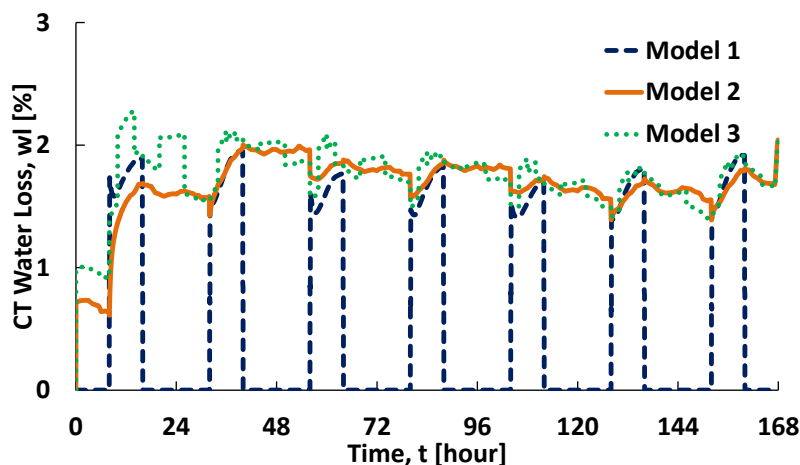


Figure 10. Cooling tower water loss rate



Nomenclature			
COP	Coefficient of performance [-]	$T_{vi}$	Water vapor inlet temperature [°C]
$\dot{m}_{air}$	Air mass flow rate [kg/h]	$T_{wb}$	Wet-bulb temperature [°C]
$\dot{m}_w$	Water mass flow rate [kg/h]	$T_{wi}$	Water inlet temperature [°C]
$\dot{m}_v$	Water vapor mass flow rate [kg/h]	$W_{fan}$	Fan input power [kW]
$M_i$	Initial stored water capacity [kg]	$\dot{V}_i$	Air volumetric flow rate [m <sup>3</sup> /h]
$M_{1tank}$	Single tank capacity in [kg]	$T_{in}$	Cooling tower inlet temperature [°C]
NTU	Number of transfer unit [-]	$\Delta t_{ON}$	Condenser ON time [hours]
$P_i$	Fan power [kW]	$\Delta t_{OFF}$	Condenser OFF time [hours]
$Q_{base}$	Condenser base heat load [kW]	$\varepsilon$	Heat exchanger effectiveness [-]
$Q_{cond}$	Condenser heat load [kW]	$n$	Number of tanks [-]

example can be seen in Figure 10. Overall, the suggested system reduces significantly the condenser working temperature and fan power at once while keeping water loss negligible.

$T_{out}$  Cooling tower outlet temperature [°C]

#### DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS

The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission..

#### REFERENCES

- [1] Isaac M., and van Vuuren D. P., "Modeling Global Residential Sector Energy Demand for Heating and Air Conditioning in the Context of Climate Change", *Energy Policy*, 37(2): 507–521, (2009).
- [2] Ghani S., Bakochristou F., ElBialy E. M. A. A., Gamaledin S. M. A., Rashwan M. M., Abdelhalim A. M., and Ismail S. M., "Design Challenges of Agricultural Greenhouses in Hot and Arid Environments – A Review", *Eng. Agric. Environ. Food*, 12(1): 48–70, (2018).
- [3] Xu J., and Li Y., "Experimental Performance of Evaporative Cooling Pad Systems in Greenhouses in Humid Subtropical Climates", *Appl. Energy*, 138: 291–301, (2015).
- [4] Abu-Hamdeh N. H. and Almitani K. H., "Solar Liquid Desiccant Regeneration and Nanofluids in Evaporative Cooling for Greenhouse Food Production in Saudi Arabia", *Sol. Energy*, 134: 202–210, (2016).
- [5] M. R. Susta, "Condensers and Coolings Systems", (2004).
- [6] TRNSYS, "Mathematical Reference Volume 5", (2006).
- [7] Kumar P., "Cooling Tower", Energy Efficiency in Electrical Utilities Guide Book, (2005).
- [8] Liu N., Zhang L., and Jia X., "The Effect of the Air Water Ratio on Counter Flow Cooling Tower", *Procedia Eng.*, 205: 3550–3556, (2017).
- [9] Abdel-Cooling tower efficiency Operating Parameters on the Performance of Counter Flow Type Cooling Towers", *Industry, Education, Dept. Mansoura Univ, New Damietta*, Egypt, (2004).
- [10] Ayoub A., and Gjorgiev B., "Cooling Towers Performance in a Changing Climate: Techno-Economic Modeling and Design Optimization", *Energy*, 160: 1133–1143, (2018).
- [11] Cengel Y., and Boles M., *Thermodynamics: An Engineering Approach*, (2006).
- [12] Lança M., Coelho P. J., and Viegas J., "Enhancement of Heat Transfer in Office Buildings during Night Cooling – Reduced Scale Experimentation", *BUILD. Environ.*, 148: 653–667, (2019).
- [13] Jiang L., and Tang M., "Thermal Analysis of Extensive Green Roofs Combined with Night Ventilation for Space Cooling", *Energy Build.*, 156: 238–249, (2017).
- [14] Ali A. H. H., "Passive Cooling of Water at Night in Uninsulated Open Tank in Hot Arid Areas", *Energy Convers. Manag.*, 48(1): 93–100, (2007).
- [15] Dyreson A., and Miller F., "Night Sky Cooling for Concentrating Solar Power Plants", *Appl. Energy*, 180: 276–286, (2016).
- [16] Taghian Dehaghani S., and Ahmadikia H., "Retrofit of a Wet Cooling Tower in Order to Reduce Water and Fan Power Consumption Using a Wet/Dry Approach", *Appl. Therm. Eng.*, 125: 1002–1014, (2017).
- [17] Naik B. K., Choudhary V., Muthukumar P., and Somayaji C., "Performance Assessment of a Counter Flow Cooling Tower – Unique Approach", *Energy Procedia*, 109: 243–252, (2017).
- [18] Belmonte J. F., Izquierdo-Barrientos M. A., Eguía P., Molina A. E., and Almendros-Ibáñez J. A., "PCM in the Heat Rejection Loops of Absorption Chillers. A Feasibility Study for the Residential Sector in Spain", *Energy Build.*, 80: 331–351, (2014).

- [19] Kasumu A. S., Nassar N. N., and Mehrotra A. K., "A Heat-Transfer Laboratory Experiment with Shell-and-Tube Condenser", *Educ. Chem. Eng.*, 19: 38–47, (2017).
- [20] Vera-García F., García-Cascales J. R., González-Maciá J., Cabello R., Llopis R., Sanchez D., and Torrella E., "A Simplified Model for Shell-and-Tubes Heat Exchangers: Practical Application", *Appl. Therm. Eng.*, 30(10): 1231–1241, (2010).
- [21] Spxcooling.com. Application of Cooling Towers for Free Cooling. [online] Available at: <https://spxcooling.com/library/detail/the-application-of-cooling-towers-for-free-cooling> [Accessed 24 Jan. 2019].
- [22] Fantech.com.au. Fan Laws, (2016). [online] Available at: <https://www.fantech.com.au/images/PDF/Catalogue/fanlaws.pdf> [Accessed 24 Jan. 2019]



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Asenkron motorlarda paralel hizalama hatalarının entropi analizi ile incelenmesi

## *Investigation of parallel misalignment faults of induction motor by using entropy analysis*

Yazar(lar) (Author(s)): Abdurrahman ÜNSAL

ORCID: 0000-0002-7053-517X

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Ünsal A., “Asenkron motorlarda paralel hizalama hatalarının entropi analizi ile incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1037-1050, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.551490

# Asenkron Motorlarda Paralel Hizalama Hatalarının Entropi Analizi ile İncelenmesi

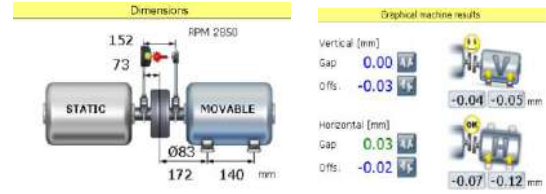
## Investigation of Parallel Misalignment Faults of Induction Motor by Using Entropy Analysis

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Asenkron motor – yük paralel hizalama hataları. / Parallel misalignment of induction motor –load.
- ❖ Stator akımı sinyali entropi analizi. / Entropy analysis of stator current signals.
- ❖ 3-eksen titreşim sinyali entropi analiz. / Entropy analysis of 3-axis vibration signals.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Laboratuvar ortamında, motor-yük paralel hizalama hataları kaplin ayar cihazı kullanılarak kademeli olarak ayarlandı. Her kademe motor yüklenerek akım ve titreşim sinyallerinin entropi değerleri hesaplandı. / In the laboratory, parallel misalignment between motor-load were adjusted gradually by using a coupling adjusting device. At each stage the motor was loaded and the entropy values of the current and vibration signals were calculated.



Şekil. Hizalama hatalarının ayarlanması / Figure. Adjustment of misalignment

### Amaç (Aim)

Bu çalışmanın amacı asenkron motor ve yük arasındaki paralel hizasızlık problemlerinin etkilerini stator akımı sinyalleri ve 3-eksen titreşim sinyallerini kullanarak analiz etmektir. / The aim of this study is to analyze the effects of parallel misalignment problems between induction motors and load by using stator current signals and 3-axis vibration signals.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Asenkron motor ve yük arasındaki hizasızlıklar bir lazer kaplin ayar cihazı ile üç farklı kademede ayarlandı. Her kademede asenkron motor kademeli olarak yüklenerek stator akım sinyalleri ve titreşim sinyalleri kaydedilerek analiz edildi. / The misalignments between the induction motor and load were adjusted at three different stages with a laser coupling adjustment device. At each stage, the induction motor was loaded gradually and stator current signals and vibration signals were recorded and analyzed.

### Özgünlük (Originality)

Asenkron motorlar ile yük arasında, montaj sırasında veya sonrasında meydana gelen paralel hizasızlık problemleri laboratuvar ortamında oluşturuldu. Hizasızlık etkileri stator akım sinyalleri ve 3-eksen titreşim sinyallerinin entropi değerleriyle incelendi. / Parallel misalignment problems that occurred between induction motors and load, during or after assembly were created in the laboratory. The misalignment effects were analyzed by using the entropy of the stator current signals and entropy of 3-axis vibration signals.

### Bulgular (Findings)

Stator akımı entropi değerleri yük artışıyla düzenli artmaktadır. Hizasızlık hatası artıkça x-eksen ve z-eksen titreşim sinyali entropi değerleri artmaktadır. y-eksen titreşim sinyali entropi değerleri azalmaktadır. / Entropy of stator current increase with increasing load. As the misalignment increases, the entropy of x-axis and z-axis vibration signal increase and the entropy of y-axis vibration signal decreases.

### Sonuç (Conclusion)

Stator akımı ve titreşim sinyali entropi değerlerindeki değişimlerin, hizasızlık sonucu asenkron motorun gövdesinde indüklenen kuvvet ve momentlerin bir sonucudur. Entropi analizi ile motor-yük hizasızlık problemlerinin motor üzerine etkileri tespit edilebilir. / The changes in entropy of the stator current and vibration signals are caused by the forces and torques induced in the body of the induction motor as a result of misalignment. The effects of motor-load misalignment problems on the motor can be determined by using entropy analysis.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Asenkron Motorlarda Paralel Hizalama Hatalarının Entropi Analizi ile İncelenmesi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Abdurrahman ÜNSAL\***

Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 09.04.2019 ; Kabul/Accepted : 01.10.2019)

## ÖZ

Asenkron motorlar elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesinde yaygın olarak kullanılan elektrik makinalarıdır. Asenkron motorlarda meydana gelen yaygın arızalar elektriksel ve mekaniksel arızalar olarak iki gruba ayrılır. Elektriksel arızalar stator arızaları ve rotor arızalarından oluşmaktadır. Mekaniksel arızalar ise rulman arızaları, eksenal kaçıklık arızaları ve motorun mekanik aksamı ile ilgili olan diğer arızalardan oluşmaktadır. Mekanik arızaların önemli bir kısmını rulman arızaları oluşturmaktadır. Rulman arızalarının ana sebeplerinden bir tanesi kaplin ayarının iyi yapılmaması ve/veya motor-yük arasındaki hizasızlık sonucu meydana gelen mekanik problemlerdir. Bu makalede bir asenkron motor ile yük arasında meydana gelen hizasızlık probleminin motora etkileri incelendi. Asenkron motor ile yük arasında bir adet yıldız-esnek kaplin kullanıldı. Kendinden uyarımlı bir senkron generatör ile yüklendi. Motor-yük (senkron generatör) arasındaki hizasızlıklar bir lazer kaplin ayar cihazı ile kademeli olarak ayarlandı. Her kademede motor stator akımı ve titreşim sinyalleri kaydedildi. Akım ve titreşim sinyalleri frekans domaininde analiz edildi. Daha sonra entropi değerleri hesaplandı. Hizasızlık problemleriye akım ve titreşim sinyalleri entropi değerinin değişimi deneysel olarak incelendi. Entropi değerindeki değişim ile hizasızlık problemlerinin analiz edilebileceği ispat edildi.

**Anahtar Kelimeler:** Asenkron motorlar, arıza analizi, kaplin hizalama hataları, entropi analizi.

## Investigation of Parallel Misalignment Faults of Induction Motor by Using Entropy Analysis

### ABSTRACT

Induction motors are widely used electrical machines in converting electrical energy into mechanical energy. Common faults of induction motors are divided into two groups as electrical and mechanical faults. Electrical faults consist of stator faults and rotor faults. Mechanical faults include bearing failures, axial misalignment and other faults related to the mechanical components of the motor. Bearing failures has significant share in mechanical faults. One of the main causes of bearing failures is the misalignment between the motor and the load. In this paper, the effects of the misalignment problems between an induction motor and a load are investigated. A star-flexible coupling was used between the induction motor and the load. The motor was loaded with a self-excited synchronous generator. Motor-load (synchronous generator) misalignments were gradually adjusted by a laser coupling alignment tool. At each alignment level the stator current and vibration signals were recorded. Current and vibration signals were analyzed in the frequency domain. Then entropies of current and vibration signals were calculated. The change in the entropy of current and vibration signals due to misalignment were investigated experimentally. It has been shown that the misalignment problems can be analyzed with the change in entropy of stator current and vibration signals.

**Keywords:** Induction motors, fault analysis, coupling misalignment faults, entropy analysis.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Asenkron motorlar sanayide kullanılan en yaygın elektrik motorlarıdır. Asenkron motorlarda meydana gelebilecek herhangi bir arıza üretim süreçlerinin önemli ölçüde kesintiye uğramasına ve üretim kayıplarına sebep olabilmektedir. Bundan dolayı Asenkron motorların durumlarının sürekli olarak izlenmesi ve olası arızalarının zamanında tespit edilmesi ve gerekli önlemlerin alınması son derece önemlidir. Bundan dolayı son yıllarda asenkron motorların arızaları alanında yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Asenkron motorların izlenmesi ve arızalarının tespit edilmesi alanında yapılan çalışmalar ağırlıklı olarak, stator akım sinyalleri ve titreşim

sinyallerinin çeşitli sinyal işleme metotları ile analiz edilmesiyle gerçekleştirilmektedir.

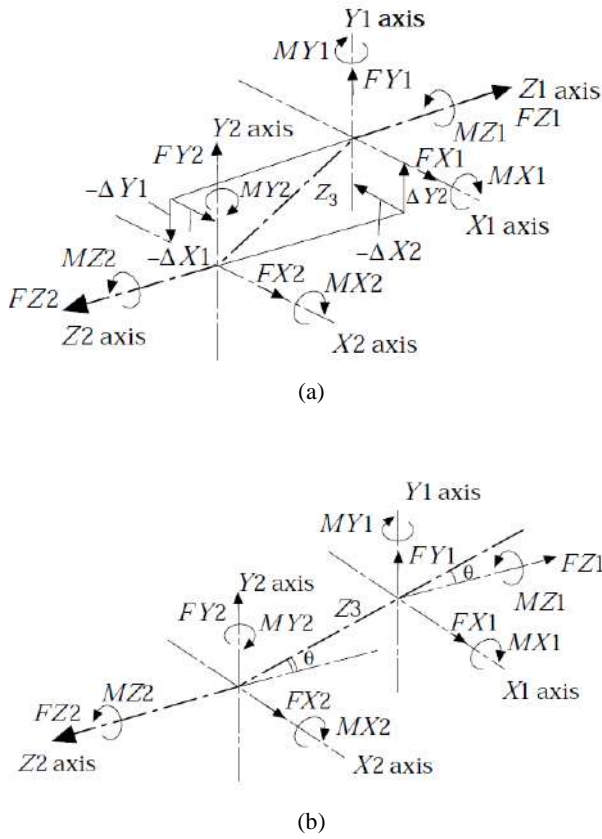
Mekanik arızalar asenkron motorlarda meydana gelen arızaların %50'den daha fazlasını oluşturmaktadır [1, 2]. Mekanik arızalar rulman arızaları, eksenal kaçıklık, motor kapağı, aktarma organları, motor mili vb. çeşitli arızalardan oluşmaktadır [3]. Mekanik arızaların ana sebeplerinden bir tanesi motor ile yükün doğru bir şekilde hizalanmamasıdır. Hizalama problemi, iki (veya daha fazla) makine milinin merkez dönme çizgilerinin birbiriyle aynı yönde hizalanmadığı durumlarda meydana gelir. Hizasızlık, mekanik sistemlerde dengersizlikten sonra en sık görülen ikinci arıza çeşididir [4]. Motor ile yükün doğru bir şekilde hizalanmaması durumunda motor eksenal ve radyal yönde çeşitli kuvvetlere maruz kalır. Şekil 1'de verilen koordinat

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : unsal@dpu.edu.tr



sisteminde motorun hizasızlık sonucu maruz kaldığı kuvvetler  $F_x$ ,  $F_y$ , ve  $F_z$  ile, momentler de  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  ile gösterilmektedir [5]. Bu kuvvet ve momentlerden dolayı motorda mekanik titreşimler meydana gelerek motorun mekaniksel olarak arızalanmasına sebep olmaktadır [3, 4, 6-8].

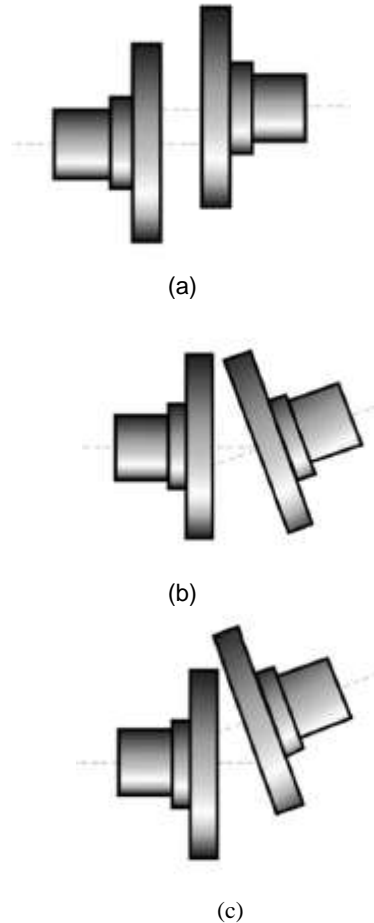
Mekanik arızalarının önemli bir kısmı rulman arızalarından oluşmaktadır. Bu konuda literatürde çok sayıda çalışma yayınlanmıştır. Yapılan literatür çalışmalarında motor arızalarının %51'den fazlasının doğrudan veya dolaylı olarak rulmanlardan kaynaklandığı bildirilmektedir [9, 10]. Büyük güçlü motorlarda rulman arızalarının mekanik arızalar içindeki oranı %90'a kadar çıkabilmektedir [11].



**Şekil 1.** Kaplin koordinat sistemi (a) Paralel hizasızlık (b) açısal hizasızlık (Coupling co-ordinate system: (a) parallel misalignment (b) angular misalignment)

Rulman arızaları genellikle rulman bakımlarının zamanında yapılmaması, ağır mekanik şartlar altında çalışma, hatalı montaj ve motor-yük arasındaki kaplin hizasızlık problemleri gibi çeşitli sebeplerden kaynaklanmaktadır. Dönen makinalarda titreşim arızaların %70'ten fazlası mil hizasızlığından kaynaklanmaktadır [12]. Millerinin yanlış hizalanması makineleri etkileyen ve çoğu zaman makine titreşiminin temel bir nedeni olan reaksiyon kuvvet ve momentlere neden olur. Yanlış hizalanmış miller 2X (dönüş hızının iki katı) karakteristik titreşim frekans bileşenleri üretmektedir [13].

Hizalama hatalarının rotor dinamik davranışı üzerine etkileri alanında birçok çalışma yapılmıştır. Rotor dönüş hızının iki katı dönme hızındaki 2X titreşimler ve karakteristik harmonikleri bir yanlış hizalama sonucu ve belirtisi olarak bildirilmiştir. Buna karşın paralel hizalama hataları sonucu 1X titreşimlerinin de meydana geldiği bildirilmektedir [4]. Hatalı hizalanmış rotor sistemleri üzerinde yapılan deneysel araştırmalarda çalışma hızının harmonik serisine sahip frekans spektrumunu bildirmiştir. Aynı zamanda farklı esnek bağlantı tiplerinin aynı hizalama koşulu altında titreşim tepkisinde farklı frekans bileşenlerinin (harmoniklerin) meydana geldiği de bildirilmiştir. Araştırmacılar tarafından önerilen farklı titreşim harmonikleri arasında, güçlü 2X harmonikli titreşimin kullanımı hatalı hizalamanın tespit edilmesi için yaygın olarak kabul edilmektedir [4]. Bununla birlikte güçlü 2X titreşimleri sadece hatalı hizalamadan kaynaklanmayıp çatlak ve sertlik asimetrisi gibi başka hatalardan da kaynaklanabilir. Bazı çalışmalarda hatalı hizalama ile ilgili önemli frekanslar 1X, 2X, 3X ve 4X olarak verilmektedir [14]. Hatalı hizalama problemi detaylı olarak [15]'te matematiksel olarak modellenmiştir.



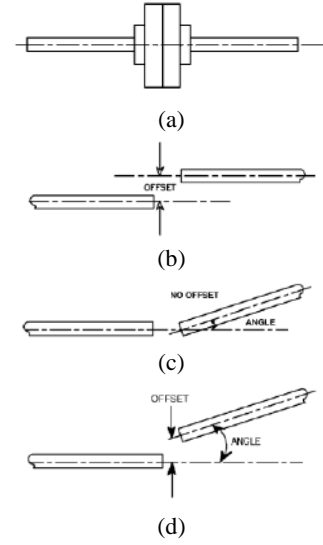
**Şekil 2.** Kaplin hizasızlık problemi: (a) paralel hizasızlık (b) açısal hizasızlık (c) karma hizasızlık [12] (Coupling misalignment problem: (a) offset (b) angular (c) mixed)

Rotor sistemlerinin bozulmasında hizasızlık problemi ikinci sırada gelmektedir. İki çeşit hizasızlık problemi

yaygın olarak görülür: paralel ve açısal hizasızlık. İleri-teknoloji kaplin ayar cihazları kullanılsa dahi motor-yük arasında bir miktar hizasızlık gözlemlenebilir. Bu hizasızlık durumu kaplin merkezinde ölçülür. Açısal hizasızlık bazen “gap” olarak, paralel hizasızlık da “offset” olarak isimlendirilir. Açısal ve paralel hizasızlık hem yatay ekseninde hem de dikey ekseninde görülebilir. Pratik uygulamalarda genelde hem açısal hem de paralel hizasızlık durumu aynı anda görülebilir. Buna karma hizasızlık denir. (Şekil 2 ve Şekil 3) [16, 17]. Bu hizasızlıklar montaj sırasında meydana gelebilir veya motorun uzun süre çalışması sonucu motor ile yükün farklı termal streslere maruz kalması sonucu da meydana gelebilir. Dolayısıyla motor yük arasında paralel, açısal veya karma olmak üzere mutlaka bir hizasızlık mevcuttur. Ancak bu hizasızlığın kabul edilebilir sınırlarda olması gerekir [7].

Uygun hizalamanın yapılması ile paralel hizasızlık ve açısal hizasızlık sonucu meydana gelen kuvvet ve momentler azalacağından dolayı motorun harcadığı enerjiyi ve gürültüyü azaltır, kaplin, rulman ve contaların ömrünü uzatır [18]. Makinalarda görülen mil bükülmesi, titreşimde artış (radyal ve eksenel yönde), rulmanlarda aşırı ısınma, gürültü, rulman ve kaplinlerde aşınma kaplinlerde hizasızlık olduğunu göstermektedir. Buna göre hem açısal hem de paralel hatalı hizalama sisteme statik bir yüklemeye veya ön yüklemeye yapar. Sistemde sadece açısal hatalı hizalama varsa bu durum statik sistem yer değiştirmelerine neden olur. Hizalama hataları sonucu ortaya çıkan momentler hizasızlık açısını azaltarak sistemin daha büyük statik kuvvetlere maruz kalmasına sebep olur. Elektrik motorlarında hizasızlık derecesi arttıkça motorun verimi düşecektir [19]. Hizasızlık durumunda kaplin ve rulmanlar da ekstra güç tüketimine sebep olduklarından motorun toplam verimi azalmaktadır. Bu güç tüketimi sadece kayıp güç olmayıp motorda hizasızlık sonucunda ortaya çıkan kuvvet ve momentlere karşı tüketilen güçtür. Hizalama hatalarının motor tarafından tüketilen aktif gücün izlenmesine dayanan bir çalışma [20]'da verilmektedir. Bu çalışmada hizasızlık ile ilgili frekansları belirleyen bir model de sunulmaktadır ve deneysel sonuçlarla önerilen yöntemin uygulanabilirliği gösterilmiştir.

Hizasızlık problemi rulmanlarda ciddi seviyede titreşimler üretir. Hizasızlık sonucu meydana gelen titreşimler doğrudan makinanın hızıyla ve kaplinin esnekliğiyle de ilişkilidir. Esnek kaplinler daha düşük seviyede titreşim üretir. Bir makinada paralel hizasızlık olduğu halde bazen 2X titreşimleri görülmeyebilir [21]. Hizasızlık sonucu meydana gelen titreşimler genel olarak eksenel yönde ve 2X motor hızında titreşimlere sebep olur. Hizasızlık sonucu meydana gelen 2X frekans tepkileri sistemin doğal frekansına yakın değilse bu tepkiler net olarak görülmeyebilir. Bu durumlarda hizasızlık probleminin 2X tepkisinden tespit edilmesi son derece zordur. Bununla birlikte 2X tepkisi sistemin doğal frekansına yakın veya doğal frekansında ise 2X tepkisinin genliği artarak daha net bir şekilde frekans spektrumunda görülebilir.



**Şekil 3.** Kaplin Ayarı (a) mükemmel ayar (b) paralel hizasızlık (offset) (c) açısal hizasızlık (d) karma hizasızlık (Coupling alignment (a) excellent (b) offset (c) angular (d) mixed)

Hatalı hizalama elektrik motorlarında (motorun dinamik davranışın etkilediği için) stator akımına da harmonik olarak yansır. Bu durum statik ve dinamik eksenel kaçıklıkla ilgili harmoniklerin genliğinde artışa sebep olmaktadır [20]. Hem eksenel kaçıklık arızaları hem hizasızlık problemleri stator akımında

$$f_{hiz} = (f \pm n f_r) \quad (1)$$

frekanslarında harmonikler üretir ( $f$  şebeke frekansını,  $f_r$  rotor dönme frekansını göstermektedir. Bundan dolayı bu arızaların birbirinden ayrı olarak tespit edilmesi oldukça zordur. Bu zorluğu aşmak için hizasızlık probleminin motor akımına etkisinin öncelikli olarak tanımlanıp tespit edilmesi gerekir. Bu tespit edildikten sonra eksenel kaçıklık arızalarından ayrılabilir. Açısal hizasızlık arızaları sadece statik ve dinamik eksenel kaçıklık sonucu oluşan  $(f+f_r)$  ve  $(f-f_r)$  frekans bileşenlerinin genliğinde değil aynı zamanda  $(f+2f_r)$  ve  $(f-2f_r)$  frekanslarındaki yan-band harmoniklerin genliğinde de artışa sebep olur [20].

Açısal hizasızlık şiddeti arttıkça stator akımında meydana gelen  $(f\pm f_r)$  frekans bileşenlerinin genliklerinde artış meydana gelir. Buna karşın motorun yük seviyesi arttıkça da  $(f\pm f_r)$  frekans bileşeninin genliğinde azalma meydana gelir. Benzer şekilde paralel dengesizlik şiddeti arttıkça stator akımında meydana gelen  $(f\pm f_r)$  frekans bileşenlerinin genliklerinde artış meydana gelir ancak yük seviyesi arttıkça da  $(f\pm f_r)$  frekans bileşeninin genliğinde azalma meydana gelir [22]. Deneysel çalışmalarda bu durumun göz önünde bulundurulması gerekir.

## 2. ENTROPİ ANALİZİ (ENTROPY ANALYSIS)

Entropi bir sistemdeki belirsizlik miktarını belirlemek için kullanılan bir kavramdır. Entropi kavramı bilgi

kuramında ilk kez 1948 yılında Claude Shannon tarafından kullanılmaya başlandı [23]. Shannon entropisi başlangıçta bilgi kaynağının belirsizliğini ve düzensizliğini ifade etmek için kullanılmaya başlandı. Daha sonra Shannon entropisi bilgi kuramı dışında diğer alanlarda belirsizliğin veya düzensizliğin ölçüsü olarak kullanılmaya başlandı. Düzensizlik bir sistemin bileşenleri arasındaki enerji akışıyla ilgilidir. Sistem düzensizliği arttıkça sistemi oluşturan bileşenler arasındaki enerji alış verişi azalır ve entropi değerinde de artış meydana gelir. Buna göre en düzensiz bir sistem maksimum entropi değerine sahip sistemdir [24-27] [23, 28] [29, 30]. Bir sistemdeki belirsizlik veya düzensizlik miktarı arttıkça entropi değeri yükselir. Birçok entropi metodu olmasına rağmen Shannon entropi metodu probabilistik metotlar kullanılarak bir sinyaldeki bilgi miktarını ortaya çıkarmak için kullanılır. Bundan dolayı bu çalışmada Shannon entropisi kullanılmıştır. Shannon entropi aşağıdaki şekilde hesaplanır [31].

Rastgele  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  gibi  $n$  değerli bir  $x$  olayının Shannon entropi değeri aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır [23, 24].

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2[p(x_i)] \quad (2)$$

Burada  $p(x_i)$  her bir  $x_i$  değerinin  $X$  olayı içindeki olasılığını vermektedir. Bu çalışmada da Shannon entropisi asenkron motorların hatalı hizalama arızalarının analizinde kullanılmaktadır. Hatalı hizalama arızaları asenkron motorun kararlı durumda çalışmasını olumsuz etkileyip motorun düzensiz olarak çalışmasına sebep olur. Bu düzensizlik durumu elektriksel olarak motorun stator akımına harmonik olarak yansımaktadır. Bu durum ayrıca asenkron motorun çalışmasını mekanik olarak etkileyip motor titreşiminde artış meydana getirmektedir. Dolayısıyla bu çalışmada hem stator akımı entropi değerleri hem de motorun 3-eksen titreşim sinyallerinin entropi değerleri incelenmiştir.

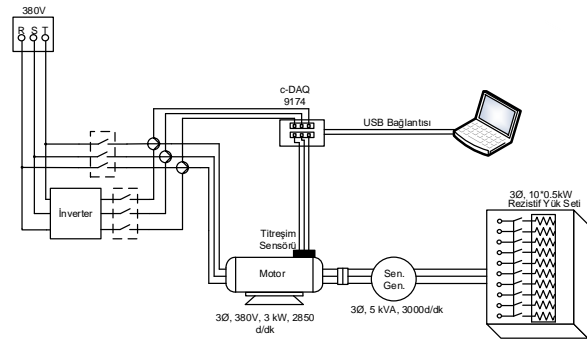
### 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL WORK)

Çalışmada 3 fazlı, 3 kW, 2850 d/dk etiket değerlerine sahip bir asenkron motor kullanıldı. Yük olarak 5 kVA gücünde kendinden uyartımlı bir senkron generatör kullanıldı. Senkron generatörün çıkışına da 5 kW gücünde resistif bir yük bağlandı. Şekil 4'te deney düzeneği görülmektedir.

Motor-yük arasında aksel (paralel) yönde üç kademe hizasızlıklar meydana getirildi. Hizasızlık derecesi Şekil 5'te verilen lazer kaplin ayar cihazı ile ölçülerek ayarlandı. Aksel yönde hizasızlık meydana geldiğinde kaçınılmaz olarak radyal yönde de hizasızlık hataları meydana gelir [16]. Kaplinlerde kabul edilebilir hizalama toleransları kaplin yapısına, ebatlarına ve kaplinin kullanıldığı sistemin hızına bağlıdır. Kaplin hizalama tolerans değerleri kaplin üreticileri tarafından verilmektedir. Çizelge 1'de kısa ve esnek kaplinler için literatürde verilen standart toleranslar değerleri

görülmektedir [10]. Bu çalışmada asenkron motor ile yük arasında bir adet yıldız-esnek kaplin kullanıldı.

Motor yük arasında üç farklı kademe yatay ve dikey ekseninde hatalı hizalama yapılarak testler gerçekleştirildi. Her hizalama kademesinde motor %25, %50, %75 ve %100 oranında yüklenerek stator akımı ve titreşim sinyalleri kaydedildi. Stator akım sinyalinin kaydedilmesinde NI donanımı kullanıldı. Titreşim sinyallerinin kaydedilmesinde bir adet 3-eksen ivmeölçer cihazı kullanıldı. İvmeölçer cihazının çıkış sinyalleri sinyal şartlandırıcı ile yükselttilerek National Instrument (NI) donanım üzerinden bilgisayara aktarıldı. İvmeölçerin kayıt eksenleri Şekil 6'da görülmektedir.



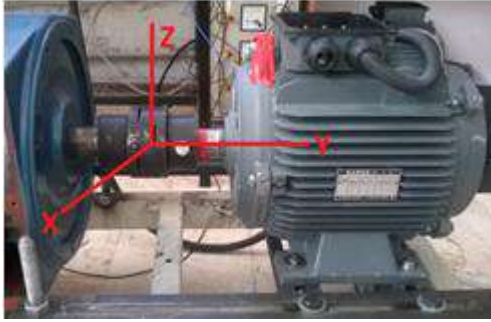
Şekil 4. Deney düzeneği (Experimental set-up)

Çizelge 1. Standart paralel hizasızlık toleransları (Standard shaft alignment tolerances)

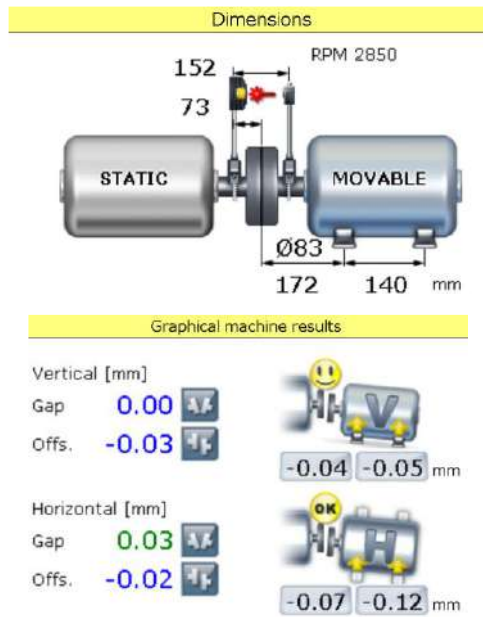
SHAFT ALIGNMENT TOLERANCES (SHORT COUPLINGS)				
RPM	EXCELLENT		ACCEPTABLE	
	Offset (mils)	Angularity (mils/inch)	Offset (mils)	Angularity (mils/inch)
600	5.0	1.0	9.0	1.5
900	3.0	0.7	6.0	1.0
1200	2.5	0.5	4.0	0.8
1800	2.0	0.3	3.0	0.5
3600	1.0	0.2	1.5	0.3
7200	0.5	0.1	1.0	0.2



Şekil 5. Kaplin ayar cihazı (Coupling alignment tool)



Şekil 6. İvmeölçer sinyal kayıt eksenleri (Accelerometer signal recording axes)



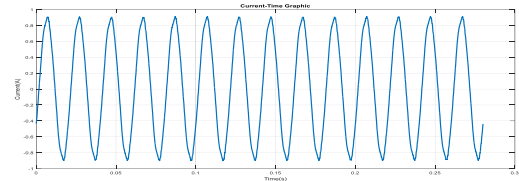
Şekil 7. Hizalı yük motor-yük boyutları ve hizalama kademeleri (Alignment load motor-load dimensions and alignment stages)

#### 4. SONUÇLAR (RESULTS)

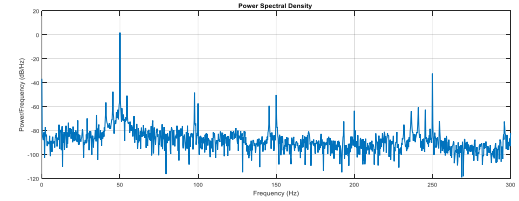
DeneySEL çalışmada 3-faz stator akımı ve 3-eksen titreşim sinyalleri kaydedildi. Üç faz stator akımlarından sadece bir faz akımı burada gösterilmektedir. Sadece bir faz akımı %100 yükleme durumu için verilmektedir. Hem stator akımları hem de titreşim sinyallerinin güç spektrum yoğunlukları hesaplandı. Sonuçlar hem zaman domeninde hem de frekans domeninde birlikte verilmektedir.

##### 4.1 Hizalı Yük (Aligned Load)

Motor-yük arasındaki paralel hizasızlık hem dikey hem de yatay ekseninde 0,055 mm'den daha az ise sistem dengeli (normal hizalı) olarak kabul edildi. Hizalı veya normal hizalı kaplin ayar değerleri Şekil 7'de verilmektedir. Normal hizalı çalışma durumunda stator akımı ve stator akımının güç spektral yoğunluğu Şekil 8'de verilmektedir. Motor gövdesinde kaydedilen 3-eksen (x, y z) titreşim sinyalleri ve bu sinyallerin güç spektral yoğunlukları sırasıyla Şekil 9 (x-eksen), Şekil 10 (y-eksen), ve Şekil 11'de (z-eksen) verilmektedir.

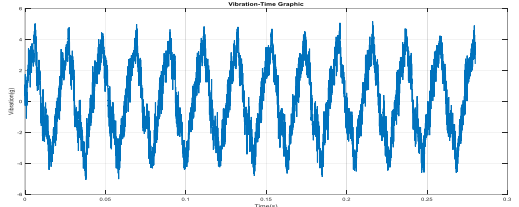


(a) Stator akımı

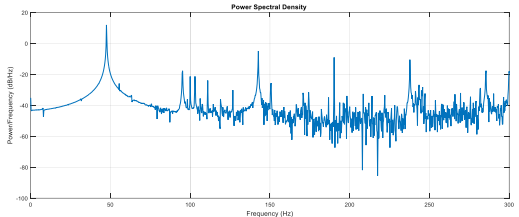


(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 8. Normal hizalı yük stator akımı (Normally aligned load stator current)

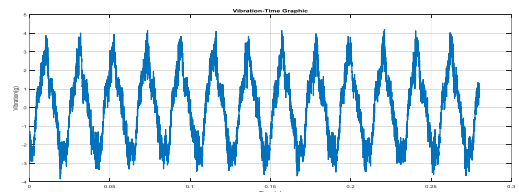


(a) Titreşim sinyali

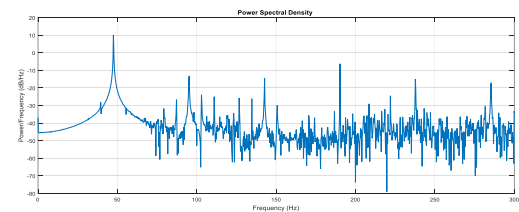


(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 9. Normal hizalı yük x-ekseni titreşim sinyalleri (Aligned load x-axis vibration signals)



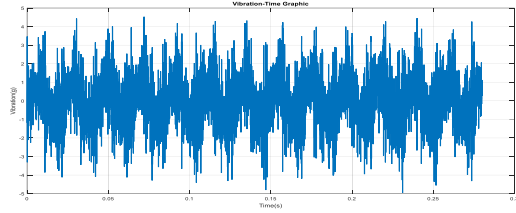
(a) Titreşim sinyali



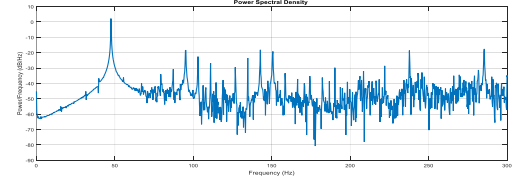
(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 10. Normal hizalı yük y-ekseni titreşim sinyalleri (Aligned load y-axis vibration signals)



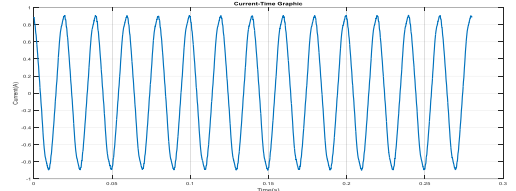


(a) Titreşim sinyali

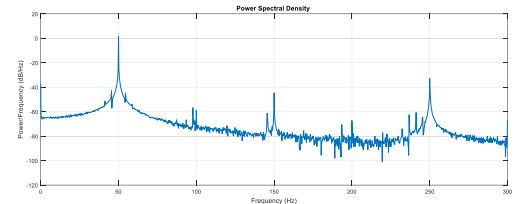


(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 11. Normal hizalı yük z-ekseni titreşim sinyalleri (Aligned load z-axis vibration signals)

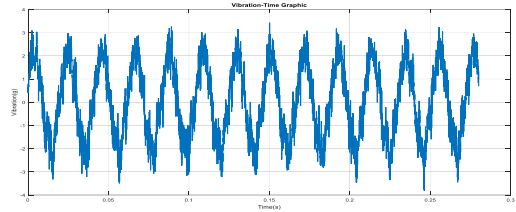


(a) Stator akımı

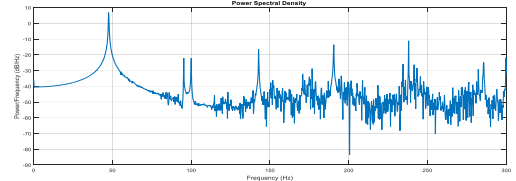


(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 12. Birinci kademe dikey hizasız yük stator akımı (First level vertical misaligned load stator current)



(a) Titreşim sinyali

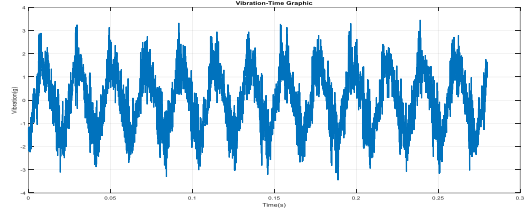


(b) Güç spektral yoğunluğu

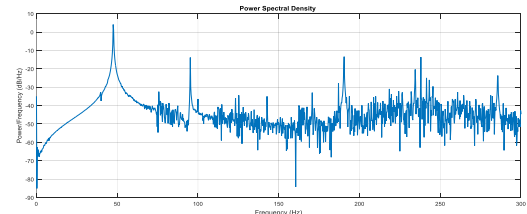
Şekil 13. Birinci kademe dikey hizasız yük x-ekseni titreşim sinyalleri (First level vertical misaligned load x-axis vibration signals)

#### 4.2 Birinci Kademe Dikey Hizasızlık (First Level Vertical Misalignment)

Motor-yük arasındaki hizasızlık dikey ekseninde 0.52 mm olarak ayarlandı. Bu hizasızlık ayar kademesinde kaydedilen stator akımı ve stator akımının güç spektral yoğunluğu Şekil 12'de verilmektedir. Motor gövdesinde kaydedilen 3-eksen titreşim sinyalleri ve bu sinyallerin güç spektral yoğunlukları sırasıyla Şekil 13 (x-eksen), Şekil 14 (y-eksen), ve Şekil 15'te (z-eksen) verilmektedir.

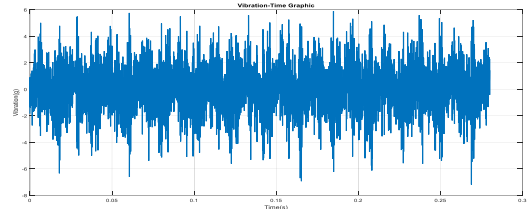


(a) Titreşim sinyali

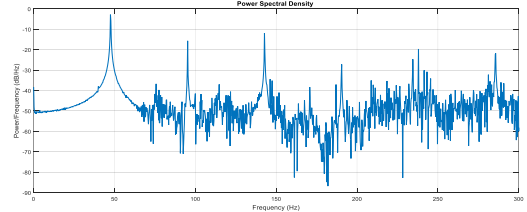


(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 14. Birinci kademe dikey hizasız yük y-ekseni titreşim sinyalleri (First level vertical misaligned load y-axis vibration signals)



(a) Titreşim sinyali



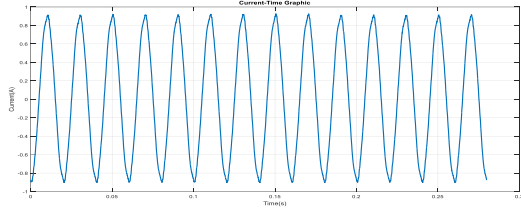
(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 15. Birinci kademe dikey hizasız yük z-ekseni titreşim sinyalleri (First level vertical misaligned load z-axis vibration signals)

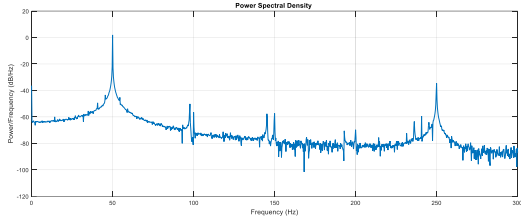
#### 4.3 Birinci Kademe Yatay Hizasızlık (First Level Horizontal Misalignment)

Motor-yük arasındaki hizasızlık yatay ekseninde 0.51 mm olarak ayarlandı. Bu hizasızlık ayar kademesinde

kaydedilen stator akımı ve güç spektral yoğunluğu Şekil 16'da verilmektedir. Motor gövdesinde kaydedilen 3-eksen titreşim sinyalleri ve bu sinyallerin güç spektral yoğunlukları sırasıyla Şekil 17 (x-eksen), Şekil 18 (y-eksen), ve Şekil 19'da (z-eksen) verilmektedir.

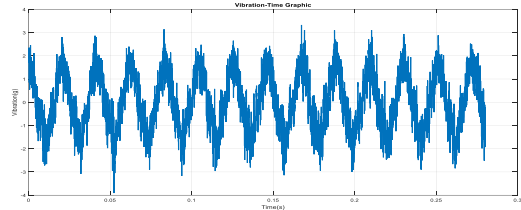


(a) Stator akımı

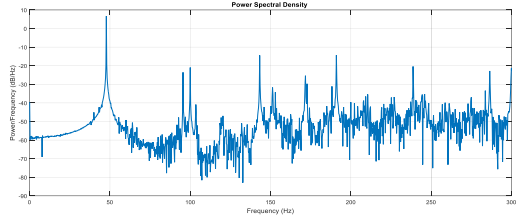


(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 16. Birinci kademe kademe yatay hizasız yük stator akımı (First level horizontal misaligned load stator current)

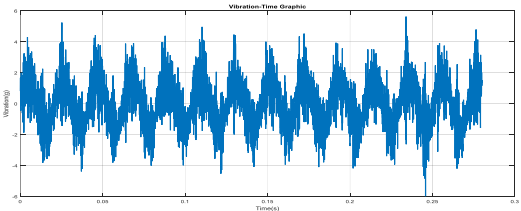


(a) Titreşim sinyali

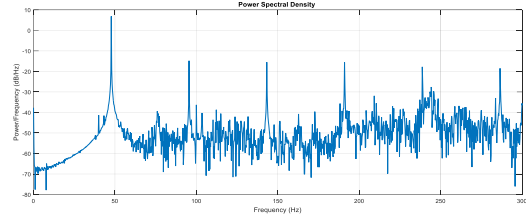


(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 17. Birinci kademe yatay hizasız yük x-ekseni titreşim sinyalleri (First level horizontal misaligned load x-axis vibration signals)

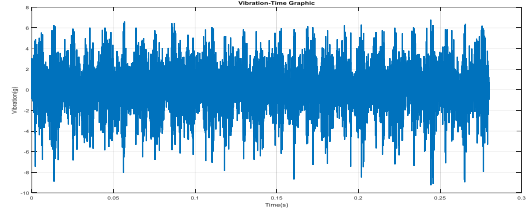


(a) Titreşim sinyali

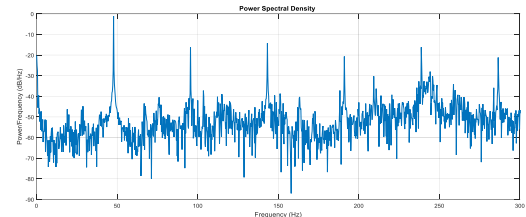


(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 18. Birinci kademe yatay hizasız yük y-ekseni titreşim sinyalleri (First level horizontal misaligned load y-axis vibration signals)

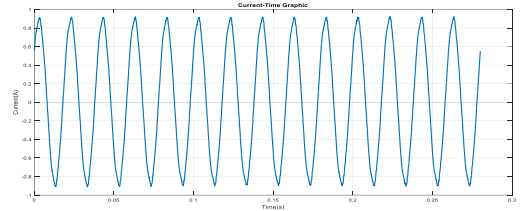


(a) Titreşim sinyali

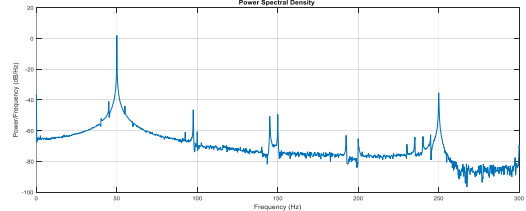


(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 19. Birinci kademe yatay hizasız yük z-ekseni titreşim sinyalleri (First level horizontal misaligned load z-axis vibration signals)



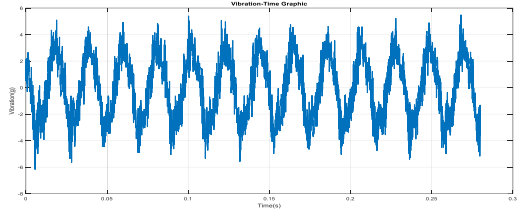
(a) Stator akımı



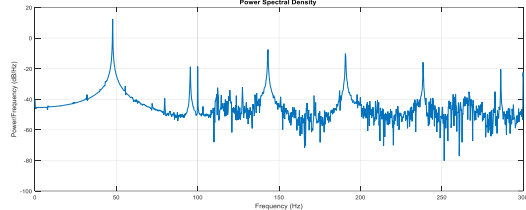
(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 20. İkinci kademe dikey hizasız yük stator akımı (Second level vertical misaligned load stator current)





(a) Titreşim sinyali

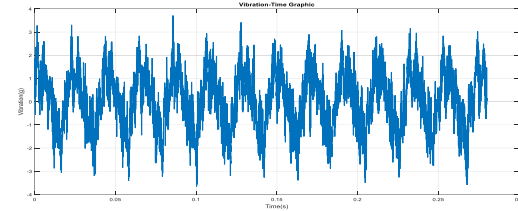


(b) Güç spektral yoğunluğu

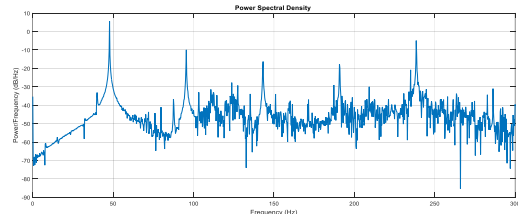
**Şekil 21.** İkinci kademe dikey hizasız yük x-ekseni titreşim sinyalleri (Second level vertical misaligned load x-axis vibration signals)

#### 4.4 İkinci Kademe Dikey Hizasızlık (Second Level Vertical Misalignment)

Motor-yük arasındaki hizasızlık dikey ekseninde 1.14 mm olarak ayarlandı. Bu hizasızlık ayar kademesinde kaydedilen stator akımı ve stator akımının güç spektral yoğunluğu Şekil 20’de verilmektedir. Motor gövdesinde kaydedilen 3-eksen titreşim sinyalleri ve bu sinyallerin güç spektral yoğunlukları sırasıyla Şekil 21 (x-eksen), Şekil 22 (y-eksen), ve Şekil 23’te (z-eksen) verilmektedir.

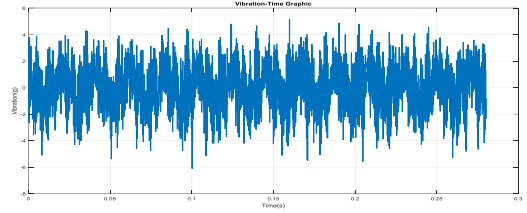


(a) Titreşim sinyali

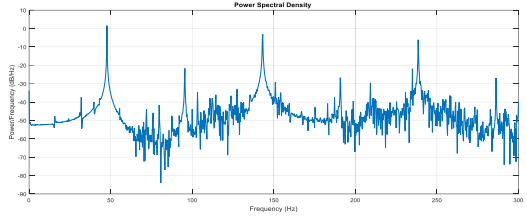


(b) Güç spektral yoğunluğu

**Şekil 22.** İkinci kademe dikey hizasız yük y-ekseni titreşim sinyalleri (Second level vertical misaligned load y-axis vibration signals)



(a) Titreşim sinyali

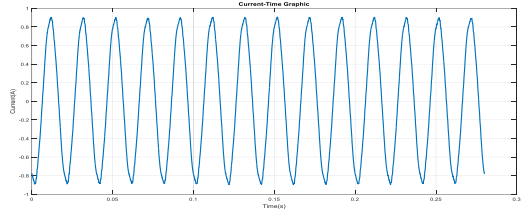


(b) Güç spektral yoğunluğu

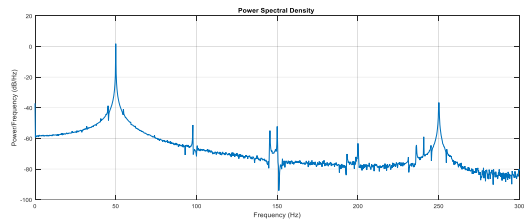
**Şekil 23.** İkinci kademe dikey hizasız yük z-ekseni titreşim sinyalleri (Second level vertical misaligned load z-axis vibration signals)

#### 4.5 İkinci Kademe Yatay Hizasızlık (Second Level Horizontal Misalignment)

Motor-yük arasındaki hizasızlık yatay ekseninde 1.13 mm olarak ayarlandı. Bu hizasızlık ayar kademesinde kaydedilen stator akımı ve stator akımının güç spektral yoğunluğu Şekil 24’te verilmektedir. Motor gövdesinde kaydedilen 3-eksen titreşim sinyalleri ve bu sinyallerin güç spektral yoğunlukları sırasıyla Şekil 25 (x-eksen), Şekil 26 (y-eksen), ve Şekil 27’de (z-eksen) verilmektedir.

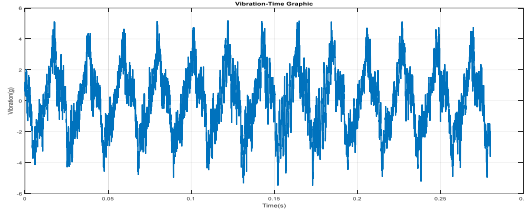


(a) Stator akımı

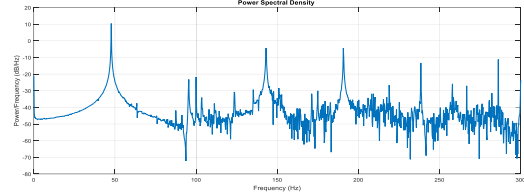


(b) Güç spektral yoğunluğu

**Şekil 24.** İkinci kademe yatay hizasız yük stator akımı (Second level horizontal misaligned load stator current)

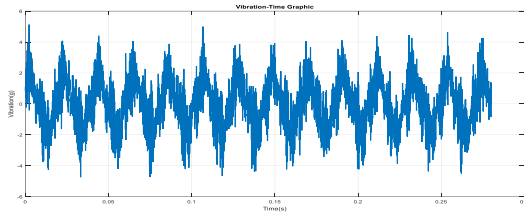


(a) Titreşim sinyali

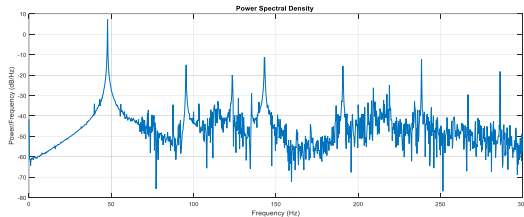


(b) Güç spektral yoğunluğu

**Şekil 25.** İkinci kademe yatay hizasız yük x-ekseni titreşim sinyalleri (Second level horizontal misaligned load x-axis vibration signals)

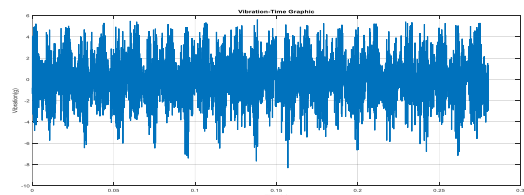


(a) Titreşim sinyali

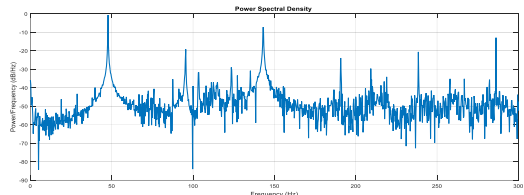


(b) Güç spektral yoğunluğu

**Şekil 26.** İkinci kademe yatay hizasız yük y-ekseni titreşim sinyalleri (Second level horizontal misaligned load y-axis vibration signals)



(a) Titreşim sinyali

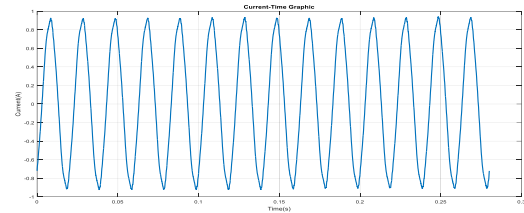


(b) Güç spektral yoğunluğu

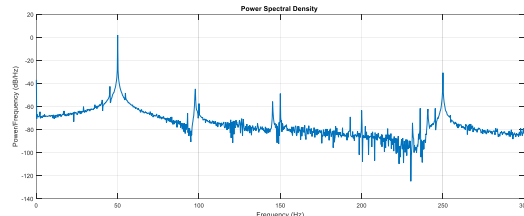
**Şekil 27.** İkinci kademe yatay hizasız yük z-ekseni titreşim sinyalleri (Second level horizontal misaligned load z-axis vibration signals)

#### 4.6 Üçüncü Kademe Dikey Hizasızlık (Third Level Vertical Misalignment)

Motor-yük arasındaki hizasızlık dikey ekseninde 1.54 mm olarak ayarlandı. Bu hizasızlık ayar kademesinde kaydedilen stator akımı ve stator akımının güç spektral yoğunluğu Şekil 28’de verilmektedir. Motor gövdesinde kaydedilen 3-eksen titreşim sinyalleri ve bu sinyallerin güç spektral yoğunlukları sırasıyla Şekil 29 (x-eksen), Şekil 30 (y-eksen), ve Şekil 31’de (z-eksen) verilmektedir

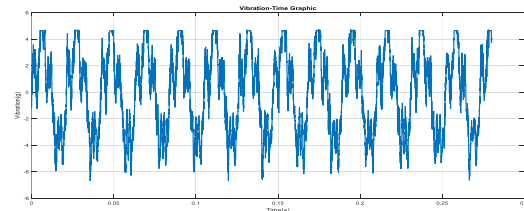


(a) Stator akımı

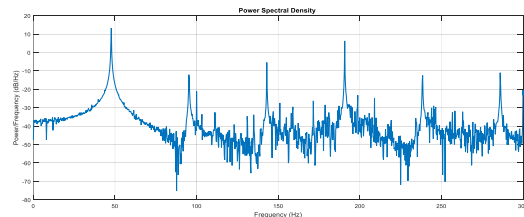


(b) Güç spektral yoğunluğu

**Şekil 28.** Üçüncü kademe dikey hizasız yük stator akımı (Third level vertical misaligned load stator current)

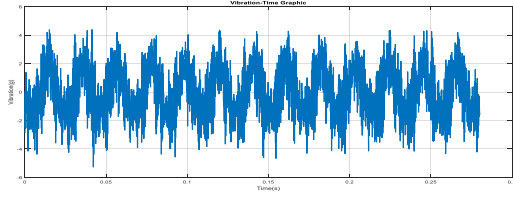


(a) Titreşim sinyali

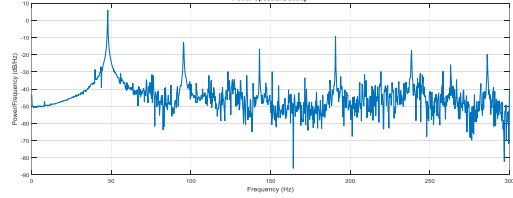


(b) Güç spektral yoğunluğu

**Şekil 29.** Üçüncü kademe dikey hizasız yük x-ekseni titreşim sinyalleri Second level vertical misaligned load x-axis vibration signals)

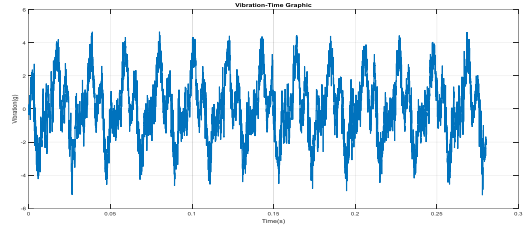


(a) Titreşim sinyali

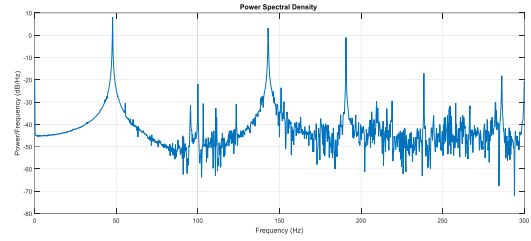


(b) Güç spektral yoğunluğu

**Şekil 30.** Üçüncü kademe dikey hizasız yük y-ekseni titreşim sinyalleri (Third level vertical misaligned load y-axis vibration signals)

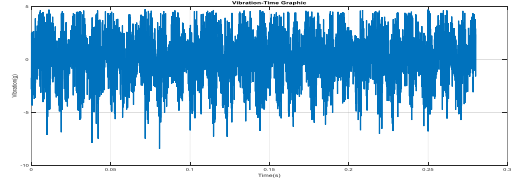


(a) Titreşim sinyali

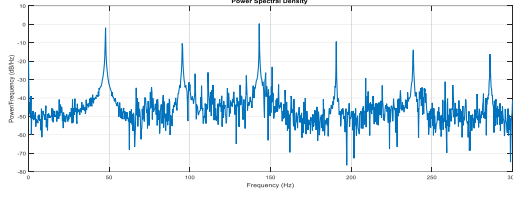


(b) Güç spektral yoğunluğu

**Şekil 33.** Üçüncü kademe yatay hizasız yük x-ekseni titreşim sinyalleri (Third level horizontal misaligned load x-axis vibration signals)

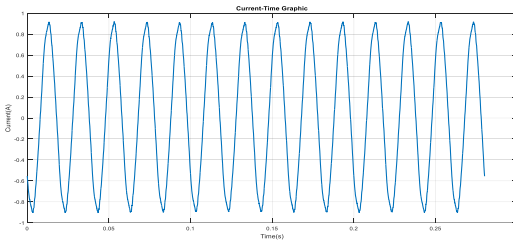


(a) Titreşim sinyali

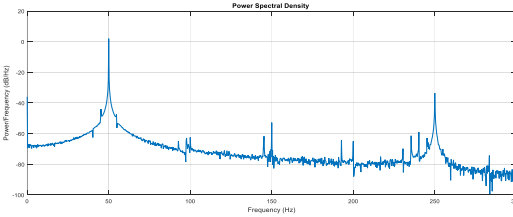


(b) Güç spektral yoğunluğu

**Şekil 31.** Üçüncü kademe dikey hizasız yük z-ekseni titreşim sinyalleri (Third level vertical misaligned load z-axis vibration signals)



(a) Stator akımı

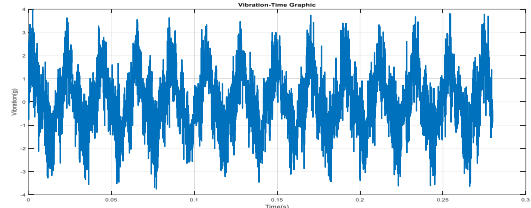


(b) Akım güç spektral yoğunluğu

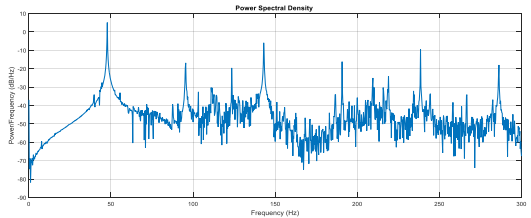
**Şekil 32.** Üçüncü kademe yatay hizasız yük stator akımı (Third level horizontal misaligned load stator current)

#### 4.7 Üçüncü Kademe Yatay Hizasızlık (Third Level Horizontal Misalignment)

Motor-yük arasındaki dengesizlik yatay ekseninde 1.52 mm olarak ayarlandı. Bu hizasızlık ayar kademesinde kaydedilen stator akımı ve stator akımının güç spektral yoğunluğu Şekil 32’de verilmektedir. Motor gövdesinde kaydedilen 3-eksen titreşim sinyalleri ve bu sinyallerin güç spektral yoğunlukları sırasıyla Şekil 33 (x-eksen), Şekil 34 (y-eksen), ve Şekil 35’te (z-eksen) verilmektedir.

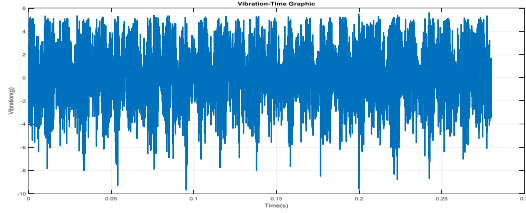


(a) Titreşim sinyali

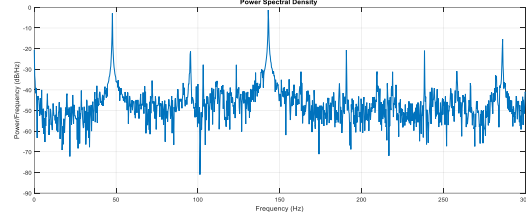


(b) Güç spektral yoğunluğu

**Şekil 34.** Üçüncü kademe yatay hizasız yük y-ekseni titreşim sinyalleri (Third level horizontal misaligned load y-axis vibration signals)



(a) Titreşim sinyali



(b) Güç spektral yoğunluğu

**Şekil 35.** Üçüncü kademe yatay hizasız yük z-ekseni titreşim sinyalleri (Third level horizontal misaligned load z-axis vibration signals)

## 5. ENTROPI ANALİZ SONUÇLARI (RESULTS of ENTROPY ANALYSIS)

Motor-yük hizasızlıklarının motor performansına etkilerini değerlendirmek üzere testler gerçekleştirilmiştir. Her test için stator akımı ve 3-eksen titreşim sinyalleri kaydedildi. Sonuçlar hem zaman domeninde hem de frekans domeninde analiz edilerek Şekil 8 - Şekil 35'te sunulmuştur. Elde edilen stator akımı ve titreşim sinyallerinin entropi değerleri hesaplandı. Deneysel çalışmaların yapıldığı laboratuvarındaki şebeke gerilimi genelde dengesiz olduğu için stator akımında istenmeyen harmonikler de oluşabiliyor. Bu harmoniklerin varlığı stator akımı entropi değerlerinin değişmesine sebep olmaktadır. Bundan dolayı test edilen asenkron motor inverter ile beslenerek deneysel çalışmalar tekrarlandı. İnverter ile motor hem 50 Hz'de hem de 55 Hz'de çalıştırıldı.

Motor dört farklı yük kademesinde (%25, %50, %75, %100) çalıştırıldı. Her yük kademesinde; normal hizalama, üç adet dikey hizalama kademesi ve üç adet de

**Çizelge 2:** Titreşim Sinyalleri Entropi Değerleri (Şebeke beslemeli) (Entropy values of vibration singals (mains fed))

		Entropi Değerleri						
		Normal hizalama	Birinci kademe dikey hizalama	İkinci kademe dikey hizalama	Üçüncü kademe dikey hizalama	Birinci kademe yatay hizalama	İkinci kademe yatay hizalama	Üçüncü kademe yatay hizalama
% 25 Yüklenme	x-ekseni	9.2282	9.2666	9.1999	9.0594	9.2520	9.4348	9.4291
	y-ekseni	8.6954	8.8245	8.6672	8.9695	8.5503	8.6000	8.5168
	z-ekseni	8.6617	8.6808	8.8781	9.0386	8.9277	8.8422	8.9483
% 50 Yüklenme	x-ekseni	9.4243	9.3857	9.3472	9.0843	9.1572	9.3959	9.4291
	y-ekseni	8.8658	8.8820	8.9357	8.9533	8.7547	8.7033	8.7287
	z-ekseni	8.6171	8.7576	8.7800	8.9991	8.9415	8.8252	8.8413
% 75 Yüklenme	x-ekseni	9.4746	9.3313	9.3649	9.1380	9.0974	9.4165	9.3787
	y-ekseni	9.1616	8.9890	9.0227	9.0406	8.7927	8.8968	8.9696
	z-ekseni	8.6372	8.6669	8.9247	8.9884	8.9106	8.7901	8.8469
% 100 Yüklenme	x-ekseni	9.3632	9.3100	9.3316	9.2327	9.0162	9.2491	9.2139
	y-ekseni	9.3306	9.0946	9.0686	9.1356	8.8263	9.0206	9.0141
	z-ekseni	8.6788	8.7432	8.7780	8.8416	8.8341	8.7634	8.8422

**Çizelge 3:** Titreşim Sinyalleri Entropi Değerleri (50 Hz inverter beslemeli) (Entropy values of vibration singals (inverter fed))

		Entropi Değerleri						
		Normal hizalama	Birinci kademe dikey hizalama	İkinci kademe dikey hizalama	Üçüncü kademe dikey hizalama	Birinci kademe yatay hizalama	İkinci kademe yatay hizalama	Üçüncü kademe yatay hizalama
% 25 Yüklenme	x-ekseni	9.1749	9.2354	9.2418	9.1447	9.3005	9.5150	9.5084
	y-ekseni	9.0193	8.8599	8.7337	9.0197	8.7043	8.6045	8.6834
	z-ekseni	8.5691	8.7562	8.8652	9.0683	8.8439	8.8027	8.8849
% 50 Yüklenme	x-ekseni	9.3340	9.4151	9.3317	8.9643	9.3372	9.5034	9.4377
	y-ekseni	8.8897	8.8318	8.7456	8.9019	8.8397	8.5581	8.6385
	z-ekseni	8.6057	8.8190	8.7987	8.9726	8.7772	8.6520	8.8807
% 75 Yüklenme	x-ekseni	9.4758	9.4527	9.3666	9.1225	9.2678	9.5286	9.3484
	y-ekseni	9.0606	8.9705	8.7961	9.0167	9.0373	8.9066	8.9072
	z-ekseni	8.6506	8.8077	8.8953	8.8643	8.8054	8.8012	8.9053
% 100 Yüklenme	x-ekseni	9.4058	9.3274	9.4205	9.1734	9.1398	9.3997	9.3213
	y-ekseni	9.3072	9.0747	8.9317	9.0954	8.9508	9.0122	9.0446
	z-ekseni	8.6689	8.7052	8.8004	8.8703	8.8852	8.7240	8.8830

**Çizelge 4:** Stator akımı entropi değerleri (Entropy values of stator current)

Entropi Değerleri		Şebeke Besleme			50 Hz İnverter Besleme			55 Hz İnverter Besleme		
Faz		R	S	T	R	S	T	R	S	T
Stator akımı % 25 Yüklenme	Normal	9.5708	9.6201	9.6196	9.5747	9.5541	9.5822	9.5584	9.5653	9.5530
	Dikey 0,52 mm	9.5867	9.5720	9.5781	9.5989	9.5665	9.5825	9.5246	9.5535	9.5513
	Dikey 1,14 mm	9.5302	9.6318	9.6103	9.5750	9.5325	9.5405	9.5608	9.5791	9.5724
	Dikey 1,54 mm	9.6179	9.6728	9.6548	9.5351	9.5035	9.5066	9.5594	9.5699	9.5768
	Yatay 0,51 mm	9.5441	9.6285	9.6062	9.5333	9.4935	9.5300	9.5601	9.5732	9.5679
	Yatay 1,13 mm	9.5555	9.6055	9.6169	9.5505	9.5443	9.5545	9.5624	9.5652	9.5723
	Yatay 1,52 mm	9.5535	9.5974	9.5929	9.5807	9.5673	9.5709	9.5629	9.5541	9.5595
Stator akımı % 50 Yüklenme	Normal	9.6624	9.6737	9.6682	9.5989	9.6424	9.5970	9.6721	9.6779	9.6738
	Dikey 0,52 mm	9.6445	9.6429	9.6400	9.5763	9.6374	9.6133	9.6769	9.6780	9.6711
	Dikey 1,14 mm	9.6739	9.6883	9.6747	9.5958	9.6475	9.6180	9.6768	9.6746	9.6674
	Dikey 1,54 mm	9.6800	9.6894	9.6795	9.6069	9.6579	9.6291	9.6714	9.6772	9.6707
	Yatay 0,51 mm	9.6655	9.6842	9.6670	9.6051	9.6462	9.6055	9.6741	9.6766	9.6745
	Yatay 1,13 mm	9.6569	9.6687	9.6631	9.6124	9.6340	9.6221	9.6722	9.6795	9.6793
	Yatay 1,52 mm	9.6459	9.6572	9.6438	9.6068	9.6316	9.6174	9.6713	9.6826	9.6787
Stator akımı % 75 Yüklenme	Normal	9.6476	9.6589	9.6491	9.6789	9.6924	9.6828	9.6872	9.6878	9.6839
	Dikey 0,52 mm	9.6291	9.6136	9.6144	9.6779	9.6928	9.6729	9.6898	9.6897	9.6854
	Dikey 1,14 mm	9.6701	9.6764	9.6595	9.6814	9.6902	9.6714	9.6866	9.6826	9.6903
	Dikey 1,54 mm	9.6656	9.6689	9.6527	9.6864	9.6935	9.6807	9.6870	9.6841	9.6823
	Yatay 0,51 mm	9.6523	9.6691	9.6488	9.6788	9.6928	9.6835	9.6885	9.6884	9.6893
	Yatay 1,13 mm	9.6323	9.6588	9.6460	9.6872	9.7006	9.6849	9.6597	9.6401	9.6648
	Yatay 1,52 mm	9.6328	9.6444	9.6200	9.6815	9.6936	9.6802	9.6887	9.6886	9.6877
Stator akımı % 100 Yüklenme	Normal	9.6187	9.6226	9.6206	9.6851	9.6893	9.6845	9.6985	9.7003	9.6998
	Dikey 0,52 mm	9.6006	9.5853	9.4084	9.6826	9.6936	9.6830	9.7007	9.7001	9.7011
	Dikey 1,14 mm	9.6448	9.6398	9.6228	9.6843	9.6899	9.6773	9.7029	9.6961	9.6964
	Dikey 1,54 mm	9.6464	9.6344	9.6195	9.6868	9.6824	9.6828	9.7028	9.7001	9.7029
	Yatay 0,51 mm	9.6257	9.6309	9.6171	9.6819	9.6840	9.6825	9.7009	9.7012	9.7006
	Yatay 1,13 mm	9.6040	9.6318	9.6106	9.6826	9.6922	9.6826	9.7028	9.7008	9.6925
	Yatay 1,52 mm	9.6195	9.6340	9.6041	9.6871	9.6913	9.6881	9.7006	9.7027	9.7012

yatay hizalama kademesi olmak üzere toplam yedi adet hizalama kademesi için deneysel çalışmalar yapıldı. Çizelge 2’de şebekeden beslemeli motorun test sonuçlarına ait 3-eksen titreşim sinyallerinin entropi değerleri verilmektedir. Çizelge 3’te motorun inverter (50 Hz) ile beslenerek kaydedilen 3-eksen titreşim sinyallerinin entropi değerleri verilmektedir. Deneysel çalışmada kullanılan hizalı ve altı adet hizasızlık kademesinde ve dört farklı yüklenme kademesinde

kaydedilen stator akımı entropi değerleri normal hizalama durumu ile karşılaştırmalı olarak Çizelge 4’te verilmektedir.

## 6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu makalede asenkron motorlarda meydana gelen motor-yük arasındaki paralel hizasızlık problemlerinin motor üzerine etkilerinin incelemek için deneysel çalışmalar yapıldı. Motor-yük paralel hizasızlık durumu için



dengeli, yatay ve dikey ekseninde üç farklı paralel hizasızlık durumu olmak üzere toplam yedi farklı hizalama durumu için deneyler yapıldı. Her hizalama durumunda gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda motor hem şebekeden beslendi hem de inverter ile beslendi. Her deneyde motor dört farklı yük kademesinde (%25, %50, %75 ve %100) çalıştırıldı. Her deneyde asenkron motorun 3-faz stator akımı ve 3-eksen titreşim sinyalleri kaydedildi. Akım ve titreşim sinyallerinin, hizasızlık sonucu meydana gelen karakteristik harmonikleri frekans domeninin analiz edildi. Elde edilen sonuçların literatürde verilen değerlerle uyumlu olduğu tespit edildi. Her test durumu için akım ve titreşim sinyallerinin güç spektral yoğunlukları hesaplanarak grafiksel olarak da gösterildi. Her test durumu için stator akımı ve titreşim sinyallerinin entropi değerleri hesaplandı. Stator akımı güç spektral yoğunluğu hesaplamalarında elde edilen karakteristik frekansların genliklerinin aynı yük durumu için entropi değerleriyle karşılaştırıldığında anlamlı sonuçlar verdiği görülmektedir.

Stator akımı entropi değerleri göz önüne alındığında, normal hizalama çalışma durumunda stator akımı entropi değerlerinin yük artışıyla düzenli ve beklentiler doğrultusunda (inverter-50 Hz besleme ile) arttığı görülmektedir. Şebekeden besleme durumunda şebeke geriliminin dengesiz olmasından kaynaklanan ekstra harmoniklerin entropi değerlerini etkilediği görülmektedir.

Dikey ekseninde hizalama hatası artıkça (%25 yükleme) entropi değerinin azaldığı gözlemlenmektedir. Benzer şekilde yatay ekseninde hizalama hatası artıkça (%25 yükleme) entropi değerinin arttığı gözlemlenmektedir. Yarı yükte (%50 yük) dikey ve dikey ekseninde hizalama hatası artıkça entropi değerlerinin arttığı gözlemlenmektedir. Entropi değerindeki değişim %75 ve %100 yükleme durumlarında da benzer şekilde hatasızlık derecesi artıkça artmaktadır. Entropi değerlerindeki bu değişim hizasızlık sonucu asenkron motorun maruz kaldığı x, y, ve z, eksenlerinde motor gövdesinde indüklenen kuvvet ve momentlerin bir sonucudur.

Titreşim sinyalleri x-y eksenlerinde benzer şekilde çıkmıştır. Ancak z-ekseninde daha osilasyonlu bir şekilde çıkmıştır. Şekil 6'da görüldüğü gibi z-ekseni dikey eksen olup bu ekseninde meydana gelen titreşim sinyalinin şekli motorun deney setine bağlantısının bir sonucudur.

Titreşim sinyalleri entropi değerleri incelendiğinde en mantıklı entropi değişiminin, stator akımı entropi değerlerinde olduğu gibi motorun 50 Hz inverter ile besleme durumunda elde edildiği görülmektedir. Yatay ve dikey ekseninde hizasızlık hatası artıkça x-eksen (radyal yatay eksen, Şekil 6) titreşim sinyali entropi değerlerinde artış meydana gelmektedir. Yatay ve dikey ekseninde hizasızlık hatası artıkça y-eksen (yatay eksen, Şekil 6) titreşim sinyali entropi değerlerinde azalma meydana gelmektedir. Yatay ve dikey ekseninde hizasızlık hatası artıkça z-eksen (radyal dikey eksen, Şekil 6) titreşim sinyali entropi değerlerinde artış meydana

gelmektedir. Üçüncü kademe yatay ve dikey hizasızlık durumunda x, y, z eksenleri titreşim sinyalleri entropi değerleri diğer kademelerine göre daha az değişmektedir. Bu durum motorun hizasızlık sonucu ortaya çıkan kuvvet ve momentlere karşı reaksiyon moment ve kuvvetler üretmesinden kaynaklanmaktadır. Motorun %100 yüklenme ve 50 Hz inverter besleme durumu için entropi değerlerinden aşağıdaki sonuçlar çıkarılmaktadır: Yatay ve dikey ekseninde hizasızlık hatası artıkça x-eksen titreşim sinyali entropi değerlerinde artış meydana gelmektedir. Yatay ve dikey ekseninde hizasızlık hatası artıkça y-eksen titreşim sinyali entropi değerlerinde artış meydana gelmektedir. Yatay ve dikey ekseninde hizasızlık hatası artıkça z-eksen titreşim sinyali entropi değerlerinde artış meydana gelmektedir.

Motor yüküyle birlikte ve hizasızlık derecesi artıkça x-eksen, y-eksen ve z-eksen titreşim sinyalleri entropi değerlerinde azalma meydana gelmektedir. Elde edilen değerler göz önüne alındığında entropi analizi ile motor-yük hizasızlık problemlerinin motor üzerine etkileri tespit edilebilir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucundan elde edilen entropi değerindeki değişimler kullanılarak sürekli olarak izlenen asenkron motorlarda meydana gelen hizasızlık problemlerine erken müdahale edilerek motor-yük hizalama hataları sonucu ortaya çıkacak olumsuz durumlar önlenabilir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri 2018-05 nolu ve **TÜBİTAK 116E302** nolu projeler ile desteklenmiştir. Kütahya Dumlupınar Üniversitesine ve TÜBİTAK Başkanlığına teşekkür ederiz.

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Nandi, S., and Toliyat H. A., "Fault diagnosis of electrical machines-a review." *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*. Seattle (USA), 219-221 (1999).
- [2] Nandi, S., Toliyat, H. A., and Li, X., "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors—A Review," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20(4): 719-729, (2005).
- [3] Verucchi, C., Bossio, J., Bossio, G., and Acosta, G., "Misalignment detection in induction motors with flexible coupling by means of estimated torque analysis and MCSA," *Mechanical Systems and Signal Processing*, 80: 570-581, (2016).
- [4] Patel, T. H., and Darpe, A. K., "Experimental investigations on vibration response of misaligned rotors," *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23(7): 2236-2252, (2009).

- [5] Sekhar, A. A., and Prabhu, B. S., "Effects of coupling misalignment on vibrations of rotating machinery." *Journal of Sound and vibration* 185(4): 655-671, (1995).
- [6] Wang, N., and Jiang, D., "Vibration response characteristics of a dual-rotor with unbalance-misalignment coupling faults: Theoretical analysis and experimental study," *Mechanism and Machine Theory*, 125: 207-219, (2018).
- [7] T. H. Patel and A. K. Darpe, "Vibration response of misaligned rotors," *Journal of Sound and Vibration*, 325(3): 609-628, (2009).
- [8] Li, S., Li, Y., & Sarlioglu, B., "Rotor Unbalanced Magnetic Force in Flux-switching Permanent Magnet Machines Due to Static and Dynamic Eccentricity," *Electric Power Components and Systems*, 44(3): 336-342, (2016).
- [9] Bonnett A. and Yung, C. "Increased Efficiency Versus Increased Reliability," *IEEE Industry Applications Magazine*, 14(1): 29-36, (2008).
- [10] Luedeking A., "*Shaft Versus Foot Alignment Tolerances: A Critique of the Various Approaches*", Ludeca Inc, (2008).
- [11] Immovilli, F., Bellini, A., Rubini, R., & Tassoni, C., "Diagnosis of Bearing Faults in Induction Machines by Vibration or Current Signals: A Critical Comparison," *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46(4): 1350-1359, (2010).
- [12] Simm, A., Wang, Q., Huang, S., & Zhao, W., "Laser based measurement for the monitoring of shaft misalignment," *Measurement*, 87: 104-116, (2016).
- [13] Lee, Y. S., and Lee, C. W., "Modeling and Vibration Analysis of Misaligned Rotor-Ball Bearing Systems," *Journal of Sound and Vibration*, 224(1): 17-32, (1999).
- [14] Lin, J. L., Liu, J. Y. C., Li, C. W., Tsai, L. F., and Chung, H. Y., "Motor shaft misalignment detection using multiscale entropy with wavelet denoising," *Expert Systems with Applications*, 37(10): 200-7204, (2010).
- [15] Redmond, I. "Shaft Misalignment and Vibration: A Model", *Saudi Aramco J. Technol.*, 4: 41-51, (2007).
- [16] Verma, A. K., Sarangi, S., and Kolekar, M. H.. "Shaft misalignment detection using stator current monitoring", *International Journal of Advanced Computer Research*, 3(1): 305, (2013)
- [17] Mobley, R. K. "*Maintenance fundamentals*". Elsevier Butterworth-Heinemann, (2004).
- [18] Mobley, R. K. "*Maintenance fundamentals*". Elsevier., (2011).
- [19] Hines, J. W., Jesse, S., Edmondson, A., and Nower, D., "Effects of Motor Misalignment on Rotating Machinery", *Proceedings of the Maintenance and Reliability Conference*. (1998).
- [20] Bossio, J. M., Bossio, G. R., and De Angelo, C. H., "Angular misalignment in induction motors with flexible coupling". *35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, 1033-1038, (2009).
- [21] Hariharan, V. and Srinivasan, P. S. S., "Vibration analysis of misaligned shaft –ball bearing system," *Indian Journal of Science and Technology*, 2(9): (2009).
- [22] Obaid, R. R., and Habetler, T. G. "Current-based algorithm for mechanical fault detection in induction motors with arbitrary load conditions", *38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference*, 2: 1347-1351, (2003).
- [23] Camarena-Martinez, D., Valtierra-Rodriguez, M., Amezcua-Sanchez, J. P., Granados-Lieberman, D., Romero-Troncoso, R. J., and Garcia-Perez, A., "Shannon Entropy and-Means Method for Automatic Diagnosis of Broken Rotor Bars in Induction Motors Using Vibration Signals", *Shock and Vibration*, 2016: (2016).
- [24] Ojaghi, M., & Mohammadi, M., "Unified Modeling Technique for Axially Uniform and Nonuniform Eccentricity Faults in Three-Phase Squirrel Cage Induction Motors," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(7): 5292-5301, (2017).
- [25] Faiz, J., & Moosavi, S. M. M., "Eccentricity fault detection – From induction machines to DFIG—A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55: 169-179, (2016).
- [26] Benbouzid, M. E. H., "A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 47(5): 984-993, (2000).
- [27] Cabal-Yepez, E., Romero-Troncoso, R. J., Garcia-Perez, A., & Osornio-Rios, R. A., "Single-parameter fault identification through information entropy analysis at the startup-transient current in induction motors", *Electric Power Systems Research*, 89: 64-69, (2012).
- [28] Dinçer G., "Entropi Kavramının İstatistiksel Bazı Uygulamaları," *Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi*, Ocak (2015).
- [29] R Cabal-Yepez, E., Romero-Troncoso, R. J., Garcia-Perez, A., Osornio-Rios, R. A., & Alvarez-Salas, R., "Multiple Fault Detection through Information Entropy Analysis in ASD-fed Induction Motors", *8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics & Drives*, (2011).
- [30] Pan, S., Han, T., Tan, A. C., and Lin, T. R., "Fault Diagnosis System of Induction Motors Based on Multiscale Entropy and Support Vector Machine with Mutual Information Algorithm," *Shock and Vibration*, 2016: 1-12, (2016).
- [31] Bromiley, P. A., Thacker, N. A., & Bouhova-Thacker, E., "Shannon Entropy, Renyi Entropy, and Information" *Statistics and Inf. Series* 2004(004), (2004).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



## **$\alpha$ -SiAlON seramiklerin optik özelliklerinin iki aşamalı yüksek enerjili öğütme yöntemi kullanılarak geliştirilmesi**

### *Enhancing the optical properties of $\alpha$ -SiAlON ceramics using two-stage high energy milling method*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Suna AVCIOĞLU<sup>1</sup>, Semra KURAMA<sup>2</sup>, Erhan AYAS<sup>3</sup>, Kubra GÜRÇAN<sup>4</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-0980-2029

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-7554-3419

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0003-0592-3990

ORCID<sup>4</sup>: 0000-0003-0434-1518

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Avcioğlu S., Kurama S., Ayas E. ve Gürçan K., “ $\alpha$ -SiAlON seramiklerin optik özelliklerinin iki aşamalı yüksek enerjili öğütme yöntemi kullanılarak geliştirilmesi”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1051-1057, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.605397

# $\alpha$ -SiAlON Seramiklerin Optik Özelliklerinin İki Aşamalı Yüksek Enerjili Öğütme Yöntemi Kullanılarak Geliştirilmesi

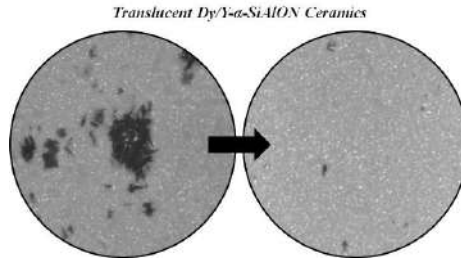
## Enhancing the Optical Properties of $\alpha$ -SiAlON Ceramics Using Two-Stage High Energy Milling Method

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Yarı saydam Dy/Y- $\alpha$ -SiAlON seramikler kıvılcım plazma sinterleme tekniği kullanılarak üretilmiştir. (Translucent Dy/Y- $\alpha$ -SiAlON ceramics were produced using spark plasma sintering technique)
- ❖ Toz karışımının hazırlanmasında iki aşamalı yüksek enerjili öğütme yöntemi kullanılmıştır. (In the preparation of the powder mixture, two-stage high-energy milling method were used.)
- ❖ AlN tozun tane boyutunun  $\alpha$ -SiAlON seramiklerin optik özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. (The effects of particle size of AlN powder on the optical properties of  $\alpha$ -SiAlON ceramics were investigated.)

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada, (Dy/Y)  $\alpha$ -SiAlON seramiklerin yapısında görülebilen AlN-politip fazların optik özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Başlangıç toz karışımının hazırlanmasında kullanılan AlN tozlar yüksek enerjili ön öğütme işlemine tabi tutularak tane boyutu küçültülmüş, böylelikle sinterleme aşamasında yapıda kalan AlN-politip miktarının azaltılması ve faz çeşitliliği nedeni ile  $\alpha$ -SiAlON seramiklerin kızıl ötesi dalga boyundaki geçirim değerinde meydana gelen düşüşün giderilmesi amaçlanmıştır.



Şekil. Dy/Y- $\alpha$ -SiAlON seramiklerinin mikroyapısında AlN politip fazının azaltılması /Figure. Reduction of AlN polytype phase in the microstructure of Dy/Y- $\alpha$ -SiAlON ceramics.

### Amaç (Aim)

Çalışmanın amacı AlN esaslı ikincil fazların miktarı ve çeşitliliği azaltılarak SiAlON seramiklerin üstün mekanik özelliklerini kaybetmeden optik özellikleri iyileştirmektir. (The aim of this study to improve the optical properties of SiAlON ceramics without losing the superior mechanical properties of SiAlON ceramics by reducing the amount and diversity of AlN-based secondary phases.)

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Yarı saydam Dy/Y- $\alpha$ -SiAlON seramikler kıvılcım plazma sinterleme tekniği kullanılarak üretilmiştir. (Translucent Dy/Y- $\alpha$ -SiAlON ceramics were produced using spark plasma sintering technique)

### Özgünlük (Originality)

Başlangıç toz karışımının hazırlanmasında kullanılan AlN tozlar yüksek enerjili ön öğütme işlemine tabi tutularak tane boyutu küçültülmüş, Dy/Y- $\alpha$ -SiAlON seramiklerin optik özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir.

### Bulgular (Findings)

Sunulan yöntem ile  $\alpha$ -SiAlON seramiklerde daha az miktarda AlN-politip fazının oluştuğu ve böylece optik özelliklerinin iyileştiği tespit edilmiştir. (With the presented method, it was determined that a smaller amount of AlN-politip phase was formed in  $\alpha$ -SiAlON ceramics so its optical properties improved.)

### Sonuç (Conclusion)

İkincil fazların miktarı ve faz çeşitliliği azaltılarak SiAlON seramiklerin üstün mekanik içeriği kaybetmeden optik özellikleri iyileştirilebilir. (By reducing the amount and phase diversity of the secondary phases, the optical properties of SiAlON ceramics can be improved without losing their superior mechanical content.)

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# $\alpha$ -SiAlON Seramiklerin Optik Özelliklerinin İki Aşamalı Yüksek Enerjili Öğütme Yöntemi Kullanılarak Geliştirilmesi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Suna AVCIOĞLU<sup>1\*</sup>, Semra KURAMA<sup>2,3</sup>, Erhan AYAS<sup>2</sup>, Kubra GÜRCAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mühendislik Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Müh. Bölümü, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Müh. Bölümü, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Türkiye

<sup>3</sup>Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 15.08.2019 ; Kabul/Accepted : 17.10.2019)

## ÖZ

Bu çalışmada, yarı saydam Dy/Y- $\alpha$ -SiAlON seramikler kıvılcım plazma sinterleme (SPS) tekniği kullanılarak üretilmiştir. Başlangıç toz karışımının iki aşamalı yüksek enerjili öğütme yöntemi ile hazırlanmasının yarı saydam  $\alpha$ -SiAlON seramiklerin faz bileşimi, mikro yapısı ve optik özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Öğütme sürecinin ilk aşamasında, AlN tozu karışıma eklenmeden önce tane boyutunun küçültülmesi ile son üründe meydana gelebilecek olan AlN esaslı ikincil fazların (politipler) miktarının azaltılması ve faz çeşitliliği nedeni ile transparanlıkta meydana gelen kaybın giderilmesi amaçlanmıştır. Öğütme işlemi öncesi ve sonrası AlN tozların parçacık boyutu dağılımı, lazer kırınım spektroskopisi ile karakterize edilmiştir. Kıvılcım plazma sinterleme (SPS) tekniği ile üretilmiş  $\alpha$ -SiAlON seramiklerin mikro yapısı ve faz karakterizasyonu sırasıyla taramalı elektron mikroskopu (SEM) ve X-ışını kırınım (XRD) teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Seramiklerin kızıl ötesi (IR) geçirgenliği FT-IR kullanılarak 3000–7000  $\text{cm}^{-1}$  dalga sayısı aralığında incelenmiştir. Sonuçlar, AlN tozunun parçacık boyutunun,  $\alpha$ -SiAlON seramiklerin morfolojisi, faz bileşimi ve IR-geçirimi üzerinde etkili olduğunu göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** SiAlON, optik özellik, AlN boyutu, mikroyapı, faz çeşitliliği.

## Enhancing the Optical Properties of $\alpha$ -SiAlON Ceramics Using Two-Stage High Energy Milling Method

### ABSTRACT

In this study, semi-transparent Dy/Y- $\alpha$ -SiAlON ceramics were produced using spark plasma sintering (SPS) technique. The effects of the production of the initial powder mixture by two-stage high-energy milling method on the phase composition, microstructure and optical properties of translucent  $\alpha$ -SiAlON ceramics were investigated. In the first stage of the milling process, it was aimed to reduce the amount of AlN based secondary phases (polypoids) which could occur in the final product by reducing the particle size before adding the AlN powder to the mixture and to reduce the decrease in transparency due to the variety of phases. The particle size distribution of the AlN powders before and after milling was characterized by laser diffraction spectroscopy. Microstructure and phase characterization of spark plasma sintered (SPS)  $\alpha$ -SiAlON ceramics were performed using scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD) techniques, respectively. The infrared (IR) transmission of the ceramics was investigated using FT-IR in the 3000-7000  $\text{cm}^{-1}$  wavenumber range. The results showed that the particle size of the AlN powder was effective on the morphology, phase composition and optical properties of the  $\alpha$ -SiAlON ceramics.

**Keywords:** SiAlON, optical properties, AlN powder size, microstructure, phase diversity.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Alüminyum oksit (safir), magnezyum alüminat (spinel), alüminyum oksinitür (AlON) gibi çok kristalin şeffaf seramik malzemeler camın mekanik ve kimyasal özelliklerinin yeterli kalmadığı lazer, gece görüş araçları, optik yükselteçler, elektromanyetik (EM) ve kızılötesi (IR) pencerelerde kullanılmaktadır. Ancak, savunma sanayinde saydam zırh ya da ısı güdümlü füze başlıkları gibi uygulamalar için malzeme seçiminde sadece kızıl ötesi dalga boyunda optik özelliklerin değil, mekanik

ve yüksek sıcaklık özelliklerinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. SiAlON seramikleri, mükemmel kırılma tokluğu ve mukavemeti, üstün kimyasal kararlılığı ve aşınma direnci ile bilinen bir seramik alaşımdır ( $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$ 'ün katı çözeltilisidir). Bu nedenle SiAlON esaslı yarı saydam zırhların üretilmesi fikri birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir.

Karunatne vd. 100 $\mu\text{m}$  kalınlığa sahip çok ince  $\alpha$ -SiAlON plakaların üretilbildiğini rapor etmişlerdir [1]. Jones vd.  $\alpha$ -SiAlON seramiklerin nadir toprak elementleri ile katılandırılması yoluyla optik özelliklerinin iyileştirilebileceğini göstermişlerdir [2]. Farklı

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : suna.avcioglu@gmail.com

kompozisyonlarda hazırladıkları  $Y-\alpha$ -SiAlON seramiklerin, kompozisyondaki  $n$  değeri değişiminin son ürünün mikroyapısı ve optik özellikleri üzerine etkilerini ortaya koyan çalışmalar mevcuttur [3]. %70 geçirgenliğe sahip  $Lu-\alpha$ -SiAlON seramikleri SPS yöntemi ile üretilbildiği rapor edilmiştir [4]. Xiong 0.5mm kalınlıktaki Mg katkılı  $\alpha$ -SiAlON seramikte %66,4 geçirgenliğe ulaşmıştır [5]. Mg ve Lu dışında Yb, Nd, Dy, Y, Lu ve Gd gibi daha birçok element kattı maddesi olarak kullanılmış ve şeffaf  $\alpha$ -sialon seramiklerin üretimindeki etkileri araştırılmıştır [6-8]. Ancak yapılan tüm bu çalışmalarda genel olarak tek katyonlu kompozisyon sistemleri üzerine yoğunlaşmış, çift katyonlu sistemler üzerinde çok fazla çalışma gerçekleştirilmemiştir.

$\alpha$ -SiAlON seramiklerin kristal yapısının optik olarak anizotropik olması teorik geçirim değerinin kübik kristal yapı seramiklere kıyasla daha düşük olmasına neden olmaktadır [9]. Malzemenin kızıl ötesi dalga boyunda geçirimini düşüren temel etkenlerden diğerleri farklı kırıcılık indeksine sahip ikincil fazlar ve gözeneklerdir [10]. Literatürde yüksek yoğunluklu  $\alpha$ -SiAlON seramiklerin üretimini konu alan birçok çalışma olsa da ikincil fazların seramiğin optik özelliklerine etkilerini inceleyen çalışma sayısı oldukça sınırlıdır.

Bu çalışmada, çift katyon katkılı (Dy/Y)  $\alpha$ -SiAlON seramiklerin üretimi sonrası yapıda görülebilen AlN-politip fazların optik özellikler üzerine etkisi incelenmiştir. Başlangıç toz karışımının hazırlanmasında kullanılan AlN tozlar yüksek enerjili ön öğütme işlemine tabi tutularak tane boyutu küçültülmüş, böylelikle sinterleme aşamasında yapıda kalan AlN-politip miktarının azaltılması ve faz çeşitliliği nedeni ile  $\alpha$ -SiAlON seramiklerin kızıl ötesi dalga boyundaki geçirim değerinde meydana gelen düşüşün giderilmesi amaçlanmıştır. Sonuçlar son ürün yoğunluğu, faz çeşitliliği ve mikroyapının Dy/Y- $\alpha$ -SiAlON seramiklerin optik özellikleri üzerine etkileri göz önüne alınarak tartışılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışmada  $\alpha$ -SiAlON seramiklerin başlangıç kompozisyonu  $Dy^{+3}$  ve  $Y^{+3}$  çift katyon katkısı ile  $m$  ve  $n$  oranları sırasıyla 2 ve 1 olacak şekilde hazırlanmıştır. Kompozisyon hesaplamaları yapılırken oksit dışı tozların ( $Si_3N_4$  ve AlN) yüzeyinde bulunan oksit tabakalar göz ardı edilmiştir. Bunun nedeni  $m=2n$  oranına sahip kompozisyonların  $Si_3N_4-9AlN:M_2O_3$  bağ doğrusu üzerinde yer alması, dolayısı ile yüzey oksitlerini ihmal etmeden oksit dengesini sağlamanın hayli güç olmasıdır. Kompozisyonların hazırlanmasında  $\alpha$ - $Si_3N_4$  (UBE-10, %1,6 yüzey oksidi), AlN (Tokuyama, %1 yüzey oksidi),  $Dy_2O_3$  (Aldrich Chemical Co., %99,9 saflıkta) ve  $Y_2O_3$  (Aldrich Chemical Co., %99,9 saflıkta) ticari tozları kullanılmıştır.

Tozların uygun oranda tartımından sonra öğütme işlemi izopropil alkol ortamında,  $Si_3N_4$  değirmen ve  $Si_3N_4$  bilyeler kullanılarak, Fritsch firmasına ait Pulverisette 5

model aksel değirmende gerçekleştirilmiştir. Öncelikle ticari AlN tozu partikül boyutunun düşürülmesi amacıyla yüksek enerjili ön öğütme işlemine tabi tutulmuştur. Yüksek enerjili ön öğütme işleminde AlN tozu/izopropil alkol/bilye ağırlıkça 1/3/10 oranına uygun olarak değirmene beslenmiştir. 600 devir/dakika hızda 6 saat süresince AlN tozu öğütme işlemi sürdürülmüştür. Ön öğütme işlemi uygulanmış AlN toz kurutma aşamasının ardından kompozisyona katılacak diğer tozlar ile değirmene eklenmiş, hazırlanan toz karışımına ağırlıkça 1/1,5/2 oranında sırası ile toz/bilye/ izopropil alkol ilave edilmiştir. İkinci aşama öğütme işlemi değirmen 300 devir/dakika hızla karıştırılarak 3 saat gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan karışımdaki alkolün toz karışımında topaklanmaya neden olmadan uzaklaştırılması amacıyla, Transpack firmasına ait WB2000 model dönel kurutucuda, 30 devir/dk hızla kurutulmuştur. İki aşamalı yüksek enerjili öğütme işlemi ile üretilen başlangıç tozları ile kıyaslamak için geleneksel öğütme yöntemi kullanılarak tüm başlangıç ham maddelerinin tek seferde değirmene beslenerek, 300 devir/dakika karıştırma hızı ile 3 saat boyunca öğütülmesi sonucu referans bir toz karışımı da hazırlanmıştır. Öğütme işlemi öncesi ve sonrası AlN tozların parçacık boyutu dağılımı, lazer kırınım spektroskopisi ile ölçülmüştür.

Dy-Y- $\alpha$ -SiAlON seramiklerin sinterlenmesi spark plazma sinterleme (SPS) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. FCT GmbH firmasına ait SPS fırın haznesindeki iki metal piston arasına yerleştirilen kalıp içindeki tozlar, 100 °C/dak ısıtma hızı ve 300 °C/dak soğutma hızıyla, 50MPa basınç altında 1750°C sıcaklıkta 5 dk. ile sinterlenmiştir. İşlem süresince sıcaklık grafit kalıp yüzeyinden optik pirometre ile okunmuştur. Sinterlenen numunelerin X-ışınları difraktometresi (Rigaku Rint 2000) yardımıyla 10-60° arasında faz analizi, taramalı elektron mikroskobu (SEM- Zeiss Supra 50V) ile mikroyapısal analiz gerçekleştirilmiş ve FT-IR (Brunker Tensor 27) ile 3000-7000  $cm^{-1}$  dalga sayısı aralığında optik özellikleri karakterize edilmiştir.

## 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

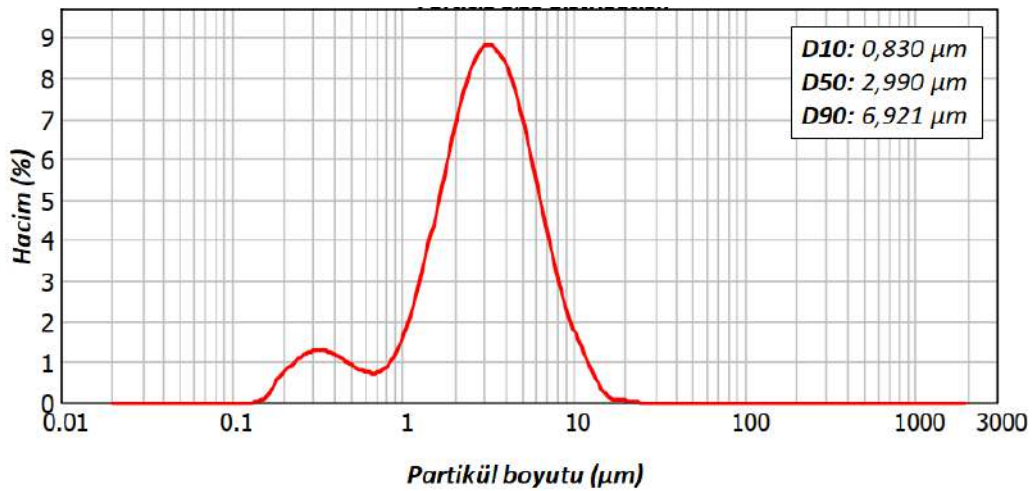
Aluminyum nitrür tozun yüksek enerjili öğütme işlemi öncesi ve sonrası elde edilen partikül boyut ölçüm sonuçları Şekil 1'de yer almaktadır. Grafiklerde yüksek enerjili öğütme ile AlN tozların tane boyutunun düştüğü ve tane boyut dağılımının daraldığı görülmektedir. Öğütme işlemi öncesi AlN tozun tane boyutu yaklaşık olarak 11 $\mu$ m-0,8 $\mu$ m arasında değişim gösterirken, işlem sonrası 3 $\mu$ m-0,2 $\mu$ m arasında olduğu tespit edilmiştir. AlN toz örnekteki partiküllerin yüzde 90'ının daha küçük ( $D_{90}$ ) ve yüzde 10'unun daha yüksek ( $D_{10}$ ) olduğu partikül boyutları ise sırası ile 6.9 $\mu$ m'den 1.7 $\mu$ m'ye ve 0,830 $\mu$ m'den 0,208 $\mu$ m'ye düşürülmüştür. Öğütme işlemi öncesi ortalama tane boyutu ( $D_{50}$  değeri) 2,990 $\mu$ m olan tozun işlem sonrası  $D_{50}$  değerinin 0,525 $\mu$ m'ye düşürülmüştür.

Çalışmada iki aşamalı yüksek enerjili öğütme işleminin  $\alpha$ -SiAlON seramiklerin mikroyapısı ve optik özellikleri

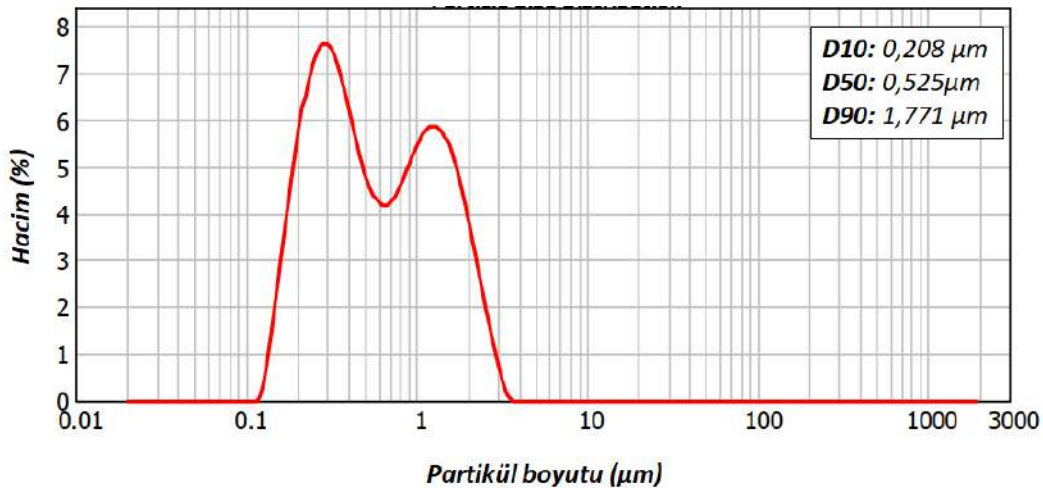


üzerine etkilerini kıyaslamak amacıyla geleneksel öğütme yöntemi ile üretilmiş başlangıç tozları kullanılarak bir referans numune hazırlanmıştır. Bu örnek “DyY2010-G” şeklinde isimlendirilmiştir. AlN tozların ön öğütme işlemine tabi tutulduğu yüksek enerjili öğütme süreci ile hazırlanan başlangıç toz karışımı kullanılarak üretilen örnek “DyY2010-6S” şeklinde kodlanmıştır. **Çizelge 1**’de üretilen numunelerin kodları ve üretim koşulları yer almaktadır. Sinterlenen numunelerin XRD analiz sonuçları **Şekil 2**’de verilmiştir. Her iki numunede de tespit edilen tüm pikler 01-076-6455 COD numaralı  $\alpha$ -SiAlON fazına aittir, ikincil bir kristalin fazın varlığına işaret eden ilave

piklere rastlanmamıştır. Ancak numunelerin kesit yüzeyinden geri yansıyan elektron detektörü kullanılarak elde edilen taramalı elektron mikroskobu görüntülerinde farklı kontrast yaratan üç fazın mevcut olduğu görülmektedir (**Şekil 3**). Görüntülerde 1 ile işaretlenmiş olan diğer iki faza kıyasla çok daha koyu renkli görülen çubuksu tane morfolojisine sahip fazın  $\alpha$ -SiAlON seramiklerinde yüksek miktarda AlN-politipleri olduğu düşünülmektedir. Daha önceki çalışmalarımızda bu fazın  $\alpha$ -SiAlON fazına kıyasla Al ve N yönünden çok daha zengin olduğu, dolayısı ile AlN-politiplerine ait olduğu tespit edilmiştir [11]. AlN-politiplerine ait karakteristik piklerin XRD analizi sonuçlarında tespit edilememesi



(a)



(b)

**Şekil 1.** Alüminyum nitrür tozun (a) yüksek enerjili öğütme işlemi öncesi ve (b) sonrası partikül boyut ölçüm sonuçları (Particle size measurement results of aluminum nitride powder before (a) and after (b) high-energy milling process )

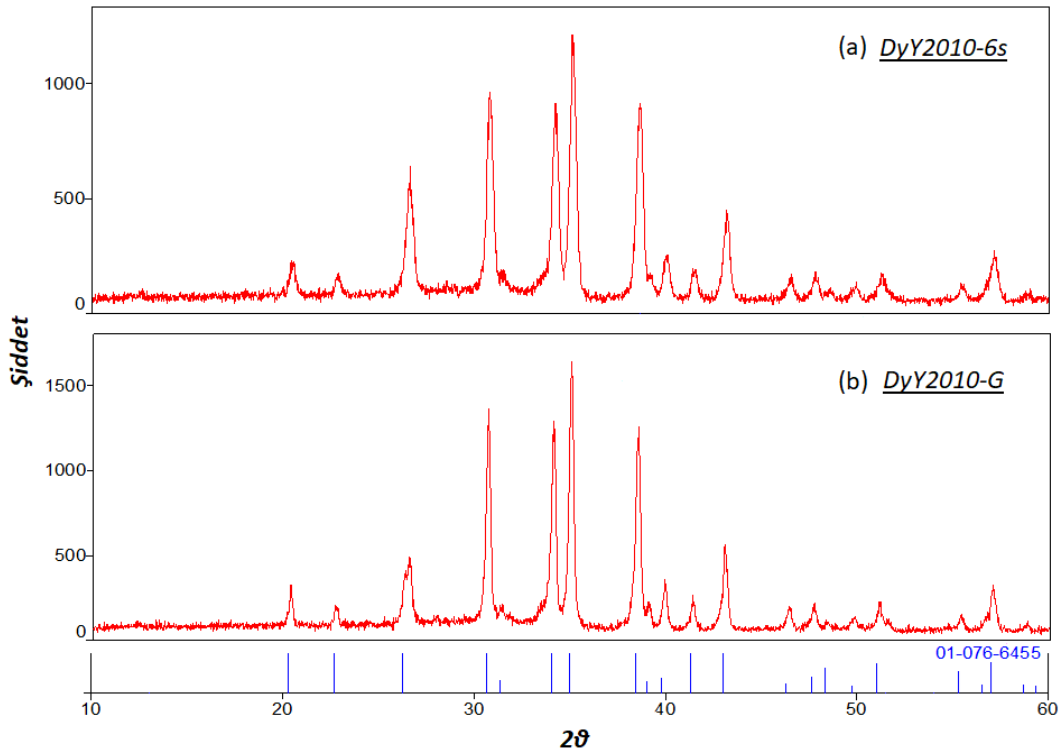
**Çizelge 1.** Numunelerin kodları ve üretim koşulları (Codes of samples and production conditions)

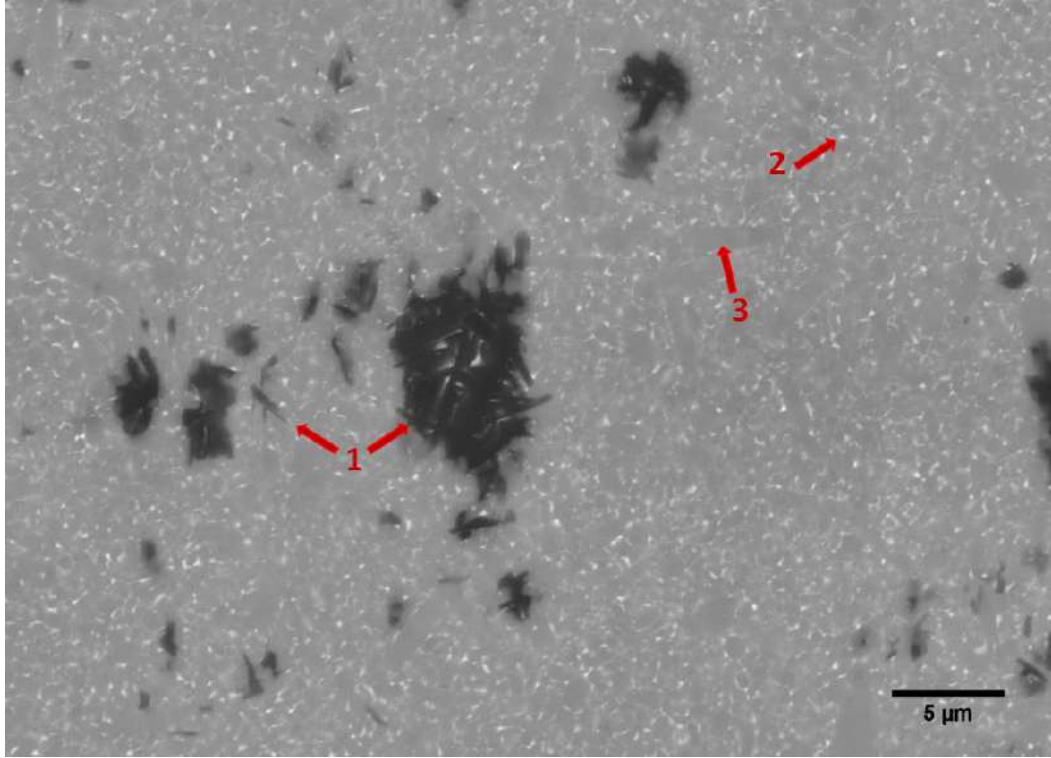
Numune Kodu	Öğütme Yöntemi	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (dk.)
DyY2010-G	Geleneksel öğütme	1750	5
DyY2010-6S	İki aşamalı yüksek enerjili öğütme	1750	5

yapıda az miktarda mevcut olmasından kaynaklanabilir. İki aşamalı yüksek enerjili öğütme işlemi uygulanarak üretilen numunenin (DyY2010-6S) taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsünde (**Şekil 3-b**) geleneksel yöntemle üretilmiş referans numuneye (DyY2010-G) (**Şekil 3-a**) kıyasla daha az miktarda AlN-politip fazın mevcut olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, DyY2010-G (**Şekil 3- a**) kodlu numunede AlN-politip tanelerinin yapıda topraklar halinde mevcut olduğu, iki aşamalı yüksek enerjili öğütme işlemi uygulanarak üretilen numunede (DyY2010-6S) (**Şekil 3-b**) ise bu tanelerin daha homojen dağıldığı ve tane boyutlarının daha küçük olduğu gözlenmiştir.

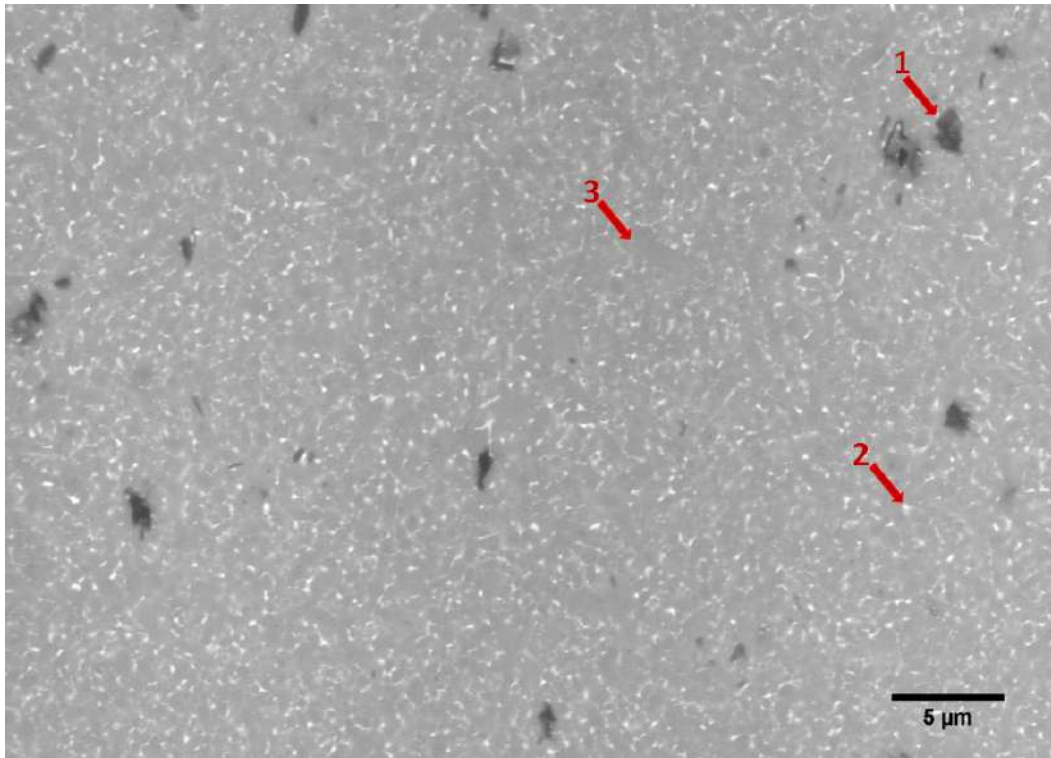
SEM görüntülerinde AlN-politiplerine kıyasla daha açık gri renkli görünen matris fazı XRD sonuçlarında tespit edilen  $\alpha$ -SiAlON fazına aittir.  $\alpha$ -SiAlON tanelerinin genel olarak eş eksenli morfolojiye sahip oldukları görülmektedir. Bunun yanı sıra az miktarda da olsa uzamış çubuksu  $\alpha$ -SiAlON tanelerinin varlığı tespit edilmiştir. SEM görüntülerinde çubuksu  $\alpha$ -SiAlON tanelerinden bazıları 3 ile işaretlenerek gösterilmiştir. AlN tozlarına yüksek enerjili ön öğütme işlemi

uygulanarak üretilen numunede (**Şekil 3-b**) geleneksel yöntemle üretilmiş referans numuneye kıyasla (**Şekil 3-a**) daha az miktarda uzamış  $\alpha$ -SiAlON tanelerinin olduğu görülmektedir. Sinterleme esnasında oluşan oksitçe zengin, düşük viskoziteye sahip sıvı fazın çubuksu  $\alpha$ -SiAlON tanelerinin oluşumunu desteklediği bilinmektedir [12]. Yüksek enerjili ön öğütme işlemi ile AlN partikül boyutunun düşürülmesi,  $\alpha$ -SiAlON oluşumunu hızlandırarak, sıvı fazın  $\alpha$ -SiAlON tarafından daha çabuk tüketilmesini ve eş eksenli  $\alpha$ -SiAlON tanelerinin oluşumuna katkı sağladığı düşünülmektedir. Görüntülerde 2 ile işaretlenmiş olan tane sınırı camısı fazın her iki numunede de üçlü tane birleşim noktalarında yer alarak mikro yapıda homojen bir dağılıma sahip olduğu tespit edilmiştir. Tane sınırı camısı fazın  $\alpha$ -SiAlON seramiklerin mekanik özelliklerini etkilediği bilinmektedir [13]. Bu nedenle yapıda az miktarda mevcut olması ve homojen olarak dağılması önemlidir. Tane sınırı camısı fazın çeşitli ısıl işlem aşamaları uygulanarak kristallendirilmesi sonucu SiAlON seramiklerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesini

**Şekil 2.** Numunelerin XRD analiz sonuçları, (a) DyY2010-6S ve (b) DyY2010-G (XRD analysis results of the samples (a) DyY2010-6S and (b) DyY2010-G).

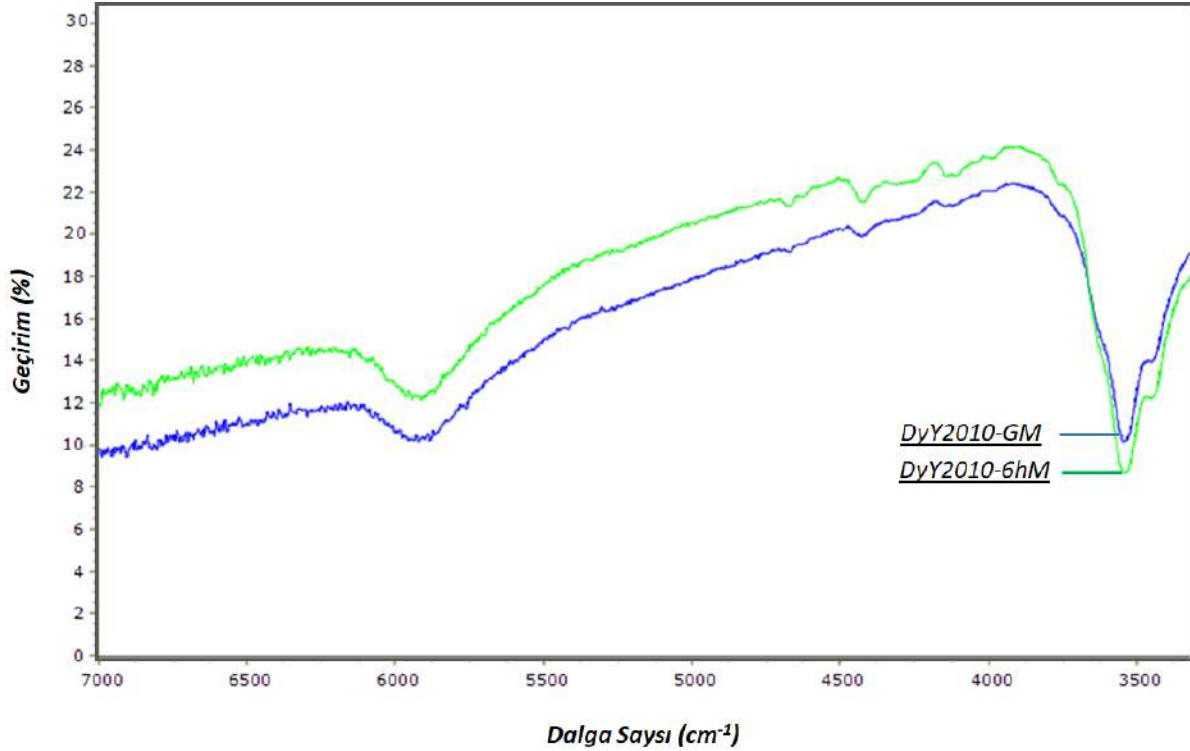


(a)



(b)

**Şekil 3.** (a) DyY2010-G ve (b) DyY2010-6S kodlu  $\alpha$ -SiAlON seramiklerin 7500 X büyütme ile 2.5 kV hızlandırma voltajı kullanılarak elde edilen geri yansıyan elektron mikroskobu görüntüleri (Backscattered electron microscopy images of (a) DyY2010-G and (b) DyY2010-6S coded  $\alpha$ -SiAlON ceramics using an acceleration voltage of 2.5 kV at 7500 X magnification).



**Şekil 4.** DyY2010-G (mavi) ve DyY2010-6S (yeşil) kodlu  $\alpha$ -SiAlON seramiklerin FT-IR analizi sonuçları (FT-IR analysis results of  $\alpha$ -SiAlON ceramics, DyY2010-G (blue) and DyY2010-6S (green))

seramiklerin üstün mekanik özelliklerini kaybetmeden optik özelliklerinin geliştirilmesi sürecinde, tane sınırı camsi fazının kırıcılık indeksi  $\alpha$ -SiAlON fazından farklılık gösterdiğinden, yapıda az miktarda tane sınırı fazının mevcut olması ve homojen olarak dağılması geçirgenliği arttırmak amacı ile tercih edilir. Bu açıdan çalışmada tasarlanan başlangıç kompozisyonlarının ve sinterleme rotasının başarılı bir şekilde çalıştığı söylenebilir. **Şekil 4**'te DyY2010-G ve DyY2010-6S kodlu  $\alpha$ -SiAlON seramik numunelerin FT-IR analizi sonuçları yer almaktadır. Grafikler incelendiğinde 0,5 mm kalınlığındaki her iki numunenin de IR-dalga boyunda yarı geçirgen olduğu tespit edilmiştir. Geçirgenlik eğrilerinde yaklaşık  $3540 \text{ cm}^{-1}$  bölgesinde görülen soğurma pikleri daha önceki çalışmalarda da rapor edildiği üzere, kompozisyonların  $\text{Dy}^{+3}$  içermesi nedeni ile gerçekleşen  $6\text{H}_{15/2} \rightarrow 6\text{H}_{11/2}$  elektron geçişinden kaynaklanmaktadır [14]. İki aşamalı yüksek enerjili öğütme işlemi uygulanarak üretilmiş DyY2010-6S kodlu numunenin IR geçirgenliğinin  $3000\text{-}7000 \text{ cm}^{-1}$  aralığında referans numuneye kıyasla yaklaşık %2 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu farkın temel nedenleri DyY2010-6S kodlu numunede daha az miktarda ve daha homojen dağılmış AlN-politip fazının mevcut olması ve daha az miktarda uzamış  $\alpha$ -SiAlON tanelerinin oluşmasıdır. Bu yaklaşım literatürde yer alan bulguları destekler niteliktedir. Daha önce rapor edilmiş çalışmalarda  $\alpha$ -SiAlON seramiklerin eş eksenli tane morfolojisine sahip olması ve faz çeşitliliğinin az olması ile optik özelliklerini iyileştirebileceği bilgileri yer almaktadır [15, 16].

## 6. SONUÇ (CONCLUSION)

Sonuç olarak, çalışmada yarı saydam çift katyon (Dy ve Y) katkılı  $\alpha$ -SiAlON seramikler kıvılcım plazma sinterleme (SPS) tekniği kullanılarak başarılı bir şekilde üretilmiştir. Başlangıç toz karışımının iki aşamalı yüksek enerjili öğütme yöntemi ile hazırlanması sayesinde AlN-politip fazının oluşmasını destekleyen büyük partikül boyutuna sahip AlN tozların ortalama tane boyutu  $2,990 \mu\text{m}$ 'den  $0,525 \mu\text{m}$ 'ye düşürülmüştür. Böylelikle sinterleme sonrası  $\alpha$ -SiAlON seramiklerin morfolojisinde daha az miktarda AlN-politip fazının oluştuğu ve bu fazın yapıda daha homojen olarak dağıldığı tespit edilmiştir. İki aşamalı öğütme işleminin  $\alpha$ -SiAlON tanelerinin morfolojisine de etki ettiği, uzamış tanelerin oluşmasını engelleyerek eş eksenli tane morfolojisini desteklediği görülmüştür. İki aşamalı yüksek enerjili öğütme tekniği ile hazırlanan tozlar kullanılarak üretilen yarı saydam  $\alpha$ -SiAlON seramiğin kızıl ötesi (IR) geçirgenlik değerleri  $3000\text{-}7000 \text{ cm}^{-1}$  dalga sayısı aralığında yaklaşık %2 oranında artırılmıştır. AlN esaslı ikincil fazların (politipler) miktarı ve faz çeşitliliği azaltılarak SiAlON seramiklerin üstün mekanik özelliklerini kaybetmeden optik özellikleri iyileştirilebilir.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Karunatne B. S. B., Lumby R. J., Lewis M. H., "Rare-Earth-Doped  $\alpha$ -Sialon Ceramics with Novel Optical Properties", *J. Mater. Res.*, 11: 2790–2794, (1996)
- [2] Jones M.I., Hyuga H., Hirao K., "Optical and Mechanical Properties of  $\alpha/\beta$  Composite Sialons", *J. Am. Ceram. Soc.*, 86 (3): 520-522, (2003)
- [3] Shan Y., Xu J., Guan C., Li J., "Preparation and Properties of Translucent Y- $\alpha$ -Sialon Ceramics by Two-Steps Hot Pressing", *Key Engineering Materials*, 434: 661-663, (2010)
- [4] Jones M.I., Hyuga H., Hirao K., Yamauchi Y., "Highly Transparent Lu- $\alpha$ -SiAlON" *J. Am. Ceram. Soc.*, 87 (4) (2004) 714-716.
- [5] Xiong Y., Fu Z., Wang H., Wang W., Zhang J., Zhang Q., Wohn S., Niihara L. K., "Translucent Mg- $\alpha$ -Sialon Ceramics Prepared by Spark Plasma Sintering", *J. Am. Ceram. Soc.*, 90(5): 1647-1649, (2007)
- [6] M. Mitomo, Y. Moriyoshi, T. Sakai, T. Ohsaka, and M. Kobayashi, "Translucent  $\beta$ -SiAlON Ceramics," *J. Mater. Sci. Lett.*, 1: 25–26, (1982)
- [7] Mandal H., "New Developments in  $\alpha$ -Sialon Ceramics," *J. Eur. Ceram. Soc.*, 19:2349-2357, (1999)
- [8] Xinlu S., Peiling W., Weiwu C., Bo Z., Yibing C., Dongsheng Y., "Translucent  $\alpha$ -Sialon Ceramics by Hot Pressing", *J. Am. Ceram. Soc.* 87(4):730-732, (2004)
- [9] Krell A., Blank P., Ma H., Hutzler T., Van B. M., Apetz, R., "Transparent sintered corundum with high hardness and strength". *J. Am. Ceram. Soc.*, 86(1):12–18 (2003)
- [10] Krell, A., Hutzler, T., Klimke, J., "Transmission physics and consequences for materials selection, manufacturing, and applications", *J. Eur. Ceram. Soc.*, 29:207–221, (2009)
- [11] Kurama S., Avcioglu S., Ayas E., "Optimization of the optical properties of  $\alpha$ -SiAlON through a decrease in starting powder size", *J. Eur. Ceram. Soc.*, 35(12):3229-3235, (2015)
- [12] Camuscu N., Thompson D. P., Mandal H., "Effect of starting composition, type of rare earth sintering additive and amount of liquid phase on  $\alpha \rightleftharpoons \beta$  sialon transformation" *J. Eur. Ceram. Soc.*, 17(4):599-613, (1997)
- [13] Kurama S., Herrmann M., Mandal H., "The effect of processing conditions, amount of additives and composition on the microstructures and mechanical properties of  $\alpha$ -SiAlON ceramics" *J. Eur. Ceram. Soc.* 22(1):109-119, (2002)
- [14] Gschneidner K. A., "Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths", Optical Spectroscopy, Volume: 37, North Holland; 1st Edition (2007)
- [15] Krell A, Klimke J. "Effects of the homogeneity of particle coordination on solid-state sintering of transparent alumina", *J. Am. Ceram. Soc.* 89(6): 1985-1992, (2006)
- [16] Avcioglu S., Kurama S., "Investigation of the influence of initial powder size on the optical properties of Dy- $\alpha$ -SiAlON ceramics fabricated by gas pressure sintering", *Ceramics International*, 43(S1): S449-S454, (2017)



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Çatlak içeren bir çerçeve taşıyıcı sistemin zorlanmış titreşim analizi

## *Forced vibration analysis of a cracked frame*

Yazar(lar) (Author(s)): Kemal KOÇYİĞİT<sup>1</sup>, Şeref Doğuşcan AKBAŞ<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-5430-0701

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0001-5327-3406

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Koçyiğit K. ve Akbaş Ş. D., “Çatlak içeren bir çerçeve taşıyıcı sistemin zorlanmış titreşim analizi”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1059-1071, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.606499



# Çatlak İçeren Bir Çerçeve Taşıyıcı Sistemin Zorlanmış Titreşim Analizi

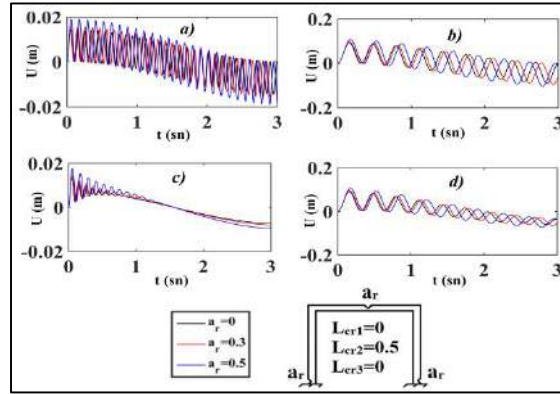
## Forced Vibration Analysis of a Cracked Frame

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Çatlak parametrelerinin ve sönümün çerçeve taşıyıcı sisteminin dinamik cevaplara olan etkisinin araştırılması/ (Effects of crack parameters and damping on the dynamic responses of the frame structure)
- ❖ Geometrik boyutların çerçevenin çatlak davranışına olan etkileri/ (Effects of geometry dimensions on the crack behavior of the frame structure)

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada farklı değerlerdeki çatlak derinliğinin, farklı çatlak konumlarının ve çerçeve boyutlarının sönümsüz ve sönümlü zorlanmış titreşim cevaplarına olan etkileri sunulmuştur.



**Şekil.** Farklı çatlak konumları ve çatlak derinliği değerleri için zamana bağlı yer değiştirmeler  
**Figure.** Time responses on the displacements for different crack locations and crack depth

### Amaç (Aim)

Çalışmada, çatlak derinliğinin, çatlak konumunun, çerçeve boyutlarının yapının dinamik cevaplarına olan etkisi detaylı olarak incelenmiştir./ (In this study, effects of crack depth, crack location and dimesions of frame structure on the dynamic responses of frames are investigated in detail.)

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Çalışmada, çelikten yapılmış bir çerçeve taşıyıcı düşünülmüştür. Farklı çatlak durumları göz önüne alınmıştır. Problemin çözümünde, sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır./ (In this study, the material of the frame structure is considered as Steel. Different crack cases are used. In the solution of the problem, the finite element method is used.)

### Özgünlük (Originality)

Bu çalışmanın özgün değeri, literatürde eksik olan çatlaklı çerçeve yapıların sönümlü zorlanmış titreşim davranışlarının incelenmesidir./ The novelty of this study is investigate to damped forced vibration of cracked frame structures.

### Bulgular (Findings)

Sönümün dikkate alınmadığı durumdaki çatlak etkisinin oluşturduğu dinamik cevaplar, sönümlü durumdaki sonucu oluşan dinamik cevaplardan oldukça farklı olduğu görülmektedir./ (It is observed that there are many differences between the results of damped and undamped properties in the cracked frames.)

### Sonuç (Conclusion)

Çatlak konumunun, çatlak derinliğinin ve yapı boyutlarının, kırılma davranışa çok önemli bir etkisinin olduğu görülmüştür. (It is seen from results, the crack location, the crack depth and dimesions of structure have big influence on the fracture behavior of frame structure.)

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Çatlak İçeren Bir Çerçeve Taşıyıcı Sistemin Zorlanmış Titreşim Analizi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Kemal KOÇYİĞİT, Şeref Doğuşcan AKBAŞ\***

Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fak., İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa, Türkiye  
(Geliş/Received : 19.08.2019 ; Kabul/Accepted : 21.10.2019)

## ÖZ

Bu çalışmada, kenarında çatlaklar bulunan tek açıklıklı bir çerçeve taşıyıcının sönümsüz ve sönümlü zorlanmış titreşim cevapları incelenmiştir. Çatlaklı çerçevenin titreşim analizleri, Euler-Bernoulli çubuk teorisi çerçevesinde incelenmiştir. Çatlak etkisinden dolayı ortaya çıkan yerel esneklik, çatlak kesiti veya bölgesinde, kütsüz ve boyutsuz bir çubuk sonlu eleman ile modellenmiştir. Çatlaktan dolayı ortaya çıkan yerel esneklik, lineer elastik kırılma mekaniği teorisi baz alınarak açılma modu (Mod1) ile düzlem içi kayma modu (Mod2) kullanılmasıyla birlikte elde edilen gerilme yığılma faktörü ve şekil değiştirme enerjisi salıveriminin oranlarına bağlı olarak elde edilmiştir. Çatlak esnekliğinin tersi alınarak elde edilen çatlak rijitliğinin sonlu elemanlar modeline eklenmesiyle birlikte birleştirilmiş sonlu elemanlar formülasyonları elde edilmiştir. Zorlanmış titreşim çözümlerinde zaman tanım aralığında doğrudan integrasyon yöntemlerinden biri olan merkezi farklar yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada farklı değerlerdeki çatlak derinliğinin, farklı çatlak konumunun ve farklı değerlerdeki çerçeve yapının geometrik boyutlarına bağlı olarak dinamik cevaplar elde edilmiş ve yorumlanmıştır. Elde edilen formülasyon ve sonuçların doğruluğu için, literatürdeki benzer çalışmaların özel sonuçları ile kıyaslama çalışmaları yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Çatlak, çerçeve yapı, zorlanmış titreşim, sonlu elemanlar metodu.

## Forced Vibration Analysis of a Cracked Frame

### ABSTRACT

In this study, undamped and damped forced vibration responses of a single span frame with cracks are investigated. The vibration analysis of the cracked frame is examined by using the Euler-Bernoulli beam theory. The local flexibility resulting from the crack effect is modeled with a massless and dimensionless finite element beam in the crack section. The local flexibility is obtained by using the stress intensity factor and strain energy release rates according to the opening mode (Mode 1) and the in-plane shear mode (Mode 2) based on the linear elastic fracture mechanics theory. The crack stiffness is obtained by taking the inverse of the flexibility of the crack. Assembly of global finite element matrices are obtained by adding the crack stiffness to the finite element model.

In solution of the forced vibration problem, the central difference method is used in the time history. In the numerical results, the effects of the crack depth, the crack location and dimension of the frame on the undamped and damped forced vibration responses of the cracked frame are investigated. Also, the validation studies are performed in order to accuracy of the presented method.

**Keywords:** Crack, frame structure, forced vibration, finite element method.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mühendislik yapılarında servis ömrü boyunca karşılaşılan en büyük problemlerden biri çatlak problemidir. Çatlaklar, yapı bütünlüğünü, dayanımını ve stabilitesini olumsuz yönde etkilemekte ve yapı elemanlarında yerel esnekliklere yol açmaktadır. Bunun neticesinde, yapı elemanının mekaniksel davranışlarında önemli değişiklikler meydana gelmekte, dayanım ve kullanım ömrü oldukça düşmektedir. Çatlak içeren yapı elemanlarının incelenmesi, yapısal analiz içerisinde önemli bir problemdir. Çatlak içeren bir yapı elemanı ile çatlak içermeyen bir yapı elemanı arasında mekanik davranışlar açısından oldukça büyük farklılıklar olabilmektedir. Çatlakların belirli bir durumundan sonra, yapı elemanı ya kırılmakta yada kullanılabilirlik özelliğini kaybedebilmektedir. Bu durum özellikle can ve

mal güvenliğinin önem arz ettiği mühendislik yapılarının tasarımı ve yapımında daha önemli husus olmaktadır. Mühendislik yapılarının servis ömrü göz önüne alınarak tasarımı ve boyutlandırılmasında, oluşabilecek kırılma ve çatlak durumlarının öngörülmesi ve tasarım analizlerinde göz önüne alınması, kırılma, çatlak ve hasarlardan kaçınabilecek önlemlerin alınması gereklidir.

Bu çalışmada, kenarında çatlak içeren, tek açıklıklı bir çerçeve taşıyıcı sistemin dinamik davranışları incelenmiştir. Literatürde, çatlak içeren yapısal elemanların mekanik davranışlarının araştırılması pek çok araştırmacı tarafından yapılmıştır. Konu ile ilgili çalışmaların çoğu, kiriş elemanları üzerinde yapılmıştır. Kiriş, kolon, çerçeve gibi çubuk elemanların çatlak göz önüne bulundurulması yapılmış çalışmaların özeti izleyen aşamada verilmiştir. Tharp [1] kenarında tek çatlak içeren, dikdörtgen kesitli kolon ve kirişlerin sonlu elemanlar analizini incelemiştir. Ostachowicz ve

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : seref.akbas@btu.edu.tr

Krawczuk [2] kenar çatlaklı bir kirişin titreşim analizini yapmışlardır. Shen vd. [3] kenar çatlaklı, basit mesnetli bir kirişin serbest titreşimini Euler-Bernoulli kiriş teorisi çerçevesinde incelemişlerdir. Nikolakopoulos vd. [4] çerçeve taşıyıcı sistemlerin çatlak analizini yapmışlardır. Krawczuk vd. [5] çatlak içeren kompozit kiriş ve levha elemanların dinamik analizini yapmışlardır. Yokoyama ve Chen [6] kenarında tek çatlağa sahip, Euler -Bernoulli kirişinin titreşim karakteristiklerini, çizgi yayı modeli kullanarak incelemişlerdir. Saavedra ve Cuitino [7] enine çatlak içeren kirişlerin dinamik davranışlarını teorik ve deneysel olarak incelemiştir. Kuntiyawichai ve Burdekin [8] dinamik yükler etkisi altında çatlaklı yapıların kırılma tokluğu ve çatlak bağlantılarını incelemek için sonlu elemanlar analizi yapmışlardır. Zheng ve Kessissoglou [9] çatlaklı bir kirişin doğal frekanslarını ve mod şekillerini, sonlu eleman yöntemi ile elde etmişlerdir. Gürel ve Kısa [10] düşey yüklere maruz, çatlak içeren narin prizmatik kolonların burkulmasını incelemişlerdir. Gürel [11] birden çok çatlak içeren ince prizmatik dairesel sütunların burkulmasını, transfer matrisi yöntemi ile incelemiştir. Caddemi ve Calio [12] ile Caddemi vd. [13] birden fazla çatlak içeren kolonların stabilitesini incelemişlerdir. Challamel ve Xiang [14] çatlaklı çerçeve, kiriş ve kolonların burkulma analizi incelemişlerdir. Ibrahim vd. [15] kenar çatlaklı çerçeve taşıyıcı sistemlerin titreşim cevaplarını incelemiştir. Chatterjee [16] harmonik yükleme altındaki konsol kirişlerin, doğrusal olmayan titreşim cevaplarından faydalanarak kırılma analizini yapmıştır. Akbaş [17] fonksiyonel olarak derecelendirilmiş, kenar çatlaklı konsol bir kirişin serbest titreşim analizi üzerine çalışmıştır. Labib vd. [18] birden çok çatlak içeren kiriş ve çerçevelerin serbest titreşim analizini yapmışlardır. Akbaş [19,20] kenar çatlaklı kirişlerin bir impulsif yük altındaki dalga yayılımını incelemiştir. Öztürk vd. [21] çok açıklıklı ve kenarında çatlak içeren çerçeve yapıların periyodik yükleme altındaki dinamik stabilitesini incelemişlerdir. Tan vd. [22] kenar çatlaklı ve değişken kesitli kirişlerin serbest titreşim analizini sonlu elemanlar yöntemi incelemişlerdir. Ayrıca Akbaş [23,24,25,26] nano ve mikro ölçekli çubuk elemanların çatlaklı durumları için dinamik analizlerini yapmıştır.

Literatür çalışmasından görüldüğü üzere, çatlaklı çerçeve yapıların zorlanmış titreşim analizleri ile ilgili yapılmış çalışma sayısı oldukça azdır. Çatlak etkisi göz önüne alınarak yapılmış çalışmaların genelinde kiriş ve kolon elemanlar üzerinde yoğunlaşma görülmüştür. Çatlaklı çerçeve yapılar üzerine yapılmış çalışmaların çoğunda serbest titreşim analizi incelenmiş olup, zorlanmış titreşim analizi etraflıca yapılmamıştır. Bu çalışmanın özgün değeri ve literatüre katkısı, literatürde eksik olan çatlaklı çerçeve yapıların sönümlü zorlanmış titreşim davranışlarının incelenmesidir.

Çalışmada, çatlaklı çerçevelerin dinamik davranışları, Euler-Bernoulli çubuk teorisi çerçevesinde ele alınıp enerji tabanlı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Çatlaklı bölümün esnekliği, çatlaktan dolayı meydana gelen yerel esnekliğe bağlı olarak

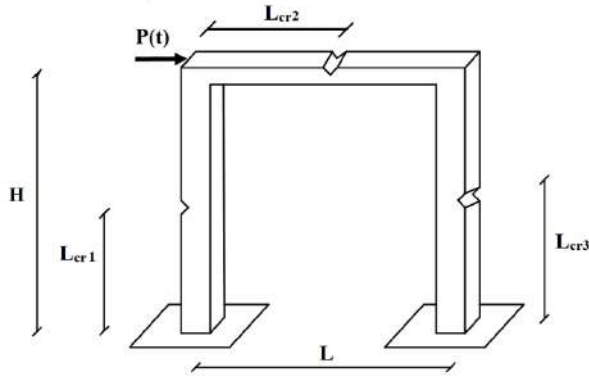
kütsüz ve boyutsuz çubuk sonlu eleman ile modellenmiştir. Sonlu elemanlar modeline eklenen çatlak elemanı eklenerek birleştirilmiş sonlu elemanlar formülasyonları elde edilmiştir. Yayın rijitliği, kırılma mekaniği teorileri kullanılması ile birlikte açılma modu (Mod1) ve düzlem içi kayma modu (Mod2) ile hesaplanan gerilme yığılma faktörü ve şekil değiştirme enerjisi salıverimin oranlarına ait esneklik matrisinin tersi alınarak türetilmiştir.

Çalışmada, çatlak derinliğinin, çatlak konumunun, çerçeve boyutlarının yapının dinamik cevaplarına olan etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Sönüm etkileri göz önüne alınarak, çatlaklı çerçevesel yapının zorlanmış titreşim sonuçları elde edilmiştir. Zorlanmış titreşim probleminde, yapıya harmonik yük etkisi göz önüne bulundurularak, dinamik cevaplar elde edilmiştir. Söz konusu dinamik probleminin çözümünde, zaman tanım aralığında doğrudan integrasyon yöntemlerinden biri olan merkezi farklar yöntemi kullanılarak çözüm yapılmıştır. Problemin çözümünde, çatlaklı durum göz önüne alınmış, çerçeve sisteminin sonlu elemanlar formülasyonları zaman tanım aralığında elde edilip bununla birlikte Matlab programında algoritma ve kodları elde edilmiştir. Elde edilen formülasyon ve sonuçların doğruluğunu test etmek için ise, literatürdeki çalışmaların özel sonuçları ile kıyaslama çalışmaları yapılmıştır.

## 2. TEORİ VE FORMÜLASYONLAR (THEORY AND FORMULATIONS)

Şekil 1 de tek açıklıklı, mesnetleri ankastre, kenarında çatlak içeren  $H$  yüksekliğinde,  $L$  uzunluğunda, dikdörtgen kesitli bir çerçeve taşıyıcı sistem gösterilmiştir. Şekil 1 de, çatlağın çerçeve elemanlarının farklı yerlerde olması durumlarına göre durumları gösterilmiştir. Çatlağın sol kolonda olması durumundaki konumu sol ankastre mesnetten itibaren  $L_{c1}$ , kiriş elemanında olması durumunda sol kolon-kiriş birleşimden itibaren  $L_{c2}$  ve sağ kolon elemanında olması durumunda sağ kolon-kiriş birleşimden itibaren  $L_{c3}$  olarak tanımlanmıştır. Çatlak derinliği ise,  $a_r$  olarak ifade edilmiştir. Zorlanmış titreşim probleminin incelenmesinde, çerçeveye şekil 1 de görüldüğü gibi, sol kolon-kiriş birleşim bölgesine bir yatay tekil ( $P(t)$ ) yük etkidiği düşünülmüştür.

Çalışmada, zorlayıcı  $P(t)$  kuvvetinin bir harmonik özellikte olduğu düşünülmüş ve  $P(t)=P_0\cos(\Omega t)$  olarak ele alınmıştır. Burada,  $P_0$  zorlayıcı dış yükün genliği,  $\Omega$  yükün frekansı ve  $t$  ise zamanı gösterir. Çerçeve elemanlarından sol kolon "1" nolu, kiriş "2" nolu ve sağ kolon ise "3" nolu eleman olarak gösterilmiştir. Çerçeve elemanın en kesit boyutları  $b$  genişlik,  $h$  yükseklik olarak gösterilmiş olup, her bir elemanın en kesit boyutları bu sembollerin alt indisi numaralandırılarak ifade edilmiştir.



**Şekil 1.** Dış dinamik bir yük etkisi altındaki çatlak içeren tek açıklı bir çerçeve taşıyıcı sistem (A single span cracked frame structure under dynamic external load)

Çatlaklı çerçevenin dinamik davranışlarının incelenmesinde, çerçeve sistemini oluşturan elemanlar çubuk sonlu elemanlar ile modellenip, çubuklar Euler-Bernoulli kiriş teorisi çerçevesinde incelenmiştir. Çalışmada yapılan kabullerde, yer değiştirme ve dönmelerin 1. Mertebe teorisinde incelendiği ve taşıyıcı sisteminin malzeme özelliği lineer-elastik, izotrop ve homojen olduğu kabul edilmiştir.

Probleme ait çatlaksız durum için sonlu elemanlar hareket denklemi izleyen şekilde verilmiştir:

$$[K']\{q'(t)\} + [D']\{\dot{q}'(t)\} + [M']\{\ddot{q}'(t)\} = \{F'(t)\} \quad (1)$$

Burada  $[K']$  rijitlik matrisi,  $[D']$  sönüm matrisi,  $[M']$  kütle matrisi ve  $\{F'(t)\}$  yük vektörüdür. Sonlu elemanlar formülasyonlarının açılımı izleyen şekilde verilmiştir.

$$[K']^e = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{-EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{-12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & \frac{-6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ \frac{-EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-12EI}{L^3} & \frac{-6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{-6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & \frac{-6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[M']^e = \begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 22L & 0 & 54 & -13L \\ 0 & 22L & 4L^2 & 0 & 13L & -3L^2 \\ \frac{\rho AL}{420} & 70 & 0 & 0 & 140 & 0 \\ 0 & 54 & 13L & 0 & 156 & -22L \\ 0 & -13L & -3L^2 & 0 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[D']^e = \eta \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{-EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{-12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & \frac{-6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ \frac{-EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-12EI}{L^3} & \frac{-6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{-6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & \frac{-6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\{F'(t)\} = \int_0^{L_e} \{\varphi\}^T F(t) dX \quad (5)$$

Burada,  $E$  Young Modülü,  $A$  kesit alanı,  $L$  çubuk uzunluğu,  $I$  kesit atalet momenti,  $\rho$  çubuk elemanın kütle yoğunluğu ve  $F(t)$  zamana bağlı dış yük,  $\varphi$  şekil fonksiyonu,  $\eta$  viskoz sönüm oranı olup izleyen denklemde ifade edilmiştir.

$$\eta = \frac{c}{E} \quad (6)$$

Burada  $c$  sönüm katsayısıdır. Çerçeve taşıyıcı sistemleri oluşturan çubukların doğrultuları farklı olduğundan dolayı, her bir çubuk için kendi yerel eksen takımına göre (2-5) eşitliklerinde elde edilen sonlu elemanlar formülasyonları, global eksen takımına göre dönüştürülerek sonlu elemanlar birleştirme işlemleri yapılır. Global eksen takımına göre sonlu elemanlar ifadeleri izleyen şekilde elde edilir.

$$\{F\} = [T]\{F'\} \quad (7a)$$

$$[K] = [T]^T[K'] [T] \quad (7b)$$

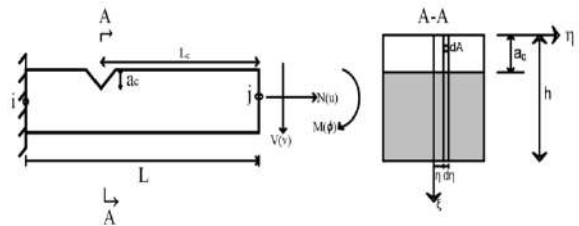
$$[M] = [T]^T[M'] [T] \quad (7c)$$

$$[D] = [T]^T[D'] [T] \quad (7d)$$

burada,  $[T]$  transformasyon matrisi olup, izleyen şekilde detaylı açılımı verilmiştir.

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin \theta & -\cos \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin \theta & -\cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

burada,  $\theta$  her bir çubuk elemanın yatay eksen ile yaptığı açıdır. Şekil 2'de  $N$  aksenal kuvvet,  $V$  kesme kuvveti ve  $M$  eğilme momentine maruz uzunluğu  $L$ , alanı  $A$ , çatlak içeren, dikdörtgen kesitli bir çubuk elemanı gösterilmiştir. Burada  $L_c$  çatlakın sağ uçdan itibaren mesafesidir (Zheng ve Kessissoglou, [9]).



**Şekil 2.** Çatlaklı bir çubuk eleman ve kesiti (A cracked bar element and cross section)

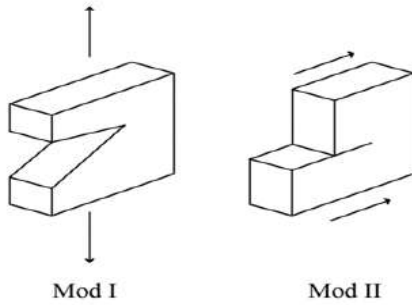
Çatlardan dolayı elemamda oluşan ek şekil değiştirme enerjisi ya da kırılma enerjisi ( $U_k$ ) izleyen şekilde verilmiştir.

$$U_k = \int_{A_c} G dA \quad (9)$$

Burada  $G$  enerji salıverme oranıdır ve  $A_c$  ise çatlak alanıdır.  $G$  enerji salıverme oranı, açılma modu (mod 1) ile düzlem içi kayma modu (Mod 2) cinsinden ifadesi izleyen şekilde verilmiştir.

$$G = \frac{1}{E'} [(K_{IN} + K_{IV} + K_{IM})^2 + K_{IIV}^2] \quad (10)$$

Burada, düzlem gerilme problemi için  $E'=E$ , düzlem şekil değiştirme için ise  $E'=E/(1-\nu^2)$ 'dir. Burada  $K$  değerleri gerilme yığılma faktörü olup mod 1 ve mod 2 cinsinden ifade edilmiştir.  $K_{IN}$ ,  $K_{IV}$  ve  $K_{IM}$  sırasıyla normal kuvvet (N), kesme kuvveti (V) ile eğilme momenti (M) tesirlerinden kaynaklanan mod 1 gerilme yığılma faktörleridir.  $K_{IIV}$  ise kesme kuvveti (V) tesirinden kaynaklanan mod 2 gerilme yığılma faktörüdür. Açılma modu (mod 1) ile düzlem içi kayma modu (Mod 2), şekil 3 de gösterilmiştir. Çatlak içeren dikdörtgen kesitli bir eleman için gerilme yığılma faktörlerinin formülasyonları izleyen bağıntılarda verilmiştir (Zheng ve Kessissoglou [9]).



**Şekil 3.** Kırılma modları (Fracture mods)

$$\begin{aligned} K_{IN} &= \frac{N}{bh} \sqrt{\pi \zeta} F_1 \left( \frac{\zeta}{h} \right), \\ K_{IV} &= \frac{6VL_C}{bh^2} \sqrt{\pi \zeta} F_2 \left( \frac{\zeta}{h} \right), \quad K_{IM} = \frac{6ML_C}{bh^2} \sqrt{\pi \zeta} F_2 \left( \frac{\zeta}{h} \right), \\ K_{IIV} &= \frac{V}{bh} \sqrt{\pi \zeta} F_{II} \left( \frac{\zeta}{h} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

(11) eşitliğinde yer alan  $F_1$ ,  $F_2$  ve  $F_{II}$  fonksiyonlarının açılımı izleyen eşitlikte verilmiştir.

$$F_1(s) = \sqrt{\frac{\operatorname{tg}(\frac{\pi s}{2}) 0.752 + 2.02s + 0.37(1 - \sin(\frac{\pi s}{2}))^3}{\pi s \cos(\frac{\pi s}{2})}} \left( s = \frac{\zeta}{h} \right) \quad (12)$$

$$F_2(s) = \sqrt{\frac{\operatorname{tg}(\frac{\pi s}{2}) 0.923 + 0.199(1 - \sin(\frac{\pi s}{2}))^4}{\pi s \cos(\frac{\pi s}{2})}} \left( s = \frac{\zeta}{h} \right) \quad (13)$$

$$F_{II}(s) = \frac{1.122 - 0.561s + 0.085s^2 + 0.180s^3}{\sqrt{1-s}} \left( s = \frac{\zeta}{h} \right) \quad (14)$$

Burada  $\zeta$  çatlak derinliğidir. Paris denkleminin kullanımı ile çatlaktan dolayı oluşan ilave yer değiştirme izleyen şekilde bulunur [9].

$$\delta_i = \frac{\partial \pi_c}{\partial P_i} \quad (i = N, V, M) \quad (15)$$

Çatlaktan dolayı oluşan esneklik katsayıları izleyen eşitlikte bulunur.

$$c_{ij} = \frac{\partial \delta_i}{\partial P_j} = \frac{\partial^2 \pi_c}{\partial P_i \partial P_j} \quad (i = N, V, M) \quad (16)$$

(11) eşitliklerini, eşitlik (9) ile (10)'da yerlerine yazıldığında, çatlaktan dolayı oluşan esneklik katsayıları izleyen şekilde elde edilir.

$$\begin{aligned} c_{ij} &= \frac{b}{E'} \frac{\partial^2}{\partial P_i \partial P_j} \int_0^a \left[ \frac{N}{bh} \sqrt{\pi \zeta} F_1 \left( \frac{\zeta}{h} \right) + \frac{6VL_C}{bh^2} \sqrt{\pi \zeta} F_2 \left( \frac{\zeta}{h} \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{6ML_C}{bh^2} \sqrt{\pi \zeta} F_2 \left( \frac{\zeta}{h} \right) \right]^2 \\ &\quad + \frac{V^2}{b^2 h^2} \pi \zeta F_{II}^2 \left( \frac{\zeta}{h} \right) \} d\zeta \quad (i = N, T, M) \end{aligned} \quad (17)$$

(17) eşitliğin açılımı sonucu, izleyen şekilde esneklik katsayıları elde edilir (Zheng ve Kessissoglou [9]).

$$F(1,1) = c_{11} E' b = 2\pi \int_0^a x F_1^2(x) dx \quad (18)$$

$$F(1,2) = \frac{c_{12} E' b h}{L_c} = 12\pi \int_0^a x F_1(x) F_2(x) dx \quad (19)$$

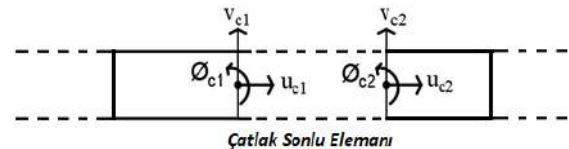
$$F(1,3) = c_{13} E' b h = F(1,2) \quad (20)$$

$$F(2,2) = c_{22} E' b = 2\pi \left[ \frac{36L_C^2}{h^2} \int_0^a x F_2^2(x) dx + \int_0^a x F_{II}^2(x) dx \right] \quad (21)$$

$$F(2,3) = \frac{c_{23} E' b h}{L_c} = 72\pi \int_0^a x F_2^2(x) dx \quad (22)$$

$$F(3,3) = c_{33} E' b h^2 = F(2,3) \quad (23)$$

Burada  $(x = \frac{\zeta}{h})$  olarak tanımlanmıştır. Çatlak kesitinin çubuk sonlu elemanlar modelinde, çatlak kesitinin olduğu yere uygun, kütleli ve uzunluğu olmayan bir sonlu eleman şekil 4'de gösterildiği gibi ilave edilir.



**Şekil 4.** Çatlak sonlu eleman modeli (Crack finite element model)

Çatlak elemanın her bir düğüm noktasının esneklik matrisi, (18)-(23) eşitliklerinden elde edilen değerler ile birlikte izleyen matris formunda elde edilir.

$$[C] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \quad (24)$$

İki düğüm noktalı ve her bir düğüm noktasında üç serbestlik derecesine sahip çatlak sonlu elemana ait rijitlik matrisinin bulunmasında, esneklik matrisinin tersi alınarak izleyen şekilde elde edilir.

$$[K_{cr}] = \begin{bmatrix} [C^{-1}] & [-C^{-1}] \\ [-C^{-1}] & [C^{-1}] \end{bmatrix}_{6 \times 6} \quad (25)$$

$$[M_{cr}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{6 \times 6} \quad (26)$$

$$[D_{cr}] = \eta[K_{cr}] \quad (27)$$

Kütlesiz çatlak sonlu elemana ait rijitlik, kütle matrislerinin ve sönüm matrislerinin çatlaksız duruma ait matrislere eklenmesi ile birlikte, çatlaklı durum için sonlu elemanlar matrisleri elde edilir. Çatlak sonlu elemanın eklenmesi ile birlikte istenilen sayıdaki sonlu eleman sayısına bağlı olarak, sonlu elemanların birleştirme işlemleri yapılır.

$$[K] = [K'] + [K_{cr}] \quad (28)$$

$$[M] = [M'] + [M_{cr}] \quad (29)$$

$$[D] = [D'] + [D_{cr}] \quad (30)$$

$$[K]\{q(t)\} + [D]\{\dot{q}(t)\} + [M]\{\ddot{q}(t)\} = \{F(t)\} \quad (31)$$

Eşitlikler 28-31'de verilen formülasyonlar, çatlak sonlu eleman modelinin eklenmesi ile elde edilen sonlu elemanlar formülasyonlarıdır.

Şekil 1 de yüklemesi ve geometrisi gösterilen çatlaklı çerçevenin, yatay harmonik bir etki altındaki sönümlü ve sönümsüz zorlanmış titreşim cevapları elde edilmiştir. (31) eşitliğinde verilen çatlaklı çerçevenin sönümlü zorlanmış dinamik denkleminin çözümünde, zaman tanım alanında çözüm yapılmıştır. Zaman tanım alanındaki çözümde, doğrudan integrasyon yöntemlerinden biri olan merkezi farklar yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemlerde problemde istenilen zaman belirli bir  $\Delta t$  zaman dilimlerine bölünerek, her bir zaman aralığında bulunan değerleri bir sonraki zaman değerlerine birleştirerek dinamik sonuçlar elde edilir. Merkezi farklar yöntemi, (31) eşitliğinde verilen hareket denkleminin ivme, hız ve yer değiştirme değerlerini merkezi sonlu farklar yöntemini uygulatarak yaklaşık olarak çözer. Herhangi bir  $t$  anında, (31) eşitliği izleyen şekilde ifade edilebilir.

$$[K] \{q\} + [D] \{\dot{q}\} + [M] \{\ddot{q}\} = \{F\} \quad (32)$$

Herhangi bir  $t$  anı için probleme ait ivme ve hız değerlerinin merkezi farklar cinsinden yaklaşık değeri izleyen şekilde gösterilmiştir.

$${}^t\{\ddot{q}\} = \frac{1}{\Delta t^2} ({}^{t-\Delta t}\{q\} - 2 {}^t\{q\} + {}^{t+\Delta t}\{q\}) \quad (33)$$

$${}^t\{\dot{q}\} = \frac{1}{2\Delta t} (-{}^{t-\Delta t}\{q\} + {}^{t+\Delta t}\{q\}) \quad (34)$$

Burada  ${}^t\{q\}$ ,  ${}^{t-\Delta t}\{q\}$  ve  ${}^{t+\Delta t}\{q\}$  sırasıyla  $t$ ,  $t - \Delta t$  ve  $t + \Delta t$  anları için yer değiştirme vektörünü,  ${}^t\{q\}$  ile  ${}^t\{\dot{q}\}$  ise sırasıyla  $t$  anı için hız ve ivme vektörlerini göstermektedir. (33) ve (34) eşitliklerinde verilen  $t$  anındaki ivme ve hız değerleri (32) eşitliğindeki hareket denklemindeki yerlerine yazılırsa, hareket denklemi yer değiştirme cinsinden izleyen şekilde elde edilir.

$$[M] \frac{({}^{t+\Delta t}\{q\} - 2 {}^t\{q\} + {}^{t-\Delta t}\{q\})}{\Delta t^2} + [C] \frac{({}^{t+\Delta t}\{q\} - {}^{t-\Delta t}\{q\})}{2\Delta t} + [K] {}^t\{q\} = {}^t\{F\} \quad (35)$$

(35) denklemin çözümünde bilinmeyen değer olan  ${}^{t+\Delta t}\{q\}$  elde edilip, bir sonraki zaman aralığı için kullanılacak başlangıç değeri olarak işleme devam edilir. (35) denkleminin başlangıç  $t=0$  çözümünde özel olarak  ${}^{t-\Delta t}\{q\}$  yani  ${}^{-\Delta t}\{q\}$  değerini bulmak için özel bir başlangıç işlemi gereklidir. Bunun için,  $t=0$  anında probleme ait yer değiştirme  ${}^0\{q\}$  ve hız değeri  ${}^0\{\dot{q}\}$  bilindiğinde, (32) denkleminde  ${}^0\{\ddot{q}\}$  değeri hesaplanır. Elde edilen  ${}^0\{q\}$ ,  ${}^0\{\dot{q}\}$  ve  ${}^0\{\ddot{q}\}$  değerleri, (33) ile (34) eşitliklerine yerlerine yazılırsa,  ${}^{-\Delta t}\{q\}$  izleyen ifadede elde edilir.

$${}^{-\Delta t}\{q\} = \frac{\Delta t^2}{2} {}^0\{\ddot{q}\} - \Delta t {}^0\{\dot{q}\} + {}^0\{q\} \quad (36)$$

Sönümsüz zorlanmış titreşim probleminin merkezi farklar yöntemi ile çözümünde, yukarıdaki işlemlerde sönüm matrisi sıfır alınarak işlemler yapılır. Merkezi farklar yönteminde elde edilecek sonuçların gerçekçi ve anlamlı olabilmesi için işlemlerde seçilecek zaman aralığının aşağıda belirtilen değerden küçük olması gereklidir.

$$\Delta t \leq \frac{T_{min}}{\pi} \quad (37)$$

Burada  $T_{min}$ , sistemin en küçük periyot değeridir.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

Bu bölümde farklı değerlerdeki çatlak derinliğinin, farklı çatlak konumlarının ve çerçeve boyutlarının sönümsüz ve sönümlü zorlanmış titreşim cevaplarına olan etkileri sunulmuştur. Daha önce de şekil 1'de gösterildiği gibi, çatlağın çerçevenin her bir elemanında ayrı ayrı bulunması durumuna göre etkileri incelenmiştir. Sayısal çalışmalarda çerçevenin malzeme parametreleri;  $E=210$  GPa,  $\mu=0.3$ ,  $\rho=7800$  kg/m<sup>3</sup> alınmıştır. Çerçevenin geometrik özelliklerinin belirlenmesinde, çerçeve yüksekliği belirli durumlara göre  $H=3$  ve  $6$  m ve seçilmiş olup çerçeve açıklığı ise farklı durumlara göre  $L=3$  ve  $6$



m seçilmiştir. Kolon kesit boyutları,  $b=12$  cm,  $h=12$  cm ve kiriş kesit boyutları  $b=8$  cm,  $h=8$  cm olarak alınmıştır. Özel olarak sönümsüz zorlanmış titreşim cevaplarının elde edilmesinde, formülasyonlardaki viskoz sönüm katsayısı  $\eta=0$  alınarak sonuçlara ulaşılmıştır. Elde edilen sonlu elemanlar formülasyonlarının çözümü, MATLAB programında kodları yazılıp sayısal sonuçlar ve grafikler elde edilmiştir. Her bir kiriş ve kolon elemanları 10 sonlu elemana bölünerek, çatlak sonlu elemanı ile birlikte sayısal işlemler gerçekleştirilmiştir. Sayısal çalışmalarda, çatlak konumunu belirlemek amacıyla,  $L_{cr}$  çatlak konum oranı ifadesi kullanılmıştır. Bu ifade çatlak referans konumundan uzaklığının bulunduğu elemana bölümüne denir. Örneğin,  $L_{cr1}$  1. Kolondaki çatlak sol ankastre mesnetten uzaklığının 1. kolon yüksekliğine bölümüne denir. Benzer şekilde  $L_{cr2}$  ve  $L_{cr3}$  sırasıyla kiriş ve 2. Kolon elemanlardaki çatlak konum oranlarıdır.

Çalışmada elde edilen formülasyonlar ve Matlab programında yazılan kodların doğruluğunu test etmek amacıyla birkaç kıyaslama çalışması yapılmıştır. Bu amaçla, Ibrahim vd. [15] tarafından yapılmış olan tek açıklıklı çatlaklı bir çerçevenin serbest titreşim analizi çalışmasından elde edilen özel sonuçlar, bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ile çizelge 1'de karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma çalışmasında, Ibrahim ve diğ. [15] tarafından kullanılan malzeme ve geometrik parametreler;  $a_r=0.5$ ,  $E=200$  GPa,  $\rho=7900$  kg/m<sup>3</sup>,  $b=20$  mm,  $h=5$  mm,  $L=100$  mm ve  $H=200$  mm'dir. Çizelge 1'de görüldüğü üzere, Ibrahim vd. [15] sunulan frekans değerleri ile bu çalışmada elde edilen sonuçların yakın olduğu görülmüştür.

**Çizelge 1.** Karşılaştırma çalışması (Comparison study)

	Frekanslar (Hz)	
	Ibrahim vd. [15]	Sunulan
Çatlaksız	117.2300	117.2582
$L_{cr}=0$	112.3300	110.8418
$L_{cr}=1$	115.3000	114.4427

Probleme ait zorlanmış titreşim çözümünde, zorlayıcı kuvvet sol kolon-kiriş birleşim bölgesine şekil 1'de gösterildiği gibi yatay bir şekilde etkilmiştir. Zorlayıcı kuvveti  $P(t)=P_0\cos(\Omega t)$  şeklindedir. Burada  $P_0$  zorlayıcı kuvvetin genliği (N),  $\Omega$  zorlayıcı kuvvetin frekansdır (rad/s). Problemin çözümünde  $P_0=10$  kN,  $\Omega=1$  rad/sn alınmıştır. Zorlanmış titreşim problemlerinde, zorlayıcı kuvvetin uygulandığı noktanın yatay yer değiştirmeleri (U), sönümsüz ve sönümlü durumlara göre hesaplanmış ve grafikleri elde edilmiştir.

Şekil 5-6 da kolon elemanında tek çatlak için, şekil 7-8 de kiriş elemanında tek çatlak için, şekil 9-11 de her iki kolon elemanında birer çatlak için, şekil 12-14 de her üç elemanda birer çatlak için, farklı geometrik değerler, farklı çatlak konum oranları ( $L_{cr}$ ) ve çatlak derinlik oranlarına ( $a_r$ ) bağlı olarak zamana bağlı, sol kolon-kiriş birleşim noktasının yatay yer değiştirmeleri sönümlü ve sönümsüz durumlar için elde edilmiş ve sunulmuştur.

Sönümün dikkate alınarak elde edilen sonuçlarda, viskoz sönüm katsayısı  $\eta=0.002$  alınmıştır.

Zorlanmış titreşim grafiklerinden görüldüğü üzere, çatlak konumun ankastre mesnette olması durumunda, çerçevenin daha fazla yer değiştirdiğinin görüldüğü ve çatlak yapıya olan etkisinin daha fazla arttığı görülmüştür. Çerçeve taşıyıcı sistemin en çok zorlandığı yer olan ankastre mesnet bölgesi olduğundan ve en büyük gerilmelerin bu bölgelerde meydana geldiğinden dolayı çatlak en çok etkisi bu bölgelerde bulunması durumunda ortaya çıkmaktadır. Çatlak konumunun ankastre mesnetten üst kısımlara doğru gidildikçe, zorlanmış titreşim yer değiştirmelerinin önemli bir oranda azaldığı ve çatlak kiriş elemanında olması durumunda yer değiştirmelerin diğer çatlak konumlarına göre çok küçük olduğu görülmüştür.

Bu grafiklerde, sönümlü ile sönümsüz durumlar arasındaki farkın oldukça büyük olduğu görülmektedir. Sönümün dikkate alınmadığı durumdaki çatlak etkisinin oluşturduğu dinamik cevaplar, sönümlü durumdaki sonucu oluşan dinamik cevaplardan oldukça farklı olduğu görülmektedir. Sönüm etkisindeki çerçeve yapıda ortaya çıkan yer değiştirmelerin sönümsüz duruma göre azaldığı belirlenmiştir. Çerçeve yüksekliğinin artmasıyla yükün sönümlenmesinin tam olarak gerçekleşmediği görülmüştür. Bunun nedeni olarak, yüksekliğin artması ile birlikte çerçevenin esnekliğinin arttığı ve doğal olarak titreşimi daha uzun sürede sönümlemeye yapacağıdır. Kiriş uzunluğunun artmasıyla yer değiştirme az miktarda artmaktadır. Kiriş elemanında uzunluğun artmasıyla birlikte yükün sönümlenmesi gerçekleşmektedir. Ayrıca kiriş elemanının ortasında çatlak olması durumu yer değiştirmeye herhangi bir değişiklik getirmemiştir.

Farklı çatlak derinlik oranları arasındaki farklar, çatlak konumlarına göre gözle görülür bir şekilde değişmektedir. Özellikle çatlak ankastre mesnette olması durumunda, çatlak derinlik oranları arasındaki farklar çok belirgin olmaktadır. Hâlbuki çatlakların kiriş elemanında olması durumunda bu farklar çok küçüktür.

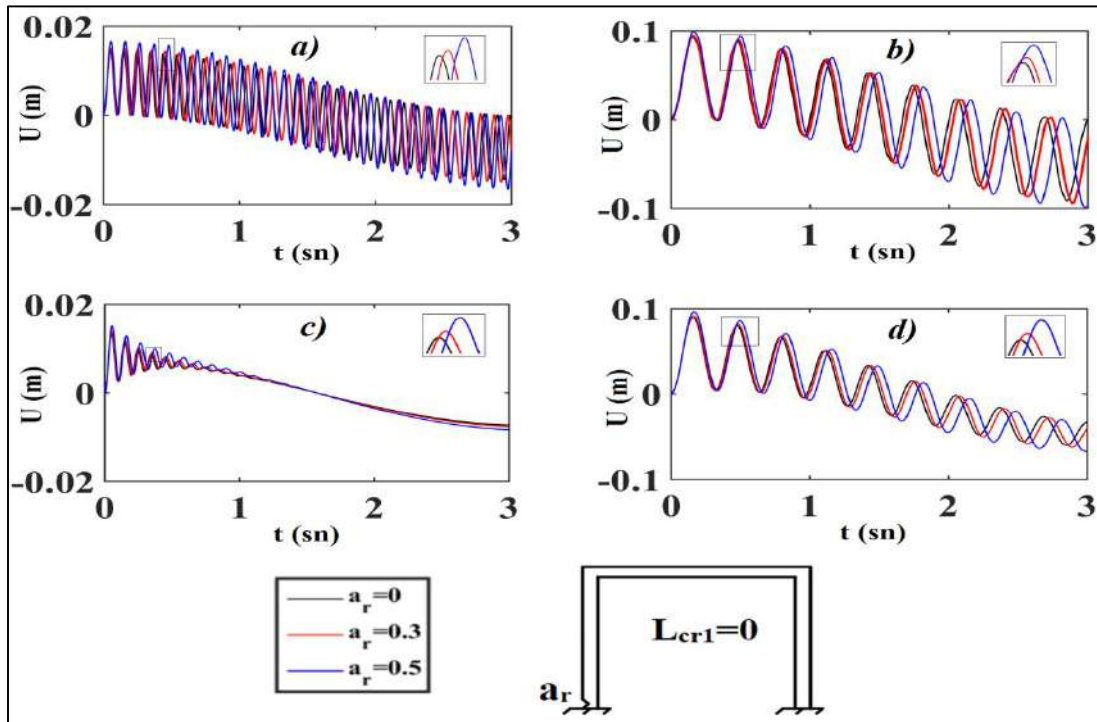
Zorlanmış titreşim sonuçlarında elde edilen bir başka bulgu ise, kolon yüksekliğinin artması ile yer değiştirmelerin oldukça arttığı ve çatlak derinlik oranının ( $a_r$ ) çatlak davranışına olan etkisidir. Çerçeve yüksekliği arttığında oluşan çatlakların etkisinin azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni olarak, yüksekliğin artması ile birlikte yapının narinliğinin artması ve beraberinde yapının şekil değiştirme kapasitesinin atması ile birlikte çatlak etkisinin göreceli olarak azaldığıdır. Özellikle küçük değerlerdeki kolon yüksekliğinde, çatlak etkisinin daha fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca, çatlak sayısı arttıkça ortaya çıkan yer değiştirmelerin doğal olarak arttığı gözlenmiştir.

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

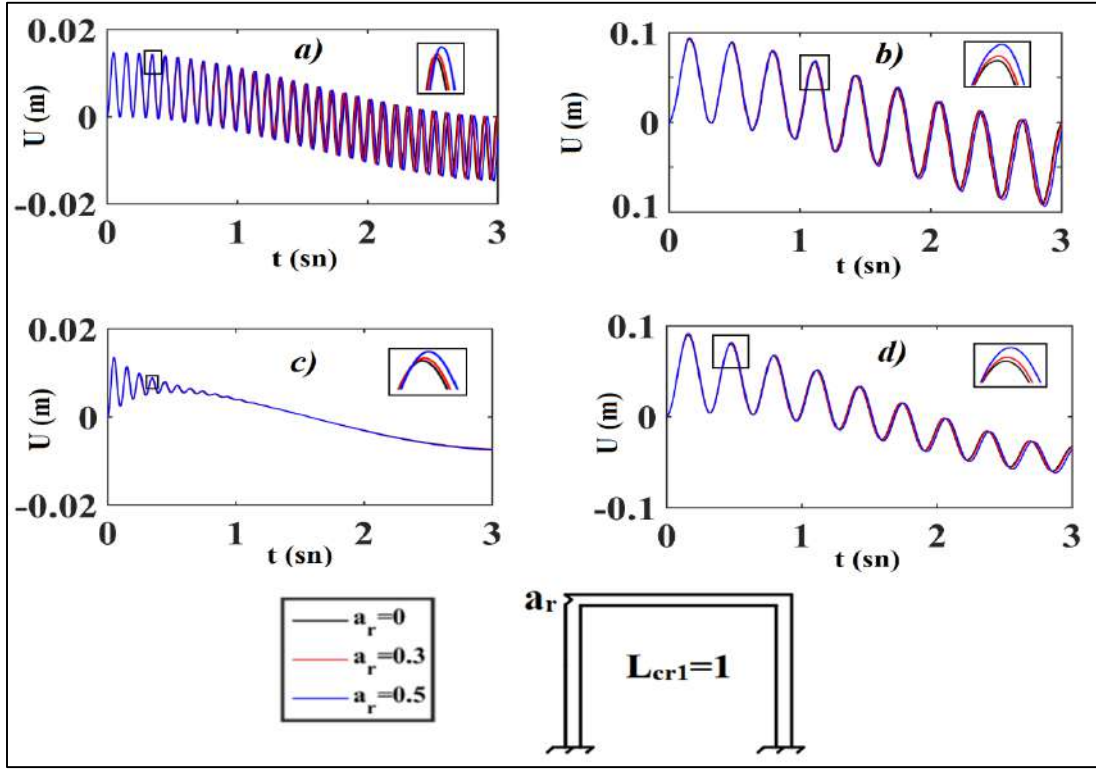
Çalışmada çatlaklı, tek açıklıklı bir çerçevenin dinamik cevapları incelenmiştir. Dinamik cevapların incelenmesinde, sönümsüz ve sönümlü zorlanmış titreşim sonuçları çatlak derinlikleri, çatlak konumları ve çerçeve geometrisine bağlı olarak elde edilmiş ve yorumlanmıştır. Çatlaklı çerçevenin dinamik incelenmesinde, Euler-Bernoulli çubuk teorisi kullanılıp, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Çatlak etkisinden dolayı ortaya çıkan yerel esneklik, çatlak kesiti veya bölgesinde, kütleli ve boyutsuz bir çubuk sonlu eleman ile modellenmiştir. Çatlaktan dolayı ortaya çıkan yerel esneklik Mod1 ile Mod2 kırılma modları kullanılmış ve elde edilen gerilme yığılma faktörü ve şekil değiştirme enerjisi salıverinin oranlarına bağlı olarak elde edilmiştir. Çatlak sonlu eleman modeli, sistem sonlu elemanlar modeline eklenmesi ile birlikte birleştirilmiş sonlu elemanlar formülasyonları elde edilmiş ve Matlab programında algoritma ve kodları yazılarak sayısal sonuçlar ile grafikler elde edilmiştir. Zorlanmış titreşim çözümlerinde ise zaman tanım aralığında doğrudan integrasyon yöntemlerinden biri olan merkezi farklar yöntemi kullanılmıştır. Sayısal sonuçlarda, farklı değerlerdeki çatlak derinliğinin, farklı çatlak konumunun ve farklı değerlerdeki çerçeve yapının geometrik boyutlarına bağlı olarak dinamik cevaplar elde edilmiş ve yorumlanmıştır.

Sayısal sonuçlar ve şekillerden elde edilen verilerden şu sonuçlara varılmıştır;

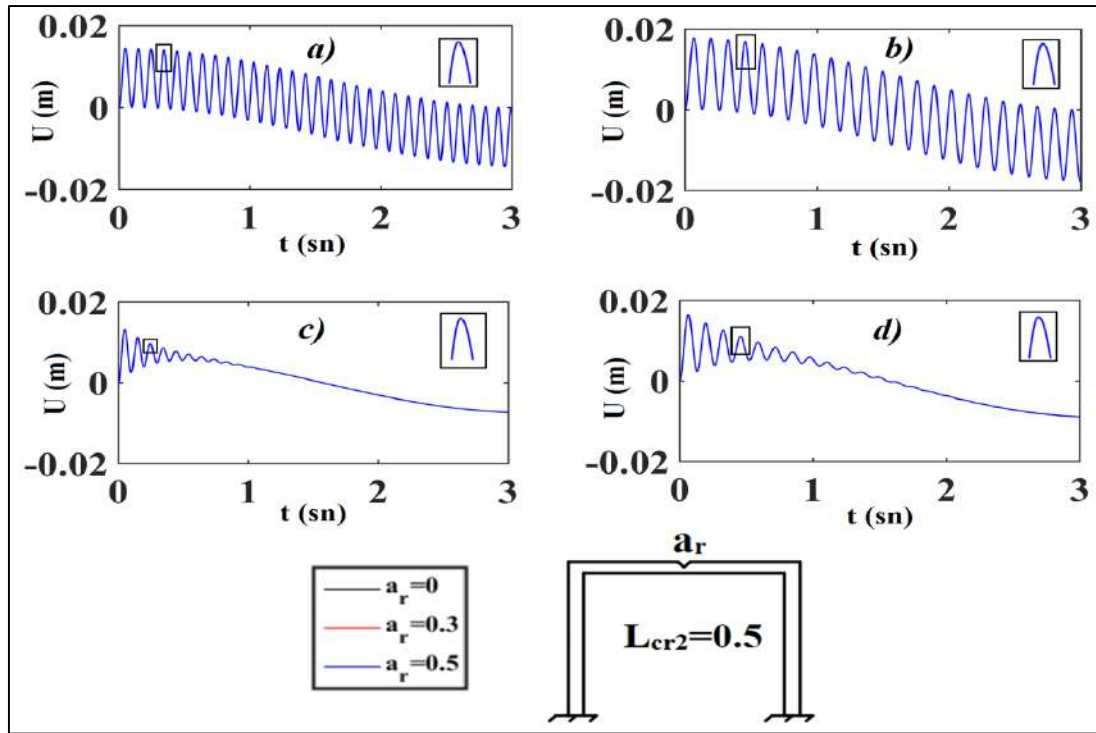
- Çatlak konumunun ankastre mesnetten üst kısımlara doğru gidildikçe, dinamik sonuçların önemli bir oranda azaldığı görülmüştür.
- Çatlağın kolonlarda bulunması, kirişlerden bulunmasından daha fazla çerçeve yapıya etkidiği görülmüştür.
- Farklı çatlak derinlik oranları arasındaki farklar, çatlak konumlarına ve yapı boyutlarına bağlı olarak göre gözle görülür bir şekilde değişmektedir.
- Kolon yüksekliğinin artmasıyla çatlağın titreşime olan etkisinin daha az olduğu görülmektedir.
- Sönümün dikkate alınmadığı durumdaki çatlak etkisinin oluşturduğu dinamik cevaplar, sönümlü durumdaki sonucu oluşturan dinamik cevaplardan oldukça farklı olduğu görülmektedir.
- Çatlak sayısının artması, yapının frekanslarına azaltıcı ve dinamik yerdeğiştirmelere artırıcı etkisi olduğu görülmüştür.
- Çatlak konumunun ve yapı boyutlarının, kırılma davranışa çok önemli bir etkisinin olduğu görülmüştür.



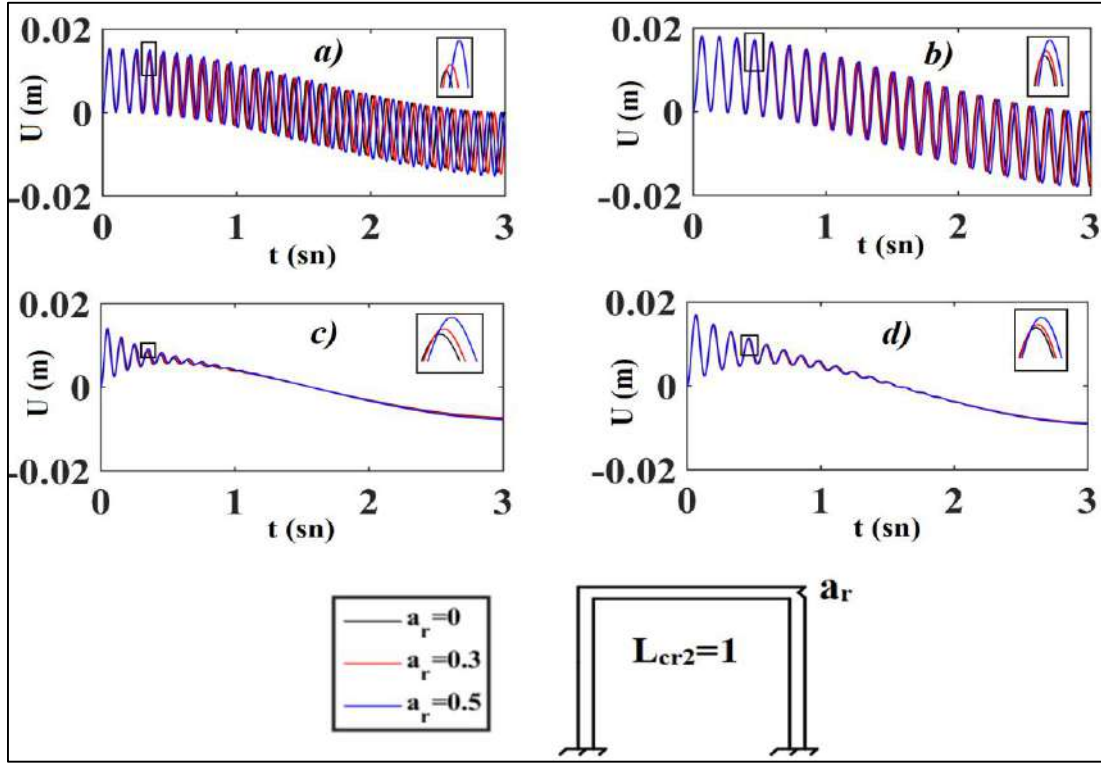
**Şekil 5.**  $L_{cr1}=0$  çatlak konumu için zamana bağlı yer değiştirmeler a) Sönümsüz durum ve  $H=3$  m, b) Sönümsüz durum ve  $H=6$  m, c) Sönümlü durum ve  $H=3$  m, d) Sönümlü durum ve  $H=6$  m (Time responses on the displacements for crack location  $L_{cr1}=0$  a) undamped and  $H=3$  m, b) undamped and  $H=6$  m, c) damped and  $H=3$  m, d) damped and  $H=6$  m)



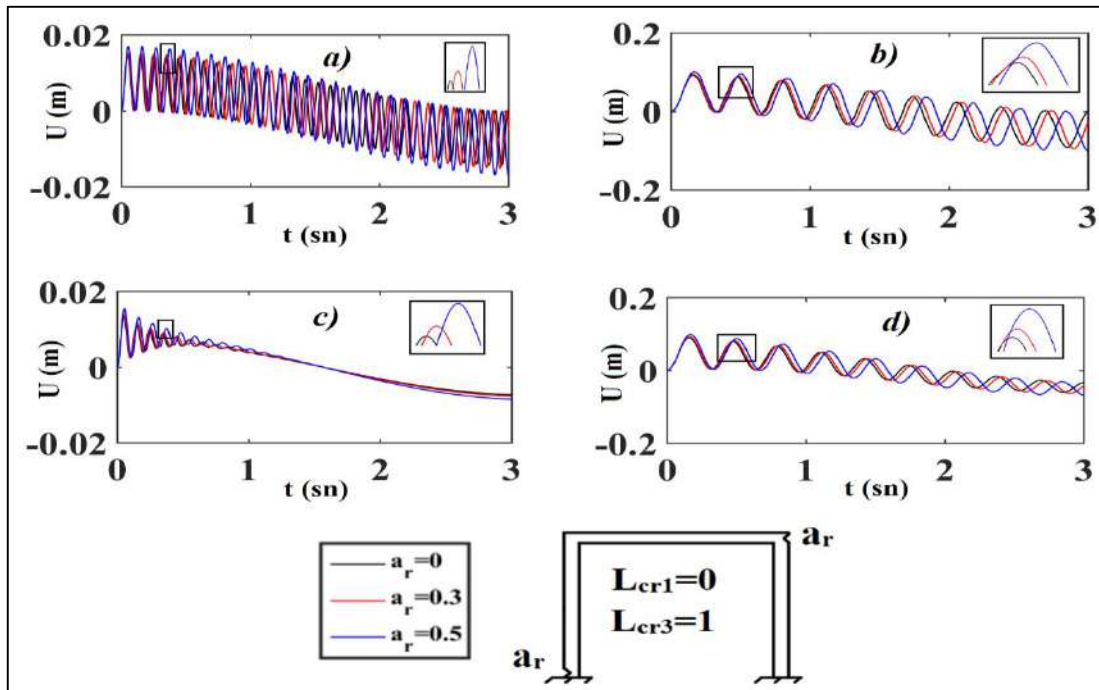
Şekil 6.  $L_{cr1}=1$  çatlak konumu için zamana bağlı yer değiştirmeler a) Sönümsüz durum ve  $H=3$  m, b) Sönümsüz durum ve  $H=6$  m, c) Sönümlü durum ve  $H=3$  m, d) Sönümlü durum ve  $H=6$  m (Time responses on the displacements for crack location  $L_{cr1}=1$  a) undamped and  $H=3$  m, b) undamped and  $H=6$  m, c) damped and  $H=3$  m, d) damped and  $H=6$  m)



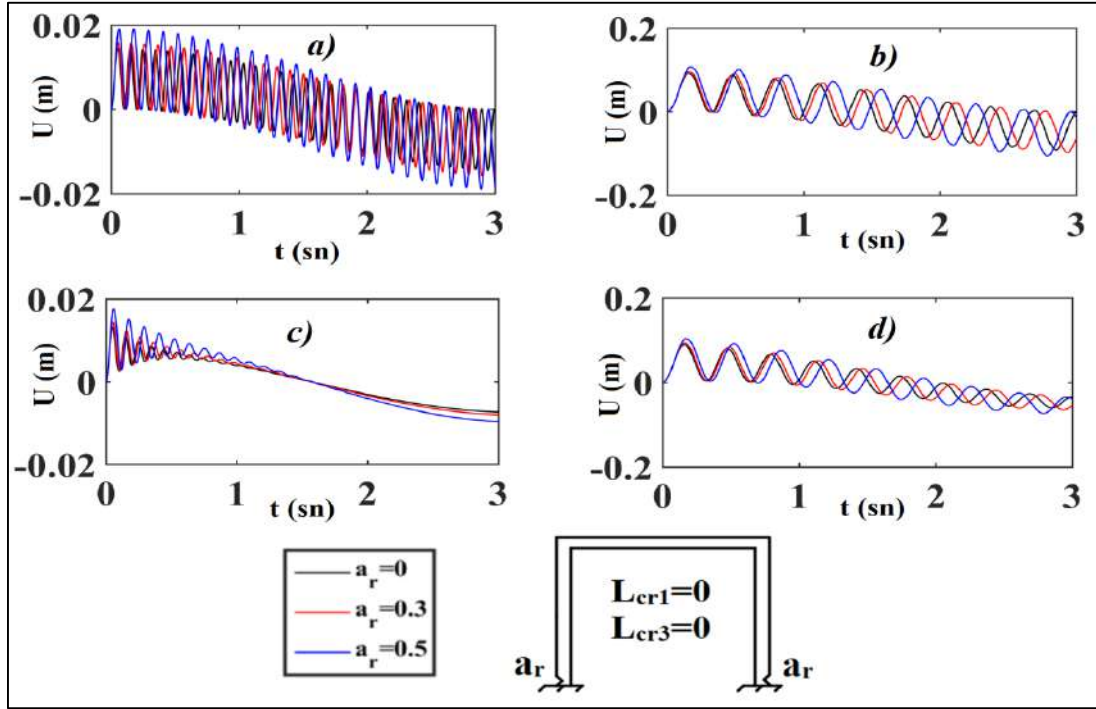
Şekil 7.  $L_{cr2}=0.5$  çatlak konumu için zamana bağlı yer değiştirmeler a) Sönümsüz durum ve  $L=3$  m, b) Sönümsüz durum ve  $L=6$  m, c) Sönümlü durum ve  $L=3$  m, d) Sönümlü durum ve  $L=6$  m (Time responses on the displacements for crack location  $L_{cr2}=0.5$  a) undamped and  $L=3$  m, b) undamped and  $L=6$  m, c) damped and  $L=3$  m, d) damped and  $L=6$  m)



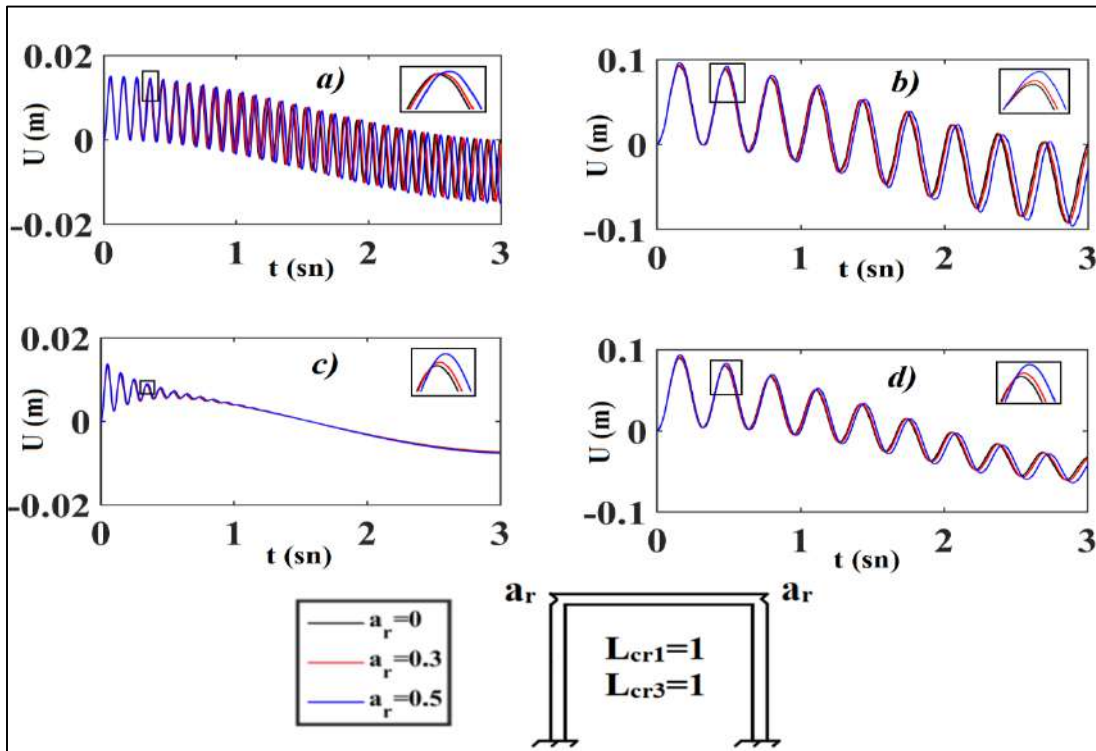
**Şekil 8.**  $L_{cr2}=1$  çatlak konumları için zamana bağlı yer değiştirmeler **a)** Sönümsüz durum ve  $L=3$  m, **b)** Sönümsüz durum ve  $L=6$  m, **c)** Sönümlü durum ve  $L=3$  m, **d)** Sönümlü durum ve  $L=6$  m (Time responses on the displacements for crack location  $L_{cr2}=1$  **a)** undamped and  $L=3$  m, **b)** undamped and  $L=6$  m, **c)** damped and  $L=3$  m, **d)** damped and  $L=6$  m)



**Şekil 9.**  $L_{cr1}=0$  ve  $L_{cr3}=1$  çatlak konumları için zamana bağlı yer değiştirmeler **a)** Sönümsüz durum ve  $H=3$  m, **b)** Sönümsüz durum ve  $H=6$  m, **c)** Sönümlü durum ve  $H=3$  m, **d)** Sönümlü durum ve  $H=6$  m (Time responses on the displacements for crack location  $L_{cr1}=0$  and  $L_{cr3}=1$  **a)** undamped and  $H=3$  m, **b)** undamped and  $H=6$  m, **c)** damped and  $H=3$  m, **d)** damped and  $H=6$  m)

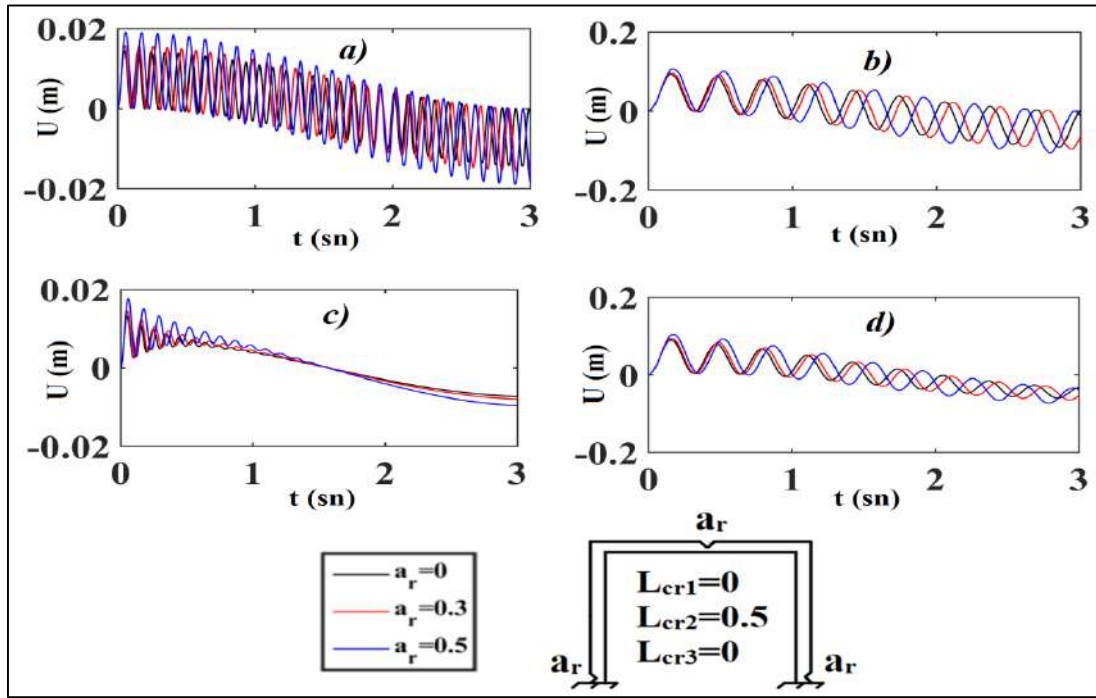


Şekil 10.  $L_{cr1}=0$  ve  $L_{cr3}=0$  çatlak konumları için zamana bağlı yer değiştirmeler a) Sönümsüz durum ve  $H=3$  m, b) Sönümsüz durum ve  $H=6$  m, c) Sönümlü durum ve  $H=3$  m, d) Sönümlü durum ve  $H=6$  m (Time responses on the displacements for crack location  $L_{cr1}=0$  and  $L_{cr3}=0$  a) undamped and  $H=3$  m, b) undamped and  $H=6$  m, c) damped and  $H=3$  m, d) damped and  $H=6$  m)

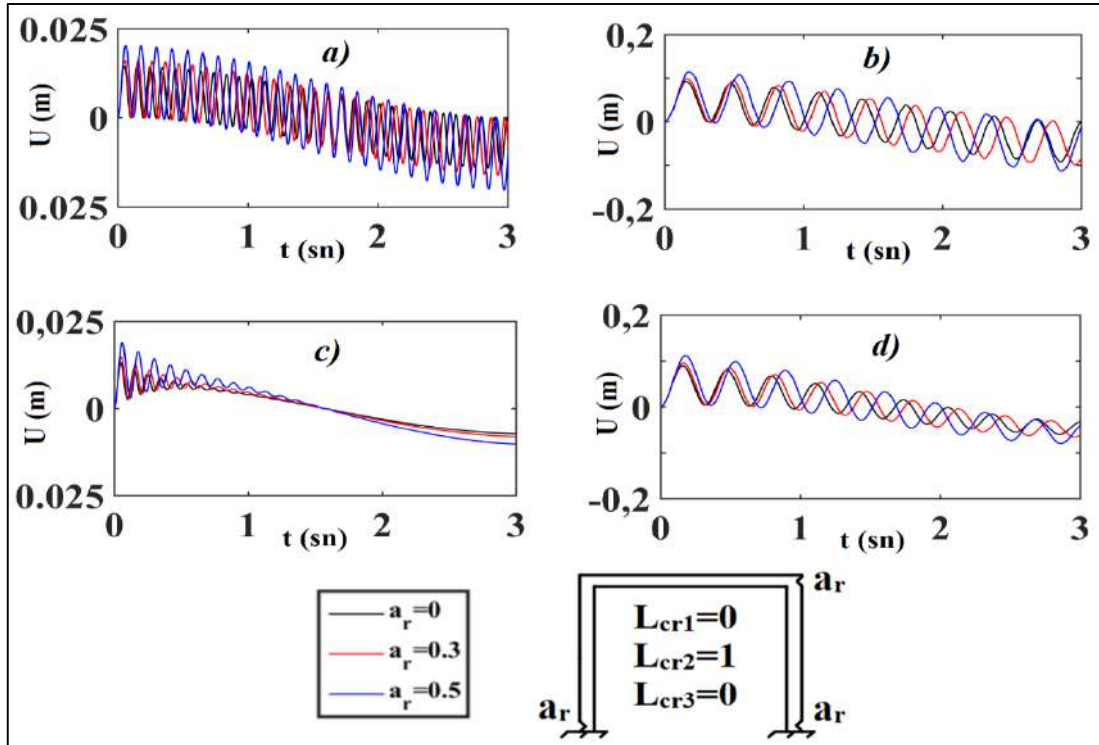


Şekil 11.  $L_{cr1}=1$  ve  $L_{cr3}=1$  çatlak konumları için zamana bağlı yer değiştirmeler a) Sönümsüz durum ve  $H=3$  m, b) Sönümsüz durum ve  $H=6$  m, c) Sönümlü durum ve  $H=3$  m, d) Sönümlü durum ve  $H=6$  m (Time responses on the displacements for crack location  $L_{cr1}=1$  and  $L_{cr3}=1$  a) undamped and  $H=3$  m, b) undamped and  $H=6$  m, c) damped and  $H=3$  m, d) damped and  $H=6$  m)



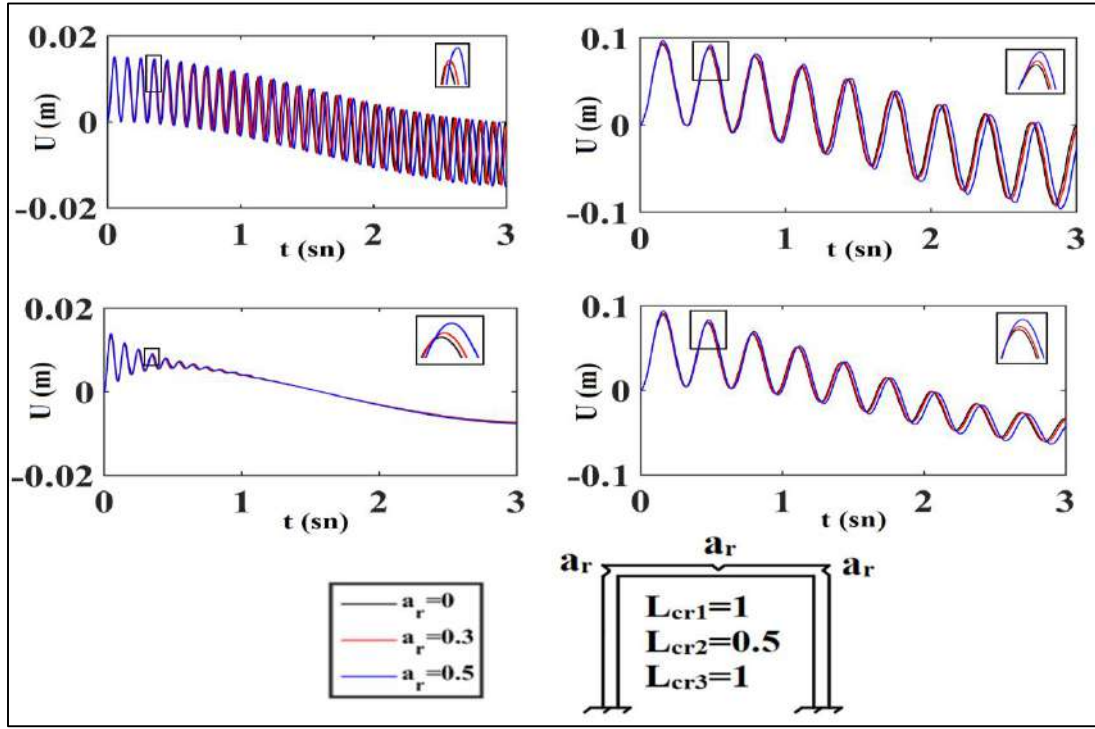


**Şekil 12.**  $L_{cr1}=0$ ,  $L_{cr2}=0.5$  ve  $L_{cr3}=0$  çatlak konumları için zamana bağlı yer değiştirmeler **a)** Sönümsüz durum ve  $H=3$  m, **b)** Sönümsüz durum ve  $H=6$  m, **c)** Sönümlü durum ve  $H=3$  m, **d)** Sönümlü durum ve  $H=6$  m (Time responses on the displacements for crack location  $L_{cr1}=0$ ,  $L_{cr2}=0.5$  and  $L_{cr3}=0$  **a)** undamped and  $H=3$  m, **b)** undamped and  $H=6$  m, **c)** damped and  $H=3$  m, **b)** damped and  $H=6$  m)



**Şekil 13.**  $L_{cr1}=0$ ,  $L_{cr2}=1$  ve  $L_{cr3}=0$  çatlak konumları için zamana bağlı yer değiştirmeler **a)** Sönümsüz durum ve  $H=3$  m, **b)** Sönümsüz durum ve  $H=6$  m, **c)** Sönümlü durum ve  $H=3$  m, **d)** Sönümlü durum ve  $H=6$  m (Time responses on the displacements for crack location  $L_{cr1}=0$ ,  $L_{cr2}=1$  and  $L_{cr3}=0$  **a)** undamped and  $H=3$  m, **b)** undamped and  $H=6$  m, **c)** damped and  $H=3$  m, **b)** damped and  $H=6$  m)





**Şekil 14.**  $L_{cr1}=1$ ,  $L_{cr2}=0.5$  ve  $L_{cr3}=1$  çatlak konumları için zamana bağlı yer değiştirmeler **a)** Sönümsüz durum ve  $H=3$  m, **b)** Sönümsüz durum ve  $H=6$  m, **c)** Sönümlü durum ve  $H=3$  m, **d)** Sönümlü durum ve  $H=6$  m (Time responses on the displacements for crack location  $L_{cr1}=1$ ,  $L_{cr2}=0.5$  and  $L_{cr3}=1$  **a)** undamped and  $H=3$  m, **b)** undamped and  $H=6$  m, **c)** damped and  $H=3$  m, **b)** damped and  $H=6$  m

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma “Çatlak İçeren Çerçeve Yapıların Dinamik Davranışlarının İncelenmesi” başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiş ve Bursa Teknik Üniversitesi BAP Koordinatörlüğüne desteklenmiştir. Proje Numarası: 172L06.

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Tharp T.M., "A Finite Element for Edge-Cracked Beam Columns", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 24: 1941-1950, (1987).
- [2] Ostachowicz W.M. and Krawczuk M., "Vibration Analysis of a Cracked Beam", *Computers & Structures*, 36: 245-250, (1990).
- [3] Shen M. H. and Pierre C., "Free Vibrations of Beams with a Single-Edge Crack", *Journal of Sound and Vibration*, 170: 237-259, (1994).
- [4] Nikolakopoulos P.G., Katsareas D.E. and Papadopoulos C.A., "Crack Identification in Frame Structures", *Computers & structures*, 64: 389-406, (1997).
- [5] Krawczuk M., Ostachowicz W. and Zak A., "Dynamics of Cracked Composite Material Structures", *Computational Mechanics*, 20: 79-83, (1997).
- [6] Yokoyama T. and Chen M. C., "Vibration Analysis of Edge-Cracked Beams Using a Line-Spring Model", *Engineering Fracture Mechanics*, 59: 403-409, (1998).
- [7] Saavedra P.N. and Cuitino L.A., "Crack Detection and Vibration Behavior of Cracked Beams", *Computers & Structures*, 79:1451-1459, (2001).
- [8] Kuntiyawichai K. and Burdekin F.M., "Engineering Assessment of Cracked Structures Subjected to Dynamic Loads Using Fracture Mechanics Assessment", *Engineering Fracture Mechanics*, 70:1991-2014, (2003).
- [9] Zheng D.Y. and Kessissoglou N. J., "Free Vibration Analysis of a Cracked Beam by Finite Element Method", *Journal of Sound and vibration*, 273:457-475, (2004).
- [10] Gürel M.A. and Kısa M., "Buckling of Slender Prismatic Columns with a Single Edge Crack Under Concentric Vertical Loads", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 29:185- 193, (2005).
- [11] Gürel M. A., "Buckling of Slender Prismatic Circular Columns Weakened by Multiple Edge Cracks", *Acta Mechanica*, 188:1-19, (2007).
- [12] Caddemi S. and Caliò I., "Exact Solution of the Multi-Cracked Euler- Bernoulli Column", *International Journal of Solids and Structures*,45:1332-1351, (2008).
- [13] Caddemi S., Caliò I. and Cannizzaro F., "The Influence of Multiple Cracks on Tensile and Compressive Buckling of Shear Deformable Beams", *International Journal of Solids and Structures*, 50:3166-3183, (2013).

- [14] Challamel N. and Xiang Y., "On the Influence of the Unilateral Damage Behaviour in the Stability of Cracked Beam/Columns", *Engineering Fracture Mechanics*, 77:1467-1478, (2010).
- [15] İbrahim A.M., Öztürk H. And Sabuncu M., "Vibration Analysis of Cracked Frame Structures", *Structural Engineering and Mechanics*, 45: 33-52, (2013).
- [16] Chatterjee A., "Nonlinear Dynamics and Damage Assessment of a Cantilever Beam with Breathing Edge Crack", *Journal of Vibration and Acoustics*, 133: 051004, (2011).
- [17] Akbaş Ş.D., "Free Vibration Characteristics of Edge Cracked Functionally Graded Beams by Using Finite Element Method", *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 4: 4590-4597, (2013).
- [18] Labib A., Kennedy D. and Featherston C., "Free Vibration Analysis of Beams and Frames with Multiple Cracks for Damage Detection", *Journal of Sound and Vibration*, 333: 4991-5003, (2014).
- [19] Akbaş Ş.D., "Wave Propagation Analysis of Edge Cracked Circular Beams under Impact Force", *Plos One*, 9: 1-8, (2014).
- [20] Akbaş Ş.D., "Wave Propagation in Edge Cracked Functionally Graded Beams Under Impact Force", *Journal of Vibration and Control*, 22: 2443-2457, (2014).
- [21] Öztürk H., Yashar A. and Sabuncu M., "Dynamic Stability of Cracked Multi-Bay Frame Structures", *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 23:715-726, (2016).
- [22] Tan G., Liu Z., Shan J. and Wu C., "Direct and Inverse Problems on Free Vibration Analysis of Cracked Non-Uniform Beams Carrying Spring-Mass Systems by Finite Element Method", *Journal of Vibroengineering*, 14:7-12, (2017).
- [23] Akbaş Ş.D., "Free vibration of edge cracked functionally graded microscale beams based on the modified couple stress theory ", *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 17: 1750033, (2017).
- [24] Akbaş Ş.D., "Forced vibration analysis of cracked nanobeams", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40: 392, (2018).
- [25] Akbaş Ş.D., "Forced vibration analysis of cracked functionally graded microbeams", *Advances in Nano Research*, 6: 39-55, (2018).
- [26] Akbaş Ş.D., "Axially Forced Vibration Analysis of Cracked a Nanorod", *Advances in Nano Research*, 50: 63-68, (2019).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



## Ecotoxicity study of iron oxide nanoparticles on *Chlorella* sp. and *Daphnia magna*

### *Chlorella* sp. ve *Daphnia magna* üzerinde demir oksit nanopartiküllerinin ekotoksisite çalışması

Yazar(lar) (Author(s)): Burcu ERTİT TAŞTAN<sup>1</sup>, İlknur KARS DURUKAN<sup>2</sup>, Mehmet ATEŞ<sup>3</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-4644-8305

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0001-5697-0530

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0002-2764-6579

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Ertit Taştan B., Kars Durukan İ. ve Ateş M., “Ecotoxicity study of iron oxide nanoparticles on *Chlorella* sp. and *Daphnia magna*”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1073-1079, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.581107

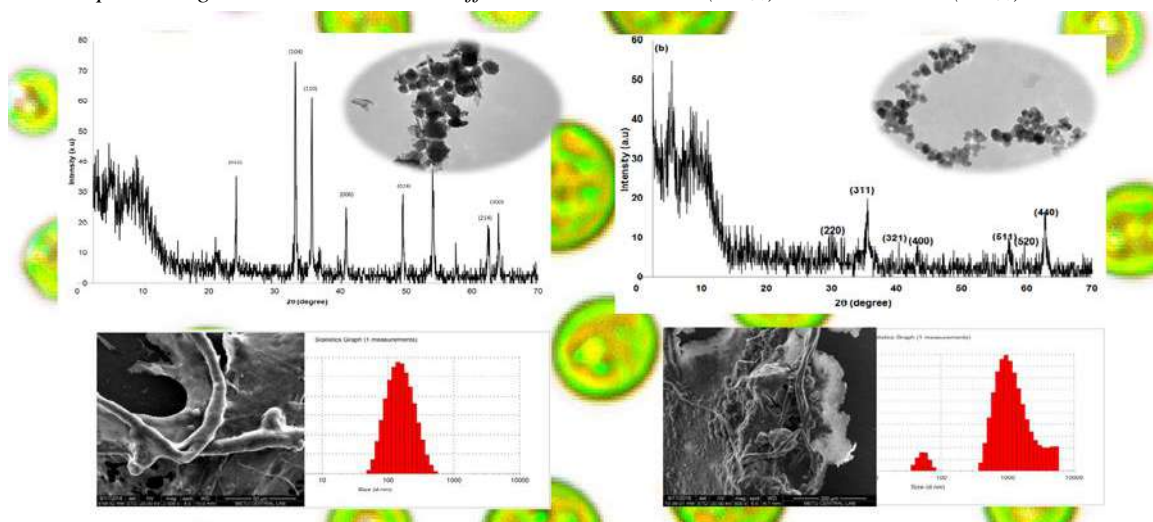
# Ecotoxicity Study of Iron Oxide Nanoparticles on *Chlorella* sp. and *Daphnia magna*

## Highlights

- ❖ Acute toxicity of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles on two aquatic species were tested.
- ❖ The EC<sub>50</sub> concentration was 500 mg/L for  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> treated *Daphnia magna*
- ❖ The LD<sub>50</sub> concentration was 1000 mg/L for  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> treated *Daphnia magna*
- ❖ Increasing NPs concentrations caused to decrease of *Chlorella* sp. growth
- ❖ Increasing NPs concentrations did not show completely toxic effect of *Chlorella* sp.

## Graphical Abstract

The study investigated the impacts of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs on behavioral change and ecotoxicity of *Chlorella* sp. and *Daphnia magna* and determined the effective concentration (EC<sub>50</sub>) and lethal dose (LD<sub>50</sub>) values.



## Aim

The aim of the current study was to investigate the effects of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs on aquatic organisms; *Chlorella* sp. and *D. magna*.

## Design & Methodology

$\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs were analyzed by XRD, TEM, DLTS and Zeta potential

## Originality

The effects of particle size and solubility were comparatively examined on the toxicity of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs to *Chlorella* sp. and *D. magna*. in aquaculture.

## Findings

Increasing  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs concentrations caused to decrease of microalgal growth but did not show completely toxic effect. The EC<sub>50</sub> concentration value was 500 mg/L and LD<sub>50</sub> concentration value was 1000 mg/L for  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> treated daphnids in 72 h, respectively.

## Conclusion

The paper demonstrates the significant evidence in understanding acute toxicity of iron oxide nanoparticles for environmental protection as part of risk assessment strategies.

## Declaration of Ethical Standards

The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Chlorella Sp. ve Daphnia Magna Üzerinde Demir Oksit Nanopartiküllerinin Ekotoksosite Çalışması

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Burcu ERTİT TAŞTAN<sup>1</sup>, İlknur KARS DURUKAN<sup>2\*</sup>, Mehmet ATEŞ<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksek Okulu, Dişçilik Hizmetleri Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

<sup>3</sup>Mühendislik Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, Munzur Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 21.06.2019 ; Kabul/Accepted : 16.10.2019)

## ÖZ

Nanopartiküller, bir çok endüstriyel alanda kullanımları nedeniyle büyük öneme sahiptirler. Ancak, büyük çapta kullanımları neticesinde sucul ortamlar üzerinde toksisiteye neden olmaktadır ve bu etkileri detaylı analizlerle henüz açıkça anlayamamaktadır. Demir oksit nanoparçacıkları ( $Fe_2O_3$  NP'ler) birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır ve sularda yaşayan türler için oldukça toksik olarak kabul edilmektedirler. Bu makale iki sucul tür üzerindeki  $\alpha$ - $Fe_2O_3$  ve  $\gamma$ - $Fe_2O_3$  NP'lerinin akut toksisitesini göstermektedir.  $\alpha$ - $Fe_2O_3$  ve  $\gamma$ - $Fe_2O_3$  'ün çeşitli konsantrasyonlarının (0, 50, 100, 250, 500 ve 1000 mg / L) *Chlorella* sp. ve *D. magna* üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada mikroalgal gelişimin,  $\alpha$ - $Fe_2O_3$  ve  $\gamma$ - $Fe_2O_3$  NP konsantrasyonlarının artmasıyla azaldığı, ancak önemli bir toksik etki göstermediği belirlenmiştir. Ayrıca 72 saat  $\alpha$ - $Fe_2O_3$  ile muamele edilmiş daphidler için EC50 değeri 500 mg / L ve LD<sub>50</sub> değeri 1000 mg /L olarak tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda,  $Fe_2O_3$  NP'lerin akut toksisitesinin risk değerlendirmesi çevre korumaya yönelik olarak tüm detaylarıyla belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:**  $\alpha$ - $Fe_2O_3$ ,  $\gamma$ - $Fe_2O_3$ , nanoparçacıklar, nanotoksosite, *Chlorella* sp., *Daphnia magna*.

## Ecotoxicity Study of Iron Oxide Nanoparticles on *Chlorella* Sp. and *Daphnia Magna*

### ABSTRACT

Nanoparticles have great impact due to their tremendous industrial applications. However, their applications have produced toxicity effects on the aquatic environments and their detailed analyses are not clearly understood. Iron oxide nanoparticles ( $Fe_2O_3$  NPs) are being used extensively in many industries but are considered highly toxic to aquatic species residing in surface waters. This paper demonstrates the acute toxicity of  $\alpha$ - $Fe_2O_3$  and  $\gamma$ - $Fe_2O_3$  NPs in two aquatic species. The effects of various concentration (0, 50, 100, 250, 500 and 1000 mg/L) of  $\alpha$ - $Fe_2O_3$  and  $\gamma$ - $Fe_2O_3$  on the sensitivity response of the *Chlorella* sp. and *D. magna* were investigated. The growth of microalgal decreased with increased concentration of the  $\alpha$ - $Fe_2O_3$  and  $\gamma$ - $Fe_2O_3$  NPs concentrations but did not show a significant toxic effect. The EC<sub>50</sub> concentration value was 500 mg/L and LD<sub>50</sub> concentration value was 1000 mg/L for  $\alpha$ - $Fe_2O_3$  treated daphnids in 72 h, respectively. The findings demonstrate the significant evidence in understanding acute toxicity of  $Fe_2O_3$  NPs for environmental protection as part of risk assessment strategies.

**Keywords:**  $\alpha$ - $Fe_2O_3$ ,  $\gamma$ - $Fe_2O_3$ , nanoparticles, nanotoxicity, *Chlorella* sp., *Daphnia magna*.

### 1. INTRODUCTION

Metal oxide nanoparticles are attracting great interest due to their tremendous applications in engineering, water treatment, medicine and cosmetics (1). Among these oxides, iron oxides are very important materials, composed of three different forms: hematite ( $\alpha$ - $Fe_2O_3$ ), maghemite ( $\gamma$ - $Fe_2O_3$ ), and magnetite ( $Fe_3O_4$ ) (2).  $\alpha$ - $Fe_2O_3$  is a thermo dynamically stable structure at ambient conditions. It has more rigid structure than diamond and offers high resistance to corrosion. Additionally, it is low cost (3, 4).  $\gamma$ - $Fe_2O_3$  is magnetic, which has an isometric crystalline structure. At room temperature,  $\gamma$ - $Fe_2O_3$  is ferromagnetic, but if smaller than 10 nm, they are considered as super paramagnetic. At high temperature,

$\gamma$ - $Fe_2O_3$  is unstable and loses its sensitivity over time. Iron oxide nanomaterials are widely used in drug delivery (5), biosensing (6), cell labeling (7), magnetic trapping (8), and magnetic resonance imaging (9), biomolecular-magnetic hyperthermia (10). Iron oxide nanomaterials are generally regarded as non- or low-toxic (11-13). However, recent studies have revealed that iron oxide nanomaterials have potential adverse effects due to their potential escape into the environment (14). Super paramagnetic iron oxide nanoparticles show less cytotoxicity (15-17) also found that ferric oxide nanoparticles have produced potential lung and systemic cumulative toxicity in rats, and intravascular iron oxide nanoparticles that may induce human endothelial inflammation and dysfunction. Moreover, iron oxide nanomaterials could serve as significant carriers of toxic chemicals (18; 19) and increase exposures to adsorbed

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

pollutants. An acute toxicity of citrate coated Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> NP was reported as 57.1 mg/L (48-EC<sub>50</sub>) and 31.7 mg/L (96-EC<sub>50</sub>) for *Daphnia magna* (*D. magna*), which were partially ascribed to dissolved iron ions and their ability to form reactive oxygen species (ROS) (20). The fate, transport and exposure pathways of manufactured Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>NP were also investigated using pumpkin plants (*Cucurbita maxima*) (21). Additionally, a previous study was reported on the effects on the Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(≥10 mg/L) NP on the development of mental toxicity of zebrafish (*Danio rerio*) embryos was studied on mortality, hatchingdelay, and malformation (22). Apart from that, another study was reported the toxic effects of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles (35 nm) on the green alga *Chlorella vulgaris* treated 72 h to a nominal concentration range from 200 to 1600 µg/mL. In a previous paper, the authors showed an induction of oxidative stress and an alteration of photosynthetic activity based on absorbed CO<sub>2</sub> fixation (22). Similarly, the toxicity of super paramagnetic iron oxide nanoparticles was investigated on *Chlorella vulgaris* cells exposed during 72 hours to Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> to a range of concentrations from 12.5 to 400 µg/mL. Under these treatments, toxicity impact was indicated by the deterioration of photochemical activities of photosynthesis, the induction of oxidative stress, and the inhibition of cell division rate.

The aim of the current study was to investigate the effects of α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs on aquatic organisms; *Chlorella sp.* and *D. magna*. These species are chosen since they are widely used as food in aquaculture and they are two of the most frequently used species in aquaculture (23). We investigated the impacts of α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs on behavioral change and ecotoxicity, and determined the effective concentration (EC<sub>50</sub>) and lethal dose (LD<sub>50</sub>) values. The attachment and accumulation of α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs in aquatic organisms were investigated using scanning electron microscopy (SEM). Also the effects of particle size and solubility were comparatively examined on the toxicity of α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs to these commonly used phytoplankton and zooplankton species in aquaculture.

## 2. MATERIAL VE METHOD

### 2.1 Nanoparticle Characterization

The characteristic feature of nanomaterials, such as size, shape, size distribution, surface area, solubility, aggregation, etc. need to be evaluated before assessing toxicity or biocompatibility (24). Morphologies of the α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs were examined using transmission electron microscopy (TEM), Powered X-ray diffraction analysis (XRD) was carried out to characterize the crystal structure of the NPs. Hydrodynamic diameters and zeta potentials of the NPs were measured with a Zetasizer (25, 26).

### 2.2 Microalgae culture conditions

The microalgae *Chlorella sp.* was isolated from the water supply in Sorgun, Yozgat, Turkey (27). The medium BG 11 (28) was used to conduct algal growth inhibition assay

based on the OECD 201 (29). The starting OD value of microalgal cultures in the beginning of the experiments was about 0.2 in 100 mL BG11 media in 250 mL Erlenmayer flasks at 25 ± 2 °C under continuous illumination at 25 µmol/m<sup>2</sup>s (1750 lx) at 100 rpm stirring rate.

*D. magna*, a planktonic crustacean was used as test species (30). The daphnids were maintained at a constant temperature of 20 ± 1 °C at 16:8 h light:dark cycle. The acute immobilization test was based on the OECD 202 (31).

### 2.3 Microalgal Growth Inhibition

Exponentially growing algal cells were propagated in Erlenmayer flasks containing α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at 50, 100, 250, 500 and 1000 mg/L of the BG11 medium separately. In addition, the control medium consisted of flasks without α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> or γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs. All experiments were carried out twice in triplicate.

### 2.4 Acute Immobilization

*D. magna*, a planktonic crustacean was used as test species [30]. The daphnids were maintained at a constant temperature of 20 ± 1 °C at 16:8 h light:dark cycle. The acute immobilization test was based on the OECD 202 (31). Increasing concentrations of α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> or γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs at 0, 50, 100, 250, 500 and 1000 mg/L were prepared in the ISO test medium to determine the sensitivity response of *D. magna*. A total of 5 daphnids were put in 3 replicates for each concentration tested. Following the 24, 48 and 72 h exposures, daphnids were studied for immobilization effects, with simultaneous comparison with controls.

### 2.5 Analytical Methods

Cell growth of *Chlorella sp.* was determined by measuring optic density, dried cell mass and specific growth rate parameters for any set of growth conditions. Optic density was measured at 600 nm with Shimadzu UV 1800 model spectrophotometer. The dried cell mass was calculated by the measurement of pellets, which were dried at 80 °C for overnight (Nüve FN 400 model sterilizator) after centrifugation step (3421x g = 5000 rpm for 10', Hettich Universal 320R model centrifuge). The chlorophyll concentrations were determined according the method developed by (32) at 646.6 nm for chlorophyll *a* and at 663.6 nm chlorophyll *b*. The chlorophyll concentrations were expressed in µg of chlorophyll per milliliter.

Specific growth rate (µ) was calculated according to the equation (1) (33);

$$\mu = (\ln X_2 - \ln X_1) \div (t_2 - t_1) \quad (1)$$

where X<sub>2</sub> and X<sub>1</sub>: dry cell weight concentrations (g/L) at time t<sub>2</sub> and t<sub>1</sub>, respectively. Maximum biomass productivity was calculated according to the equation (2);

$$P_{max} = (X - X_0) \div (t - t_0) \quad (2)$$

where X: final and X<sub>0</sub>: initial biomass concentrations (g/L), t: final and t<sub>0</sub>: initial time of the culture.



Scanning electron microscopy was used to observe the morphology of *Chlorella* sp. as described previously (30).

All of the experiments were performed in triplicate. The standard error of data was calculated according to the equation (3) formulated by (34) where  $\sigma$  represents the square root of the estimated error variance of the quantity.

$$SE = \sqrt{\sigma^2} \quad (3)$$

### 3. RESULTS AND DISCUSSIONS

#### 3.1 Nanoparticle Characterization

Figure 1 A shows the  $2\theta$ -intensity profiles of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs. The data obtained were matched with leptos program, which confirmed the crystalline structure of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. The XRD diffractograms for  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (hematite) NPs showed 8 peaks within 20-80° range with the

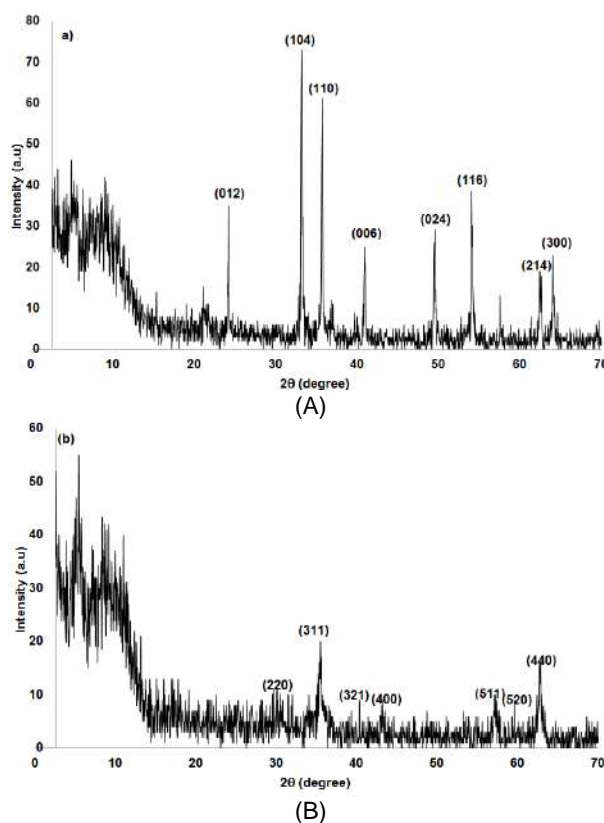
given in JCPDS (24-81) data. This confirms the formation of cubic phase and lattice constant  $a$ : 8.35 Å.

The average length and length distribution of the nanoparticles used in our study was determined by transmission electron microscopy. The results of the evaluation of the photographs were calculated as follows: number average diameter ( $D_p$ , nm equation (4)) and coefficient of variation for length distributions (CV, % equation (5)). Where  $N_i$  determine the number of particles with  $D_i$  diameter and  $SD$  (equation (6)) determines the standard deviation according to the number average diameter value.

$$D_p = \frac{\sum N_i D_i}{\sum N_i} \quad (4)$$

$$CV = \frac{SD}{D_p} * 100 \quad (5)$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum N_i (D_i - D_p)^2}{(N-1)}} \quad (6)$$



**Figure 1.** XRD spectrum of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (A) and  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (B) NPs.

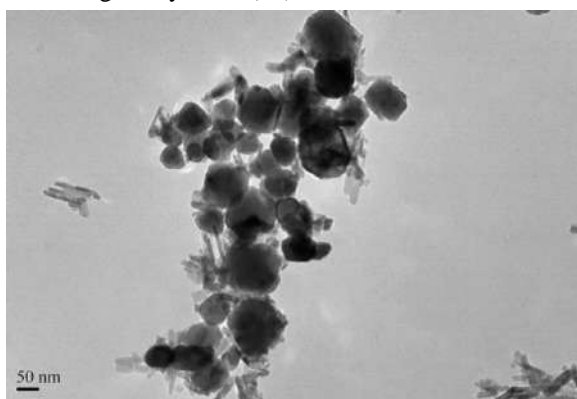
following hkl values: (012), (104), (110), (113), (024), (116), (214) and (300) and with those given in JCPDS (24-72) data. This confirms the formation of rhombohedral phase and lattice constant  $a$ : 5.038 Å and  $c$ :13.772 Å. The existence of sharp peaks confirmed that  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs were highly crystalline and monodisperse (35)

Figure 1 B shows the  $2\theta$ -intensity profiles of  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs. The XRD diffractogram for  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (maghemite) NPs showed 7 sharp peaks at hkl: (220), (311), (321), (400), (511), (520) and (440). That was consistent with previously published values (36) and also with those

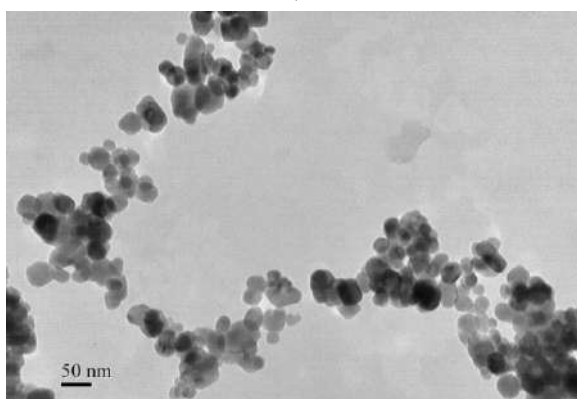
A typical TEM image of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle is given in Figure 2 A. The dispersion of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles have a spherical shape, but also contain structures in the form of nanorods, with a lower concentration. Through the TEM photograph, the average diameter of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles was determined as 57.95 nm, the standard deviation value of length distribution was 23.27 nm, and the coefficient of variation for length distribution was 40 %. However, it should be noted that these values are obtained without taking into account the nanorod form. The  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs TEM image is given in Figure 2 B. As shown in the figure, the average diameter of the  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

nanoparticles was 33.91 nm, the standard deviation value of the length distribution was 8.20 nm, and the coefficient of variation for the length distribution was 24 %. The  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles appear to have spherical morphology, generally spherical morphology, compared to  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles.

The TEM, DSL and Zeta Potential (positive / negative charge) analysis values of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs in the aquatic environment are shown in Table 1. Immediately after ultrasonication the initial sizes of both  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs were found to be 235 nm and 636 nm, respectively. These determined dimensional differences are consistent with zeta potential measurements. In the aquatic environment, an increase in size over time was observed for both NPs. As shown in Table 1,  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs have negatively charged surfaces. Surface loads of suspensions of NPs play an important role in particle stability versus agglomeration in a solvent and in determining interaction with biological systems (37).



a)



b)

**Figure 2.** TEM images of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (a) and  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (b) NPs.

The Zeta potential value is also used not only as a positive (+) or negative (-) load change on the surface, but also as an indicator of attractive and repulsive forces on the surface. In a recently published study, it is shown that the surface charge of particles in agglutination in water is not sufficient to prevent aggregation of NPs in water even without counter ions, but aggregates were found to be

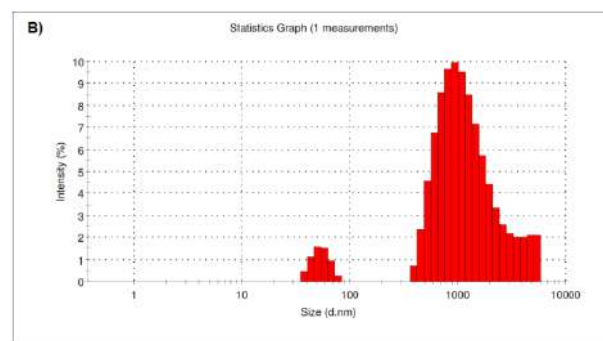
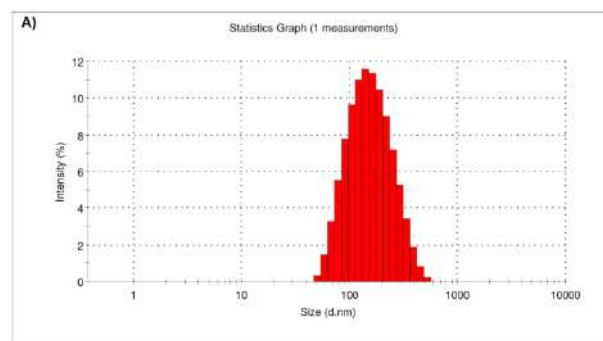
smaller than other NP studies that were compatible with measured surface loads (38).

**Table 1.** Size distribution and surface load of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs in aqueous media

NPs	TEM* (nm)	DLS* (nm)	Zeta*Potential (mV)	Appearance (Color)
$\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	57.95	235	-2.15	Blurred-yellow
$\gamma$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33.91	636	-3.78	Orange

\*: Experimental values measured in this study from 10  $\mu$ g mL<sup>-1</sup> suspensions

The statistical distribution of DLS values in the aquatic environment of NPs is given in Figure 3 A and B. When these graphs are examined, it is seen that  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs exhibit fairly steady and stable distribution and  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs exhibit more unstable distribution. All of the metal-based NPs are very unstable in the aquatic environment except for the general situation for NPs, the effects of water on physical and chemical properties in the aquatic environment and tend to aggregate together for various reasons. As a direct consequence of this, they lose their nano properties. Although the size of the aggregate particles is only several times larger than the original particle, the properties exhibited by the material differ. Metal or metal oxide NPs exhibited a similar pattern in our previous studies by our research group (38). In this study, it is seen that  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs in aggregate form more aggregates than  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs in freshwater environment.

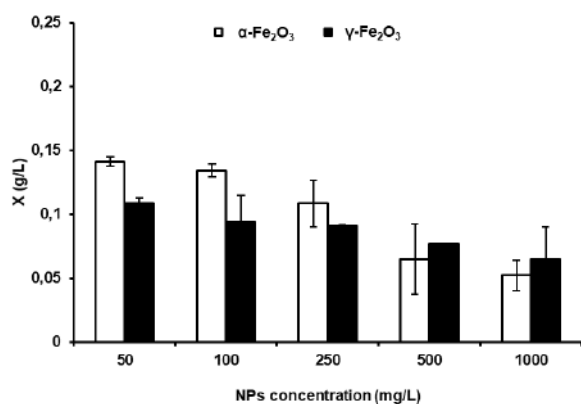


**Figure 3.** Statistical distribution of DLS values of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (A) and  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (B) NPs.

### 3.2 Toxicity Assessment

#### 3.2.1 Microalgal Growth Inhibition

It was found that the growth inhibition of *Chlorella* sp. is concentration dependent following 72 h of exposure to  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Initially, during the 72 h observation, it was found that microalgal growth decreased with increasing NPs concentrations (Figure 4). The highest growth was obtained at 50 mg/L  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NP concentration as 0.141 g/L. Dry weight of *Chlorella* sp. decreased from 0.094 g/L to 0.065 g/L when  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NP concentration increased from 100 mg/L to 1000 mg/L. The  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> concentration at 1000 mg/L showed highly toxic effect on *Chlorella* sp. Thus, it was apparent that increasing  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs concentrations caused to decrease of microalgal growth but did not show completely toxic effect (Table 2).



**Figure 4.** The effect on dry weight (X) of *Chlorella* sp. with  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs during the incubation period.

Chlorophyll (a+b) concentrations of *Chlorella* sp. were also evaluated (Table 2). Following the 72 h exposure, chlorophyll (a+b) concentrations decreased with increasing  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs concentrations.

Calculated P<sub>max</sub> values are presented in Table 2. As anticipated, 48 h values of productivity at the highest  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs concentrations were lower than the lowest concentrations.

**Table 2.**  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NP effect on *Chlorella* sp. Growth parameters during 48 h and 72 h exposures

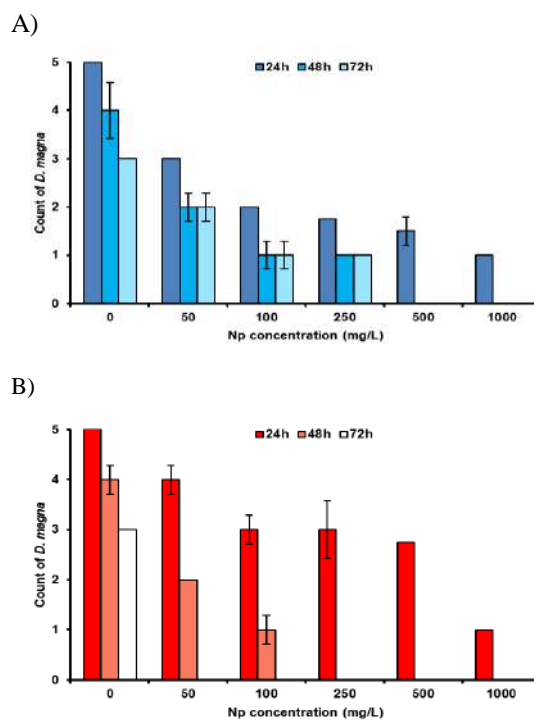
	50 mg/L	100 mg/L	250 mg/L	500 mg/L	1000 mg/L
<b><math>\alpha</math>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>					
X (g/L)	0.141±0.004	0.134±0.005	0.108±0.018	0.065±0.028	0.052±0.012
P <sub>max</sub> <sup>48h</sup>	0.0022±0.0001	0.0020±0.0001	0.0018±0.0001	0.0007±0.0001	0.0004±0.0001
$\mu$ <sub>max</sub> <sup>48h</sup>	0.028±0.0006	0.027±0.0021	0.030±0.0015	0.0151±0.0008	0.010±0.0002
Chl (a+b)	0.076±0.002	0.072±0.002	0.058±0.0001	0.035±0.0031	0.028±0.006
<b><math>\gamma</math>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>					
X (g/L)	0.109±0.004	0.094±0.021	0.091±0.001	0.077±0.001	0.065±0.025
P <sub>max</sub> <sup>48h</sup>	0.0014±0.0001	0.0009±0.0001	0.0008±0.0001	0.0008±0.0001	0.0002±0.0001
$\mu$ <sub>max</sub> <sup>48h</sup>	0.020±0.0032	0.014±0.005	0.011±0.0017	0.010±0.007	0.003±0.001
Chl (a+b)	0.059±0.007	0.050±0.002	0.049±0.0003	0.041±0.0003	0.035±0.003

In a previous paper, results showed the toxicities of 4 zero-valent iron NPs with different sizes to a green alga *Chlorella pyrenoidosa*. The effects of particle size of iron NPs showed that the algal growth inhibition of increased significantly with decreasing particle size (39). These results are similar in ours with the effect of higher toxicity of smaller particle sizes. In our results the size distribution of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs was detected as 57.95 nm in TEM and size distribution of  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs was detected as 33.91 nm. As shown in Table 2 dry weight, P<sub>max</sub>,  $\mu$ <sub>max</sub> and chlorophyll concentrations were lower in the  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs exposed cultures.

*Chlorella* sp. could be demonstrated as a successful bio indicator in this study and also in many other toxicity studies (39, 40). On the other hand other microalgae species have also been tested in toxicity studies such as *Nannochloropsis* sp. and *Isochrysis* sp. (41).

#### 3.2.2 Acute Immobilization Test

The effects of increasing  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs concentrations on *D. magna* were analyzed during 72 h of exposure. The EC<sub>50</sub> concentration value was 500 mg/L and LD<sub>50</sub> concentration value was 1000 mg/L for  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> treated daphnids in 72 h, respectively (Figure 5 A).



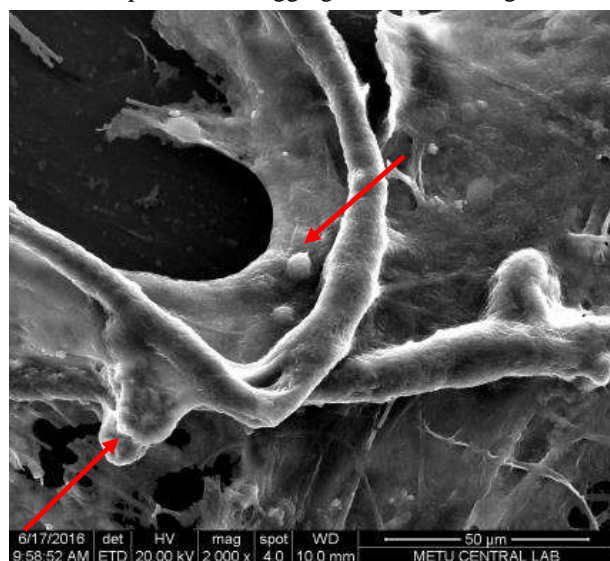
**Figure 5.** The effect of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (A) and  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (B) NP concentrations on *D. magna*.

The no observed effect level (NOEL) and low observed effect level (LOEL) were calculated at 0 mg/L and 50 mg/L for  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at 24 h, respectively. The LD<sub>50</sub> concentration value was 50 mg/L  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NP treated daphnids in 48 h (Figure 5 B).

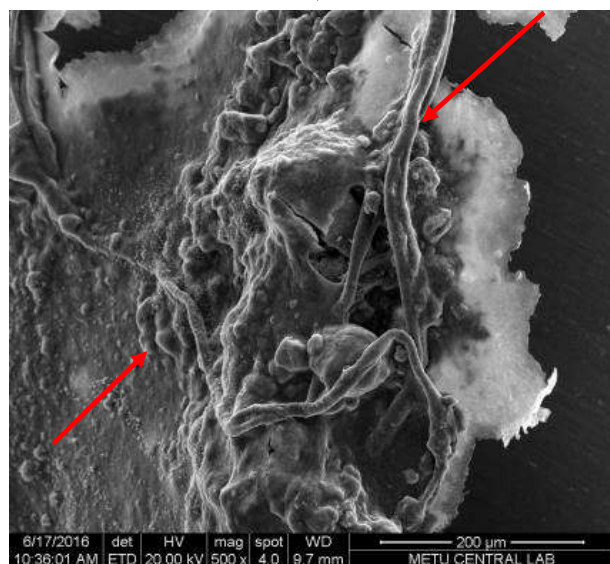
Further, the SEM images also confirmed to change in morphology (Figure 6). Interestingly, the images indicate



the attachment of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs on the *Chlorella* sp. caused to aggregation of microalgal cells.



A)



B)

**Figure 6.** SEM image of *Chlorella* sp. following exposure to  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (A) and  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (B) NPs (72 h).

#### 4. CONCLUSIONS

In this study,  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles were analyzed by XRD, TEM, DLTS and Zeta potential before toxicity study. The formation of the particles and crystal structure were determined by XRD. The shape, size, length distribution and standard deviation values of the particles with TEM were determined. With DLTS and Zeta potential measurements, particle size distribution, solubility, aggregations were determined. The paper highlighted the acute toxicity of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles on *Chlorella* sp. and *Daphnia magna*. Increasing  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs concentrations caused to decrease of microalgal growth but did not show completely toxic effect. The EC<sub>50</sub> concentration value was 500 mg/L and LD<sub>50</sub> concentration value was 1000

mg/L for  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> treated daphnids in 72 h, respectively. The paper demonstrates the significant evidence in understanding acute toxicity of iron oxide nanoparticles for environmental protection as part of risk assessment strategies.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

This research is supported by a grant from The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK, Grant No: 114Y087) through TÜBİTAK Center for Department of Bioengineering at Munzur University.

#### DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS

The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission..

#### REFERENCES

- [1] Sadiq, I.M., Pakrashi, S., Chandrasekaran, N., Mukherjee, A., "Studies on toxicity of aluminum oxide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) nanoparticles to microalgae species: *Scenedesmus* sp. and *Chlorella* sp", *J. Nanopart. Res.*, 13: 3287–3299, (2011).
- [2] Fan, H.M., You, G.J., Li, Y., Zheng, Z. Tan, H.R., Shen, Z.X., Tang, S.H., Feng, Y.P., "Shape-controlled synthesis of single-crystalline Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hollow nanocrystals and their tunable optical properties", *J. Phys. Chem. C*, 113: 9928–9935, (2009).
- [3] Hua, J., Gengsheng, J., "Hydrothermal synthesis and characterization of monodisperse  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles", *Mater. Lett.*, 63: 2725–2727, (2009).
- [4] Hsu, L.C., Li, Y.Y., Hsiao, C.Y., "Synthesis, electrical measurement, and field emission properties of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanowires", *Nanoscale Res. Lett.* 3: 330–337, (2008).
- [5] Seth, A., Lafargue, D., Poirier, C., Péan, J.M., Ménager, C., "Performance of magnetic chitosan–alginate core–shell beads for increasing the bioavailability of a low permeable drug", *Eur. J. Pharm. Biopharm.*, 8: 374–81, (2014).
- [6] Haun, J.B., Yoon, T.J., Lee, H., Weissleder, R., "Magnetic nanoparticle Biosensors", Wiley Interdiscip. Rev. Nanomed. *Nanobiotechnol.* 2: 291–30, (2010).
- [7] Chen, C.L., Zhang, H., Ye, Q., Hsieh, W.Y., Hitchens, T.K., Shen, H.H., Liu, L., Wu, Y.J., Foley, L.M., Wang, S.J., Ho, C., "A new nano-sized ironoxide particle with high sensitivity for cellular magnetic resonance imaging", *Mol. Imaging Biol.*, 13: 825–839, (2011).
- [8] Konry, T., Bale, S., Bhushan, A., Shen, K., Seker, E., Polyak, B., Yarmush, M., "Particles and microfluidics merged: perspectives of highly sensitive diagnostic detection", *Microchim. Acta*, 176: 251–269, (2012).
- [9] Rügenapp, C., Gleich, B., Haase, A., "Magnetic nanoparticles in magnetic resonance imaging and diagnostics", *Pharm. Res.*, 29: 1165–1179, (2012).
- [10] Maier-Hauff, K., Ulrich, F., Nestler, D., Niehoff, H., Wust, P., Thiesen, B., Orawa, H., Budach, V., Jordan, A., "Efficacy and safety of intratumoral thermotherapy using magnetic iron-oxide nanoparticles combined with external beam radiotherapy on patients with recurrent glioblastoma multi for me", *J. Neurooncol.*, 103: 317–324, (2011).

- [11] Soenen, S.J.H., De Cuyper, M., "Assessing iron oxide nanoparticle toxicity in vitro: current status and future prospects", *Nanomedicine*, 5(8): 1261–1275, (2010).
- [12] Karlsson, H.L., Cronholm, P., Gustafsson, J., Moller, L., "Copper oxide nanoparticles are highly toxic: a comparison between metal oxide nanoparticles and carbon nanotubes", *Chem. Res. Toxicol*, 21 (9): 1726–1732, (2008).
- [13] Karlsson, H.L., Gustafsson, J., Cronholm, P., Möller, L., "Size-dependent toxicity of metal oxide particles—a comparison between nano- and micrometer size", *Toxicol. Lett*, 188 (2): 112–118, (2009).
- [14] Pandey, R.K., Prajapati, V.K., "Molecular and immunological toxic effects of nanoparticles", *Int. J. Biol. Macromol. Part A*, 107: 1278-1293, (2018).
- [15] Zhu, M.T., Wang, B., Wang, Y., Yuan, L., Wang, H.J., Wang, M., Ouyang, H., Chai, Z.F., Feng, W.Y., Zhao, Y.L., "Endothelial dysfunction and inflammation induced by iron oxide nanoparticle exposure: risk factors for early atherosclerosis", *Toxicol. Lett*, 203 (2): 162–171, (2011).
- [16] Mahmoudi, M., Simchi, A., Imani, M., Shokrgozar, M.A., Milani, A.S., Häfeli, U.O., Stroeve, P., "A new approach for the in vitro identification of the cytotoxicity of superparamagnetic iron oxide nanoparticles", *Colloids. Surf. B: Biointerfaces*, 75(1): 300–309, (2010).
- [17] Zhu, M.T., Feng, W.Y., Wang, Y., Wang, B., Wang, M., Ouyang, H., Zhao, Y.L., Chai, Z.F., "Particokinetics and extrapulmonary translocation of intratracheally instilled ferric oxide nanoparticles in rats and the potential health risk assessment". *Toxicol. Sci*, 107(2): 342–351, (2009).
- [18] Tang, Y.L., Guan, X.H., Wang, J.M., Gao, N.Y., Mc Phail, M.R., Chusuei, C.C., "Fluoride adsorption onto granular ferric hydroxide: effects of ionic strength, pH, surface loading, and major co-existing anions", *J. Hazard. Mater.* 171(1–3), 774–779. 2009.
- [19] Guan, X.H., Wang, J.M., Chusuei, C.C., "Removal of arsenic from water using granular ferric hydroxide: macroscopic and microscopic studies", *J. Hazard. Mater.* 156(1–3):178–185, (2008).
- [20] Baumann, J., Koser, L., Arndt, D., Filser, J., "The Coating Makes the Difference: Acute Effects of Iron Oxide Nanoparticles on *Daphnia magna*", *Sci. Tot. Environ*, 484: 176. (2014).
- [21] Zhu, H., Han, J., Xiao, J.Q., Jin, Y., "Uptake, translocation, and accumulation of manufactured iron oxide nanoparticles by pumpkin plants", *J. Environ. Monit*, 10: 713-717, (2008).
- [22] Zhu, X., Tian, S., Cai, Z., "Toxicity assessment of iron oxide nanoparticles in Zebrafish (*Danio rerio*) early life stages", *PLoS ONE*, 7(9): 462-486, (2012).
- [23] Hemaiswarya, S., Raja, R., Kumar, R.R., Ganesan, V., Anbazhagan, C., "Microalgae: a sustainable feed source for aquaculture", *World J. Microbiol. Biotechnol*, 27: 1737–1746, (2011).
- [24] Murdock, R.C., Braydich-Stolle, L., Schrand, A.M., Schlager, J.J., Hussain, S.M., "Characterization of nanomaterial dispersion in solution prior to in vitro exposure using dynamic light scattering technique", *Toxicol. Sci*, 101: 239–253, (2008).
- [25] Gurunathan, S., Han, J.W., Kim, E.S., Park, J.H., Kim, J.H., "Reduction of graphene oxide by resveratrol: A novel and simple biological method for the synthesis of an effective anticancer nanotherapeutic molecule", *Int. J. Nanomed*, 10: 2951–2969, (2015).
- [26] Sapsford, K.E., Tyner, K.M., Dair, B.J., Deschamps, J.R., Medintz, I.L., "Analyzing nanomaterial bioconjugates: A review of current and emerging purification and characterization techniques", *Anal. Chem.* 83: 4453–4488, (2011).
- [27] Taştan, B.E., Duygu, E., Donmez, G., "Boron bioremoval by a newly isolated *Chlorella* sp. and its stimulation by growth stimulators", *Water Res*, 46: 167–175, (2012).
- [28] Rippka, R., "Recognition and identification of cyanobacteria", *Methods in Enzymology*, 167: 28–67, (1988).
- [29] OECD, "Freshwater Alga and Cyanobacteria", Growth Inhibition Test. OECD Guideline for the testing of chemicals, Guideline 201, (2011).
- [30] Balusamy, B., Taştan, B.E., Ergen, S.F., Uyar, T., Tekinay, T., "Toxicity of lanthanum oxide (La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) nanoparticles in aquatic environments", *Environ. Sci.: Process. Imp*, 17: 1265-1270, (2015).
- [31] OECD, *Daphnia* sp., "Acute Immobilisation Test". OECD Guideline for the testing of chemicals, Guideline 202, (2004).
- [32] Porra, R.J., Thompson, W.A., Kriedemann, P.E., "Determination of accurate extinction coefficients and simultaneous equations for assaying chlorophylls a and b extracted with four different solvents: verification of the concentration of chlorophyll standards by atomic absorption spectroscopy", *Biochim. Biophys. Acta. (BBA) – Bioenergetics*, 975: 384–394, (1989).
- [33] Ip, P.F. Chen, F., "Production of astaxanthin by the green microalga *Chlorella zofingiensis* in the dark", *Process. Biochem*, 40: 733–738, (2005).
- [34] Kenney, J., Keeping, E. S., "Standard Error of the Mean in N. Princeton and V. Nostrand (eds.)", *Mathematics of Statistics*, 110: 132-133, (1951).
- [35] Jesus, J.R., Lima, J.S., Moura, O., Duque, G.S., Meneses, T. "Anisotropic growth of -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanostructures", *Ceram. Int*, 44, 3585-3589, (2018).
- [36] Parsianpour, E., Gholami, M., Shahbazi, N., Samavat, F., "Influence of thermal annealing on the structural and optical properties of maghemite (γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) nanoparticle thin films", *Surf. Interface Anal*, 47: 612–617, (2015).
- [37] Clogston, J.D., Patri, A.K., "Zeta potential measurement", *Methods Mol Biol*, 697: 63–70, (2011).
- [38] Ates, M., Daniels, J., Arslan, Z., Farah, I.O., "Uptake and toxicity of titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) nanoparticles to brine shrimp (*Artemia salina*)", *Environ. Monit. Assess*, 185: 3339–3348, (2013).
- [39] Cheng, Lei., Luqing, Zhang., Kun, Yanga., Lizhong, Zhu., Daohui, Lin., "Toxicity of iron-based nanoparticles to green algae: Effects of particle size, crystal phase, oxidation state and environmental aging", *Environ. Pollut*, 218: 505-512, (2016).
- [40] Barhoumi, L., Dewez, D., "Toxicity of Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles on Green Alga *Chlorella vulgaris*", *BioMed Res. Int*, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/647974>, (2013).
- [41] Demir, V., Ates, M., Arslan, Z., Camas, M., Celik, F., Bogatu, C., Can, Ş.S., "Influence of Alpha and Gamma-Iron Oxide Nanoparticles on Marine Microalgae Species", *Bull. Environ. Contam. Toxicol*, 95(6):752-757, (2015).

POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Rende ve dilimlenmiş kırmızıturp (*raphanus sativus*) kuruma kinetiğinin belirlenmesi ve enerji analizi

## *Determination of kinetics of drying grated and sliced red radish (*raphanus sativus*) and energy analysis*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Faruk KILIÇ

*ORCID:* 0000-0002-9978-1972

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(To cite to this article):** Kılıç F., “Rende ve dilimlenmiş kırmızıturp (*raphanus sativus*) kuruma kinetiğinin belirlenmesi ve enerji analizi”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1081-1087, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.552289



# Rende ve Dilimlenmiş Kırmızıturp (*Raphanus sativus*) Kuruma Kinetiğinin Belirlenmesi ve Enerji Analizi

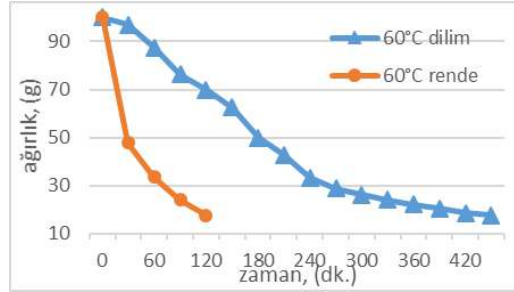
## Determination of Kinetics of Drying Grated and Sliced Red Radish (*Raphanus sativus*) and Energy Analysis

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Enerji analizi / Energy analysis
- ❖ Enerji tüketimi / Energy consumption
- ❖ Gıda kurutma / Food drying
- ❖ Kırmızıturp kurutma / Red radish drying

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Yapılan bu çalışmada kırmızıturp 60 °C'de dilimlenerek ve rendelenerek iki farklı yöntemle kurutulmuştur. Dilimlenerek ve rendelenerek kurutulmuş kırmızıturp'un kurutma süreleri sırası ile 450 dakika ve 120 dakika olarak belirlenmiştir. / In this study, red radish was dried in two different methods by slicing and grating at 60 °C. Drying time of sliced and grated dried red radish was determined as 450 min and 120 min, respectively.



Şekil A. Kırmızıturp ağırlık-zaman grafiği/ Figure A. Red radish weight-time graph)

### Amaç (Aim)

Bu çalışmanın amacı gıda kurutma fırınında kırmızıturp (dilimlenmiş, rende) kurutma sürecinde kurutma işleminin enerji analizlerini yapmak, kurutma süresince tüketilen elektrik enerjisini tespit etmek ve kuruma kinetiğini belirlemektir. / The aim of this study is to make energy analysis of the drying process in the process of drying the red radish (sliced, grater) in the food drying oven, to determine the electrical energy consumed during the drying and to determine the drying kinetics.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Kurutma işlemleri rezistanslı gıda kurutma fırınında gerçekleştirilmiştir. / (These drying processes were carried out in a resistance drying food oven.)

### Özgünlük (Originality)

Gıda kurutma fırını içerisinde kurulan elektronik düzenek sayesinde ölçümlerin tamamı fırın içerisinde gerçekleştirilmiştir. / Thanks to the electronic device installed in the food drying oven, all of the measurements were made in the oven.

### Bulgular (Findings)

60 °C de kurutulan kırmızıturp deneyinde dilimlenmiş kırmızıturp 450 dakika ve yine 60 °C de kurutulan rendelenmiş kırmızıturp deneyi 120 dakika sürmüştür. / (Sliced red radish in the red radish experiment dried at 60 °C took 450 minutes and the grated red radish experiment dried at 60 °C lasted 120 minutes.

### Sonuç (Conclusion)

Rendelenmiş kırmızıturp SEC değeri en fazla 17,7 (kWh/kg su), dilimlenmiş kırmızıturp en fazla 58,2 (kWh/kg su) değerini almıştır. Dilimlenmiş kırmızıturp SMER değeri en fazla 0,16 (kWh/kg su), rendelenmiş kırmızıturp SMER değeri en fazla 0,29 (kg su/kWh) değerini almıştır. / Grated red radish SEC has a maximum value of 17.7 (kWh / kg water) and sliced red radish has a maximum value of 58.2 (kWh / kg water). Sliced red radish SMER value is maximum 0,16 (kWh / kg water) and grated red radish SMER value is maximum 0,29 (kg water / kWh).

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Rende ve Dilimlenmiş Kırmızıturp (*Raphanus sativus*) Kuruma Kinetiğinin Belirlenmesi ve Enerji Analizi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Faruk KILIÇ\***

Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metel Teknolojileri Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye  
(Geliş/Received : 11.04.2019 ; Kabul/Accepted : 14.10.2019)

## ÖZ

Yapılan bu çalışmada kırmızıturp 60 °C de dilimlenerek ve rendelenerek iki farklı yöntemle kurutulmuştur. Dilimlenerek ve rendelenerek kurutulmuş kırmızıturp'un kurutma süreleri sırası ile 450 dakika ve 120 dakika olarak belirlenmiştir. Kurutma boyunca tüketilen elektrik enerjisi ölçülmüştür. Rendelenmiş kırmızıturp dilimlenmiş kırmızıturp'a göre % 53,09 daha az enerji tüketmiştir. Rendelenmiş kırmızıturp SEC değeri en fazla 17,7 (kWh/kgsu), dilimlenmiş kırmızıturp en fazla 58,2 (kWh/kgsu) değerini almıştır. Dilimlenmiş kırmızıturp SMER değeri en fazla 0,16 (kWh/kgsu), rendelenmiş kırmızıturp SMER değeri en fazla 0,29 (kg/kWh) değerini almıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Enerji analizi, enerji tüketimi, gıda kurutma, kırmızıturp kurutma.

# Determination of Kinetics of Drying Grated and Sliced Red Radish (*Raphanus sativus*) and Energy Analysis

## ABSTRACT

In this study, red radish was dried in two different methods by slicing and grating at 60 °C. Drying time of sliced and grated dried red radish was determined as 450 min and 120 min, respectively. The electrical energy consumed during drying was measured. The shredded red radish consumed 53,09 % less energy than the sliced red radish. The shredded red radish SEC had a maximum value of 17,7 (kWh/kgsu) and the sliced red radish had a maximum of 58,2 (kWh/kgsu). The maximum SMER value of sliced red radish was 0,16 (kWh/kgsu) and the maximum SMER value of grated red radish was 0,29 (kg/kWh).

**Keywords:** Energy analysis, energy consumption, food drying, red radish drying.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Turp yenilebilir bir kök sebzedir [1]. Büyüklüğü ve rengi farklı olan birçok turp çeşidi vardır [2]. Olgun bir turp kökünün çapı 1 cm'den 30 cm'ye kadar değişmektedir [3]. Sağlıklı ve taze ürünlere yönelik tüketici talebi, yemeye hazır ve en az işlenmiş sebzelerin tercih edilmesine yol açmıştır [4-6]. Bu tercihlerden en kuvvetli olanlarından biri de kurutmadır.

Kurulmuş uyarlıkların tamamı et, balık, meyve, bitki ve diğer bitkisel gıdaları kurutarak tüketmişlerdir. Kurutma gıda bünyesindeki su oranını %75-95 den %10-20'ye düşürme işlemine denir. Buna ek olarak kurutma boyunca aroma, renk, besin değeri, bozulma ömrü gibi kalite özelliklerini mümkün olduğunca az değişimine sebebiyet verilmelidir [7]. Kurutma, ürünlerin nem içeriğini azaltmakla kalmaz aynı zamanda antioksidan kapasite, aroma, enzimatik aktivite, vb. gibi diğer fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri de değiştirir [8]. Son zamanlarda konserve ya da dondurarak saklamaya göre birincil yöntem olarak kullanılan kurutma gıda teminini kolaylaştırma tekniklerinden biri olarak ön plana çıkmaktadır [9]. Kurutma işlemi; dondurma, mevsim dışı kullanım veya hiç üretimi

yapılmayan ülkelerde tüketim amacıyla da kullanılmaktadır [10].

Türk Standart Enstitüsünün Nisan 2010 tarihli Turp standardı vardır. Fakat turp kurutma standardı ile ilgili yayınlanmış bir standart yoktur. Konu ile ilgili en büyük örgüt olan Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (Food and Agriculture Organization of the United Nations FAO) turp verilerini kayıt altında tutmadığı görülmüştür [11].

Gou R. ve ark. fotoperiyodun (photoperiod) kiraz turp'u kök oluşumuna etkisini araştırmıştır [12]. Adekiya A O, ve ark. Biochar (oksijeniz ve yüksek sıcaklıkta organik maddelerin piroliz ürünüdür [13]) ve kanatlı gübrelerinin toprak özellikleri ve turp verimi üzerine etkileri hakkında çalışma yapmıştır [14].

Bang J ve ark. turp tohumunu kurutma yöntemleri hakkında çalışma yapmıştır [15]. Japon turpu üzerine yapılan çalışma ön işlemin kurutma oranındaki değişiklikleri incelenmiştir [16]. Isıtma dondurma çözünme süreçlerinin turp hücrelerine verdiği zararları araştırılmıştır.

Asya beyaz turp'unu tuzlamanın kurutmaya etkisi üzerine çalışma yapılmıştır. Hava kurutucusu ile dört farklı sıcaklıkta (40 °C, 50 °C, 60 °C ve 70 °C) kurutma yapılmıştır. Hava kurutucusuna ek olarak ısı pompası ile

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

dört farklı sıcaklıkta (35 °C, 40 °C, 45 °C ve 50 °C) ve son olarak da dondurarak kurutma yapılmıştır [17].

Lee J. H. ve Kim H. J. beyaz asya turp'unu vakumla üç farklı sıcaklıkta (40 °C, 50 °C ve 60 °C) kurutmuş ve kuruma kinetiğini elde etmiştir. Asya turp'u iki farklı dilim kalınlığı seçilerek 4mm ve 6mm de çalışılmıştır. Yapılan bu çalışmada 4mm üç farklı sıcaklık için 300-480 dakika, 6 mm'de 450-700 dakika çıkmıştır [18].

Bu çalışmanın amacı gıda kurutma fırınında kırmızıturp (dilimlenmiş, rende) kurutma sürecinde kurutma işleminin enerji analizlerini yapmak, kurutma süresince tüketilen elektrik enerjisini tespit etmek, özgül enerji tüketimi ile özgül nem çekme oranını hesaplamak ve kuruma kinetiğini belirlemektir.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Deneylerde Osmaniye menşeli, ekstra sınıf özelliğine sahip, 3-12 cm çap aralığında, çatlaksız ve sıyrıksız ince ucu çatal yapmamış kırmızı kabuklu içi beyaz renkli yuvarlak şekilli kırmızıturp kullanılmıştır [19].



Şekil 1. Deneylerde kullanılan kırmızıturp (Red radish used in experiments)

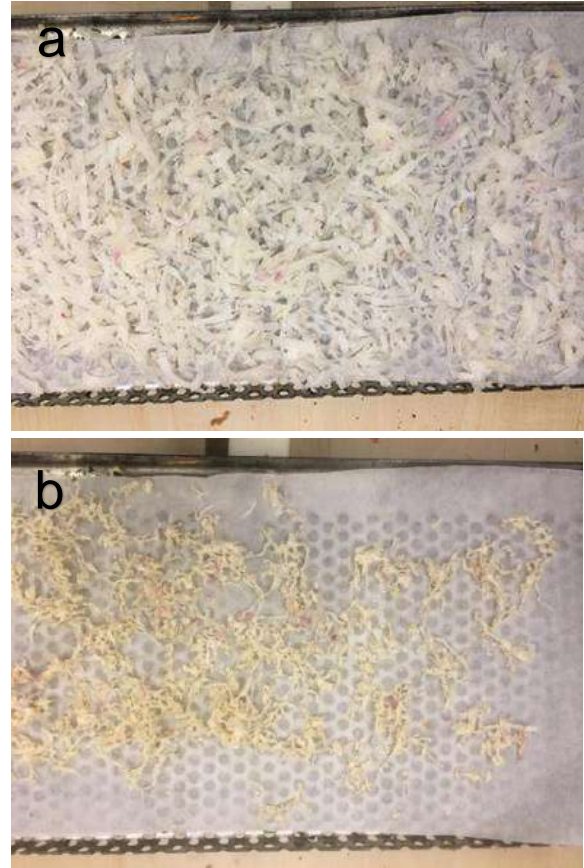
Kırmızıturp 3 mm kalınlıkta dilimleme makinesi ile dilimlenmiş ve mutfak tipi iri rende yüzeyi ile rendelenerek kurutulmuştur. Rende kalınlıkları 3 mm ( $\pm 0,5$  mm) eninde ve 5-8 mm boyunda yapılmıştır.

Deney numunesi için ard arda yapılan iki tartım arasında kütle farkı % 1'den az ise numune tam kuru hale gelmiş olur [20]. Dikmen E. ve arkadaşları "Türk standardı TS 4087'ye göre birbirini izleyen iki tartım arasında kütle farkının, her bir deney için % 1'den az olması halinde tam kuru hale gelmiş olur" kuru hal tanımına uygun çalışmıştır [21].

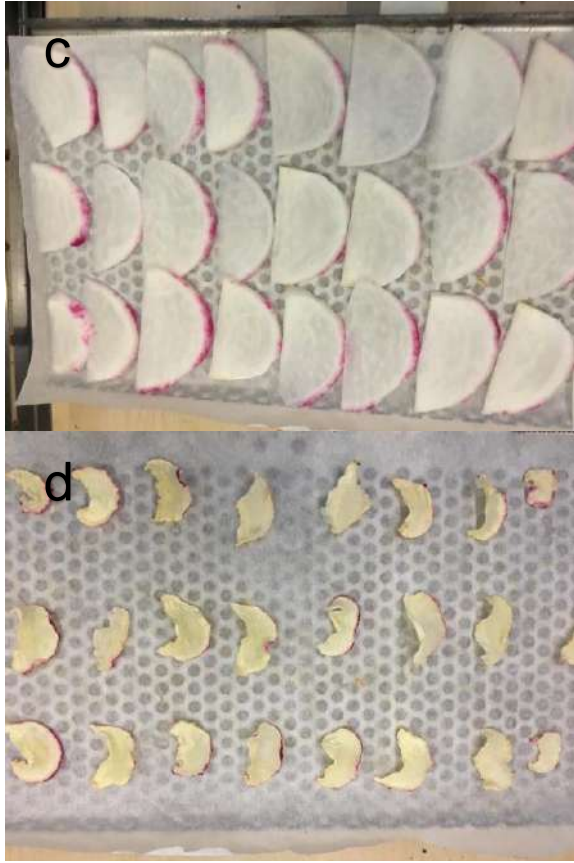
Kırmızıturp deneylerinde deney bulguları dakika başı alınmıştır. Kuru kütle belirlemek için yapılan deney ard arda iki ölçüm arasında ağırlıkça % 1'den daha az fark oluşuncaya kadar devam etmiştir [20]. % 1 den daha az fark oluştuğunda deney sonlandırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda kırmızıturp normalize kuru kütlesi 15,53 g olarak tespit edilmiştir.

Türk Standart Enstitüsü turp başlıklı TS 1815 kodlu standarda sahiptir. Ancak kurutma ile ilgili bir standart olmadığından kırmızıturp hücre yapısının havuç'a yakın olmasından dolayı son üründe % 12 nem içeriği olmasına karar verilmiştir. Kuru kütle 15,53 g olarak tespit edilmiş toplam ağırlık % 12 nem ile birlikte 17,4 g olmuştur. 30 dakika ölçüm aralıkları ile grafiklendirilen kurutma deneyleri 17,4 g değerine geldiğinde kurutma işlemi durdurulmuştur. Gıda kurutma fırınında rendelenmiş ve dilimlenmiş olarak iki farklı durumda fiziksel durum karşılaştırması yapabilmek için her iki deneyde 60 °C de yapılmıştır. Ölçümün güvenilirliği için her sıcaklık için deney üç defa tekrarlanmış toplamda kuru kütle tayini için yapılan deneyle birlikte yedi deney yapılmıştır.

Kırmızıturp rende ve dilimlenmiş halleri ne ek olarak son halleri de Şekil 2 de verilmiştir.

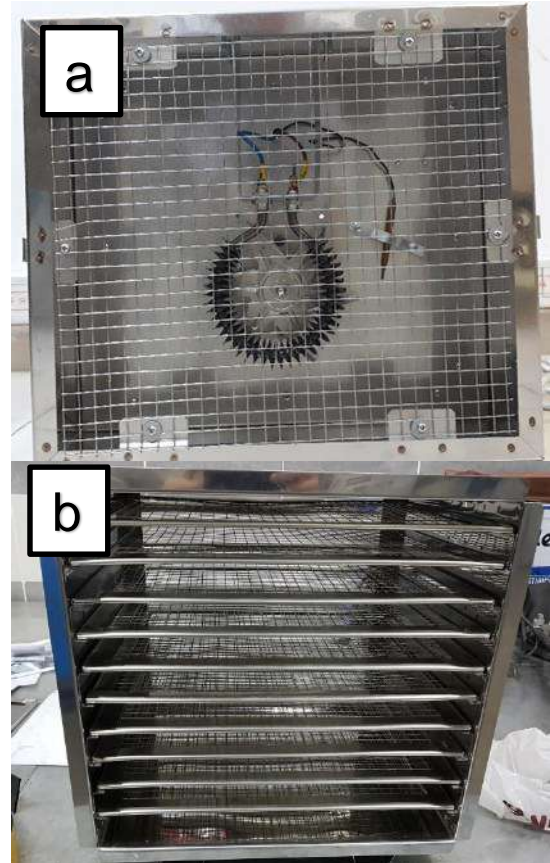






**Şekil 2.** a: rendelenmiş kırmızıturp yaş hali b: rendelenmiş kırmızıturp kurutulmuş c: dilimlenmiş kırmızıturp yaş hali d: dilimlenmiş kırmızıturp kurutulmuş (a: shredded red radish wet state b: shredded red radish dried c: sliced red radish wet state d: sliced red radish dried)

Kırmızıturp Gıda Kurutma Fırınında kurutulmuştur (Şekil 3). Kurutma yöntemlerinden biri olan rezistanslı ısı kaynağı ile kurutma ortamı ısıyı artırılarak kurutma hacmi istenilen sıcaklıkta tutulmuştur. 27/10/2004 tarihli ve (AT) 1935/2004 sayılı Gıda ile Temas Eden Madde ve Malzemeler hakkında Avrupa Parlamentosu ve Konseyi tüzüğü göz önünde bulundurularak Avrupa Birliği mevzuatına uyum çerçevesinde hazırlanan Türk gıda yönetmeliğine uygun şartlardaki paslanmaz çelik 304 sac tercih edilmiştir. Zaman rölesi sayesinde istenilen sürede çalışması kontrol edilebilen GKF imal edilmiştir. Termostat kontrolünü sağlayan bakır tüp ayarlanmış istenilen fırın sıcaklığı aşıldığında termostat devreyi kapatmakta ve fan-motor ikilisi eş zamanlı olarak durmaktadır. Fırın sıcaklığı düştüğünde ise termostat devreyi açmakta ve fan-motor ikilisi eş zamanlı olarak çalışmakta ve fırın içi sıcaklığını artırmaktadır.



**Şekil 3.** Deneilerde kullanılan kırmızıturp a: ısıtma düzeneği b: raflar ve kabin (Red radish used in experiments a: heating device b: shelves and cabinet)

GKF düzeneği kullanılan cihaz özellikleri ve ölçüm değer aralıkları Çizelge 1 de verilmiştir. Kuruma boyunca kırmızıturp kuruma kinetiği parametrelerini belirleyebilmek için gıdanın ağırlığı kurutma boyunca hassas terazi (load cell) sayesinde kaydedilmiştir. Termokupl ortam sıcaklığını, DHT11 (nem sensörü) ise hem fırın içi sıcaklığını hem de bağıl nemi ölçmektedir.

**Çizelge 1.** Gıda kurutma fırınının özellikleri (Features of food drying oven)

kullanılan cihaz	özellik	değer aralığı
termokupl	ölçüm aralığı	20 °C ~ 85°C
	hassasiyet	0.25 °C
mekanik termostat	ölçüm aralığı	30-90 °C
yük hücresi	ağırlık kapasitesi (en fazla)	1 kg
	operasyon sıcaklık aralığı	20 ~ +60 °C
HX711	çalışma gerilimi	5 V
amplifikatör kartı		
DHT11	ölçüm aralığı	% 20-90 bağıl nem
zaman rölesi	ortam / depolama sıcaklığı	0~50°C/-25~70 °C

X (moisture content) t anındaki nem içeriği, t zaman [22].

$$X_{kb} = \left( \frac{Y_A - K_A}{K_A} \right) \quad (1)$$

$$X_{yb} = \left( \frac{Y_A - K_A}{Y_A} \right) \quad (2)$$

Termodinamiğin 1. kanunu dikkate alındığında, sisteme geleneksel rezistansa elektrik enerjisi verilerek (Wr) fırın içi ısı kontrol edilmiştir. Bu ısının fırın içinde homojen dağılım sağlayabilmesi için rezistansla eş zamanlı çalışan fan enerji tüketmiştir (Wf). Kapalı sistem çalışan gıda kurutma fırını içinde oluşan ısı kaçaklar (Qk) ve fırın duvarı (Qd) (paslanmaz çelik) sayesinde ısı sistem dışına iletilmiştir. Kırmızıturp'un (Qü) istenilen sıcaklığa kadar ısıtılması için ve fırın iç havasının (Qh) ısıtılması için gerekli ısı miktarı göz önünde bulundurulursa. Dengeli halindeki bir sistem için

$$E_{giren} = E_{çıkan} \quad (3)$$

genel formülü düzenlenir [23].

$$W_r + W_f - Q_k - Q_{\dot{u}} - Q_h - Q_d = 0 \quad (4)$$

olarak düzenlenmiştir.

Duvarlar sıcaklığını artırmak için gerekli olan ısı

$$Q_k = m_k c_p \Delta T \quad (5)$$

$$Q_{\dot{u}} = m_{\dot{u}} c_p \Delta T \quad (6)$$

$$Q_h = m_h c_p \Delta T \quad (7)$$

$$Q_d = m_d c_p \Delta T \quad (8)$$

olarak bilinmektedir.

Fırın duvarlarından çıkan ısı, fırın iç havası sıcaklığını artırmak için gerekli olan ısı, ısı kaçakların tespiti Eş. 5 düzenlenirse

$$W_r + W_f = Q_k + Q_{\dot{u}} + Q_h + Q_d \quad (9)$$

olarak elde edilir. Eş. 4'te verilen denklemdeki tüm enerjiler tek tek hesaplanarak bir kıyas yapılabilir. Ancak burada bu kıyaslama dolaylı olarak yapılmıştır. Elektrik tüketimi ölçülerek fırının enerji tüketimi hakkında yorum yapılmıştır.

Rezistans (Wr) ve fanın harcadığı elektrik enerjisi (Wf) sistemin harcadığı toplam elektrik enerjisine eş olduğundan fırının harcadığı enerji tespiti yapılarak sistem hakkında bir sonuca ulaşılabilir.

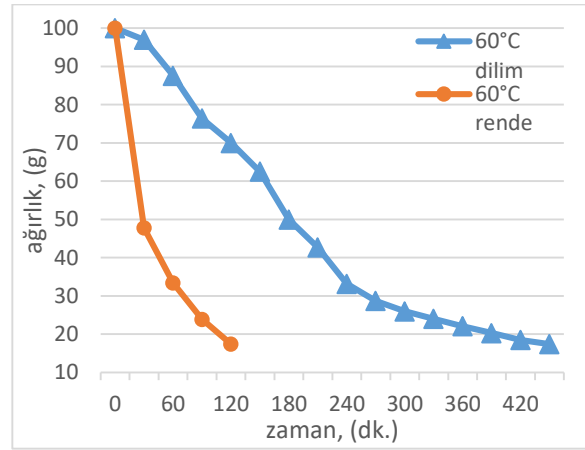
SEC (Specific Energy Consumption), kırmızıturp kurutmak için harcanılan enerji (kWh) değerinin kırmızıturp'tan buharlaştırılan su kütlesine (kg) oranı olarak tanımlanır.

SMER (Specific Moisture Extraction Rate), kırmızıturptan buharlaştırılan su kütlesinin (kg) kırmızıturpu kurutmak için harcanılan enerji (kWh)'ye oranı olarak tanımlanır.

### 3. BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

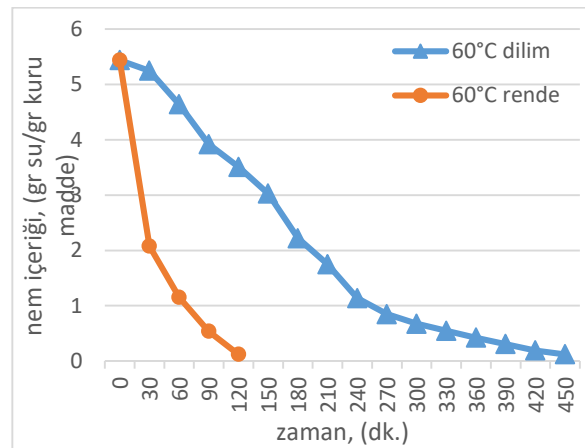
Dilimlenmiş ve rendelenmiş kırmızıturp ile yapılan deneylerde rezistanslı ısıtıcı kullanılarak kurutma yapılmıştır. Yapılan ısıtma sayesinde kırmızıturp

bünyesinde bulunan su buharlaştırılarak nem ve dolayısı ile ağırlık kaybı yaşanmıştır. Şekil 4'te yatay ekseninde zaman dakika biriminde, dikey ekseninde ise ağırlık gram biriminde verilmiştir. 60 °C de kurutulan kırmızıturp deneyinde dilimlenmiş kırmızıturp 450 dakika ve yine 60 °C de kurutulan rendelenmiş kırmızıturp deneyi 120 dakika sürmüştür. Tüm deneyler boyunca ısıtma ve fan sayesinde fırın içi bağıl nemi % 1 de tutulmuştur. Kırmızıturp rendelendikten sonra avuç içinde kısa bir süre suyu sıkılmıştır. Zaten hava ile temas yüzeyi rendelenme sebebiyle artan kırmızıturp yaklaşık olarak yarı yarıya bir sıvı atmıştır. Atılan bu sıvı ciddi bir zaman ve enerji kazancı sağlamıştır.



Şekil 4. Kırmızıturp ağırlık-zaman grafiği (Red radish weight-time graph)

Kırmızıturp için yapılan deneyde yatay ekseninde zaman dakika biriminde, dikey ekseninde ise nem içeriği (kb) gr su/gr kuru madde biriminde verilmiştir (Şekil 5). Kırmızıturp içindeki kuru bazlı nem içeriği 60 °C için 5,44-0,12 aralığında değer almıştır.



Şekil 5. Kırmızıturp nem içeriği kb-zaman grafiği (Red radish moisture content kb-time graph)

Fırın içi hava sıcaklığı, fırın sıcaklığı ve kurutulacak ürün sıcaklığı kurutma denge sıcaklığından düşük olmasından dolayı başlangıçtaki elektrik tüketimi denge halindeki elektrik tüketiminden yüksektir (Çizelge 2). Bahsedilen

sıcaklıklar 60 °C kurutma sıcaklığına ulaştıktan sonra elektrik tüketimi yaklaşık olarak yakın değerler almaktadır. 0-30 dakika boyunca rendelenmiş kırmızıturp dilimlenmiş kırmızıturpa göre % 50 fazla enerji tüketimi yapmıştır. Daha sonra rendelenmiş kırmızıturp 0,12 kWh değeri yakınlarında seyretmiş dilimlenmiş kırmızıturp ise ilk 60 dakikadan sonra 0,08 kwh değerini almış ilerleyen dakikalarda ise 450. dakikaya kadar azalarak 0,06 kWh değerine kadar düşüş gözlenmiştir. Rendelenmiş kırmızıturp dilimlenmiş kırmızıturpa göre daha yüksek bir enerji tüketimi seyrinde olsa da 120. dakikada kuruma değerlerine ulaşmıştır. Ancak bu durum dilimlenmiş kırmızıturpta 450 dakika sürmüştür. Burada toplam enerji tüketimini ilk andan beri değerlendirmek istersek tüketim miktarlarını üst üste bindirmeli olarak inceleme ihtiyacı doğar.

**Çizelge 2.** Kırmızıturp tüketilen enerji-zaman çizelgesi (Red radish consumed energy-time table)

zaman, (dk.)	Tüketilen enerji, (kWh)	
	60°C dilim	60°C rende
0	0	0
30	0.125	0.183
60	0.080	0.111
90	0.085	0.122
120	0.077	0.115
150	0.071	
180	0.079	
210	0.074	
240	0.075	
270	0.070	
300	0.067	
330	0.066	
360	0.068	
390	0.065	
420	0.066	
450	0.064	

Çizelge 3'te 30 dakika aralıklarla tüketilen enerji üst üste bindirilerek toplam tüketilen enerji miktarı hesaplanarak gösterilmiştir. 60 °C de yapılan rendelenmiş kırmızıturp deneyleri dilimlenmiş kırmızıturp deneylerinden daha fazla enerji tüketimine sebep olsa da daha kısa zamanda bitmiştir. Dilimlenmiş kırmızıturp deneyi uzun sürmesine karşın rendelenmiş kırmızıturpa göre daha az enerji tüketmiştir. Burada zaman ve enerji maliyeti karşılaştırması yapılarak ihtiyaca göre tercih

yapılmalıdır. Rendelenmiş kırmızıturp toplamda 0,531 kWh enerji tüketimi yaparken dilimlenmiş kırmızıturp toplamda 1,132 kWh enerji tüketmiştir. Rendelenmiş kırmızıturp dilimlenmiş kırmızıturpa göre % 53,09 daha az enerji tüketmiştir.

**Çizelge 3.** Kırmızıturp tüketilen enerji (bindirilmiş)-zaman çizelgesi (Red radish consumed energy table (cumulative))

zaman, (dk.)	Tüketilen enerji, (kWh)	
	60°C dilim	60°C rende
0	0	0
30	0.125	0.183
60	0.205	0.294
90	0.290	0.416
120	0.367	0.531
150	0.438	
180	0.517	
210	0.591	
240	0.666	
270	0.736	
300	0.803	
330	0.869	
360	0.937	
390	1.002	
420	1.068	
450	1.132	

Kırmızıturp kurutmada birim kütle için harcanan enerji miktarı (SEC) hesaplanarak zamanla değişimi Çizelge 4'te gösterilmiştir. İlk anda dilimlenmiş kırmızıturp keskin bir yükseliş yapmış ancak daha sonra sabit bir aralıkta seyretmiştir (Çizelge 4). Değerlerin daha sonra yükselmeye geçişinin sebebi turp 'un yapısı gereği su atmaya karşı direnç göstererek birim su buharlaşma miktarının azalması ve buna ek olarak enerji tüketiminin aynı kalması SEC değerlerinin 210. dakikadan sonra yükselişe geçmesine sebep olmuştur. Normalde ilk başta buharlaşma hızı yüksek olduğundan ve fırın içi ısının deney sıcaklığına ulaşmaya dek rezistansın durmadan çalışması sebebiyle keskin bir yükseliş elde edilmesi gerekir. Ancak rendelenmiş kırmızıturpun kg su miktarının mekanik olarak sıkılması sebebiyle ilk 30 dakika keskin bir artış gerçekleşmemiştir. Özgül enerji tüketiminin yükselmemesi de kuru gıda üreticileri için büyük bir avantajdır.



**Çizelge 4.** Kırmızıturp SEC-zaman çizelgesi (Red radish SEC-time table)

SEC (kWh/kgwater)		
zaman, (dk.)	60°C dilim	60°C rende
0	0	0
30	41.7	3.5
60	8.5	7.7
90	7.6	12.8
120	12.0	17.7
150	9.5	
180	6.3	
210	10.1	
240	7.9	
270	15.6	
300	24.8	
330	33.0	
360	35.8	
390	36.1	
420	36.7	
450	58.2	

Kırmızıturp kurutmada birim enerjide özgül nem çekme oranı (SMER) kapasitesi görülmektedir (Çizelge 5). Rende kırmızıturp SMER değerinin ilk anda keskin bir yükseliş eğrisi göstermesinin sebebi rendelenen kırmızıturp'un mekanik olarak suyunun sıkılması ile % 50 su kaybetmesidir. Dilimlenmiş kırmızıturp SMER değerinin 210. dakikadan sonra azalarak gitmesinin sebebi Çizelge 2'deki enerji tüketiminin sabit olması hasebiyle buharlaşan su miktarının azalması olarak açıklanabilir.

**Çizelge 5.** Kırmızıturp SMER-zaman çizelgesi (Red radish SMER- time table)

SMER(kgwater/kWh)		
zaman, (dk.)	60°C dilim	60°C rende
0	0	0
30	0.02	0.29
60	0.12	0.13
90	0.13	0.08
120	0.08	0.06
150	0.11	

180	0.16
210	0.10
240	0.13
270	0.06
300	0.04
330	0.03
360	0.03
390	0.03
420	0.03
450	0.02

#### 4. SONUÇLAR (RESULTS)

Yapılan bu çalışmada geleneksel kırmızıturp ağırlık, nem içeriği, nem oranı, kuruma oranı gibi kurutma parametrelerine ek olarak özgül enerji tüketimi (SEC) ve özgül nem çekme oranları (SMER) tespit edilmiştir. Ağırlık tespiti cihaz ve donanım kullanımı hatasını azaltmak amacı ile mikro-denetleyici içeren arduino kartı yük hücresi (load cell) yönetimi yapmış ve gıda kurutma fırınında hassas ölçüm yapabilmıştır. Arduino kartı kontrol etmek için açık kaynak kodlu yazılım ile ölçümleri bilgisayar ortamına kaydedilmiştir.

Her iki ön işleme (dilimleme ve rendeleme) değerlendirebilmek amacı ile deneyler 60 °C'de yapılmıştır. Yapılan bu deneylerin sonucunda 60 °C de kurutulan dilimlenmiş kırmızıturp deneyi 420 dakika rendelenmiş kırmızıturp deneyi 120 dakika sürmüştür. Toplam özgül enerji tüketim değerleri SEC göz önünde bulundurduğunda kırmızıturpu rendeleyerek kurutma toplamda hem daha az enerji harcamış hem de daha kısa zamanda kurutmıştır.

Rendelenmiş kırmızıturp SEC değeri en fazla 17,7 (kWh/kgsu), dilimlenmiş kırmızıturp en fazla 58,2 (kWh/kgsu) değerini almıştır. Dilimlenmiş kırmızıturp SMER değeri en fazla 0,16 (kWh/kgsu), rendelenmiş kırmızıturp SMER değeri en fazla 0,29 (kg su/kWh) değerini almıştır.

Bundan sonra yapılacak deneylerde;

- ✓ Kırmızıturp için fiziksel ön işleme ek olarak kimyasal ön işlemler yapılabilir.
- ✓ Enerji tüketimini azaltacak fırın duvarı yalıtımı çalıştırılabilir.
- ✓ Farklı ısı kaynakları ile kurutma yapılarak karşılaştırılabilir.

#### Kısaltmalar (Abbreviations)

Egiren = sisteme giren enerji (kJ)

Eçıkan = sistemden çıkan enerji (kJ)

$\Delta T$  = sıcaklıklar arasındaki fark (°C)

Wf = fan işi (kJ)

Wr	= rezistans işi (kJ)
Qk	= ısıtma güçleri (kJ)
Qü	=kurutulacak ürünün istenilen sıcaklığa kadar ısıtılması için gerekli ısı (kJ)
Qd	= firm duvarından çıkan ısı (kJ)
m	= kütle (kg)
md	= duvarın kütlesi (kg)
mk	= kaçak havanın kütlesi (kg)
mü	= kurutulmuş ürünün kütlesi (kg)
mh	= havanın kütlesi (kg)
cp	= sabit basınçtaki özgül ısı (kJ/kgK)
KA	= kuru ağırlık
YA	= yaş ağırlık
kb	= kuru baz
yb	= yaş baz

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Hall B., "Relation of light intensity to radish root shape", *Proceeding of the Florida State Horticultural Society*, 103: 100-101, (1990).
- Kaymak H. C., Ercisli S., Kalkan F., Ozturk I., "Some Physico-Mechanical Properties of Radish (*Raphanus Sativus* L.) Cultivars". *Comptes Rendus De L Acad. Bulgare Des Sci.*, 69: 945-952, (2016).
- Mitsui Y., Shimomura M., Komatsu K., Namiki N., Shibata-Hatta M., Imai M., Katayose Y., Mukai Y., Kanamori H., Kurita K., "The radish genome and comprehensive gene expression profile of tuberous root formation and development". *Sci. Rep.*, 5: (2015).
- Fajardo V., Alonso-Aperte E., Varela-Moreiras G., "Folate content in fresh-cut vegetable packed products by 96-well microtiter plate microbiological assay", *Food Chem.*, 169: 283-288, (2015).
- Quested T.E., Cook P.E., Gorris L.G.M., Cole M.B., "Trends in technology, trade and consumption likely to impact on microbial food safety", *Int. J. Food Microbiol.*, 139: 29-42, (2010).
- São José J.F.B.D., Medeiros H.S.D., Bernardes P.C., Andrade N.J.D., "Removal of Salmonella enterica Enteritidis and Escherichia coli from green peppers and melons by ultrasound and organic acids", *Int. J. Food Microbiol.*, 190: 9-13, (2014).
- Kılıç F., Köse A., "Meyve-Sebze Kurutma Makineleri İçin Arduino Tabanlı Neme Duyarlı Fan Kontrol Tasarımı", *1st International Turkish World Engineering and Science Congress*, Antalya, Türkiye, 7-10 Aralık (2017).
- Jiang N., et al. "Evaluation of freeze drying combined with microwave vacuum drying for functional okra snacks: Antioxidant properties, sensory quality, and energy consumption", *LWT - Food Science and Technology*, 82: 216-226, (2017).
- Bradford K.J., et al. "The dry chain: Reducing postharvest losses and improving food safety in humid climates", *Trends in Food Science & Technology*, 71: 84-93, (2018).
- Aktaş M., ve Gönen E., "Isı Pompalı Nem Kontrollü Bir Kurutucuda Defne Yaprağı Kurutulması", *Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 29(2): 433-441, (2014).
- <http://www.fao.org/statistics/en>, "Food and Agriculture Organization of the United Nations", (2019).
- Guo R., Li W., Wang X., Chen B., Huang Z., Liu T., et al., "Effect of photoperiod on the formation of cherry radish root", *Scientia Horticulturae*, 244: 193-199, (2019).
- Thies J.E., Rilling M.C., "Characteristics of Biochar: Biological Properties", *Biochar for Environmental Management Science and Technology, Earthscan, UK*, 85-106, (2009).
- Adekiya A.O., Agbede T.M., Aboyeji C.M., Dunsin O., Simeon V.T., "Effects of biochar and poultry manure on soil characteristics and the yield of radish", *Scientia Horticulturae*, 243: 457-463, (2019).
- Bang J., Kim H., Kim H., Beuchat L.R., and Ryu J-H., "Inactivation of Escherichia coli O157:H7 on Radish Seeds by Sequential Treatments with Chlorine Dioxide, Drying, and Dry Heat without Loss of Seed Viability", *Applied And Environmental Microbiology*, 77(18): 6680-6686, (2011).
- Ueno S., Izumi T., and Fujii T., "Estimation of Damage to Cells of Japanese Radish Induced by High Pressure with Drying Rate as Index", *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 73(8): 1699-1703, (2009).
- Coogan R.C., and Wills R.B.H., "Effect of drying and salting on the flavour compound of Asian white radish", *Food Chemistry*, 77(3): 305-307, (2002).
- Lee J.H. and Kim H.J., "Vacuum drying kinetics of Asian white radish (*Raphanus sativus* L.) slices", *LWT - Food Science and Technology*, 42(1): 180-186, (2009).
- TS 1815, "Turp", Türk Standart Enstitüsü, Ankara, Türkiye, (2010).
- Official Method of Analysis, "Association of Official Analytical Chemist". IAC, Arlington, Virginia, (1990).
- Dikmen E., Sahin A.Ş., ve Yakut A.K., "DeneySEL Bir Kurutma Sistemi Tasarımı ve Çalışma Parametrelerinin İncelenmesi", *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 32(2): 81-88, (2011).
- Simpson R., Ramirez C., Nuñez H., Jaques A., and Almonacid S., "Understanding the success of Page's model and related empirical equations in fitting experimental data of diffusion phenomena in food matrices", *Trends in Food Science & Technology*, 62: 194-201, (2017).
- Halıcı F., Gündüz M., "Örneklerle Isı Geçiş İki Transferi", *Birsen Yayınevi*, (2013).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



## Three group classification problem approach based on fuzzy goal programming

### *Bulanık hedef programlama tabanlı üç grulu sınıflandırma problemi yaklaşımı*

Yazar(lar) (Author(s)): Zülal TÜZÜNER<sup>1</sup>, Hasan BAL<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-1085-9399

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0003-0570-8609

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Tüzüner Z. and Bal H., “Three group classification problem approach based on fuzzy goal programming”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1089-1095, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.600520

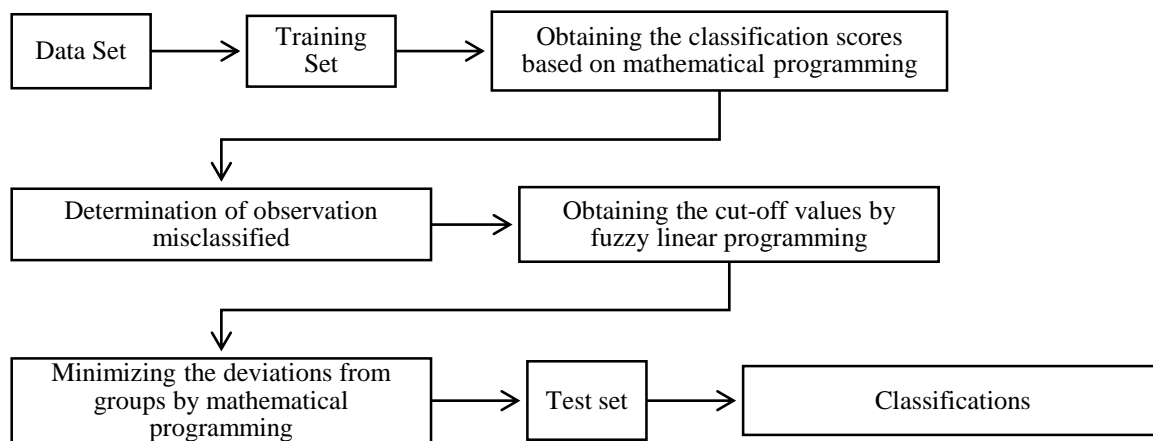
# Three Group Classification Problem Approach Based on Fuzzy Goal Programming

## Highlights

- ❖ A new models proposed has been made for the classification problem.
- ❖ The models created are based on fuzzy logic and mathematical programming.
- ❖ To examine performance of the proposed models, comparison was made with the Fisher's Linear Discriminant Function and some mathematical programming approaches in the literature.

## Graphical Abstract

In this study, two-step method based on fuzzy linear programming was developed to solve the three-group classification problems. In the first step of the proposed method, the classification score of each unit as well as misclassified observations are identified. In the second step, incorrectly classified units are assigned to the correct group, while the status of the correctly classified units is maintained.



**Figure.** Flow chart of proposed method

## Aim

In this study, a new fuzzy logic and mathematical programming based model was proposed to solve three-group classification problem.

## Design & Methodology

The proposed method combines the Fuzzy logic and mathematical programming method.

## Originality

By considering the literature,, it is noteworthy that the number of methods based on fuzzy logic and mathematical programming is insufficient.

## Findings

The models proposed ultimately displayed better performance than other models in terms of correct classification rate. Fuzzy number type for which correct classification rate was the highest was triangle fuzzy number.

## Conclusion

With the proposed method, it is possible to achieve high correct classification success in the three group classification problems.

## Declaration of Ethical Standards

The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Three Group Classification Problem Approach Based on Fuzzy Goal Programming

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Zülal TÜZÜNER\*, Hasan BAL**

Faculty of Science, Statistics Department, Gazi University, Turkey

(Received : 02.08.2019 ; Accepted : 25.10.2019 )

## ABSTRACT

In this study, a new fuzzy logic and mathematical programming based model was proposed to solve three-group classification problem. Determination of cut-off value, which corresponds to discrimination axis in classification problems, has importance. Status of the cut-off value such as asymmetric triangle fuzzy number, trapezoid fuzzy number and gauss fuzzy number was examined. The proposed approach displayed better performance when compared to Fisher's Linear Discriminant Function and some mathematical programming-based models by using three group data sets used frequently in the literature.

**Keywords:** Three group classification problem, fuzzy logic, mathematical programming, goal programming.

## Bulanık Hedef Programlama Tabanlı Üç Gruplu Sınıflandırma Problemi Yaklaşımı

### ÖZ

Bu çalışmada, üç gruplu sınıflandırma probleminin çözümü için bulanık mantık ve matematiksel programlamaya dayalı yeni bir model önerilmiştir. Sınıflandırma problemlerinde ayırma eksenine karşılık gelen kesme değerinin belirlenmesi önem arz etmektedir. Kesme değerinin; asimetrik üçgen bulanık sayı, yamuk bulanık sayı ve gauss bulanık sayı olması durumları incelenmiştir. Önerilen yaklaşım, literatürde sıkça kullanılan 3 gruplu veri setleri kullanılarak Fisher'in Doğrusal Diskriminant Fonksiyonu ve bazı matematiksel programlama yöntemleri ile karşılaştırıldığında daha iyi performans göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Üç gruplu sınıflandırma problemi, bulanık mantık, matematiksel programlama, hedef programlama.

### 1. INTRODUCTION

One of the most important problems in data analysis is classification problem that includes designation of observations to one of the predetermined groups by basing on characteristics in relevant variables set. Classification problems are frequently encountered on social sciences, finance, marketing, medicine, science and engineering areas. Parametric and nonparametric approaches can be applied to solve a classification problem. The first frequently used parametric method is linear discriminant function (FLDF) proposed by Fisher (1936) [1], the second one is logistic regression analysis and the third one is quadratic discriminant function proposed by Smith (1947) [2]. In classification studies, when parametric test assumptions were not provided, many linear programming-based mathematical programming (MP) model was developed. Linear Programming-based classification model was proposed by Freed and Glover [3] in 1980's, MSD (Minimum sum of deviations model which was developed by Stam and Ragsdale [4] in the early 1990's was based and many MP-based classification models were developed. The purpose of these models is to determine cut-off value allowing discrimination between the groups.

In the study, Goal Programming Problem (GPP) is discussed with fuzzy targets. In addition to theoretical interest, decision-making in a fuzzy environment also attracts attention in application due to the fact that both targets and their significance levels are not exactly stated. The purpose of this study is to develop a new model for three group classification problem when right constant in linear programming model is a fuzzy number. Developed model is based on fuzzy goal programming having different membership functions. In applications, there is no limitation for membership function type. It is based on decision maker's demand and experience. The model was compared with FLDF and examined multi-group models via real data set.

In second section of the study, Fisher's Linear Discriminant Function and some multi-group mathematical programming-based classification models are discussed and proposed model, fuzzy logic and fuzzy numbers shall be introduced briefly in third section. In fourth section, proposed classification models and classification of models are discussed and in the last section there is conclusions and discussion part.

### 2. LITERATURE REVIEW

The Linear Discriminant Analysis (LDA) is the most important of linear classification techniques that are

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



commonly used in classification. Testing whether there is important difference between averages of two or many group variables that were determined before the analysis, determining contribution of each variable to difference between the groups, and determining combination of predictor variables maximizing discrimination between groups in proportion to in-group change can be counted among the purposes of linear discriminant analysis.

The Linear Discriminant Analysis was suggested by Fisher (1936) [1]. Function achieves this by reflecting variable points on vector which separates variance between its classes at maximum level and minimizes in class variances. Statistical linear discriminant function proposed for two groups is commonly used method. Supposing there is p dimensional random vector corresponding to measures to be taken over  $\underline{X}'=(X_1, X_2, \dots, X_p)$  observation. Observation value of  $\underline{X}$  shall vary by groups.  $Y = \sum_{p \times 1} X_{p \times 1}$  linear combination means Fisher's Linear Discriminant Function (FLDF).

When hypothesis of statistical techniques were not provided, many mathematical programming models were developed to solve classification problems. Application studies in classification problems occurred firstly in the later 1960's and in the early 1970's ((Rosen, 1965) [5], (Mangasarian, 1965) [6], (Smith, 1968) [7] and (Grinold, 1972) [8]). The interest for mathematical programming approaches to develop classification model increased with classification model which was proposed by Freed and Glover (1981) [3] and which basis on minimization of deviations total (MDS) for two-group classification problem. In addition to that  $d_i$  represents deviation of i unit from discrimination function, if observation is classified correctly  $d_i=0$ , but if it is misclassified it becomes  $d_i>0$ . In case two groups are separated linearly, minimum of deviations total is zero. Basic linear programming model is given as follows to create MSD discriminant function:

$$\begin{aligned} & \min \sum_{i \in G_k} d_i \\ & \text{subject to:} \\ & \sum_{j=1}^p \alpha_j Z_{ij} \leq b + d_i \quad i \in G_1 \\ & \sum_{j=1}^p \alpha_j Z_{ij} > b - d_i \quad i \in G_2 \end{aligned} \tag{1}$$

where  $Z_{ij} \geq 0$ ,  $\alpha_j$  ( $j=1,2,\dots,p$ ) and  $b$  are unrestricted variables and  $d_i \geq 0$  ( $i=1,2,\dots,n$ ). To solve model,  $\alpha_j$  and  $b$  models and classification score of any model are obtained. When observations classification score is  $S_j$ ,  $S_j \geq b$  is classified to  $G_1$ , otherwise it is classified to  $G_2$ .

Mathematical programming-based models were proposed by many authors such as Bajgier and Hill (1982) [9], Lam and Moy (1997) [10], Glen (1999) [11]. Stam and Ragsdale (1992) [4] proposed a two-stage method to find discrimination function. In this method, observations that may coincide, that is to say, the observations that are difficult to be classified are defined

in the first phase and these observations are reexamined in the second phase. Lam et al. (1996) [12] divided two-group classification operation into two phases. In the first stage, the classification function of the units is approximated to the average score of the group using the objective function, which minimizes the sum of deviations from the group average classification scores. From this step the cut-off values are obtained. In the second stage, the classification scores of the units are obtained. Bal et al. (2006) [14] proposed a linear programming model for two-group classification problems based on model of Lam et al. Approach in model that they proposed is based on minimizing total of deviations between classification score of all observations and group median scores. They solved classification problem in a single phase by transforming two-phase model into priority goal programming model in Bal et al. (2006) [14], Bal et al. (2006) [13] studies. Classification studies in the literature are generally based on two-group studies. Nevertheless, number of studies proposing multi-group mathematical programming approach is limited. According to Freed and Glover (1981) [3], the way for expanding two-group status into multi-group status is to use two-group combinations. However, this situation does not always give exact information about correct classification rate. For multi-group classification problems, a truer way is to use general single-function classification model (GSFC) proposed by Gehrlein (1986) [15] or general multiple function model (GMFC) proposed by Gehrlein (1986) [15] and Choo and Wedley (1985) [16]. When there are many outliers in data, GSFC model cannot guarantee that observations will be classified correctly. Gehrlein (1986) [15] and Choo and Wedley (1985) [16] proposed a general multi-function classification model (GMFC) to solve this problem. GMFC is defined in Eq. (2):

$$\begin{aligned} & \min \sum_{i=1}^n y_i \\ & \text{subject to:} \\ & \alpha_{r0} + \sum_{j=1}^p \alpha_{rj} Z_{ij} - \alpha_{t0} - \sum_{j=1}^p \alpha_{tj} Z_{ij} + My_i \geq e, \forall i \in G_r, r = 1,2, \dots, k, i = 1,2, \dots, n, r \neq t \end{aligned} \tag{2}$$

where  $Z_{ij}$  means observation value for j. value of i. observation, k: group number; M: a big positive constant, p: variable number, n: total observation number,  $\alpha_{rj}$ : weight assigned to  $Z_{ij}$  for i. observation in  $G_r$  group,  $\alpha_{r0}$ : slippage constant for  $G_r$  group (threshold value for  $G_r$  group),  $\alpha_{rj}$ : unrestricted variable,  $y_i$ : a binary variable showing whether i. observation was misclassified or not.

Lam and Moy (1996) [17] expanded two-group classification model developed by Lam et al. (1996) [18] to a multi-group classification model. In model that they called as MLM (The model developed by Lam and Moy), k group number is  $u=1, \dots, k-1$ ,  $v=u+1, \dots, k$ , and it is given in Eq. (3) for each (u,v) pairs.

$$\begin{aligned} & \min \sum_{i \in G_u, i \in G_v}^n d_i \\ & \text{subject to:} \\ & \sum_{j=1}^p w_j (X_{ij} - \bar{x}_j^u) + d_i \geq 0, j \in G_u \\ & \sum_{j=1}^p w_j (X_{ij} - \bar{x}_j^v) - d_i \leq 0, j \in G_v \\ & \sum_{j=1}^p w_j (\bar{x}_j^u - \bar{x}_j^v) \geq 1 \end{aligned} \quad (3)$$

Total observation number is  $n=n_1+n_2+\dots+n_k$  for the observation number  $i$ ;  $n_r$ :  $G_r$  group and average regarding  $j$ . variable is defined as  $\bar{x}_i^r = \frac{1}{n_r} \sum_{i \in G_r} X_{ij}$ , ( $r=1,2,\dots,k$ ). In the model,  $w_j$  ( $j=1,\dots,p$ ) is unrestricted variable and is  $d_i \geq 0$  for  $i \in G_u$  ve  $i \in G_v$ .  $S_i$  classification scores of observations in are  $G_u$  and  $G_v$  found via  $w_j$  obtained for each  $(u,v)$  group pair after solving Eq. (4). In the second phase,  $c_{uv}$  values to be benefited in discrimination of groups are obtained with solving of Eq. (4) model.  $c_{uv}$  values are unrestricted variables and  $d_{iuv} \geq 0$ .

$$\min \sum_{i \in G_u} \sum_{u=1}^{k-1} \sum_{v=u+1}^k d_{iuv} + \sum_{i \in G_v} \sum_{u=1}^{k-1} \sum_{v=u+1}^k d_{iuv}$$

subject to:

$$\begin{aligned} S_{iuv} + d_{iuv} & \geq c_{uv}, u = 1, \dots, k-1, v=u+1, \dots, k, i \in G_u \\ S_{iuv} - d_{iuv} & \leq c_{uv}, u = 1, \dots, k-1, v=u+1, \dots, k, i \in G_v \end{aligned} \quad (4)$$

Örkcü and Bal (2011) [19] combined two different models by benefiting from artificial neural network for multi-group classification problem and they created a hybrid model. Youssef et al. (2011) [20] developed a new two-phase technique which bases on linear programming model to solve three-group classification problems. Smaoui and Aouni (2017) [21] proposed a new approach for the classification problems for which cut-off value basing on Goal Programming and corresponding to discrimination axis is fuzzy. They discussed fuzziness with different membership functions. Doğan et al. (2019) [22] developed a method basing on regression analysis and mathematical programming for solving multi-group classification problems.

### 3. PROPOSED CLASSIFICATION MODEL

Many of real life problems are included in an environment in which objective function, some coefficients of constraints and right constants cannot be defined completely, in other words, in which they are indefinite. Fuzziness concept was firstly included in article "Fuzzy Sets" by A. Zadeh (1965) [23]. Many problems encountered in daily life can be defined with Linear Programming (LP). However, in most instances it may not be possible to exactly determine constraints or objective functions or both in Linear Programming. Fuzzy Linear Programming (FLP) may be applied to examine uncertainty seen in any of LP model parameters. Uncertainty hypothesis should be also provided in addition to valid proportionality, additivity and severance

hypothesis for LP problems to evaluate any problem as FLP Problem. To provide uncertainty hypothesis, all or a part of objective function coefficient, right constant and weight coefficients parameters should not be known exactly but membership degrees of these parameters should be known. Right hand side parameters, which show maximum source amount in LP models, may not be defined exactly, that is to say, they may be fuzzy. Source constraints to be created in this case are defined as fuzzy source constraints.

Goal Programming (GP) is a technique that aims minimization of deviations of goals within them instead of making them directly maximum and minimum under determined constraints. There is no uncertainty in determining objective function and creating parameters. For this reason, fuzzy logic is suitable for the Goal Programming and it was benefited frequently in the literature. Fuzzy Goal Programming (FGP) created with application of fuzzy logic theory into GP is a technique that is used when there are indefinite goals and purposes. The first studies with which GP was processed with fuzzy number theory are studies of Narasimhan (1980) [24] and Hannan (1981) [25]. Fuzzy Goal Programming started to be used in classification studies in recent years. Li et al. (2006) [26] proposed flexible constrained fuzzy linear programming classification method. Hosseinzadeh et al. (2007) [27], Hosseinzadeh and Mansouri (2008) [28] and Ben Youssef and Rebai (2008) [29] developed classification model by taking decision making parameters as fuzzy parameters. Asymmetric triangle fuzzy number defined in real number line is defined with  $\tilde{c}=(c_1, c, c_2)$ .  $h$  ( $h \in [0,1]$ ) level of a fuzzy set is defined as ordered set of all members whose membership value is  $h$  or higher.  $h$  level of  $\tilde{c}$  fuzzy number is defined with  $\tilde{c} = [c - (1 - h)\eta_1, c + (1 - h)\eta_2]$  interval. Here,  $\eta_1 = c - c_1$  and  $\eta_2 = c_2 - c$ ,  $c_1$  were determined as lower limit of  $\tilde{c}$  fuzzy number and  $c_2$  was determined as upper limit of  $\tilde{c}$  fuzzy number and  $c$  center.

If fuzzy number is given by  $\tilde{c}=(c_1, c-\epsilon, c+\epsilon, c_2)$  membership function, it becomes a trapezoid fuzzy number.  $h$  level of  $\tilde{c}$  fuzzy number is defined as  $\tilde{c}=[c_1+h\alpha, c_2-h\beta]$ .  $h$  level of  $\tilde{c}$  fuzzy number is defined with  $\tilde{c}=[h(c-\epsilon)+(1-h)c_1, h(c+\epsilon)+(1-h)c_2]$  interval as  $\alpha=c-\epsilon-c_1$  and  $\beta=c_2-c-\epsilon$ .

$z$  model value and left and right fuzziness is given equally to  $\sigma$  with a Gauss fuzzy number  $\tilde{c}=(z, \sigma, \sigma)$  because Gauss membership is symmetric around center value  $c$ . Gauss fuzzy cut-off value  $\tilde{c}$  is defined by lower limit  $c_1$  and center  $c$  and upper limit  $c_2$ . Alternatively,  $h$ -level of  $\tilde{c}$  is calculated as interval as follows:

$$\tilde{c} = [c - \sigma\sqrt{-\text{Log } h}, c + \sigma\sqrt{-\text{Log } h}] = [\mu_h^l, \mu_h^u]$$

Besides, 68% of values are included within 1 standard deviation, 95% in 2 standard deviations and 99.7% in 3 standard deviations in normal distribution. By basing on this opinion, fuzzy number  $\tilde{c}$  belongs to  $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$  interval with the rate of 99.7%. And when it is considered

that average  $\mu$  is equal to  $\frac{c_1+c_2}{2}$ , then  $\sigma = \frac{c_2-c_1}{6}$  value of the standard deviation may be removed. This value is used in Gauss fuzzy number approach.

**Table 1.** Types of Fuzzy Numbers

Fuzzy Number Type	Asymmetric Triangle	Trapezoid	Gauss
Membership Functions	$\begin{cases} 0, & z < c_1 \\ \frac{z - c_1}{c - c_1}, & c_1 \leq z \leq c \\ \frac{c_2 - z}{c_2 - c}, & c \leq z \leq c_2 \\ 0, & z > c_2 \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{z - c_1}{c - \varepsilon - c_1}, & c_1 \leq z \leq c - \varepsilon \\ 1, & c - \varepsilon \leq z \leq c + \varepsilon \\ \frac{c_2 - z}{c_2 - c - \varepsilon}, & c + \varepsilon \leq z \leq c_2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$	$\exp\left\{-\frac{1}{\sigma}(z - c)^2\right\}$
Figure of fuzzy numbers			

The purpose of this study is to propose models for three-group classification problems having fuzzy cut-off value. Developed models are based on Fuzzy Goal Programming having different membership functions. A new three-group classification model was proposed by combining three-group classification model that was proposed by Youssef et al. (2011) [20] with model proposed by Smaoui and Aouni (2017) [21] for two-group classification problem. A single model can be created with combination of more than one classification model.

The proposed classification model is based on the Fuzzy Goal Programming. In this model, the cut-off value  $\tilde{c}$  and  $\tilde{s}$  were firstly considered as asymmetric triangle fuzzy number, secondly as trapezoid fuzzy number and thirdly as Gauss fuzzy number. Membership functions of these cut-off values can be submitted with  $\mu_{\tilde{c}}$  and  $\mu_{\tilde{s}}$  fuzzy sets. The aim is to determine cut-off values  $\tilde{c}$  and  $\tilde{s}$  accepted as fuzzy number by using different membership functions so as to minimize observation number that was misclassified.

In the model, assume that  $k$  is  $n_k$  observation belonging to  $k=1,2,3$  group with each observation defined by  $p$  variable. Assume that  $j$  is  $X_{ij}$  which is value of variable  $j=1,2,\dots,p$  for  $i$ . observation of  $k$  group. It was assumed that second group was among the first and third group, in other words, that coincidence was between  $G_1$  and  $G_2$  groups and  $G_2$  and  $G_3$  groups. The model consists of two interrelated phases. In the first phase, it was aimed at defining observations that were misclassified, in the second phase it was aimed at assigning the observations that were misclassified to correct groups.  $c_1$  and  $c_2$  parameters in the models are reference points of  $\tilde{c}$  fuzzy number and  $s_1$  and  $s_2$  parameters are reference points of

$\tilde{s}$  fuzzy number.  $h$  was defined as height of fuzzy numbers. The first phase is given in Eq. (5):

$$\begin{aligned} & \min \sum_{i \in G_k} d_{1i}^- + d_{2i}^+ + e_{2i}^- + d_{3i}^+ \\ & \text{s.t.} \\ & \sum_{j=1}^p w_j x_{ij} - d_{1i}^+ + d_{1i}^- = c_2, \quad i \in G_1 \\ & \sum_{j=1}^p w_j x_{ij} - d_{2i}^+ + d_{2i}^- = c_1, \quad i \in G_2 \\ & \sum_{j=1}^p w_j x_{ij} - e_{2i}^+ + e_{2i}^- = s_2, \quad i \in G_2 \\ & \sum_{j=1}^p w_j x_{ij} - d_{3i}^+ + d_{3i}^- = s_1, \quad i \in G_3 \\ & c_2 - c_1 \geq 1 \\ & s_2 - s_1 \geq 1 \\ & c_1 - s_2 > 1 \\ & \sum_{j=1}^p w_j = 1 \\ & d_{ki}, e_{ki} \geq 0 \\ & w_j, c_1, c_2, s_1, s_2 \text{ unrestricted in sign} \end{aligned} \tag{5}$$

$c_1^*, c_2^*, s_1^*, s_2^*$  and  $w_j^*$  which are optimal values of  $w_j$  are obtained respectively for  $c_1, c_2, s_1, s_2$  and  $j$  variable with solution of the first phase.  $E_1$ : the set of observations classified as Group 1 ( $G_1$ ),  $E_2$ = the set of observations classified as Group 2 ( $G_2$ ),  $E_3$ = the set of observations classified as Group 3 ( $G_3$ ),  $E_0$ = the set of observations in

the first classification gap (Group 1 and Group 2), and  $E'_0$  = the set of observations in the second classification gap (Group 2 and Group 3). Accordingly, the observations can be classified to sub sets as follows:

$$E_1 = \{i \in G / \sum_{j=1}^p w_j * x_{ij} \geq c_2^*\}$$

$$E_2 = \{i \in G / s_2^* \leq \sum_{j=1}^p w_j * x_{ij} \leq c_1^*\}$$

$$E_3 = \{i \in G / \sum_{j=1}^p w_j * x_{ij} \leq s_1^*\}$$

$$E_0 = \{i \in G / c_1^* < \sum_{j=1}^p w_j * x_{ij} < c_2^*\}$$

$$E'_0 = \{i \in G / s_1^* < \sum_{j=1}^p w_j * x_{ij} < s_2^*\}$$

Since some observations were misclassified, other sub sets are defined as follows:

$C_k = G_k \cap E_k$ ,  $k=1,2,3$ , the set of observations correctly classified into  $G_k$

$D_1 = G_1 \cap (E_2 \cup E_0)$ : the set of observations from  $G_1$  that are misclassified or in the first classification gap

$D_2 = G_2 \cap (E_1 \cup E_0)$ : the set of observations from  $G_2$  that are misclassified or in the first classification gap

$D'_2 = G_2 \cap (E_3 \cup E'_0)$ : the set of observations from  $G_2$  that are misclassified or in the second classification gap

$D'_3 = G_3 \cap (E_2 \cup E'_0)$ : the set of observations from  $G_3$  that are misclassified or in the second classification gap.

The second phase is used to determine  $w_j^{**}$  ( $j=1,2, \dots,p$ ),  $c^*$  and  $s^*$  constant terms. Here, the observation wanted to be classified is classified to any of three groups. The aim of second phase is bilateral. Firstly, it is aimed at creating a new function separating observations in  $D_1$  and  $D_2$  as far as possible while protecting correct classification of the observations in  $C_1$  and  $C_2$ . Secondly, it is aimed at using new created function to separate observations in  $D_2$  and  $D_3$  while protecting correct classification of the observations in  $C_2$  and  $C_3$ .

Models are given in Table 2 according to different fuzzy number types belonging to second phase of the model. In the models,  $w_j, c, s$  unrestricted variables,  $d_{ki}, e_{ki} \geq 0$ .  $w_j^{**}, c^*$  and  $s^*$  are optimal values obtained by the second model of respectively  $w, c$  and  $s$  to use a classification function that is a discrimination function obtained from the second phase.

$Z_j$  new observation classification rule is as follows:

$\sum_{j=1}^p w_j^{**} Z_j \geq c^*$  : the observation is classified into  $G_1$ .

$s < \sum_{j=1}^p w_j^{**} Z_j < c^*$  : the observation is classified into  $G_2$ .

$\sum_{j=1}^p w_j^{**} Z_j \leq s^*$  : the observation is classified into  $G_3$ .

#### 4. APPLICATION

In the application phase, two different data sets, frequently used in the literature, were used. Data sets were taken from internet data base of University of California-Irvine (UCI), and they include real life data sets such as IRIS and Wine (Wine Identification) data set.

**FISHER's IRIS Data Set:** In this data set, there are 3 different decorative flowers such as setosa, versicolor and virginica. Data set consists of 150 flowers in total, in each of three groups there are 50 flowers. 4 different variables were observed from each flower: sepal length, sepal width, petal length and petal width.

**Wine Data Set:** This is data set obtained from 13 different chemical analyses performed in three wine types created from grape wines produced in Italia and grown by different people in a definite region. The data set consists of 178 observations in total, there are 59 observations in the first group, 71 observations in the second group and 48 observations in the third group.

**FLDF:** Fisher's Linear Discriminant Function

**GMFC:** Gehrlein's multi-function classification model

**MLM:** The model developed by Lam and Moy

Results were compared by separating 70% of the observations regarding data set as training and 30% as test sample. Comparison of correct classification rates are given in Table 3 according to the Fisher's Linear Discriminant Function, some mathematical programming approaches in the literature and fuzzy number height of the proposed method. For IRIS data set, correct classification rate was obtained at the rate of 0.94 in Fisher's Linear Discriminant Function and of 0.95 in Gehrlein's model and in the model developed by Lam and Moy. In the proposed model, when triangle fuzzy number was used the highest correct classification rate was obtained, and when height (h) of the fuzzy number was 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, the rate was 0.953. When trapezoid fuzzy number was used and the height (h) of the fuzzy number was 0.3, 0.4, 0.9, the best correct classification rate which was 0.947 was obtained. When Gauss fuzzy number was used and the height (h) of the fuzzy number was 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, the highest correct classification rate which was 0.953 was obtained

**Table 2.** Models of the Second Stage of the Proposed Method

Asymmetric Triangle Fuzzy Number Model	Trapezoid Fuzzy Number Model	Gauss Fuzzy Number Model
$\min \sum_{i \in G_k} d_{1i}^- + d_{2i}^+ + e_{2i}^- + d_{3i}^+$	$\min \sum_{i \in G_k} d_{1i}^- + d_{2i}^+ + e_{2i}^- + d_{3i}^+$	$\min \sum_{i \in G_k} d_{1i}^- + d_{2i}^+ + e_{2i}^- + d_{3i}^+$
s.t.	s.t.	s.t.
$\sum_{j=1}^p w_j x_{ij} \geq c_2^*, i \in C_1$	$\sum_{j=1}^p w_j x_{ij} \geq c_2^*, i \in C_1$	$\sum_{j=1}^p w_j x_{ij} \geq c_2^*, i \in C_1$
$\sum_{j=1}^p w_j x_{ij} \leq c_1^*, i \in C_2$	$\sum_{j=1}^p w_j x_{ij} \leq c_1^*, i \in C_2$	$\sum_{j=1}^p w_j x_{ij} \leq c_1^*, i \in C_2$
$\sum_{j=1}^p w_j x_{ij} \geq s_2^*, i \in C_2$	$\sum_{j=1}^p w_j x_{ij} \geq s_2^*, i \in C_2$	$\sum_{j=1}^p w_j x_{ij} \geq s_2^*, i \in C_2$
$\sum_{j=1}^p w_j x_{ij} \leq s_1^*, i \in C_3$	$\sum_{j=1}^p w_j x_{ij} \leq s_1^*, i \in C_3$	$\sum_{j=1}^p w_j x_{ij} \leq s_1^*, i \in C_3$
$\sum_{j=1}^p w_j x_{ij} - d_{1i}^+ + d_{1i}^- = c + (1-h)\eta_2, i \in D_1$	$s - c < 0$	$s - c < 0$
$\sum_{j=1}^p w_j x_{ij} - d_{2i}^+ + d_{2i}^- = c - (1-h)\eta_1, i \in D_2$	$c - c_1^* > 0$	$c - c_1^* > 0$
$\sum_{j=1}^p w_j x_{ij} - e_{2i}^+ + e_{2i}^- = s + (1-h)\theta_2, i \in D'_2$	$c_2^* - c > 0$	$c_2^* - c > 0$
$\sum_{j=1}^p w_j x_{ij} - d_{3i}^+ + d_{3i}^- = s - (1-h)\theta_1, i \in D'_3$	$s - s_1^* > 0$	$s - s_1^* > 0$
$c - c_1^* = \eta_1$	$s_2^* - s > 0$	$s_2^* - s > 0$
$c_2^* - c = \eta_2$	$\sum_{j=1}^p w_j x_{ij} - d_{1i}^+ + d_{1i}^- = h(c + \epsilon) + (1-h)c_2^*, i \in D_1$	$\sum_{j=1}^p w_j x_{ij} - d_{1i}^+ + d_{1i}^- = c + \sigma_1 \sqrt{-\log h}, i \in D_1$
$s - s_1^* = \theta_1$	$\sum_{j=1}^p w_j x_{ij} - d_{2i}^+ + d_{2i}^- = h(c - \epsilon) + (1-h)c_1^*, i \in D_2$	$\sum_{j=1}^p w_j x_{ij} - d_{2i}^+ + d_{2i}^- = c - \sigma_1 \sqrt{-\log h}, i \in D_2$
$s_2^* - s = \theta_2$	$\sum_{j=1}^p w_j x_{ij} - e_{2i}^+ + e_{2i}^- = h(s + \epsilon) + (1-h)s_2^*, i \in D'_2$	$\sum_{j=1}^p w_j x_{ij} - e_{2i}^+ + e_{2i}^- = s + \sigma_2 \sqrt{-\log h}, i \in D'_2$
$s - c < 0$	$\sum_{j=1}^p w_j x_{ij} - d_{3i}^+ + d_{3i}^- = h(s - \epsilon) + (1-h)s_1^*, i \in D'_3$	$\sum_{j=1}^p w_j x_{ij} - d_{3i}^+ + d_{3i}^- = s - \sigma_2 \sqrt{-\log h}, i \in D'_3$

**Table 3.** The Correctly Classification Rate of The Different Models

Other Models	Data Set					
	IRIS			WINE		
FLDF	0.94			0.95		
GMFC	0.95			0.95		
MLM	0.95			0.935		
Proposed Models for several h values	Asymmetric Triangle	Trapezoid	Gauss	Asymmetric Triangle	Trapezoid	Gauss
	0.953	0.94	0.947	0.961	0.961	0.949
	0.953	0.94	0.953	0.961	0.961	0.955
	0.953	0.947	0.953	0.961	0.961	0.955
	0.953	0.947	0.953	0.955	0.955	0.955
	0.953	0.94	0.953	0.949	0.955	0.955
	0.947	0.933	0.947	0.949	0.955	0.955
	0.94	0.94	0.947	0.955	0.949	0.955
	0.94	0.94	0.947	0.955	0.949	0.955
0.94	0.947	0.947	0.955	0.949	0.955	

For WINE data set, correct classification rate was obtained at the rate of 0.95 in the Fisher's Linear Discriminant Function and Gehrlein's classification model and of 0.935 in the model developed by Lam and Moy. In the proposed model, when Triangle and Trapezoid fuzzy number was used the highest correct classification rate which was 0.961 was obtained while fuzzy number height (h) was 0.1, 0.2, 0.3. When Gauss fuzzy number was used, the highest correct classification rate was obtained as 0.955 while the height (h) of fuzzy number was 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9.

## 5. CONCLUSION and DISCUSSION

In this study, a hybrid model is developed based on studies of previous researchers and fuzzy goal programming is used to in solving three-group classification problems. To examine performance of the proposed model, comparison was made with the Fisher's Linear Discriminant Function and some mathematical programming approaches in the literature. The models proposed ultimately displayed better performance than other models in terms of correct classification rate (Table 3). Fuzzy number type for which correct classification rate was the highest was triangle fuzzy number. In this article, classification performances of four different models were compared by basing on two real life data. The same comparison may be provided by making a simulation study.

## DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS

The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission..

## REFERENCES

- [1] Fisher, R.A., "The use of multiple measurements in taxonomy problems", *Annals of Eugenics*, 7: 179-188, (1936).
- [2] Smith, C. A., "Some examples of discrimination", *Annals of Eugenics*, 13(1): 272-282, (1946).
- [3] Freed, N. & Glover, N., "A linear programming approach to the discriminant problem", *Decision Sciences*, 12: 68-74, (1981).
- [4] Stam, A. & Ragsdale, C.T., "On the classification gap in mathematical programming-based approaches to the discriminant problem", *Naval Research Logistics*, 39: 545-559, (1992).
- [5] Rosen, J.B., "Pattern separation by convex programming", *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 10: 123-134, (1965).
- [6] Mangasarian O., "Linear and Nonlinear Separation of patterns by Linear Programming", *Operations Research*, 13: 444-452, (1965).
- [7] Smith, F.W. "Pattern classifier design by linear programming", *IEEE Transactions on Computers*, 17(4): 367-372, (1968).
- [8] Grinold, R.C., "Mathematical programming methods for pattern classification", *Management Sciences*, 19: 272-289, (1972).
- [9] Bajgier, S. M. & Hill, A. V., "An experimental comparison of statistical and linear programming approaches to the discriminant problem", *Decision Sciences*, 13: 604-618, (1982).
- [10] Lam, K.F., Moy, J.W., "An experimental comparison of some recently developed linear programming approaches to the discriminant analysis", *Computers and Operations Research*, 24(7): 593-599, (1997).
- [11] Glen, J. J., "Integer programming methods for normalisation and variable selection in mathematical programming discriminant analysis models", *Journal of Operational Research Society*, 50: 1043-1053, (1999).
- [12] Lam, K.F., Choo, E.U., Moy, J.W., "Minimizing deviations from the group mean: A new linear programming approach for the two-group classification problem", *European Journal of Operational Research*, 88: 358-367, (1996).





POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



## Ergonomic analysis based on digital human modelling: adjustable school furniture design for secondary school students

*Dijital insan modelleme tabanlı ergonomik analiz: ortaokul öğrencileri için ayarlanabilir okul mobilyası tasarımı*

*Yazar(lar) (Author(s)): Mehmet İsmail SARI<sup>1</sup>, İsmail ŞAHİN<sup>2</sup>*

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-4920-1888

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0001-8566-3433

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Sarı M. İ., Şahin İ. “Ergonomic analysis based on digital human modelling: adjustable school furniture design for secondary school students”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1097-1110, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.607557

# Ergonomic Analysis Based on Digital Human Modelling: Adjustable School Furniture Design for Secondary School Students

## Highlights

- ❖ The school furniture, whose height and slope can be adjusted, is designed in accordance with the anthropometric features of the students.
- ❖ Ergonomic analysis was carried out with RULA - Rapid Upper Limb Analysis.
- ❖ Digital Human Modeling (DHM) was used in the analysis.
- ❖ The limbs were colored from green to red in the RULA analysis
- ❖ The furniture we designed has achieved a better RULA score than the furniture used in schools.

## Graphical Abstract

In this study, school furniture was designed and ergonomic analysis was done with DHM.



**Figure.** DHM analysis and school furniture design.

## Aim

In this study, it is aimed that the students can maintain their ideal posture while drawing in design-oriented lessons with school furniture that is suitable for the anthropometric features and whose height and slope can be adjusted.

## Design & Methodology

The student desk and the chair were designed in consideration of the anthropometric data obtained from the students. Ergonomically evaluation of the school furniture designed was carried out through RULA – Rapid Upper Limb Analysis. During the tests and the analyses, Digital Human Models (DHM) matching the anthropometric measures determined within the study were used.

## Originality

Ergonomic analysis of the designed school furniture was done using RULA and DHM.

## Findings

It was determined that the school furniture designed in a way that the slope and height could be adjusted is more suitable and ergonomic for the antropometric properties of secondary school students in the risk analysis with DHM.

## Conclusion

As a result of the analysis, it was seen that the designed furniture had a better RULA score than the known school furniture.

## Declaration of Ethical Standards

The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Dijital İnsan Modelleme Tabanlı Ergonomik Analiz: Ortaokul Öğrencileri İçin Ayarlanabilir Okul Mobilyası Tasarımı

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Mehmet İsmail SARI<sup>1</sup>, İsmail ŞAHİN<sup>2\*</sup>**

<sup>1</sup>Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstriyel Tasarım Müh. Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 20.08.2019 ; Kabul/Accepted : 30.10.2019)

## ÖZ

Öğrencilerin akademik başarılarını ve sağlıklarını etkileyen bir çok neden vardır. Bu nedenlerden biri de okul mobilyalarının ergonomik olmamasıdır. Bu çalışmada, öğrenilerin antropometrik özelliklerine uygun, yüksekliği ve eğimi ayarlanabilen okul mobilyaları ile tasarım odaklı derslerde çizim yaparken ideal duruşlarını koruyabilmeleri amaçlanmıştır. Öğrenci mobilyası öğrencilerden elde edilen antropometrik veriler doğrultusunda tasarlanmıştır. Yüksekliği ayarlanabilir oturma öğrencilerin bacak boylarına göre üç farklı yükseklikte, tasarlanan masa ise eğimli olarak kullanılabilir. Mobilyaların ergonomik analizi RULA-Üst Ekstremité Analizi ile gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, elde edilen antropometrik verilere uygun olarak Dijital İnsan Modelleri (DHM) kullanılmıştır. Modeller yoluyla yapılan analizler sayesinde risk değerlendirmeleri yapılmıştır. RULA analizinde ergonomik konumda pozisyonlanan uzuvlar yeşilden kırmızıya doğru renklendirilmiştir. Analizler neticesinde, tasarlanan mobilyanın, bilinen okul mobilyalarına oranla daha iyi RULA skoru elde ettiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** DHM, ergonomik analiz, antropometri, ergonomik tasarım, okul mobilyası.

## Ergonomic Analysis Based on Digital Human Modelling: Adjustable School Furniture Design for Secondary School Students

### ABSTRACT

There are many reasons that affect students' academic achievement and health. One of the reasons is that school furniture is not ergonomic. Designed in this paper are student chairs and desks, which are height adjustable and inclinable, are suitable for the anthropometric characteristics of the students and which would ensure that students maintain their ideal body postures in design oriented classes, especially while making drawings. The student desk and the chair were designed in consideration of the anthropometric data obtained from the students. The height-adjustable seat can be used at three different heights according to the leg length of the students and the designed table can be used inclined. Ergonomically evaluation of the school furniture designed was carried out through RULA – Rapid Upper Limb Analysis. During the tests and the analyses, Digital Human Models (DHM) matching the anthropometric measures determined within the study were used. Risk assessments were conducted in this study with the help of the ergonomics analyses carried out with DHMs. In the RULA analysis, the limbs positioned in the ergonomic position were colored from green to red. As a result of the analysis, it was seen that the designed furniture had a better RULA score than the known school furniture.

**Keywords:** DHM, ergonomics analysis, anthropometry, ergonomic design, school furniture.

### 1. INTRODUCTION

Nowadays, methods in which the students participate in the activities conducted as much as possible are preferred by the educationists over teaching methods, which prevent students from actively participating into the classes [1]. Curriculums are thus being re-considered in a way to ensure learning by doing and living in a simplified manner. However, re-designing the curriculum in such manner would not be adequate in terms of the efficiency of the curriculum. Apart from the re-designed curriculums, the venues in which the

teaching and learning activities are conducted should also be designed to enable performing such activities.

The scientific researches made demonstrate that the wrongdoings in physical environment affect the focus of the students into the subject as well as their behaviour and learning [2]. The school furniture that are not produced in compliance with the anthropometric measurements of the students is one of the most significant of these wrongdoings. Such school furniture may carry forward the muscle-skeleton problems of the students into the adulthood. In children in adolescence period, in which the growth, in particular, rapidly occurs, postural and orthopaedic disorders are often experienced. Therefore,

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

the physical environment and the products used (chairs, desks etc.) should be designed in accordance with their anthropometric measurements. The researches made show that only a limited number of student use school furniture that are fit for their anthropometric measures [3]. Yet, the anthropometric values differ depending on many variables such as age, region, eating and drinking habits, gender, nationality and health [4].

In applied classes in particular, where activities go beyond the writing on the desks, non-ergonomic positions emerge for the students. In consideration of this phenomena, functionality-increased designed are needed. For instance, for a student to do draft-rough copy studies in a Technology and Design class, s/he will need a desk that the tilt angle can be adjusted. The Technology and Design class aim to educate / train individuals who are literate in industrial design, architectural design and graphical design who are able to create unique products, are able present their products and have comprehensive knowledge about the design process. In this class, the students are expected to turn their studies into drawings, models or products. Therefore, the chairs and desk on which the students carry out their studies should be suitable for the anthropometries of the students as well as for making drawings, models and products.

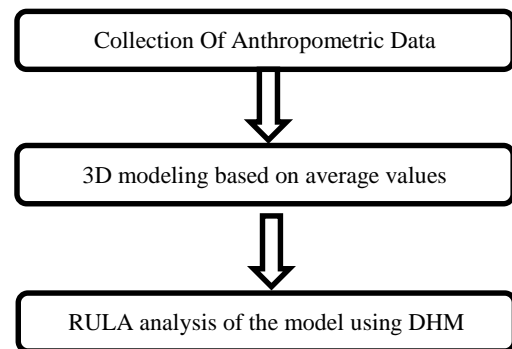
It is seen that some of the student desks being already used in Turkey, where this study is being conducted, are the ones that were produced with the help of the data obtained through the anthropometric studies carried out in United Kingdom or in Germany or ones that were produced based on no such study at all [5]. While use of school furniture produced without taking into account the anthropometric measurements in education /training may result in muscle-skeleton disorders in students, it may decrease the performance of the students as well [6]. This is a real threat in terms of the health of students.

There are few studies made on the design of ergonomic school furniture to be used in drawing making classes especially in design-oriented classes. This grabs attention as a significant shortage. In design of ergonomic furniture, design that is suitable for the anthropometry of the humans is essential. In this study, a study was conducted for this deficiency in the literature.

As seen in literature, studies made on the ergonomically production of the school furniture are quite few in number. The studies are mainly focused on;

- Influence of the existing furniture on the performance of the students and research of the health problems that may arise on the skeleton system,
- Collection and analysis of the data required for the design of furniture that would meet the anthropometric features of the students,
- Determination of the anthropometric measurements for ergonomic school furniture in the light of these data.

The study was carried out in accordance with the process steps in Figure 1.



**Figure 1.** Working Steps

This paper differs from others in research of the health problems the existing furniture of the students pose on the musculoskeletal system, in collection of the anthropometric data to be used in design of ergonomic school furniture and in design of ergonomic school furniture in accordance with these data. The paper makes a contribution to the field by embracing all these three subjects in one. Another significant contribution of this paper to the literature is that a computer-assisted ergonomic analysis of the ergonomic school furniture designed is made. Another important contribution of this article in the literature is the computer-assisted ergonomic analysis of ergonomic school furniture, which was first designed within a previous study [4]. The ergonomic performance of the design has been observed by the DHM-based analysis. With the DHM based ergonomic analysis approach carried out on the furniture design makes it possible to monitor the ergonomic performance that the furniture will demonstrate at the stage of use right at the design stage. This brings innovation to the studies made in the field.

## 2. LITERATURE REVIEW

There are studies in literature made on the ergonomic furniture design. Most of these studies focus on the ergonomics of the furniture used in work stations [7, 8]. The studies, however less in number, made on the ergonomic school furniture considering the anthropometric measurements of the students however, cover the research of the existing situation and theoretical suggestions required for ergonomic design rather than a concrete furniture design. The study of Taifa and Desai is a good sample of these studies. Taifa and Desai made a research on the selection criteria and measurements required for the design of an adjustable desk and a chair for the use of their students and created an anthropometric database [9]. It does not contain a concrete design. The study of Oyewole et al., however, suggests guidelines and a methodology for the design of an ergonomics-oriented school furniture for students. Regression equations were used for the measurements of

the school furniture in the study in which the anthropometric data of twenty grade-1 students were used [10]. The study of Knight and Noyes are intended for the definition of the basic functionality of the school furniture. In the study, it was pointed out that effective school furniture would enhance the effective learning as the postures and behaviours of the students would best be monitored when they are seated apart from the minimising the distracting factors in school furniture [11]. Castelucci et al., made a comparison on three different school furniture sizes in terms of the anthropometric measurements of the students in Valparasi region of Chile for a purpose to observe a possible mismatch. On the study made in 3 different schools in 3 different economic classes, it was seen that the school furniture did not meet the anthropometric requirements [12]. In another study of the very same researchers, they discussed the criteria equation to define the mismatch between the students and the school furniture, applied these criteria on a specific sample and suggested a methodology to assess the suitability of the school furniture based on the results [13, 14]. Agha and Alnahhal, in their studies, endeavoured to estimate measurements in design of school furniture (chairs) for primary school pupils, using ANN – Artificial Neural Networks and regression analysis [15]. Castelucci et al. conducted a study to determine whether the design and/or sizes of the school furniture would affect the physical reactions and/or performances of the students. The

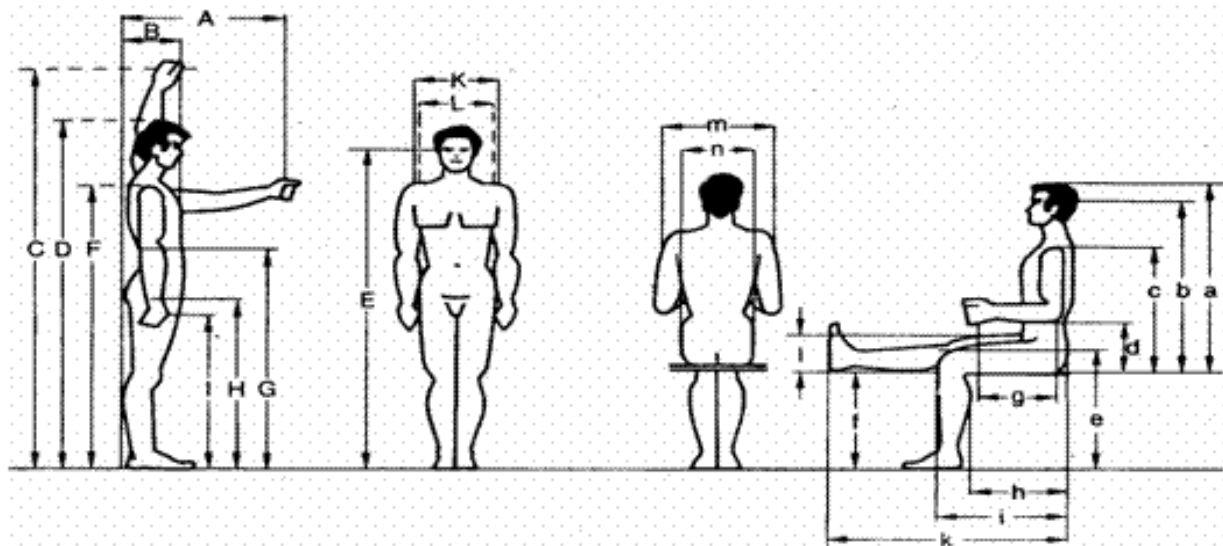
school furniture would minimise the musculoskeletal symptoms among the pupils [17]. In the sampling study conducted by Hoque et al. among 500 university students in four different academic levels, the relation between the body dimensions was evaluated and the coherence between the body dimensions of the students and the school furniture was assessed. Significant mismatches were identified at the end of the study and ergonomic furniture dimensions were suggested [18]. In a similar study, ergonomic suitability of the educational furniture in university conference rooms was evaluated [19]. Results of the study present basic information on the anthropometric measurements of the university students and also on the suitability of the lecture rooms. Jung made and adjustable desk and a chair using the standards suggested by ISO 5970 and instructions of Lueder [20]. The study differs from other studies in containing a concrete product design. However, in that study the products were developed considering the standards rather than an anthropometric study conducted [21].

### 3. RESEARCH METHODOLOGY

#### 3.1 Anthropometry

Anthropometry is a measuring science and application art determining the physical geometry, mass features and strength abilities of the human body. The study field dealing with the metric values measured in static postures and seating positions of the humans is called static

**Table 1.** Significant Anthropometric Measurements for Ergonomic Designs [22].



results of the study revealed that the design of the school furniture did have a positive impact on the in-school behaviour, energy consumption and attention span of the students [16]. Saarni et al. compared the impacts of the ergonomically designed school furniture (desks and chairs) on the musculoskeletal system of the students to that of the conventional furniture. The study failed to confirm the hypothesis that ergonomically designed

anthropometry and the one dealing with the arms, legs and bodies of humans during working is called dynamic anthropometry [28]. Anthropometric measurements and measurement positions are shown in Table 1

Description		Male			Female		
		Lower Limit	Average Value	Upper Limit	Lower Limit	Average Value	Upper Limit
<u>Standing</u>							
A	Frontward Stretching Distance	622	722	787	616	690	762
B	Chest Depth	233	276	318	238	285	357
C	Upward Stretching Distance with Two Arms	1910	2051	2210	1748	1870	2000
D	Height	1629	1733	1841	1510	1619	1725
E	Height of Eye	1509	1613	1721	1402	1502	1596
F	Shoulder Height	1349	1445	1542	1234	1339	1436
G	Elbow Height	1021	1096	1179	957	1030	1100
H	Perineum Height	752	816	806	-	-	-
I	Height of Hand	728	767	828	664	738	803
K	Shoulder Breadth	367	398	428	323	355	308
L	Hip Breadth	310	344	368	314	358	405
<u>Seated</u>							
a	Height of Upper Body	849	907	962	805	857	914
b	Height of Eye	739	790	844	680	735	785
c	Shoulder Height	561	610	655	538	585	631
d	Elbow Height	193	230	280	191	233	278
e	Popliteal Height	493	535	574	462	500	542
f	Height of Calf	399	442	480	351	395	434
g	Elbow–Palm(Gripping Axis) Breadth	237	362	389	292	322	364
h	Body Depth	452	500	552	426	464	532
i	Hip – Popliteal Breadth	554	599	645	530	587	631
k	Hip – Sole Breadth	964	1035	1125	955	1044	1126
l	Femoral Thickness	117	136	157	118	144	173
m	Breadth between Elbows	399	451	512	370	456	544
n	Hip Breadth	325	362	391	340	387	451

Each society has its own unique anthropometric values and knowing these anthropometric values gains favour in all kinds of studies and designs made for the target audience in the fields such as medicine, engineering, architecture and industrial design etc. [23].

Anthropometric data are used in ergonomically determining the physical dimensions of all tools, equipment, furniture and clothing. Therefore, dimensions of the tools and the equipment are made suitable for the users [24, 25]. Without knowing the anthropometric values, rational and correct design of

places cannot be made. However excellent a product is in terms of technicality, if it is not suitable for the measurements and biomechanical features of the user, it cannot be used effectively [26, 27]. Anthropometric data were collected for ergonomic design of school furniture.

As per Hertzberg who evaluated the anthropometric measurements made in 1950's, the most significant 30 measurements for ergonomic designs are height, hip breadth, upper body height from hip, hip-elbow height, height of eye from hip, hip-leg clearance, shoulder breadth, elbow height, shoulder-elbow length, elbow-



hand length, elbow-wrist length, popliteal height, hip height, depth of stomach, thickness of leg, foot length, hand length, hand breadth and palm length [28].

**3.2 RULA (Rapid Upper Limb Assessment) Analysis Method**

Continuous repetition of painful positions while working creates fatigue and may cause skeletal-muscle disorders in the long term [29]. RULA can be used to detect these disorders [30]. Ergonomic analyses of the desk and the chair designed as part of the study were carried out in RULA analysis. RULA – Rapid Upper Limb Assessment Method is a method of survey developed to be used in workplaces where occupational upper limb disorders are reported and in researches made in ergonomics. While this method assesses the muscle functions of the neck, body and upper limb postures, it also enables the rapidly evaluation of the external forces that the body encounters.

In this method, the movements, standing postures, fixed muscle moves and the physical forces the person becomes subjected to, are assigned risk evaluation scores using a series of scoring systems. The risk evaluation scores obtained enables the ergonomic analysis of the project. The scoring is between scales of “1 – Low Risk” and “7 – Highly Risky” Results being too high or too low do not implicitly guarantee a work place is dangerous or safe.

There are two main posture analysis tables in the method, being A and B. Table A lists the arm and wrist analyses

and the table B lists the analyses of neck, trunk and leg. In order to find the score of the Table A, posture angles of upper arm, lower arm and wrist need to be determined. Twists in lower arm and the wrist would affect the score. Another score is added on the score obtained from Table A depending on the muscles being static of continuously working. An additional score is finally added depending on the amount of force or load, the results of the “Arm and Wrist” are obtained to be placed in Table C.

For the score of the Table B, angles of the postures of the neck, trunk and the leg are measured. The values obtained through the scores will give the results for the Table B. Depending on whether the muscles are static or continuously working, a score is added on the values. An additional scoring is performed depending on the amount of the force and the load. Through the results obtained, the score of “Neck, Trunk and Leg” is obtained.

When Table C is considered, the results obtained from Table A are marked on the values in the first column and the results obtained through the Table B are marked on values on the upper lines. Correlation of the two results then gives out the final score of the Table C. If the result is 1 or 2, the risk evaluation is acceptable. If the result is 3 or 4, that indicates that the risk exists, it needs to be evaluated and it may need some amendments. Results being in values of 5 or 6 indicate that the situation needs to be evaluated and corrections will need to be made in the near future. A result in the value of 7 indicates that this way of working is risky (Figure 2).

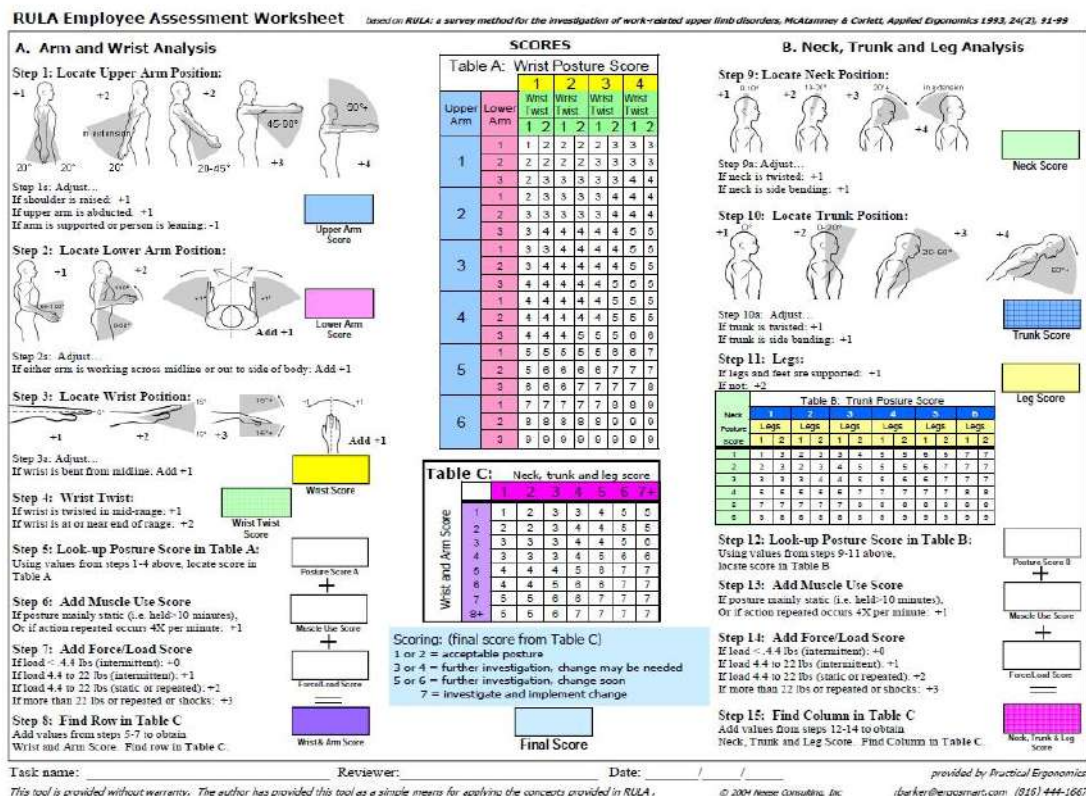


Figure 2. RULA Employee Assessment Work Sheet [31]

The results have the characteristics of a reference guide for taking necessary measures at workplace [32].

Through the RULA Analysis, it is aimed to;

- Present a rapid screening method to mitigate the possible risks of upper limb disorders in relation to the works performed;
- Determine the muscle strains arising based on the standing posture, load being applied and the static and repeated works;

Ensure to obtain results that could be included in a much more sophisticated ergonomics assessment that would cover, too, epidemiologic, physical, cognitive, environmental and organisational factors.

### 3.3 Digital Human Modelling (DHM)

Digital Human Modelling is an approach in which the ergonomic dimensions could be considered at the very early stages of the design developed and an idea could be obtained on how the end user would be affected by the design [33]. It is quite popular study field in recent years, used by many product development units [34, 35]. Digital human modelling techniques have been developed to assist in design and evaluation for a certain labour population. Apart from that, it enables 3D visualisation of the human beings, ergonomic analysis and design of work stations (Figure 3).

DHM, in simple terms, is a design of a human being and the models used are anthropometric. That is, they are visual models having specific abilities and limitations. It is possible to list the features of a suitable DHM as follows [36];

- Inner structure should be able to mimic the human skeleton,
- It should be able to move like a human being and be positioned into real human postures,
- It should be organised in accordance with the data of the society of the anthropometric data will be used,
- It should be able to be integrated into other software.

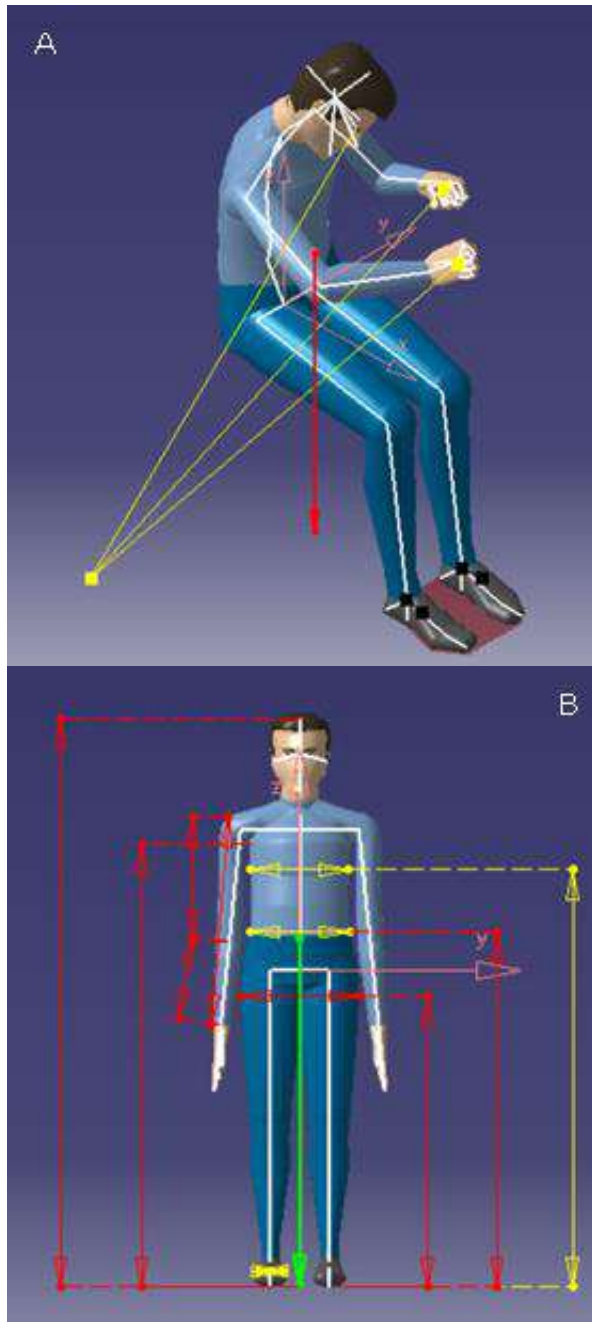
In order to enhance the applicability of the DHM, a data base for the human movements were obtained through HUMOSIM – Human Motion Simulation - Project and this project is extremely significant for the accuracy of the analyses [37, 38]. With DHM, it is possible to carry out applications and assessments in a wide range from postures and movements to joint angles on a CAD software. DHM has positive impacts on design and production processes in terms of cost effectiveness. It provides engineers with the opportunity to assess ergonomics and human factors at the start of the product development stage. At the same time, it reduces the need for real prototypes.

Enterprises, prior to obtaining a prototype, evaluate designs suitable for users with different characteristics in terms of ergonomic measurements and decide on the best design in this method [39].



Figure 3. A sample for Digital Human Modelling [40].

As it is not required to take measurements on a user directly on a design carried out through DHM, it provides engineers with the opportunity think about the design and make modifications from the start of the design to the completion [41]. With these characteristics, Digital Human Modelling is rapidly becoming an effective tool for ergonomics analysis and design. With the ergonomic design & analysis module of CATIA, digital human models in desired sizes (DHM-Manikins) can be created and this manikin can be positioned in any working posture (Figure 4). Therefore, the angles of the joints on the manikin's posture can be digitally measured and thus be used in ergonomic analysis methods such as RULA. With the RULA ergonomic analysis calculation tool available within CATIA ergonomic analysis module, RULA analysis stages can be finalised with the hit of a button. This is actually useful in evaluation of the risk at a workplace as well as amount of ergonomic risks in a design. An ergonomic analysis that is run simultaneously with the design would gain the designer speed and accuracy.



**Figure 4.** (A) Working Posture (B) Digital Human Model created for the anthropometric measurements (Manikin).

#### 4. RESEARCH AND EXPERIMENTAL DESIGN

##### 4.1 Field Research

A research / implementation was carried out on 234 numbers of 7 and 8 grade students in Ipekyolu province of the city of Van in Turkey for the purposes of this study.

The students participated in the study were informed about the study and the measurements to be conducted. Anthropometric data of the students were collected first in the study. Then these data were organized and average anthropometric data belonging to the students were obtained. In the light of the average values obtained, a 3D model of the student desk and the chair was created on a computer. Computer-supported ergonomic analysis of the model was conducted and ergonomically suitability of the desk and the chair for the user was tested. RULA method was used for testing. For the testing and the analysis, Digital Human Models matching the anthropometric measurements obtained as a result of the researches made were used. CATIA V5 software was used for testing, analysis and modelling of these processes. Anthropometric data were collected in January 2017.

Free measurement technique was used in the collection of the anthropometric data as it was economic and practical. It was paid attention that the students participated in the study had no disabilities. Prior to taking measurements, the measuring equipment were calibrated. While taking measurements the students were cared to be as little dressed as possible. First the heights and weights of the participants were measured. Following the measuring of height and weight, the elbow – palm breadth, breadth between elbows, popliteal heights, upper body height, shoulder height, knee height, width of seating area and the depth of seating area of the participants in a static position were measured by means of a steel tape measure. The anthropometric measurements carried out were registered in a data sheet separately for each classroom.

The data recorded in the data collection form were transferred to a digital analysis software. Minimum, average and maximum values of the data transferred to the digital analysis software were taken. With the data obtained, tables and graphs were created.

The study was carried out with 234 Grade 7 and 8 students. Male students constituted %43 of the participant students and female students %57.

Anthropometric data for the participants were recorded in the anthropometric measurement data form given in Table 2 to show the minimum, average and maximum values.



**Table 2.** Anthropometric Measurement Data

ŞEHİT KEMAL GÖRGÜLÜ SECONDARY SCHOOL*		ANTHROPOMETRIC DATA OBTAINED FROM PARTICIPANTS			
S. N.	Anthropometric Measurements Used in Study	Classroom	MIN.	AVE.	MAX.
1	Weight (Kg)	Grade 7	34,2	41,6	58,3
		Grade 8	34,8	53,3	67,1
2	Height (cm)	Grade 7	137	148,1	169
		Grade 8	143	161,1	170
3	Elbow – Palm Breadth (cm)	Grade 7	18	26,2	37
		Grade 8	23	32,9	38
4	Breadth Between Elbows (cm)	Grade 7	29	33,7	46
		Grade 8	26	38,4	50
5	Popliteal Height (cm)	Grade 7	31	38,4	42
		Grade 8	37	43,5	49
6	Upper Body Height (cm)	Grade 7	68	76,4	93
		Grade 8	74	83,5	94
7	Shoulder Height (cm)	Grade 7	49	54,2	64
		Grade 8	49	59,4	70
8	Knee Height (cm)	Grade 7	37	46,7	57
		Grade 8	43	53,1	58
9	Width of Seating Area (cm)	Grade 7	21	29,8	40
		Grade 8	22	35,5	43
10	Depth of Seating Area (cm)	Grade 7	27	38,2	50
		Grade 8	33	45,2	51

As per the anthropometric measurement data given in Table 2, average weight of the participants in Grade 7 is 41,6 kg and that of the ones in Grade 8 is 53,3 kg and general average weight of the participants is 47,5 kg. As per the anthropometric measurements, average height of the participants in Grade 7 is 148,1 cm and that of the ones in Grade 8 is 161,1 cm and general average height of the participants is 154,6 cm.

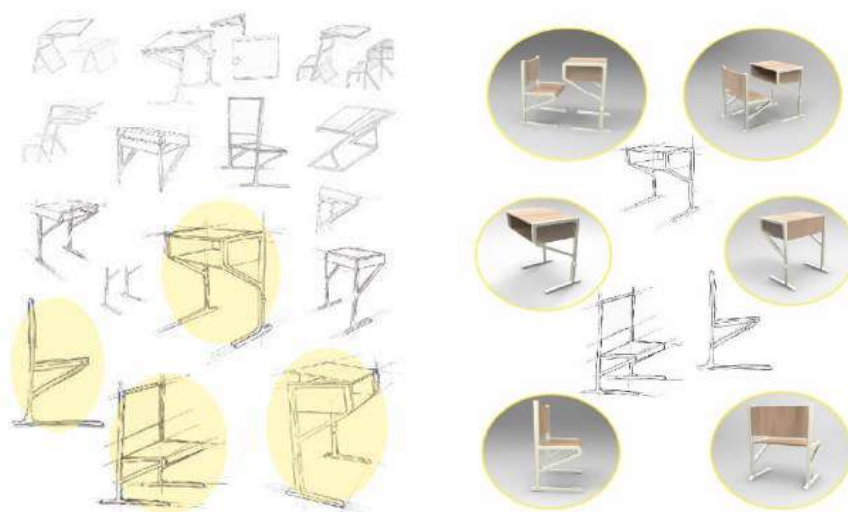
When all of the anthropometric measurement data in Table 2 are considered, it is seen that while the difference between the measurements of the male and female

students is little, the female students have smaller measurements.

Design of the chair was carried out using the average anthropometric measurement data. In the design, the anthropometric measurements of the students were synchronised with the dimensions of the chair. In Figure 5, draft and 3D models of the student desk and chair designed. In Figure 6, technical drawings and 3D models of the student chair designed are shown.

**4.2 Design of Adjustable School Furniture**

In this class, the students are expected to turn their studies into drawings, models or products. Therefore, the chairs



**Figure 5.** 3D Single Desk and Chair Drawings designed for Technology and sketch studies

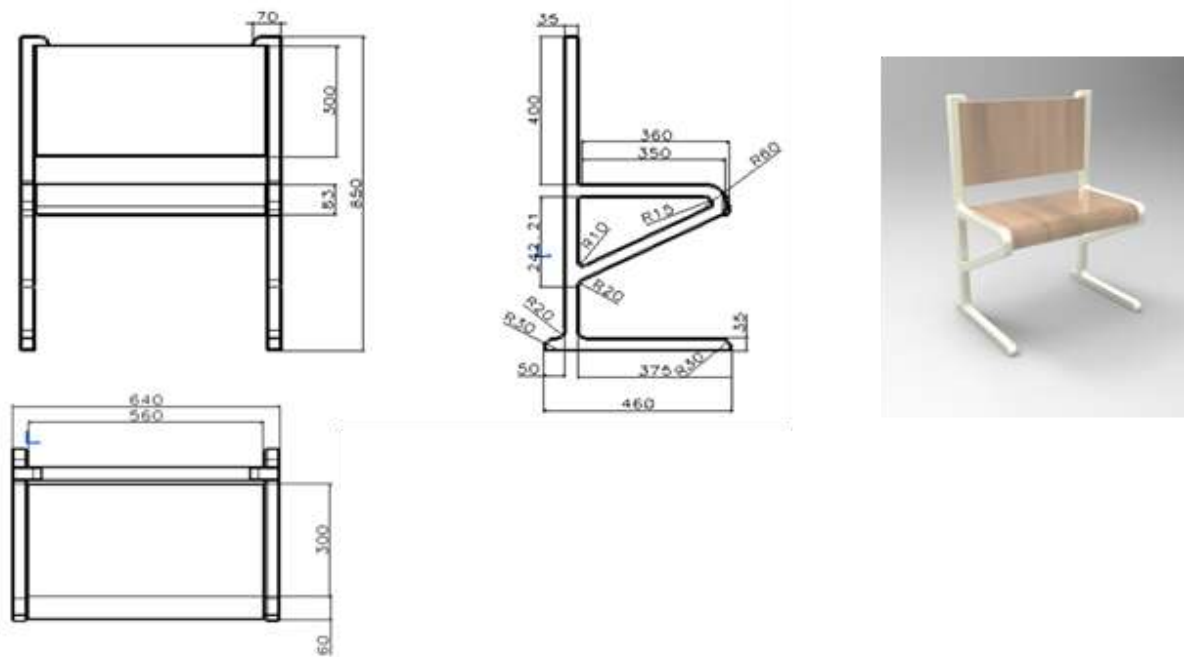
and desk on which the students carry out their studies should be suitable for the anthropometries of the students as well as for making drawings, models and products.

Through the anthropometric measurement study conducted, a 3D desk and chair design was created on a computer software considering the requirements of the Technology and Design class. When determining the dimensions of the desk and the chair, average anthropometric measurement data were used. As the practices in technology and design classes are carried out individually, the desk and the chair were designed to be a single set to enable students to perform their studies without disturbing each other (Figure 5).

When all of the anthropometric measurement data in Table 2 are considered, it is seen that while the difference between the measurements of the male and female students is little, the female students have smaller measurements.

Design of the chair was carried out using the average anthropometric measurement data. In the design, the anthropometric measurements of the students were synchronised with the dimensions of the chair. In Figure 5, draft and 3D models of the student desk and chair designed. In Figure 6, technical drawings and 3D models of the student chair designed are shown.

#### 4.2 Design of Adjustable School Furniture



**Figure 6.** Student Chair Technical Drawing and 3D Model

The data recorded in the data collection form were transferred to a digital analysis software. Minimum, average and maximum values of the data transferred to the digital analysis software were taken. With the data obtained, tables and graphs were created.

The study was carried out with 234 Grade 7 and 8 students. Male students constituted %43 of the participant students and female students %57.

Anthropometric data for the participants were recorded in the anthropometric measurement data form given in Table 2 to show the minimum, average and maximum values.

As per the anthropometric measurement data given in Table 2, average weight of the participants in Grade 7 is 41,6 kg and that of the ones in Grade 8 is 53,3 kg and general average weight of the participants is 47,5 kg. As per the anthropometric measurements, average height of the participants in Grade 7 is 148,1 cm and that of the ones in Grade 8 is 161,1 cm and general average height of the participants is 154,6 cm.

In this class, the students are expected to turn their studies into drawings, models or products. Therefore, the chairs and desk on which the students carry out their studies should be suitable for the anthropometries of the students as well as for making drawings, models and products.

Through the anthropometric measurement study conducted, a 3D desk and chair design was created on a computer software considering the requirements of the Technology and Design class. When determining the dimensions of the desk and the chair, average anthropometric measurement data were used. As the practices in technology and design classes are carried out individually, the desk and the chair were designed to be a single set to enable students to perform their studies without disturbing each other (Figure 5).

In design of the desk, anthropometric measurement data obtained during the study and requirements of the technology and design class were taken into account. In that respect, a model of the desk of which the table-top and the skeleton was dynamic was developed (Figure 7).

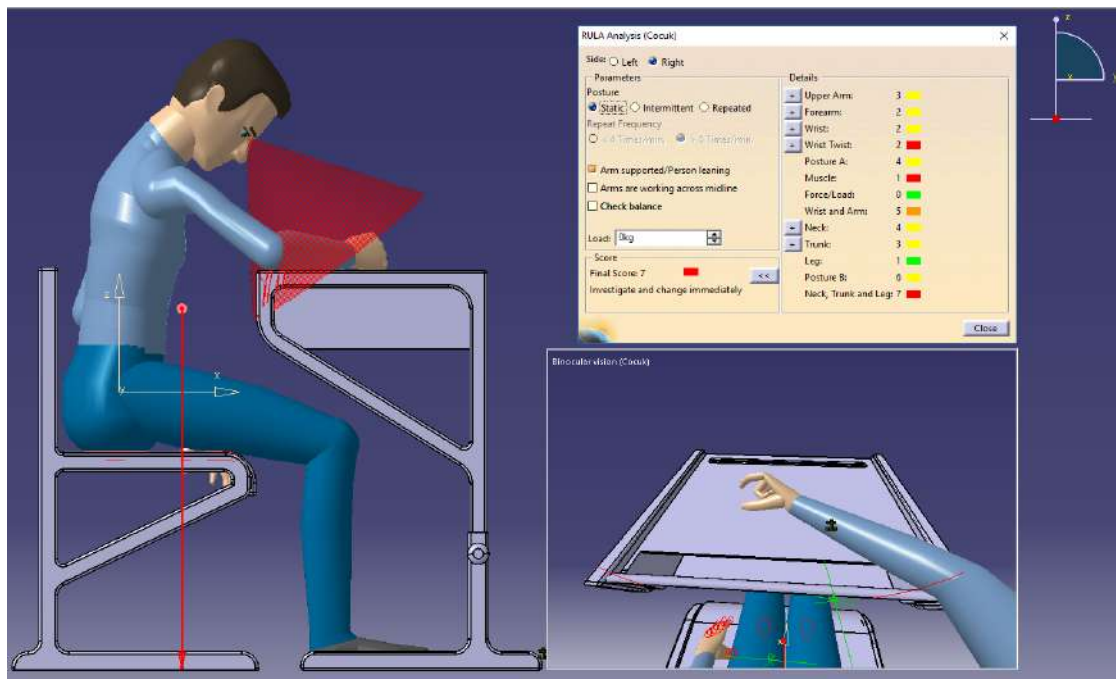




### 5.1. Case 1: Classic School Furniture

Firstly, an analysis was carried out with the table-top flat (0 Degree) and the manikin in writing position (Figure

Posture of the fore arm and the wrist in the writing position affected the ergonomics.



**Figure 10.** Demonstration of Chair Design and Results of RULA Analysis in CATIA Software

10). This position is suitable for design of conventional school chairs. Therefore, the analysis to be carried out would give out the ergonomics score of the conventional student chairs. Then, data such as posture, load borne by the limbs, frequency of the moves and the directions were recorded in relevant sections of the RULA tool. In RULA analysis tool, while it is possible to determine which side of the manikin performing the move is to be assessed, and whether the posture is static, intermittently moving or continuously repeated, the arm support, working area of the arm and the load applied can also be selected. As the child was a right-handed one, right side was chosen and that was the first option. As the move was less than 4 times a minute, “intermittent” option was selected. Arm support was added and the load was specified to be zero. Under these circumstances, the RULA final score was 7. As seen in Figure 10 as well, limbs with ergonomic postures were shown in green and the limbs that disturb the ergonomics were shown in colours other than green. As the ergonomics gets disturbed, the green colour turns into yellow, orange colour and red at the end. The upper arm, fore arm, the wrist, wrist twist, wrist and the arm and dependent on these, the A Score was shown in Yellow to indicate that an ergonomic correction was needed. In this working position, the muscles, load applied, the neck and the lower back are under serious ergonomic risk. This is also reflected in Score B, as well. It was seen the the posture of upper arm and the wrist affected the score most greatly (Table 3). In the first position RULA score was 7. This situation bears considerable amount of ergonomic risks.

### 5.2 Case 2: Adjustable School Furniture

In the second scenario (Case 2), the table-top being flat was inclined by an angle of 15 degrees (Figure 11). On the conditions that the load, repeat of moves and the seating posture would remain the same, only the fore arm was aligned with the table-top. With the new posture of the fore arm, it was seen that the torsion and the twisting in the shoulder and upper arm of the manikin were lessened. With the reducing of the Score of the upper arm, the Score A of the arm and the wrist was also decreased (Figure 11).

Score B was also enhanced compared to Case 1. The design was enhanced thanks to the ability to make instant ergonomic analysis (Table 3). While the muscles and the loads applied in Case 2 are same as that of Case 1, significant enhancements were monitored in scores of wrist and arm as well as neck and body. This was reflected in the Score B. In Case 2, RULA score was 3. This score means a lower ergonomic risk. Comparative ergonomic analysis results showed that the school furniture designed as part of the study could provide better ergonomic study environment compared to the conventional school furniture.

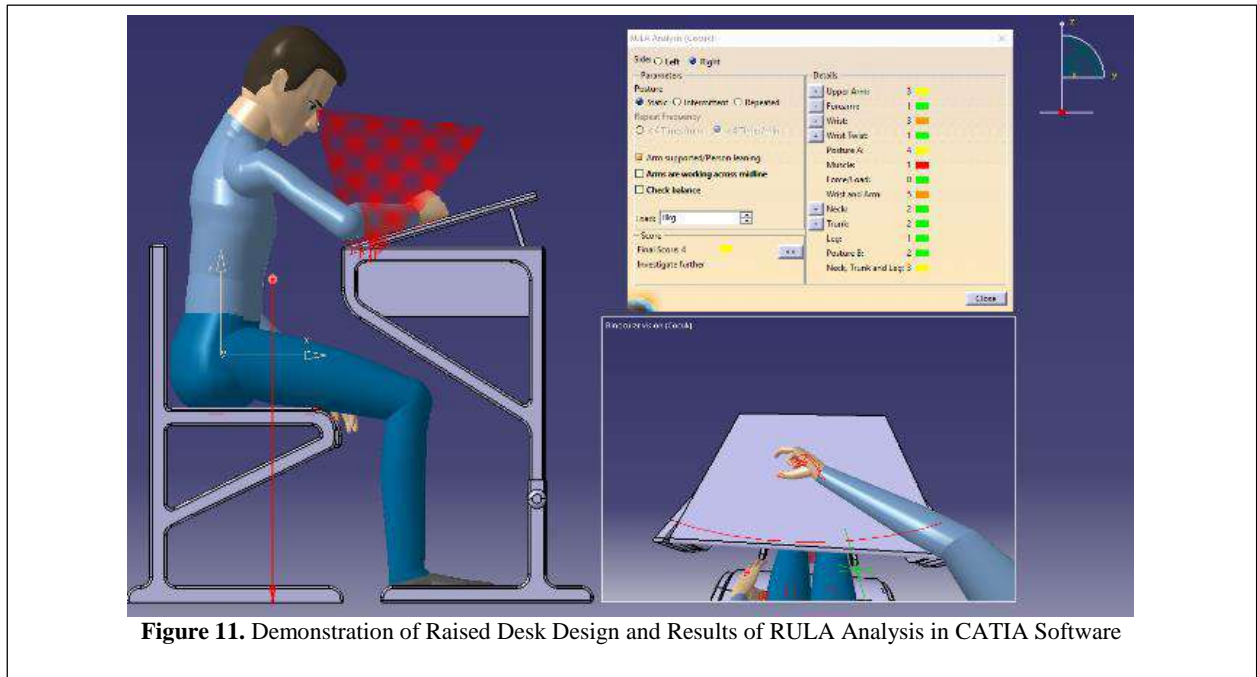


Figure 11. Demonstration of Raised Desk Design and Results of RULA Analysis in CATIA Software

Table 3. Scores' Of Case 1 And Case 2

	Case 1	Case 2
Upper Arm	3	2
Fore Arm	2	2
Wrist	2	2
Wrist Twist	2	1
Posture A	4	3
Muscle	1	1
Force / Load	0	0
Wrist and Arm	5	3
Neck	4	2
Trunk	3	2
Leg	1	1
Posture B	6	2
Neck, Trunk and Leg	7	2
Final Score	7	3

## 6. CONCLUSION

In the studies in literature, it was seen that a majority of the desks and chairs used in existing primary and secondary schools are not suitable for the anthropometric measurements of the students. This is no different in Turkey, either. It was that the desks and chairs used in Turkey were produced taking into account the German or British measurements or produced with no consideration of anthropometric measurements, at all.

The fact that the study was performed in DHM approach, provided monitoring of the effects of the design on the user in a digital medium and provided researchers with the opportunity to think and make amendments on the design. Through the RULA analysis, all anatomic effects of the design on the user were seen and it was decided whether the design needed enhancements or not. DHM approach and the RULA analysis provided researchers

with advantages in terms of time and cost. There were small deviations in the measurements. This is mainly due to the fact that length measurements are made with hand tools, not digital devices.

The ergonomic analysis carried out demonstrated that the desk and the chair designed as a result of the anthropometric data were suitable for the use of the Grade 7 and 8 Students. It was seen that the dynamic table-top of which the inclination was controlled was ergonomically suitable as long as the students maintain their postures. With these school furniture of which the 3D modelling and ergonomic analysis were carried out, it is envisaged that students would experience a comfortable, easy and healthy design process in Technology and Design classes by maintaining their postures.

In future studies, a general study can be conducted by selecting children of the same age level from different regions of the country. Digital measuring devices can be used in the works. In those studies, the use of DHM and RULA will be very advantageous in terms of time and cost. More functional row and table design can be realized. The table top should be able to be used in several different angles. Studies can intensify in this direction.

## DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS

The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission..

## REFERENCES

- [1] Aydın G., Balım AG. "Yapılandırıcı yaklaşıma göre modellendirilmiş disiplinler arası uygulama: enerji konularının öğretimi", *Ankara Üniversitesi Eğitim Bilimleri Fakültesi Dergisi*, 38(2), 145-166.

- [2] Yeats B. "Factors that may influence the postural health of schoolchildren (K12)", *Work*, 9: 45-55, (1997).
- [3] Açıık E., Kayıhan H., Aran, OT. "Investigation of anthropometric suitability of school furniture in primary schools-a pilot study", *Journal of Occupational Therapy and Rehabilitation*, 2: 131-140, (2014).
- [4] Sarı Mİ, Şahin İ., Eldem C., Kiraz C., Şahin T. 2017. "A new ergonomic school furniture design for technology and design teaching", *1st International Turkish World Engineering and Science Congress*, Antalya, Turkey, 245-253, (2017).
- [5] Akın G., Gültekin T., Bektaş Y., Önal S., Tuncel E. "Sequence design for the university students", *DTCF Journal*, 54: 269-286, (2014).
- [6] Bendak S., Al-Saleh K., Al-Khalidi A. "Ergonomic assessment of primary school furniture in united arab emirates", *Occupational Ergonomics*, 11: 85-95, (2013).
- [7] Sigurdsson SO., Artnak M., Needham M., Wirth O., Silverman K. "Motivating ergonomic computer workstation setup: sometimes training is not enough", *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 18: 27-33, (2012).
- [8] Burgess-Limerick R., Plooy A., Ankrum D. "The influence of computer display height on head and neck posture1", *International Journal Of Industrial Ergonomics*, 23: 171-179, (1999).
- [9] Taifa IW., Desai DA. "Anthropometric measurements for ergonomic design of students' furniture in India", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20: 232-239, (2017).
- [10] Oyewole SA., Haight JM., Freivalds A. "The ergonomic design of classroom furniture/computer work station for first graders in the elementary school", *International Journal of Industrial Ergonomics*, 40: 437-447, (2010).
- [11] Knight G., Noyes JAN. "Children's behaviour and the design of school furniture", *Ergonomics*, 42: 747-760, (1999).
- [12] Castellucci HI., Arezes PM., Viviani CA. "Mismatch between classroom furniture and anthropometric measures in Chilean schools", *Applied ergonomics*, 41: 563-568, (2010).
- [13] Castellucci HI., Arezes PM., Molenbroek JFM. "Applying different equations to evaluate the level of mismatch between students and school furniture", *Applied ergonomics*, 45: 1123-1132, (2014).
- [14] Castellucci HI., Arezes PM., Molenbroek JFM. "Equations for defining the mismatch between students and school furniture: A systematic review", *International Journal of Industrial Ergonomics*, 48: 117-126, (2015).
- [15] Agha SR., Alnahhal MJ. "Neural network and multiple linear regression to predict school children dimensions for ergonomic school furniture design", *Applied ergonomics*, 43: 979-984, (2012)..
- [16] Castellucci HI., Arezes PM., Molenbroek JFM., De Bruin R., Viviani C. "The influence of school furniture on students' performance and physical responses: results of a systematic review", *Ergonomics*, 60: 93-110, (2017).
- [17] Saarni LA., Rimpelä AH., Nummi TH., Kaukiainen A., Salminen JJ., Nygård CH. "Do ergonomically designed school workstations decrease musculoskeletal symptoms in children? A 26-month prospective follow-up study", *Applied ergonomics*, 40: 491-499, (2009).
- [18] Hoque ASM., Parvez MS., Halder PK., Szecsi T. "Ergonomic design of classroom furniture for university students of Bangladesh", *Journal of Industrial and Production Engineering*, 31, 239-252, (2014).
- [19] ISO 5970. "Furniture: chairs and tables for educational institutions: functional sizes", *International Organization for Standardization (ISO)*, (1979).
- [20] Lueder R. "The ergonomics payoff: Designing the electronic Office", Nichols Pub Co, New York, (1986).
- [21] Jung HS. "A prototype of an adjustable table and an adjustable chair for schools", *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35: 955-969, (2005).
- [22] Url: Kaslar, Çalışmaları ve Antropometri. <http://enm.blogcu.com/kaslar-calismalari-ve-antropometri-5/2661306>, (accessed 23 July 2017).
- [23] Güleç E., Akın G., Sağır M., Koca Özer B., Gültekin T., Bektaş Y. "Anadolu insanının antropometrik boyutları: 2005 yılı Türkiye antropometri anketi genel sonuçları", *Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi*, 49, 187-201, (2009).
- [24] Dizdar EN. "Ergonomik iş istasyonu tasarımında ilk adım 'Antropometri'", *Mesleki Sağlık ve Güvenlik Dergisi(MSG)*, 4: 38-44, (2003).
- [25] Güler Ç., Vaizoğlu SA., Tekbaş ÖF. "Temel ergonomi kavramları", *Mesleki Sağlık ve Güvenlik Dergisi(MSG)*, 1: 22-26, (2000).
- [26] Özok AF. "Ergonomik açıdan çalışma yeri düzenleme ve antropometri", Türk Metal Sendikası, Ankara, (1988).
- [27] Şimşek M. "Mühendislikte ergonomik faktörler", *Marmara Üniversitesi Yayınları*, İstanbul, (1994).
- [28] Hertzberg HTE. "Dynamic anthropometry of working positions", *Human Factors*, 2: 147-155, (1960).
- [29] Eldem C., Şahin İ., Demir MT., Top N., Şahin T. "Araç bakım kanallarının dijital insan modelleri ile ergonomik analizi ve yeniden tasarımı", *Mühendislik Bilimleri Ve Tasarım Dergisi*, 7(2): 386-392, (2019).
- [30] Eldem C., Top N., Şahin H. "Dijital insan modelleri kullanılarak otomobil sürücüsü duruş pozisyonlarının ergonomik değerlendirilmesi üzerine bir çalışma", *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi (GMDB)*, 5(1): 22-31, (2019).
- [31] *RULA Employee Assessment Worksheet*, Neese Consulting Inc., USA, (2004).
- [32] McAtamney L., Corlett EN. "RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders", *Applied Ergonomics*, 24: 91-99, (1993).
- [33] Demirel HO., Duffy VG. "Applications of digital human modeling in industry. In: V. G. Duffy (Ed.)", *Digitalhumanmodeling,Hcii2007,LNCS4561*, 824-832, Berlin, Heidelberg, (2007).
- [34] Faraway J., Reed MP. "Statistics for digital human motion modeling in ergonomics", *Technometrics*, 49: 277-290, (2007).
- [35] Liang MA., Wei Zhang, Huanzhang FU, Yang GUO, Chablat D., Bennis F. "A framework for interactive work design based on digital work analysis and simulation", *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 20: 339-352, (2010).
- [36] Dischinger Jr HC. "Digital Human Modeling", *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*, USA, (2017).

- [37] Chaffin DB. “On simulating human reach motions for ergonomics analyses”, *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 12: 235–247, (2007).
- [38] Chaffin DB. “Human motion simulation for vehicle and workplace design”, *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 17: 475–484, (2007).
- [39] Naumann A., Roetting M. “Dijital human modelling for design and evaluation of human-machine systems”, *MMI-Interaktiv*, (2007).
- [40] Lämkuil D., Hanson L., Örtengren R. “A comparative study of digital human modelling simulation results and their outcomes in reality: a case study within manual assembly of automobiles”, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39: 428-441, (2009).
- [41] Chaffin DB. “Improving digital human modelling for proactive ergonomics in design”, *Ergonomics*, 48: 478–491, (2005).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# PID parametrelerinin LQR ve GA tabanlı optimizasyonu: sıvı seviye kontrol uygulaması

## *LQR and GA based PID parameter optimization: liquid level control application*

*Yazarlar (Authors):* Gökhan YÜKSEK<sup>1</sup>, Ahmet Naci METE<sup>2</sup>, Alkan ALKAYA<sup>3</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-6832-8622

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-0406-8577

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0002-8235-6726

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Yüksek G., Mete A. N. ve Alkaya A., "PID parametrelerinin LQR ve GA tabanlı optimizasyonu: sıvı seviye kontrol uygulaması", *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1111-1119, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.603344

# PID Parametrelerinin LQR ve GA Tabanlı Optimizasyonu: Sıvı Seviye Kontrol Uygulaması

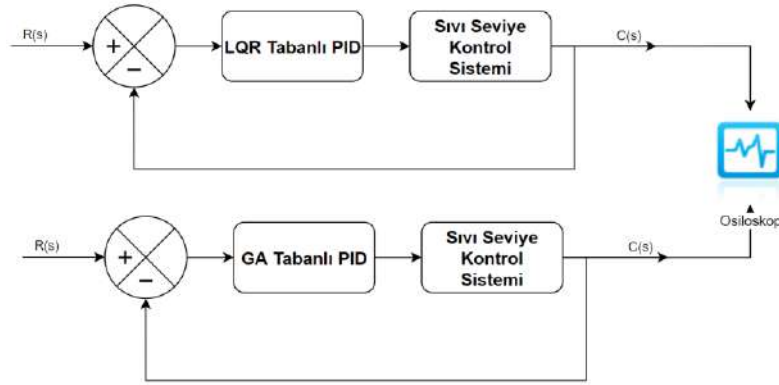
## LQR and GA based PID Parameter Optimization: Liquid Level Control Application

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Doğrusal Karesel Düzenleyici / Linear Quadratic Regulator
- ❖ Genetik Algoritma / Genetic Algorithm.
- ❖ PID Ayarlama / PID Tuning

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

İki farklı yöntem kullanılarak tasarlanan PID denetleyicilerin deneysel olarak karşılaştırması yapılmıştır.



Şekil. LQR Tabanlı PID vs GA Tabanlı PID / Figure.0 LQR Based PID vs GA Based PID

### Amaç (Aim)

Bu çalışmada iki farklı metot kullanılarak PID parametre ayarlaması yapılmıştır. / In this study, PID parameter tuning was made by using two different methods.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

İlk olarak Doğrusal Karesel Düzenleyici (LQR) yaklaşımı kullanılarak maliyet fonksiyonu minimize edilmiş ve optimal parametreler elde edilerek LQR tabanlı PID denetleyici tasarlanmıştır. Ardından LQR maliyet fonksiyonunun minimizasyonu için Genetik Algoritma (GA) kullanılmış ve GA tabanlı PID denetleyici tasarlanmıştır. / Firstly, LQR based PID controller is designed by minimizing the cost function by obtaining Linear Quadratic Regulator (LQR) approach. Then Genetic Algorithm (GA) was used for minimizing the LQR cost function and GA based PID controller was designed.

### Özgünlük (Originality)

Tasarlanan PID denetleyiciler bir sıvı seviye kontrol sisteminde benzetimsel ve deneysel olarak test edilmiş ve performans karşılaştırmaları yapılmıştır. / The designed PID controllers have been simulated and experimentally tested in a liquid level control system and performance comparisons have been made.

### Bulgular (Findings)

Deneysel sonuçlar, GA tabanlı PID'nin performansının LQR tabanlı PID'den performans indisleri açısından daha başarılı olduğunu göstermektedir. / Experimental results show that the performance of the GA based PID is better than LQR based PID in terms of performance indices.

### Sonuç (Conclusion)

GA Tabanlı PID için normalize edilmiş ITSE indisi 0.6479 ile daha başarılı performans sergilemiştir. / Normalized ITSE index of 0.6479 is achieved for better performing GA based PID.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.



# PID Parametrelerinin LQR ve GA Tabanlı Optimizasyonu: Sıvı Seviye Kontrol Uygulaması

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Gökhan YÜKSEK, Ahmet Naci METE\*, Alkan ALKAYA**

Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mersin Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 07.08.2019 ; Kabul/Accepted : 22.10.2019)

## ÖZ

Bu çalışmada iki farklı metot kullanılarak PID parametre ayarlaması yapılmıştır. İlk olarak Doğrusal Karesel Düzenleyici (LQR) yaklaşımı kullanılarak maliyet fonksiyonu minimize edilmiş ve optimal parametreler elde edilerek LQR tabanlı PID denetleyici tasarlanmıştır. Ardından LQR maliyet fonksiyonunun minimizasyonu için Genetik Algoritma (GA) kullanılmış ve GA tabanlı PID denetleyici tasarlanmıştır. Tasarlanan PID denetleyiciler bir sıvı seviye kontrol sisteminde benzetimsel ve deneysel olarak test edilmiş ve performans karşılaştırmaları yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, GA tabanlı PID'nin performansının LQR tabanlı PID'den performans indisleri açısından daha başarılı olduğunu göstermektedir. GA Tabanlı PID için normalize edilmiş ITSE indisi 0.6479 ile daha başarılı performans sergilemiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Doğrusal karesel düzenleyici, PID ayarlama, genetik algoritma.

## LQR and GA based PID Parameter Optimization: Liquid Level Control Application

### ABSTRACT

In this study, PID parameter tuning was made by using two different methods. Firstly, LQR based PID controller is designed by minimizing the cost function by obtaining Linear Quadratic Regulator (LQR) approach. Then Genetic Algorithm (GA) was used for minimizing the LQR cost function and GA based PID controller was designed. The designed PID controllers have been simulated and experimentally tested in a liquid level control system and performance comparisons have been made. Experimental results show that the performance of the GA based PID is better than LQR based PID in terms of performance indices. Normalized ITSE index of 0.6479 is achieved for better performing GA based PID.

**Keywords:** Linear quadratic regulator, PID tuning, genetic algorithm.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geleneksel PID denetleyiciler basitliği, kolay uygulanabilirliği ve ucuz maliyeti sebepleriyle süreç endüstrisinde en sık kullanılan kontrol tekniklerinden birisidir [1]. Ancak PID denetleyici tasarımında karşılaşılan en önemli sorunlardan bir tanesi PID parametrelerinin gerçek zamanlı uygulamalar için optimum olarak ayarlanmasıdır. Geleneksel PID denetleyicilerin değişen süreç dinamiklerine karşı yeterince gürbüz olmayışı nedeniyle istenilen performans hedeflerinin başarımında yetersiz kalışları, araştırmacıları PID denetleyicilerde optimal tasarım yöntemleri üzerine çalışmalar yapmaya yöneltmiştir [2]. Literatürde bu konuda yapılmış çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Parametre ayarlama yöntemleri olarak bu çalışmalar üç ana başlık altında sınıflandırılabilirler; deneysel metodlar (Ziegler-Nichols (ZN)), analitik metodlar (Root Locus), ve optimizasyon tabanlı metodlar (İteratif Geribeslemeli Ayarlama (IFT)) [3]. Tüm bu metodlar arasında en bilinen ve en çok kullanılan ZN metodudur [4]. Süreç endüstrisinin çok geniş bir alanında

başarılı uygulamaları vardır. Fakat gürbüz bir teknik olmadığından dolayı sistem dinamikleri değiştiğinde geçiş rejimi cevabı kabul edilebilir sınırların ötesine çıkabilmektedir. Süreç endüstrisindeki sistemlerin büyük çoğunluğunun zamanla değişen dinamik sistemler olduğu göz önüne alındığında, sistemin çevresel etkilerden en az etkilenecek şekilde kontrol edilmesi için uyarlamalı ve optimal kontrol ayarlama teknikleri, ZN metoduna göre daha başarılı olmaktadır [5].

Son yıllarda PID parametrelerinin ayarlanmasında yapay zekâ algoritmaları sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Nagaraj ve arkadaşlarının çalışmalarında PID parametre ayarlamasında yapay zekâ kullanımının çok fazla avantajı olduğuna değinilmiştir. Yüksek dereceli sistemlere uygulanabilirliği, farklı kontrol tekniklerinin dengeli şekilde birlikte kullanımına olanak sağlaması, hızlı hesaplama ile çok kısa süre içerisinde optimizasyonun gerçekleşmesi gibi avantajlar yapay zekâyı bu alanda ilgi çekici hale getirmektedir [6]. Lin ve Liu'nun çalışmalarında adaptif genetik algoritma ile PID parametrelerini ayarlayarak yükselme zamanı, sistemin referans sinyali ve çıkışı arasındaki hata sinyalinin mutlak zaman integrali ve kontrol sinyalinin karesinin ağırlık matrisleriyle çarpılarak toplanmasıyla elde edilen

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : mete@mersin.edu.tr

bir maliyet fonksiyonu kullanılmıştır. Kullanılan maliyet fonksiyonunun global minimumu bulunarak optimal PID parametreleri ayarlanmış ve geleneksel metotlara göre daha başarılı sonuçlar alındığı gösterilmiştir [3]. Wati ve Hidayat'ın çalışmasında kullanılan genetik algoritma için minimize edilecek maliyet fonksiyonu olarak sistemin birim basamak cevabından elde edilen maksimum tepe aşma noktası ve durulma süresi kullanılmıştır. Bu iki parametre hata olarak alınmış ve global minimum yakalanmaya çalışılmıştır [7]. Bu konuda kullanılan diğer bir yapay zekâ yöntemi ise yapay balık sürüsü algoritmasıdır. Cheng and Hong'un çalışmasında besin konsantrasyon fonksiyonu olarak İntegral Zaman Mutlak Hata (ITAE) indisi kullanılmıştır. Bu indisin minimize edilmesiyle PID parametreleri ayarlanmıştır [8]. Fang ve Chen'in çalışmasında PID parametre ayarlaması, başka bir yapay zekâ uygulaması olan Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) kullanılarak hidrolik türbin hızı kontrolü için gerçekleştirilmiştir. Maliyet fonksiyonu olarak maksimum tepe aşımı, durulma süresi ve kalıcı durum hatası kullanılmış ve ITAE kriteri ile optimizasyon gerçekleştirilmiştir [9]. Sravan ve arkadaşlarının çalışmalarında ise doğrusal ters sarkaç için PID denetleyici parametreleri GA kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada maliyet fonksiyonu olarak ITAE kriteri kullanılmıştır. Deneysel olarak yapılan çalışmanın sonucunda geleneksel ZN metoduna göre daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir [10].

Son yıllarda PID parametrelerinin ayarlanmasında LQR metodu kullanılarak PID denetleyiciye optimallik ve gürbüzlük (robust) özellikleri kazandırılmaya çalışılmaktadır. LQR denetleyicilerde sistem performansı ile kontrol enerjisi arasında bir ödünleşim mevcuttur. Bu iki kriter arasındaki denge ise Q ve R ağırlık matrisleri kullanılarak maliyet fonksiyonunun minimize edilmesi ile sağlanmaktadır. PID parametrelerinin de aynı yöntemle elde edilebileceği çalışmalarla ispatlanmıştır. Al-Smadi ve Mahmoud, çalışmalarında LQR denetleyiciler için kullanılan maliyet fonksiyonunu kullanarak PID denetleyici parametrelerini elde etmiş ve fotovoltaiik sistemlerin gerilim kontrolünde kullanmıştır. Çalışma sonucunda Maksimum Güç Noktası İzleme algoritması ile işaret edilen gücü bu yöntemle de elde etmişlerdir [11]. Saleem ve Rizwan ise LQR tabanlı PID metodunu DC-DC Buck dönüştürücünün çıkış gerilim regülasyonunu geliştirmek için kullanmış ve başarılı sonuçlar elde etmişlerdir [12].

GA ve diğer global optimizasyon teknikleri optimal kontrol tekniklerinde çeşitli şekillerde kullanılmaktadır. Wang ve arkadaşları çalışmalarında GA kullanarak LQR ağırlık matrislerini optimal olarak elde etmiştir [13]. Das ve arkadaşları ise çalışmalarında PID parametrelerinin ayarlanmasında LQR maliyet fonksiyonunun yanı sıra, maliyet fonksiyonunun ağırlık matrislerine karar vermek için de genetik algoritmadan faydalanmışlardır [14].

Yapılan bu çalışmada iki farklı optimal PID denetleyicinin bir sıvı seviye kontrol sistemindeki performans karşılaştırması yapılmıştır. İlk olarak ağırlık matrislerine matematiksel olarak karar verilen LQR

maliyet fonksiyonundan faydalanılarak LQR tabanlı PID denetleyici tasarlanmıştır. Daha sonra genetik algoritma optimizasyon tekniği kullanılarak optimum maliyet fonksiyonu elde edilmiş ve GA tabanlı PID denetleyici tasarlanmıştır. Deneysel sistem olarak süreç endüstrisinde, yiyecek işleme, içecek, süt ürünleri, filtreleme, atık su arıtımı, ilaç endüstrisi, su arıtma sistemleri, endüstriyel kimyasal işleme ve sprey kaplama ve otomatik sıvı dağıtım ve doldurma cihazları gibi kullanım alanları oldukça yaygın olan tank sıvı seviye kontrol sistemi seçilmiştir. Deneysel sonuçlar performans indisleriyle kıyaslanmıştır.

Bu çalışmanın sonraki bölümleri şu şekilde organize edilmiştir; 2. Bölümde PID denetleyiciler hakkında genel bilgi verilmiş, 3. Bölümde LQR tabanlı PID denetleyici tasarımı için gereken matematiksel çıkarımlar sunulmuş, 4. Bölümde GA tabanlı PID tasarımı için algoritma akış şeması verilmiş ve bu çalışmada kullanılan maliyet fonksiyonu açıklanmış, 5. Bölümde deneysel çalışma için kullanılan sıvı seviye sisteminin modellenmesi anlatılmış, benzetim çalışmalarının sonuçları 6. Bölümde, deneysel çalışmaların sonuçları ise 7. Bölümde verilmiş, son bölümde ise elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve iki metodun performans kıyaslamaları yapılmıştır.

## 2. LQR TABANLI PID DENETLEYİCİ (LQR BASED PID CONTROLLER)

PID parametrelerinin ayarlanmasında LQR maliyet fonksiyonu kullanılabilir. Bu şekilde optimal PID denetleyici tasarımı mümkün olmaktadır. Saha ve arkadaşlarının çalışmalarında PID parametre ayarlanmasında LQR yaklaşımı verilmiştir [15]. Bu yaklaşımda, PID optimal denetleyici kazanımlarını elde etmek için hata, hata oranı ve hatanın integrali durum değişkenleri olarak kabul edilmiştir. Şekil 1'de LQR tabanlı PID parametre ayarlaması için blok diyagramı verilmiştir. Durum değişkenleri;

$$x_1(t) = \int e(t)dt \quad (1)$$

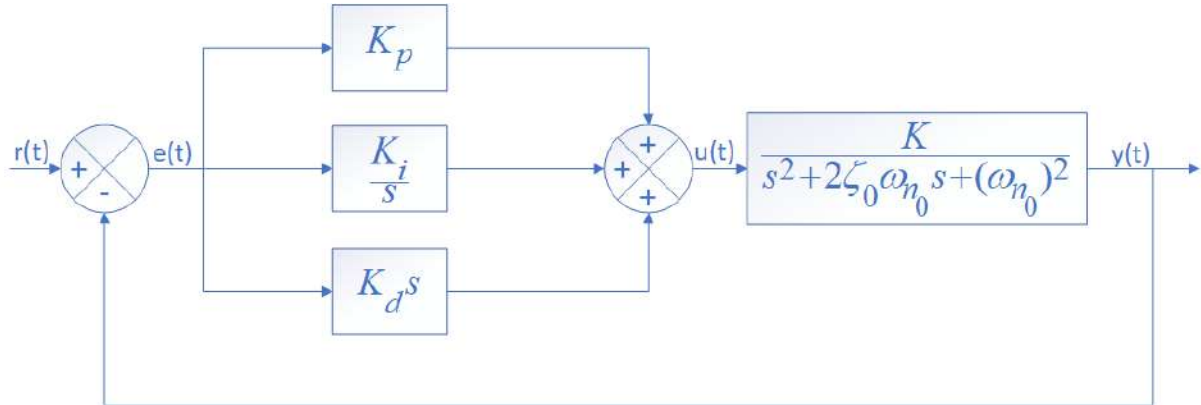
$$x_2(t) = e(t) \quad (2)$$

$$x_3(t) = \frac{d}{dt} e(t) \quad (3)$$

olarak tanımlanmışlardır.

Şekil 1'de görüldüğü gibi süreç modeli 2. dereceden tek girişli ve tek çıkışlı olarak kabul edilmiştir. Hata sinyali  $e(t)$  ile kontrol sinyali  $u(t)$  arasındaki ilişki  $r(t) = 0$  için;

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{s^2 + 2\zeta_0\omega_{n_0}s + (\omega_{n_0})^2} = \frac{-E(s)}{U(s)} \quad (4)$$



Şekil 1. LQR tabanlı PID parametre ayarlanması için blok diyagramı (Block diagram for LQR based PID parameter tuning)

$$[s^2 + 2\zeta_0\omega_{n_0}s + (\omega_{n_0})^2]E(s) = -KU(s) \quad (5)$$

şeklinde elde edilir.

(5) numaralı denkleme ters Laplace dönüşümü uygulandığında (6) numaralı denklem edilir.

$$\ddot{e} + 2\zeta_0\omega_{n_0}\dot{e} + (\omega_{n_0})^2e = -Ku \quad (6)$$

(1)-(3) denklemleri ile verilen durum değişkenleri için sürece ait kontrol edilebilir kanonik formdaki durum uzay modeli;

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & (-\omega_{n_0})^2 & -2\zeta_0\omega_{n_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -K \end{bmatrix} u \quad (7)$$

şeklini alır.

Genel durum uzay modeli  $\dot{x} = Ax + Bu$  olmak üzere sistem matrisi  $A$  ve giriş matrisi  $B$ ;

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & (-\omega_{n_0})^2 & -2\zeta_0\omega_{n_0} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -K \end{bmatrix}$$

şeklinindedir.

Sistemden optimal performans elde etmek amacıyla LQR maliyet fonksiyonunun minimize edilmesi gerekmektedir. LQR maliyet fonksiyonu denklem (9)'da verilmiştir.

$$J = \int_0^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)]dt \quad (9)$$

Denklem (10)'da verilen Sürekli Cebirsel Riccati denkleminin çözümüyle (9) ile verilen maliyet fonksiyonunu minimize eden kontrol girişi (11)'deki gibi elde edilir.

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (10)$$

$$u(t) = -R^{-1}B^T Px(t) = -Fx(t) \quad (11)$$

Burada  $P$  Sürekli Cebirsel Riccati denkleminin simetrik pozitif tanımlı çözümü,  $Q$  yarı pozitif tanımlı bir matris ve  $R$  ise süreç tek girişli olduğu için pozitif bir sabittir. Genel olarak optimal kontrol girişini elde edebilmek için  $R$  matrisi sabit tutulurken  $Q$  matrisi değiştirilir.

Denklem (11)'den durum geri-besleme kazanç vektörü;

$$F = R^{-1}[0 \quad 0 \quad -K] \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{12} & P_{22} & P_{23} \\ P_{13} & P_{23} & P_{33} \end{bmatrix}$$

$$= -R^{-1}K[P_{13} \quad P_{23} \quad P_{33}]$$

$$= -[K_i \quad K_p \quad K_d] \quad (12)$$

olarak elde edilir. Durum geri besleme kazancının ilk elemanı integratör kazancı, ikinci elemanı oransal kontrol kazancı, son elemanı ise türevsel kontrol kazancıdır. Bu durumda kontrol sinyali denklem (13) ile ifade edilir.

$$u(t) = -Fx(t) = [K_i \quad K_p \quad K_d] \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix}$$

$$= K_i \int e(t)dt + K_p e(t) + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (13)$$

Simetrik pozitif tanımlı matrisin 3. sütunu PID denetleyici parametrelerini vermektedir. Bu parametreler;

$$P_{13} = \frac{K_i}{R^{-1}K},$$

$$P_{23} = \frac{K_p}{R^{-1}K},$$

$$P_{33} = \frac{K_d}{R^{-1}K}, \quad (14)$$

şeklinindedir.

Kapalı döngü sistem matrisi  $A_c$  denklem (15) ile verilmiştir.

$$A_c = A - BF = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ A_{c31} & A_{c32} & A_{c33} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Burada,

$$A_{c31} = -R^{-1}K^2 P_{13}$$

$$A_{c32} = (-\omega_{n_0})^2 - R^{-1}K^2 P_{23}$$

$$A_{c33} = -2\zeta_0\omega_{n_0} - R^{-1}K^2 P_{33}$$

olarak hesaplanır. Bu durumda kapalı döngü sistemin karakteristik denklemi (16) ile verilmiştir.

$$\Delta(s) = |sI - A_c|$$

$$= s^3 + (-A_{c33})s^2 + (-A_{c32})s + (-A_{c31}) \quad (16)$$

Kapalı döngü sistem için istenen sönümlenme oranı  $\zeta_c$  ve doğal frekans  $\omega_{nc}$  olmak üzere istenen karakteristik denklem  $\Delta_i(s)$  şu şekilde ifade edilsin;

$$\Delta_i(s) = (s^2 + 2\zeta_c\omega_{nc}s + \omega_{nc}^2)(s + d\zeta_c\omega_{nc})$$

$$= s^3 + ((2+d)(\zeta_c\omega_{nc})s^2 + ((\omega_{nc})^2 + 2d(\zeta_c\omega_{nc})^2)s + d\zeta_c^2(\omega_{nc})^3) \quad (17)$$

Burada  $d$ , 3. kutup değerinin dominant kutupların reel kısmına olan uzaklığını belirleyen bir parametre olarak tanımlanmıştır. Bu parametrenin en az 3-5 aralığında seçilmesiyle 3. kutbun geçiş rejimi cevabına etkisi ihmal edilebilecek düzeyde olacaktır.

(16) ve (17) ile verilen karakteristik denklemlerin katsayılarının eşleştirilmesiyle (18)'de verilen eşitlikler elde edilir.

$$-A_{c33} = (2+d)\zeta_c\omega_{nc}$$

$$-A_{c32} = ((\omega_{nc})^2 + 2d(\zeta_c\omega_{nc})^2) \quad (18)$$

$$-A_{c31} = d\zeta_c^2(\omega_{nc})^3$$

Buradan P matrisinin 3. satırının elemanları (19) ile verilen denklemler kullanılarak hesaplanabilir.

$$P_{13} = \frac{d\zeta_c^2(\omega_{nc})^3}{R^{-1}K^2}$$

$$P_{23} = \frac{(\omega_{nc})^2 + 2d(\zeta_c\omega_{nc})^2 - (\omega_{n0})^2}{R^{-1}K^2} \quad (19)$$

$$P_{33} = \frac{(2+d)\zeta_c\omega_{nc} - 2\zeta_0\omega_{n0}}{R^{-1}K^2}$$

Son olarak Q matrisi ise;

$$Q_{11} = R^{-1}K^2P_{13}^2$$

$$Q_{22} = R^{-1}K^2P_{23}^2 - 2(P_{12} - (\omega_{n0})^2P_{23}) \quad (20)$$

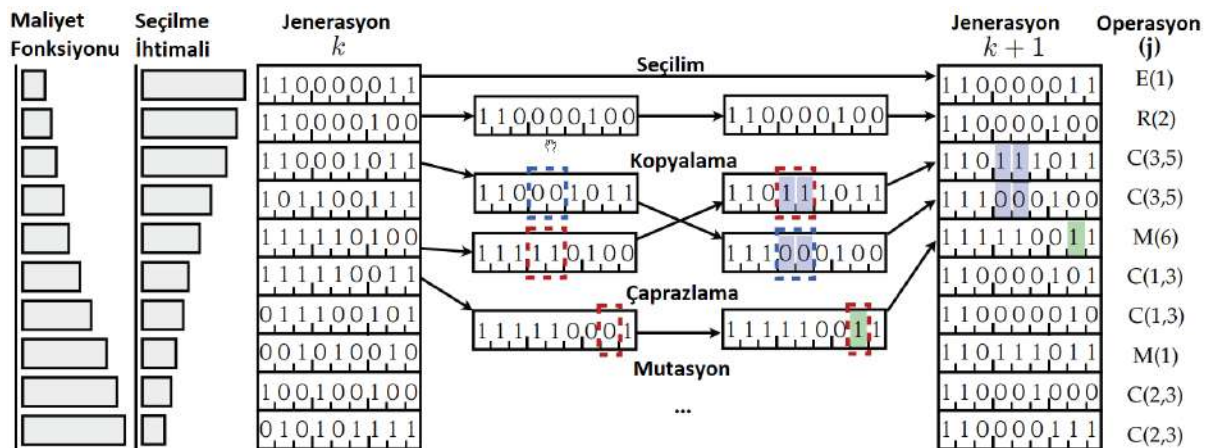
$$Q_{33} = R^{-1}K^2P_{33}^2 - 2(P_{23} - 2\zeta_0\omega_{n0}P_{33})$$

bağıntılarıyla elde edilir.

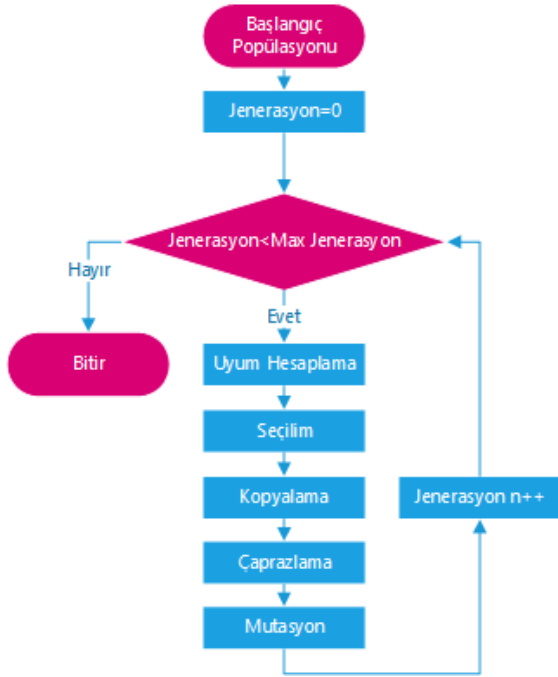
### 3. GENETİK ALGORİTMA TABANLI PID DENETLEYİCİ (GENETIC ALGORITHM BASED PID CONTROLLER)

Genetik Algoritma, Darwin'in doğal seçim ilkesine dayanan stokastik bir global uyarlamalı arama optimizasyon tekniğidir. Arama süreci, rekabet ortamında daha güçlü bireyin kazanabileceği biyolojik bir sürecin olduğu sürece benzerdir. GA ilk olarak popülasyon adı verilen kromozomlarla temsil edilen bir dizi çözüme göre başlatılır. Her bir çözüm, uygulama verilerine bağlı olarak birer ve sıfırlar, gerçek sayılar veya diğer formların ikili bir dizisi ile gösterilebilir. Bu algoritmalarda, bir grup birey arasında en uygun olanı hayatta kalır ve gelişmiş uygunluk değerleri olan bireylerin yeni nesillerini oluşturmak için kullanılır.

Diğer optimizasyon tekniklerinden farklı olarak GA bir problemin çözümünü temsil eden birkaç kromozom içeren bir başlangıç popülasyonu ile başlar ve her çözüm bir uyum fonksiyonu tarafından değerlendirilir. Temel olarak, GA dört temel işlemle oluşur: seçim, kopyalama, çaprazlama ve mutasyon. Seçim, en uygun kişilere daha fazla üreme şansı verir. Geçiş sırasında bazı üreyen bireyler genetik özelliklerini geçip değiştirirler. Mutasyonlar küçük bir oranda meydana gelebilir ve genetik materyalde rastgele bir değişikliğe neden olabilir, bu da popülasyonda çeşitliliğin oluşmasına katkıda bulunur. Evrim süreci, GA'yı arama alanındaki daha ümit vaat eden bölgeler boyunca yönlendirmektedir. Bu dört temel işlemin uygulanması, ebeveynlerinden daha iyi olabilecek yeni bireylerin oluşturulmasını sağlar. Bu algoritma birçok nesiller için tekrarlanır ve nihayet soruna en uygun çözümü temsil eden kişilere ulaşır. Şekil 2'de GA'nın evrimi verilmiştir.  $k$  jenerasyonundaki bireylerin her biri, genetik operasyonlar için seçim olasılıklarıyla ters orantılı olan, uyum fonksiyonlarına göre artan sırada değerlendirilir ve sıralanır.



Şekil 2. GA evrim şeması (GA evolution scheme) [16]



Şekil 3. GA akış diyagramı (GA flowchart)

Ardından Şekil 3’te verilen akış diyagramında görüleceği üzere, bireyler seçim, kopyalama, çaprazlama ve mutasyon kullanarak  $k + 1$  popülasyonunun ilerlemesi için bu ağırlıklı olasılığa dayanarak seçilir. Bu,  $k + 1$  oluşumunu oluşturur ve dizi, popülasyon istatistikleri birbirine yaklaşıncaya veya başka bir uygun durma kriterine ulaşılan kadar tekrarlanır. GA tabanlı PID denetleyici tasarımında uyum fonksiyonu tasarımcı tarafından belirlenmektedir. İstenilen şartları sağlamak için uyum fonksiyonu olarak denklem (21)’de LQR maliyet fonksiyonu verilmiştir. Bu fonksiyonda tek durum olarak seçilen hata için optimizasyon uygulanmaktadır.

$$J = \int_0^T Q(w_r - y)^2 + Ru^2 dt \quad (21)$$

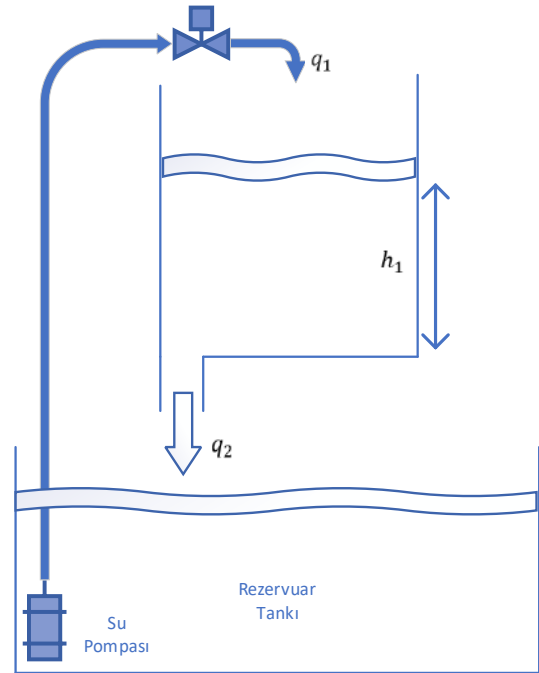
Şekil 4’te GA tabanlı PID denetleyici ile kontrol edilen sisteme ait blok diyagram verilmiştir. Optimizasyon süresince her iterasyonda, popülasyon sayısı kadar  $J$  uyum fonksiyonu elde edilmektedir. Her bir  $J$ , farklı  $P$ ,  $I$  ve  $D$  değerlerinin test uygulaması ile elde edilmektedir. Bu  $J$  değerlerinden en küçük olanı bir sonraki iterasyonun başlangıç popülasyonunda kullanılmaktadır. Son iterasyona gelindiğinde global minimum elde edilmeye çalışılmaktadır. GA tabanlı PID optimizasyonunda tasarım parametreleri başlangıç popülasyonu ve jenerasyon sayısıdır.



Şekil 4. GA tabanlı PID denetleyici blok diyagramı (Block diagram for GA based PID)

#### 4. SIVI SEVİYE KONTROL SİSTEMİNİN MODELLENMESİ (MODELLING of the LIQUID LEVEL CONTROL SYSTEM)

Çalışmada Şekil 5’te şematığı verilen Feedback 33-041 Tank Seviye Kontrol Sistemi kullanılarak deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Tank sisteminin sıvı seviye ölçümü için basınç sensörü kullanılmıştır. Sensörden alınan veriler DAQ kartı ile bilgisayar ortamına gerçek zamanlı olarak aktarılmış ve gerçek zamanlı kontrol sağlanmıştır. Sistemde rezervuar tankında bulunan su, pompa vasıtasıyla  $q_1$  akış hızıyla tanka aktarılmaktadır. Aktarılan su, tankın alt bölümünde bulunan drenaj borusundan  $q_2$  akış hızıyla tekrar rezervuar tankına boşalmaktadır. Kontrol sisteminin amacı  $h_1$  seviyesini referans noktasında tutmaktır. Akış miktarları ve sıvı seviyesi arasındaki ilişki denklem (22)’te verilmiştir. Burada  $A$  tank yüzey alanını temsil etmektedir.



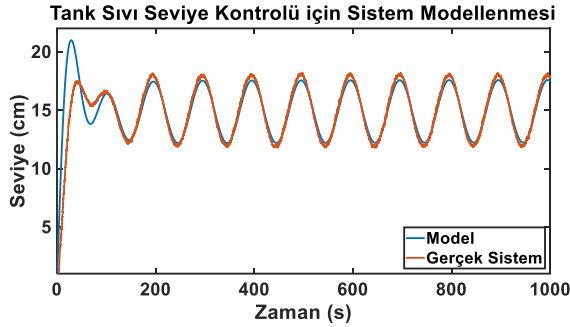
Şekil 5. Tank sistemi şematığı (Tank System Scheme)

$$A \frac{dh_1}{dt} = q_1 - q_2 \quad (22)$$

Sistemin matematiksel modeli sistem tanılama yazılım aracılığı ile elde edilmiştir. Öncelikle basınç sensörlerinin kalibrasyonu yapılmıştır. Ardından rastgele bir senaryo ile açık döngü sisteme giriş gerilimi uygulanmış ve çıkışta sıvı seviye verileri alınmıştır. Elde edilen giriş ve çıkış verileri SIT’e girilmiş ve birçok model arasından en uygun olanı seçilmiştir. Sisteme ait transfer fonksiyonu denklem (23)’te verilmiştir.

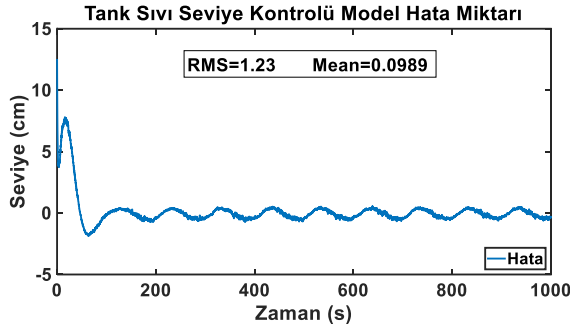
$$G(s) = \frac{0.2638s + 0.00029}{s^2 + 0.01588s + 0.000072} \quad (23)$$

Elde edilen transfer fonksiyonu ile deneysel sistem açık döngü olarak karşılaştırılmış ve karşılaştırma sonucu Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 6. Matematiksel model ve deneysel sistemin karşılaştırılması (Comparison of the mathematical model and the experimental system)

Şekil 7'de sistem modeli ile gerçek sistemin cevapları arasındaki hata değeri verilmiştir. Çalışmada hatanın RMS değeri 1.23 ortalama değeri ise 0.0989 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7. Matematiksel model ile deneysel sistem arasındaki hata miktarı (Error between the mathematical model and the experimental system)

## 5. BENZETİM ÇALIŞMASI SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS)

Çalışma sonucu elde edilen PID parametreleri öncelikle benzetim çalışmaları ile denenmiştir.

### 5.1. LQR Tabanlı PID Denetleyici (LQR Based PID Controller)

Tank sisteminin matematiksel modelinden  $\omega_{n_0} = 0.0085$ ,  $\zeta_0 = 0.9358$  ve  $K_0 = 0.2638$  olarak elde edilmiştir. İstenen kapalı döngü sistem dinamikleri ise  $\omega_{n_c} = 0.3$ ,  $\zeta_c = 0.595$ ,  $d = 3$  ve  $K_c = 0.05$  olarak belirlenmiş ve bu şartları sağlayacak PID parametreleri (25)'teki gibi elde edilmiştir. Parametrelerin seçiminde deneysel sistemin fiziksel sınırları göz önünde bulundurulmuştur. LQR tabanlı PID parametre ayarlamaya yaklaşımı kullanıldığında sistem matrisleri;

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.000072 & -0.01588 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.05 \end{bmatrix}$$

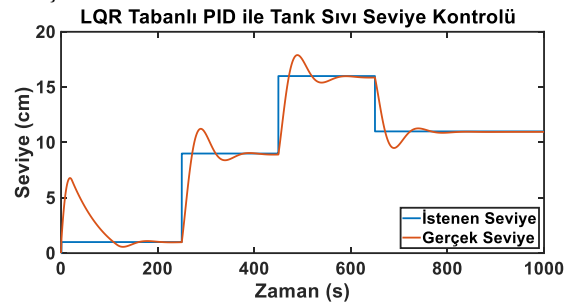
şeklinde elde edilir ve buradan;

$$\begin{bmatrix} K_p & K_i & K_d \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$= [0.2043 \quad 0.0210 \quad 0.6352]$$

PID parametreleri elde edilir.

LQR tabanlı PID parametre ayarlamasından elde edilen sonuçlarla benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmalarında kullanılan senaryo, deneysel sistem baz alınarak oluşturulmuştur. Deneysel sistemde basınç sensörünün en iyi kalibrasyonu 250 sn. olarak belirlenmiş ve sistemin başlangıç noktası 250. sn. olarak kabul edilmiştir. Oluşturulan senaryoda 250. saniyede istenen sıvı seviyesi aniden 9 cm'ye yükseltilmiştir. Çalışmayı değişken koşullarda test etmek amacıyla istenen sıvı seviyesi 450. saniyede 15 cm'ye çıkartılmış ve 750. saniyede 11 cm'ye düşürülmüştür. Şekil 8'de görüldüğü gibi LQR tabanlı PID ile kalıcı durum hatası sıfıra indirgenmiş ve istenen geçici durum cevabı elde edilmiştir.

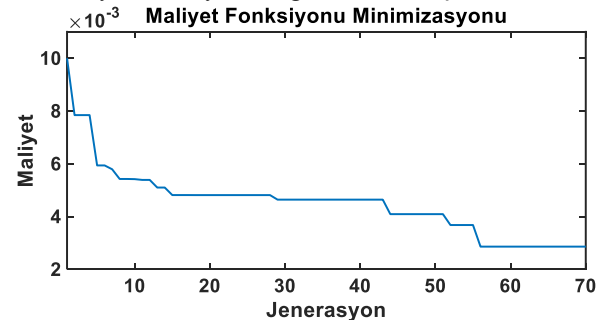


Şekil 8. LQR tabanlı PID denetleyici için benzetim çalışması sonucu (Simulation result for LQR Based PID)

### 5.2. GA Tabanlı PID Denetleyici (GA Based PID Controller)

Bu çalışmada GA maliyet fonksiyonu olarak (21) ile verilen LQR kontrol tekniğinde kullanılan maliyet fonksiyonu kullanılarak uyum fonksiyonu elde edilmiştir.

Popülasyon sayısı 25, maksimum jenerasyon ise 70 olarak alınmıştır. Deneysel sistemin fiziksel sınırlarının dışına çıkılmaması ve en iyi geçiş cevabını yakalamak amacıyla farklı R ve Q ağırlık matrisleri kullanılarak PID parametreleri ayarlanmaya çalışılmıştır. R=0.001 ve Q=0.0001 değerlerinde elde edilen PID parametrelerinin en iyi sonucu verdiği, Şekil 9'da verilen maliyet fonksiyonu minimizasyon grafiğinden elde edilmiştir. Maliyet fonksiyonu J, 0.0312 değerine kadar indirgenmiştir. Şekil 10'da her bir jenerasyonda elde edilen maliyet fonksiyonu değerleri verilmiştir.



Şekil 9. Maliyet fonksiyonu minimasyonu (Cost function minimization)

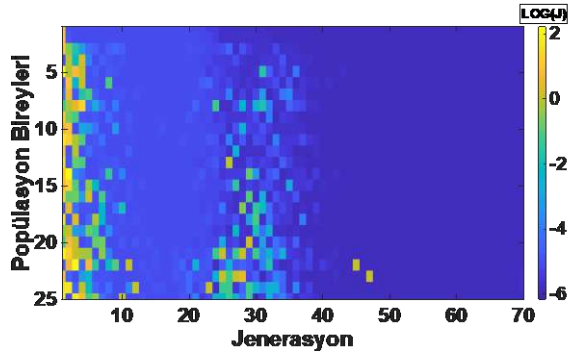


Bu çalışma sonucunda elde edilen PID parametreleri;

$$[K_p \quad K_i \quad K_d] \quad (26)$$

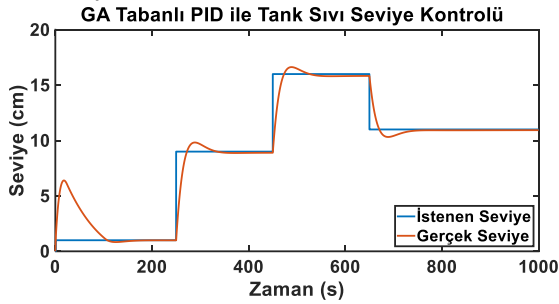
$$= [0.3242 \quad 0.0144 \quad 0.0012]$$

şeklinde elde edilmiştir.



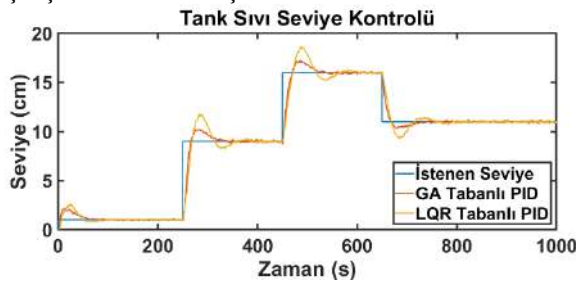
Şekil 10. GA tabanlı PID optimizasyonunda her bir jenerasyona karşılık gelen maliyet fonksiyonları (Cost functions corresponding to each generation in GA-Based PID optimization)

GA tabanlı PID parametre ayarlanmasından elde edilen PID denetleyici için benzetim çalışması sonuçları Şekil 11'de verilmiştir. LQR Tabanlı PID denetleyici için yapılan deneydeki senaryo kullanılmış ve başarılı sonuç elde edilmiştir.



Şekil 11. GA tabanlı PID denetleyici için benzetim çalışması sonucu (Simulation result for GA Based PID)

Şekil 12'de LQR tabanlı PID denetleyici ve GA tabanlı PID denetleyicinin benzetim sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 12. GA tabanlı PID denetleyici ve LQR tabanlı PID denetleyici benzetim sonucu karşılaştırılması (Comparison of simulation results for GA Based PID and LQR Based PID)

Benzetim çalışmaları sonuçlarından GA tabanlı PID denetleyicili sistemin basamak tepkilerinin daha düşük maksimum tepe aşımı ve durulma süresine sahip olduğu görülmüştür.

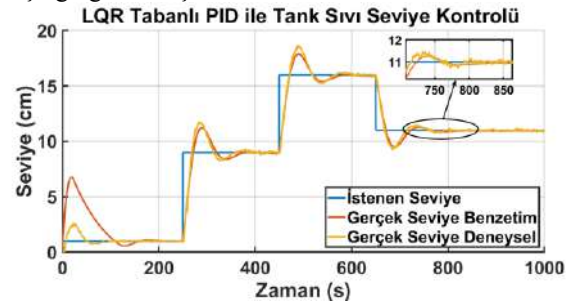
## 6. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI (EXPERIMENTAL RESULTS)

Deneysel sistem olarak Şekil 13'te verilen Feedback 33-041 Tank Seviye Kontrol Sistemi kullanılmıştır. Deneysel çalışmada da benzetim çalışmasında kullanılan senaryo referans olarak uygulanmıştır. Şekil 14'te LQR tabanlı PID denetleyicinin benzetim ve deneysel çalışma sonuçları beraber verilmiştir.



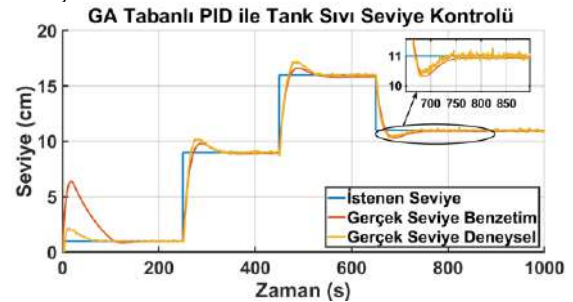
Şekil 13. Feedback 33-041 tank sistemi (Feedback 33-041 tank system)

LQR tabanlı PID denetleyicili sisteme ait benzetim ve deneysel çalışma sonuçlarının basamak tepkilerindeki tepe noktaları arasındaki küçük farklar dışında tamamen örtüştüğü görülmüştür.



Şekil 14. LQR tabanlı PID denetleyici benzetim ve deneysel çalışma sonucu karşılaştırmaları (Comparison of simulation and experimental results for LQR Based PID)

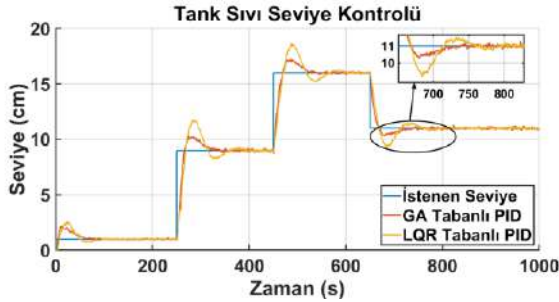
Şekil 15'te GA tabanlı PID denetleyici için benzetimsel ve deneysel çalışma sonuçları karşılaştırılması olarak verilmiştir.



Şekil 15. GA tabanlı PID denetleyici benzetim ve deneysel çalışma sonucu karşılaştırılması (Comparison of simulation and experimental results for GA Based PID)

Şekil 15'den de görüleceği gibi benzetimsel sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasındaki fark ihmal edilebilecek kadar küçüktür.

Son olarak Şekil 16'da GA tabanlı PID ve LQR tabanlı PID denetleyicinin deneysel olarak karşılaştırılması verilmiştir. Basamak tepkilerine ait maksimum tepe aşımı ve durulma süresi değerleri Çizelge 1'de verilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda GA tabanlı PID denetleyicinin, maksimum aşma miktarının daha az olduğu ve daha kısa sürede kalıcı duruma ulaştığı görülmüştür.



Şekil 16. GA tabanlı PID denetleyici ve LQR tabanlı PID denetleyicinin deneysel sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of experimental results for GA Based PID and LQR Based PID)

Çizelge 1. LQR tabanlı PID ve GA tabanlı PID karşılaştırılması (Comparison of LQR Based PID and GA Based PID)

	Maks. tepe aşımı	Durulma Süresi
LQR PID	%30.77	102.3 sn.
GA PID	%13.66	70.6 sn.

Her iki denetleyici için performans indisleri IAE, ITAE, ITSE ve IATE değerleri normalize edilmiş olarak Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Performans indisleri (Performance indices)

	ITSE	ITAE	IAE	ISE
LQR PID	1	0.5518	1.4e-3	3.7e-3
GA PID	0.6479	0.4424	0.97e-3	2.5e-3

Alınan sonuçlardan GA tabanlı PID parametre optimizasyonunun LQR tabanlı optimizasyona göre daha başarılı olduğu görülmektedir.

## 7. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada Doğrusal Karesel Düzenleyici (LQR) yaklaşımı ve Genetik Algoritma kullanılarak iki farklı PID denetleyici tasarlanmıştır. Tasarlanan PID denetleyiciler bir sıvı seviye kontrol sisteminde benzetim ve deneysel çalışmalarla test edilmiş ve performans kıyaslamaları yapılmıştır. Basamak cevaplarında LQR tabanlı PID denetleyici ile kıyaslandığında, GA tabanlı

PID denetleyici basamak tepkisinde hem daha düşük maksimum aşma yüzdesine sahiptir hem de daha kısa sürede kalıcı duruma ulaşmaktadır. Performans indisleriyle (ITSE, ITAE, IAE ve ISE) yapılan karşılaştırmada GA tabanlı PID denetleyicinin daha başarılı olduğu görülmüştür.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Koivo H. N. and Tanntu J. T., "Tuning of PID Controllers: Survey of Siso and Mimo Techniques," *IFAC Proc.*, 2017.
- [2] Ghosh A., Krishnan T. R., and Subudhi B., "Brief Paper - Robust proportional-integral-derivative compensation of an inverted cart-pendulum system: an experimental study," *IET Control Theory Appl.*, 2012.
- [3] Lin G. and Liu G., "Tuning PID controller using adaptive genetic algorithms," in *ICCSE 2010 - 5th International Conference on Computer Science and Education, Final Program and Book of Abstracts*, 2010.
- [4] Hägglund T. and Åström K. J., "Revisiting The Ziegler-Nichols Tuning Rules For Pi Control," *Asian J. Control*, 2008.
- [5] Chunchen W., Feng C., Guang Z., Ming Y., Li L., and Taihu W., "Design of Genetic Algorithm Optimized PID Controller for Gas Mixture System," in *2017 IEEE 13th International Conference on Electronic Measurement & Instruments*, 2017.
- [6] Nagaraj B., Subha S., and Rampriya B., "Tuning algorithms for PID controller using soft computing techniques," *Int. J. Comput. Sci. Netw. Secur. IJCSNS*, 2008.
- [7] Wati D. A. R. and Hidayat R., "Genetic algorithm-based PID parameters optimization for air heater temperature control," in *Proceedings of 2013 International Conference on Robotics, Biomimetics, Intelligent Computational Systems, Robionetics*, 2013.
- [8] Cheng Z. and Xu H., "PID Controller Parameters Optimization Based on Artificial Fish Swarm Algorithm," *Fifth Int. Conf. Intell. Comput. Technol. Autom.*, 2012.
- [9] Fang H. and Chen L., "Application of an enhanced PSO algorithm to optimal tuning of PID gains," in *2009 Chinese Control and Decision Conference, CCDC*, 2009.
- [10] Sravan B., Babu T. S., and Rajasekar N., "Tuning PID Controller for Inverted Pendulum Using Genetic Algorithm," *Adv. Syst. Control Autom.*, 395-404, 2018.
- [11] Al-Smadi M. K., Hu Y., and Mahmoud Y., "LQR-based PID Voltage Controller for Photovoltaic Systems," *44th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, 1854-1859, 2018.
- [12] Saleem O. and Rizwan M., "Performance optimization of LQR-based PID controller for DC-DC buck converter via iterative-learning-tuning of state-weighting matrix," *Int. J. Numer. Model. Electron. Networks, Devices Fields*, 32: 2019.

- [13] Wang T., Wang Q., Hou Y., and Chaoyang D., "Suboptimal controller design for flexible launch vehicle based on genetic algorithm: selection of the weighting matrices Q and R," *IEEE Int. Conf. Intell. Comput. Intell. Syst.*, 2: 720–724, 2009.
- [14] Das S., Pan I., Halder K., and Gupta A., "LQR based improved discrete PID controller design via optimum selection of weighting matrices using fractional order integral performance index," *Appl. Math. Model.*, 2013.
- [15] Saha S., Das S., Das S., and Gupta A., "A conformal mapping based fractional order approach for sub-optimal tuning of PID controllers with guaranteed dominant pole placement," *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, 2012.
- [16] Brunton S. and Kutz N., *Data Driven Science and Engineering*. Cambridge University Press, 978-1-108-42209-3, 2019.



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



## Comparison of the experimental performance of round and flat tube automobile radiators for various coolants

*Çeşitli soğutma sıvıları için dairesel ve düz tüplü otomobil radyatörlerinin deneysel performanslarının karşılaştırılması*

*Yazar(lar) (Author(s)): Erkan KEKLİK<sup>1</sup>, Murat HOŞÖZ<sup>2</sup>*

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-8297-046X

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-3136-9586

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Keklik E. and Hoşöz M., "Comparison of the experimental performance of round and flat tube automobile radiators for various coolants", *Journal Of Polytechnic*, 23(4): 1121-1130, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.555878

# Comparison of the Experimental Performance of Round and Flat Tube Automobile Radiators for Various Coolants

## Highlights

- ❖ An experimental system for testing the performance of automobile radiators was developed.
- ❖ The performances of round and flat tube radiators were evaluated for four different engine coolants.
- ❖ In the tests, the air speed, air temperature at the radiator inlet and coolant flow rate were varied.
- ❖ For water, the flat tube radiator dissipated on average 4.8% more heat than the round tube one.
- ❖ For ethylene glycol, the flat tube radiator dissipated averagely 66.4% more heat than the round tube one.

## Graphical Abstract

In this study, the heat transfer performance of round tube and flat tube automobile radiators were experimentally evaluated and compared for various engine coolants using the test system shown below.

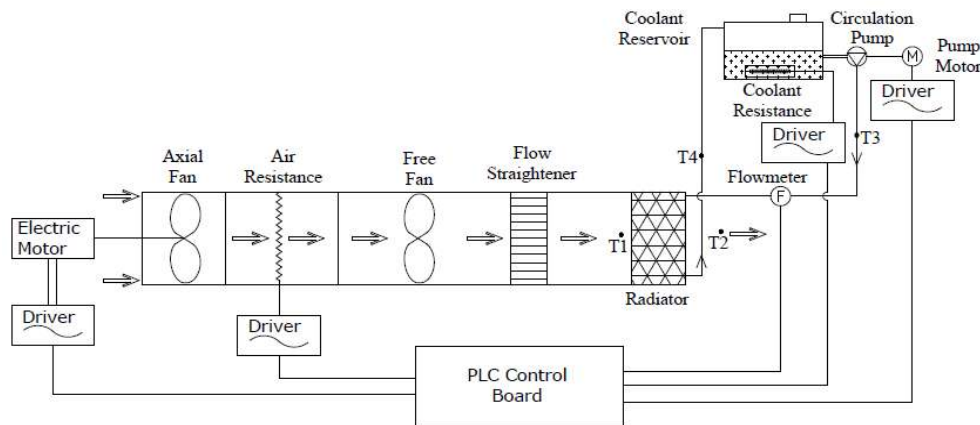


Figure. Schematic view of the test system

## Aim

The aim of the study was to evaluate and compare the experimental heat transfer performances of round and flat tube automobile radiators for various engine coolants, namely water, ethylene glycol, their 50/50 mixture and a commercial heat transfer oil.

## Design & Methodology

An experimental test system capable of using various types of radiators and coolants was developed. The radiators were tested by changing the air speed, air temperature entering the radiator and coolant flow rate in a broad range.

## Originality

The performances of two types of automobile radiators serving the same engine were experimentally compared for four different engine coolants.

## Findings

The flat tube radiator dissipated on average 4.8% and 66.4% more heat than the round tube one when the coolants were water and ethylene glycol, respectively.

## Conclusion

The flat tube radiator rejects more heat and water is the best among the tested coolants in terms of heat transfer performance.

## Declaration of Ethical Standards

The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Comparison of the Experimental Performance of Round and Flat Tube Automobile Radiators for Various Coolants

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Erkan KEKLİK<sup>1</sup>, Murat HOŞÖZ<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Natural and Applied Sciences, Kocaeli University, 41001, Kocaeli, Turkey

<sup>2</sup>Department of Automotive Engineering, Kocaeli University, 41001, Kocaeli, Turkey

(Geliş/Received : 19.04.2019 ; Kabul/Accepted : 31.10.2019)

## ABSTRACT

A radiator test system was developed to test the heat transfer performance of automobile radiators for various engine coolants. The system was made up from a circulation pump, coolant reservoir, axial fan, electric heaters, PLC controlled drivers and instruments for various mechanical measurements along with the tested radiators. Two different radiators, namely round and flat tube ones, and four different engine coolants, namely water, ethylene glycol, their 50/50 mixture and a commercial heat transfer oil, were tested. The experimental heat dissipation rates of the radiators were evaluated under a broad range of operating conditions. The air speed was changed between 2 and 4 m s<sup>-1</sup>, the coolant flow rate was varied between 0.1 and 0.3 l s<sup>-1</sup>, and the air temperature at the inlets of the radiators was changed between 25 and 35 °C, while the coolant temperature was fixed at 90 °C in all tests. The flat tube radiator dissipated on average 4.8% more heat than the circular tube one for water coolant, while it rejected on average 66.4% more heat than the circular tube one for ethylene glycol. Furthermore, when the heat transfer oil was used as coolant, the flat tube radiator dissipated on average 101.6% more heat than the circular tube one.

**Keywords:** Engine cooling, radiator, coolant, automobile, ethylene glycol.

## Çeşitli Soğutma Sıvıları İçin Dairesel ve Düz Tüplü Otomobil Radyatörlerinin Deneysel Performanslarının Karşılaştırılması

### ÖZ

Bu çalışmada, otomobil radyatörlerinin ısı transferi performanslarını çeşitli motor soğutma sıvıları için test etmek amacıyla bir radyatör test sistemi geliştirilmiştir. Sistem, sirkülasyon pompası, soğutma sıvısı tankı, eksenel fan, elektrikli ısıtıcılar, PLC kontrollü sürücüler, çeşitli mekanik ölçüm cihazları ve test edilen radyatörlerden oluşturulmuştur. Testlerde dairesel ve düz tüplü iki farklı otomobil radyatörü ile su, etilen glikol, bunların 50/50 karışımı ve ticari bir ısı transfer yağı olmak üzere dört farklı soğutma sıvısı kullanılmıştır. Radyatörlerin attığı ısılar, geniş bir test koşulu aralığında deneysel olarak belirlenmiştir. Radyatörlerden geçen hava hızı 2 ve 4 m s<sup>-1</sup> arasında, soğutma sıvısı debisi 0.1 ve 0.3 l s<sup>-1</sup> arasında, radyatörlere giren hava akımının sıcaklığı 25 ve 35 °C aralığında değiştirilmiştir. Radyatörlere giren soğutma sıvısı sıcaklığı ise tüm testler için 90 °C'de sabit tutulmuştur. Soğutma sıvısı olarak su kullanıldığında, düz tüplü radyatörün dairesel tüplüye göre ortalama % 4.8 daha fazla ısı attığı; etilen glikol kullanıldığında ise düz tüplü radyatörün dairesel tüplüden ortalama % 66.4 daha fazla ısı attığı tespit edilmiştir. Soğutma sıvısı olarak ısı transfer yağı kullanılması durumunda, düz tüplü radyatörün dairesel tüplüye kıyasla ortalama % 101.6 daha fazla ısı attığı belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Motor soğutma, radyatör, soğutma sıvısı, otomobil, etilen glikol.

### 1. INTRODUCTION

In internal combustion engines, some portion of the energy released during combustion is transferred to the surroundings as heat. Although the exhaust gas expels a ratio of this heat to the atmosphere, the engine cooling system dissipates about 17–26% and 16–35% of the fuel heating value to the atmospheric air in spark ignition (SI) and Diesel engines, respectively [1]. In order to prevent

distortion and fatigue cracking caused by thermal stresses, the temperature to be experienced by engine components made from aluminium alloys is limited to 300 °C [1]. Furthermore, the maximum allowable cylinder surface temperature is 180 °C to avoid from excessive wear and engine damage caused by deterioration of the lubricating oil film due to high temperatures [2]. In SI engines, overheating may also cause pre-ignition and knock. On the other hand, insufficient engine temperatures may cause incomplete burning of fuel, thus leading to low engine thermal efficiency and deteriorated exhaust emissions.

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : mhoso@kocaeli.edu.tr



In liquid-cooled internal combustion engines, a coolant is commonly circulated by a pump through the water jackets located in the engine block to remove the heat released by combustion so that the engine operating temperature is maintained at desirable values. This excess heat absorbed by the engine coolant is conveyed from the engine block to the radiator, and dissipated into the atmospheric air with the aid of an axial fan. When the engine temperature is below the desired value, the coolant is bypassed the radiator, and recirculated in the engine block. When the coolant reaches a certain temperature, the thermostat opens and sends the coolant to the radiator for heat dissipation.

Nowadays, volume and weight limitations compel automotive manufacturers to develop more efficient radiators with higher heat rejection rates for a certain volume allocated for the radiator. The heat transfer performance of a specific radiator depends substantially on the heat transfer characteristics of the coolant and geometric characteristics of the radiator. Manufacturers usually employ either round or flat tube radiators with different channel and fin geometries together with water and ethylene glycol mixture as engine coolant.

The open literature contains limited number of studies on the performance comparison of various types of automotive radiators and engine coolants due to the competitive nature of the sector.

Gollin and Bjork evaluated and compared the experimental performance of water, ethylene glycol, propylene glycol, and their blends in automotive radiators [3]. They determined that water yielded the best heat transfer performance followed by 50/50 ethylene glycol/water, 50/50 propylene glycol/water, 70/30 ethylene glycol/water, 70/30 propylene glycol/water, and finally propylene glycol in decreasing order.

Oliet et al. developed a heat exchanger model to perform parametric studies on automotive radiators [4]. As a compromise between classical  $\varepsilon$ -NTU method and CFD, their model determined the heat transfer and hydraulic performance of automobile radiators as a function of the air and water mass flow rates, air and water inlet temperatures, fin pitch, louver angle and coolant flow layout. Their results showed the utility of their numerical model as a rating and design tool for automotive radiators.

Sany et al. evaluated experimental performance of a car radiator under various test conditions [5]. Based on experimental data, they developed a method to determine the heat transfer coefficient using  $\varepsilon$ -NTU method. The practical usefulness of their calculation method is its provision of empirical data, which can be used in the design state.

Peyghambarzadeh et al. compared the performance of automotive radiators using pure water, pure ethylene glycol and their blends with different ratios [6]. They also experimentally investigated the effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano particles added to these blends on the heat convection inside the radiator tubes. They determined that addition

of nano particles increased the Nusselt number by up to 40% inside the tubes.

Amrutkar and Patil performed a theoretical analysis of automobile radiators using  $\varepsilon$ -NTU method, and validated their one-dimensional simulation software [7]. They concluded that the simulated heat dissipation rate and coolant temperature were very close to the experimental ones.

Nieh et al. investigated the experimental performance of some nano coolants, which were water and ethylene glycol containing various ratios of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and TiO<sub>2</sub> nano particles, in vehicle radiators [8]. Their test results showed that the use of nano coolants increased the radiator heat dissipation rate by 25.6%.

Sheikhzadeh et al. prepared a computer software for simulating the heat transfer performance of a car radiator with ethylene glycol containing copper nano particles at various ratios [9]. They found that the increase in the radiator heat dissipation rate was about 26.9% when the volume fraction of these nano particles was increased from 0 to 5%.

Vajjha et al. analysed the heat transfer of flat tube automotive radiators with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CuO nano particles in ethylene glycol and water mixture using ANSYS software [10]. They determined that, for the same pumping power, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CuO nano fluids up to 3% and 2% particle volumetric concentrations, respectively, provided higher heat transfer coefficients than that of the base fluid.

Ahmed et al. evaluated the experimental performance of a car radiator using pure water and TiO<sub>2</sub>-water nano fluid as coolants [11]. They tested the nano fluids containing three different ratios of TiO<sub>2</sub>, namely 0.1, 0.2 and 0.3% in volume. They found that the 0.2% TiO<sub>2</sub>-water coolant provided up to 47% higher heat transfer coefficient compared to the pure water.

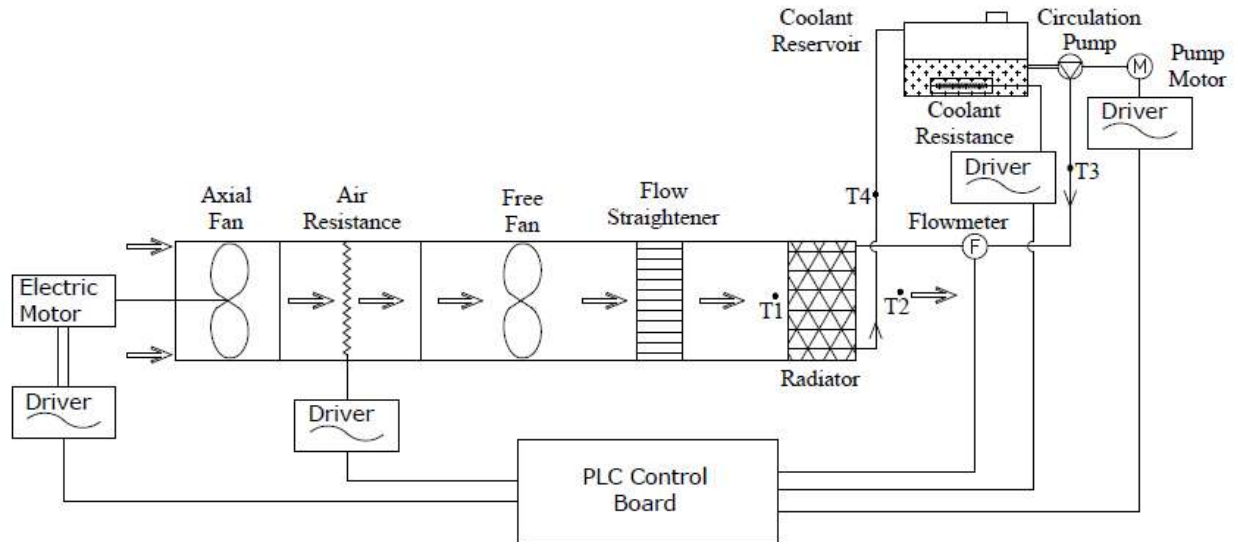
Keklik and Hosoz developed a rig to test the heat transfer performance of automobile radiators [12]. They evaluated the heat dissipation rates of a round tube radiator using water, ethylene glycol, 50/50 mixture of ethylene glycol/water and a commercial heat transfer oil as coolants under a broad range of test conditions. They found that the highest radiator heat dissipation rates were obtained with water, followed by 50/50 ethylene glycol/water mixture, ethylene glycol and heat transfer oil, respectively. According to their results, water yielded 77–112% higher heat dissipation rates than ethylene glycol and 234–264% higher rates than the heat transfer oil.

In this study, the experimental heat transfer performance of two different types of automobile radiators, namely round and flat tube ones, were evaluated and compared for four different engine coolants, which were water, ethylene glycol, their 50/50 mixture and a commercial heat transfer oil.

## 2. DESCRIPTION OF THE EXPERIMENTAL SETUP

The layout and photograph of the experimental system used for evaluating the heat transfer performance of automobile radiators are shown in Figures 1 and 2, respectively. The heat dissipation rate from a specific radiator depends on the speed and inlet temperature of the

air stream passing over the radiator along with the flow rate and inlet temperature of the coolant passing through the radiator. The effects of all these variables were taken into account in the experimental system. The system mainly consists of coolant and air circuits, a test radiator, electric motors, drivers, a PLC control board for the drivers and various instruments for mechanical measurements.



**Figure 1.** Layout of the experimental system used for testing radiators.

The components located in the air circuit are an axial fan used for providing the air stream passing over the radiator, an air heater resistance used for heating the air stream to the required test temperature and a free fan-flow straightener couple used for obtaining both a uniform air speed and air temperature at the radiator inlet. The axial fan has a maximum air flow rate of  $2.66 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , and it was operated by a three-phase 550 W AC motor. The fan motor was driven via a driver connected to a PLC so that the air speed could be adjusted to the desired value by changing the frequency of the electric power supplied to the motor. The operation of the air heater, which had a maximum heating capacity of 10 kW, was also controlled by the PLC through solid state relays so that the air temperature at the radiator inlet could be adjusted to the desired value.

On the other hand, the components located in the coolant circuit are a coolant reservoir, a coolant heater resistance placed in the reservoir, a coolant circulation pump along with the test radiator. The coolant reservoir was made from steel sheet, and has dimensions of  $416 \times 296 \times 248 \text{ mm}^3$ . The coolant resistance, which had a total heating capacity of 15 kW, was also controlled by the PLC through solid state relays so that the coolant temperature entering the radiator could be kept at the desired value. Similarly, the motor driving the circulation pump was operated with a driver connected to the PLC to simulate changing engine speed, thereby providing various coolant flow rates.

In order to evaluate the heat dissipation rate of the test radiator, various mechanical measurements were performed. For this aim, the coolant volume flow rate was measured by a turbine type flow meter installed upstream of the radiator. The air speed passing over the radiator was measured at the inlet of the radiator by an air velocity transmitter. Moreover, the air and coolant temperatures were measured at the inlet and outlet of the radiator, as shown in Figure 1, by type J thermocouples connected to the thermocouple module of the PLC. Technical specifications of the measurement devices are reported in Table 1.

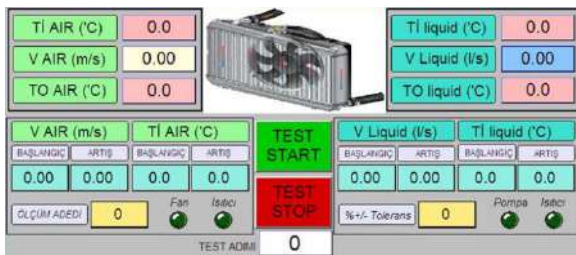


**Figure 2.** Photograph of the experimental setup.

**Table 1.** Technical specifications of the instruments.

Physical quantity	Instrument	Range	Accuracy
Temperature	Type J thermocouple	0–400 °C	±2.2 °C
Air speed	Air velocity transmitter	0–20 m s <sup>-1</sup>	<0.2 m s <sup>-1</sup>
Coolant flow rate	Turbine meter	0–6 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	±1%

As mentioned above, the resistance heaters as well as the fan and circulation pump motors were operated via the PLC to obtain the required test conditions. The PLC also served for acquiring the coolant flow rate, air speed and temperature data. Before performing a test, the desired coolant flow rate, air speed, air inlet temperature and coolant inlet temperature were entered the PLC via a touchpad screen, which is indicated in Figure 3. Because the PLC was previously programmed to maintain the required test conditions, it operated the system at these conditions by controlling the motor and resistance drivers. During the tests, the temperatures of the coolant and air streams entering and leaving the radiator as well as coolant volume flow rate and air speed were monitored on the control screen of the PLC, as shown in Figure 3.

**Figure 3.** Touchpad control screen of the PLC.

The tested radiators were a finned round tube aluminium radiator and a louvered-fin flat tube aluminium radiator. Both of these radiators belonged to a light commercial vehicle having a four-cylinder diesel engine with a stroke volume of 1910 cm<sup>3</sup> and a maximum power of 77 kW. The photographs of the round tube (radiator 1) and flat tube (radiator 2) test radiators are shown in Figures 4 and 5, respectively, while their geometric characteristics are reported in Table 2.

**Figure 4.** Photographs of the round tube radiator (radiator 1) from different perspectives.**Figure 5.** Photographs of the flat tube radiator (radiator 2) from different perspectives.**Table 2.** Geometric characteristics of the round and flat tube radiators.

Characteristics	Round tube radiator	Flat tube radiator
Frontal area (m <sup>2</sup> )	0.219	0.175
Depth (mm)	34	30
Fin pitch (fpi)	1.6	2.7
Core size (mm)	700 x 312.5 x 34	770 x 293 x 30
Core volume (l)	7.44	6.77
Tube no.	32	48
Pass no.	2	2
Tube outside diameter (mm)	10.3	2 x 12
Tube hydraulic diameter (mm)	9.8	2.9
Fin thickness (mm)	0.07	0.05
Minimum fin length between the tubes (mm)	8.3	9.0

It is seen in Table 2 that the core volume of the flat tube radiator is about 9.0 % lower than that of the round tube radiator employed in the same vehicle. Since the manufacturing processes of the flat and round tube radiators are completely different, they have different tube numbers as well as fin pitches and thicknesses even though their volumes are close to each other.

The coolants used in the tests were water, ethylene glycol (EG), their 50/50 mixture on a volume basis, and a commercial heat transfer oil (HTO). Table 3 reports important thermophysical properties of these coolants.

In all tests, the coolant temperature at the radiator inlet ( $T_{c,in}$ ) was maintained at 90 °C, while the air temperature at the radiator inlet ( $T_{a,in}$ ) was changed between 25 and 35 °C with intervals of 5 °C. On the other hand, the air speed passing over the radiator was varied between 2 and 4 m s<sup>-1</sup> with intervals of 1 m s<sup>-1</sup>. Because the test radiators

belonged to an engine with a maximum power of 77 kW, it was assumed that the radiators dissipated about 25 kW at this power. However, due to the technical limitations of the laboratory where tests were performed, the maximum heating capacity of the coolant resistance was determined as 15 kW. Another constraint was to keep the coolant temperature entering the radiator at 90 °C. When the speed of the air stream passing over the radiators exceeded 4 m s<sup>-1</sup>, the heating capacity of the coolant resistance became insufficient to maintain 90 °C coolant temperature. Therefore, the upper limit of the air speed passing over the radiators was determined as 4 m s<sup>-1</sup>. On the other hand, the lower limit of the air speed was selected as 2 m s<sup>-1</sup> to simulate the operations at low vehicle speeds, which are more critical for the radiators due to the deteriorated heat transfer at low speeds. Furthermore, in accordance with the studies of Patel et al. [14] and Tasuni et al. [15], the coolant flow rate passing

through the radiator was changed between 0.1 and 0.3 l s<sup>-1</sup> with intervals of 0.1 l s<sup>-1</sup>.

In the study, each radiator was tested under totally 27 different combinations of test conditions for each coolant. Furthermore, each test was repeated five times and the averaged steady-state data were employed for the performance evaluation. Thus, totally 1080 test runs were carried out for all radiators and coolants. The experimental system reached the steady-state in maximum 15 min after changing the test conditions. The radiator heat dissipation rate was evaluated from

$$\dot{Q} = \rho_c \dot{V}_c c_c (T_{c,in} - T_{c,out}) \quad (1)$$

where  $\rho_c$  is the coolant density,  $\dot{V}_c$  is the coolant volume flow rate,  $c_c$  is the coolant specific heat,  $T_{c,in}$  is the coolant temperature at the radiator inlet and  $T_{c,out}$  is the coolant temperature at the radiator outlet.

**Table 3.** Thermophysical properties of the coolants used in the tests at 90 °C [13].

Coolant	Density (kg m <sup>-3</sup> )	Specific heat (kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	Dynamic viscosity (mPa s)	Thermal conductivity (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
Water	965	4.205	0.316	0.676
EG	1064	2.677	2.640	0.261
50% water + 50% EG (volume basis)	1019	3.616	0.819	0.432
HTO	860	2.150	6.70	0.13

### 2.1. Uncertainty Analysis

The uncertainty for the radiator heat dissipation rate was determined using the method suggested by Moffat [16]. This method assumes that the function R is to be calculated from a set of totally N independent variables represented by

$$R = R(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (2)$$

The uncertainty of the result R can be found by combining the uncertainties of the individual terms using a root-sum-square method as expressed below.

$$\Delta R = \left[ \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial R}{\partial X_i} \Delta X_i \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

Using the accuracies for the measured variables reported in Table 1 and evaluating Eq. (1) in Eq. (3), the total uncertainty of the radiator heat dissipation rate was estimated as 4.1%.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

The heat dissipation rates of the round and flat tube radiators as a function of the test conditions and coolant types were indicated in Figures 6–11.

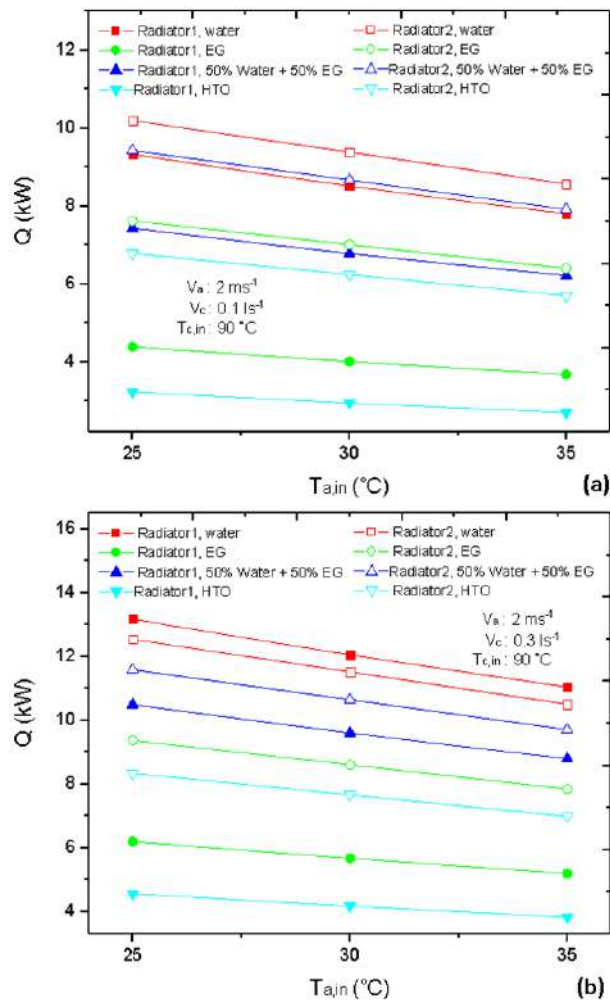
In Figure 6, the heat dissipation rates of the radiators were compared for two different coolant volume flow rates, namely 0.1 and 0.3 l s<sup>-1</sup>, as a function of the air inlet temperature when the air speed passing over the radiators

was maintained at 2 m s<sup>-1</sup>. For a specific coolant flow rate, the heat dissipation rates decreased

for both radiators and all coolants with rising air inlet temperature. Furthermore, water rejects the highest heat, followed by 50/50 water/EG mixture, EG and HTO in decreasing order for both radiators. For the round tube radiator and a coolant flow rate of 0.1 l s<sup>-1</sup>, the average heat dissipation rates for water, mixture, EG and HTO were 8.5 kW, 6.8 kW, 4.0 kW and 3.0 kW, respectively. When the coolant flow rate was increased to 0.3 l s<sup>-1</sup> in the round tube radiator, the average heat dissipation rates for water, mixture, EG and HTO reached to 12.1, 9.6, 5.7 and 4.2 kW, respectively. On the other hand, for the flat tube radiator and a coolant flow rate of 0.1 l s<sup>-1</sup>, the average heat dissipation rates for water, mixture, EG and HTO were 9.4, 8.7, 7.0 and 6.2 kW, respectively. When the coolant flow rate was increased to 0.3 l s<sup>-1</sup> in the flat tube radiator, the average heat dissipation rates for water, mixture, EG and HTO became 11.5, 10.6, 8.6 and 7.7 kW, respectively. These results reveal that the flat tube radiator usually rejects greater heat than the round tube radiator except the operation with water for the coolant volume flow rate of 0.3 l s<sup>-1</sup>. On the other hand, for the air speed of 2 m s<sup>-1</sup> and coolant flow rate of 0.1 l s<sup>-1</sup>, the flat tube radiator rejected 41.7% more heat than the round tube one as an average of the four coolants in the range of test conditions. However, when the coolant flow rate



was increased to  $0.3 \text{ l s}^{-1}$  for the same air speed, the flat tube radiator rejected on average 22.7% more heat than the round tube one.

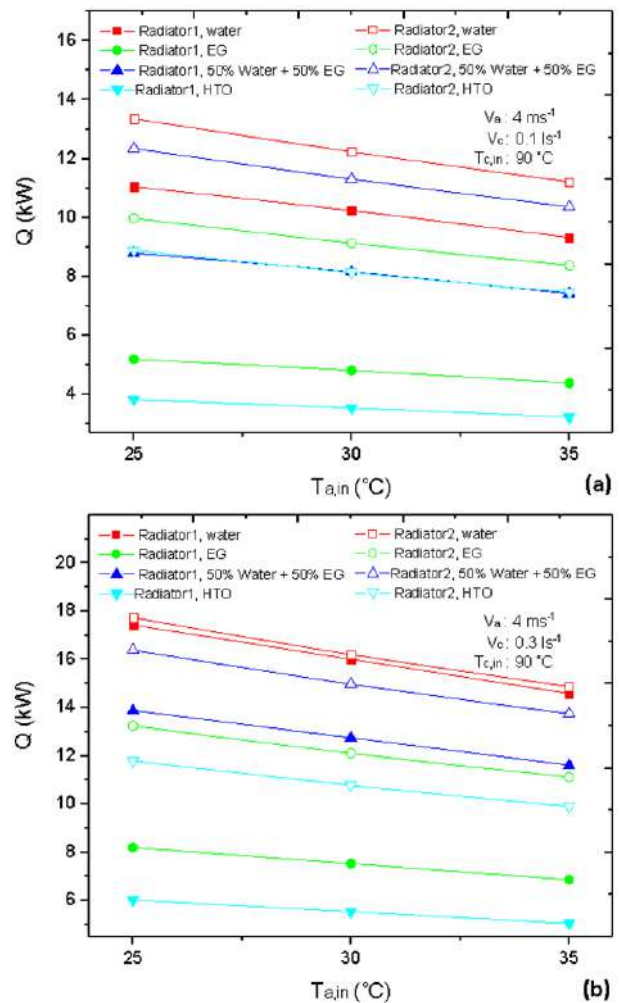


**Figure 6.** The radiator heat dissipation rates for  $2 \text{ m s}^{-1}$  air speed as a function of the air inlet temperature for two different coolant flow rates; (a)  $\dot{V}_c = 0.1 \text{ l s}^{-1}$ , (b)  $\dot{V}_c = 0.3 \text{ l s}^{-1}$ .

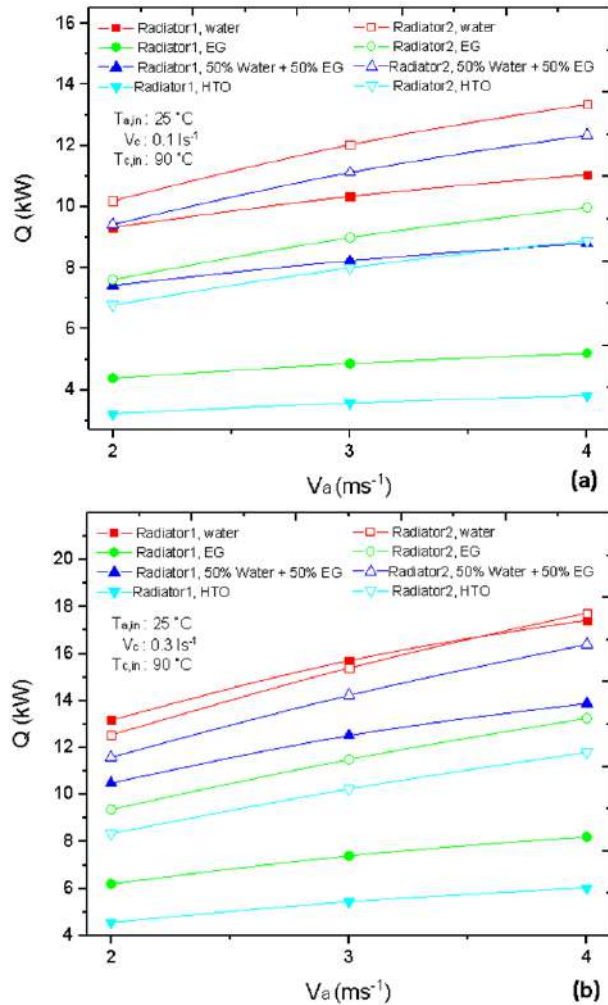
Because water was the coolant with the highest specific heat and thermal conductivity, it yielded the largest convection heat transfer inside the radiator tubes, thus providing the highest radiator heat rejection rates. On the other hand, the HTO resulted in the lowest heat rejection rates since it had the lowest specific heat and thermal conductivity. The total surface area of the liquid side of the flat tube radiator was  $0.93 \text{ m}^2$ , while that of the round tube radiator was  $0.31 \text{ m}^2$ . Although the total surface area of the air side of the flat tube radiator was  $3.85 \text{ m}^2$  while that of the round tube radiator was  $9.30 \text{ m}^2$ , the liquid side area is more influential than the air side one. Therefore, the flat tube radiator rejects more heat than the round tube one.

Figure 7 indicates the heat dissipation rates of the radiators for two different coolant volume flow rates as a function of the air inlet temperature when the air speed

passing over the radiators was kept at  $4 \text{ m s}^{-1}$ . Similar to the previous results, water rejected the highest heat and HTO rejected the lowest heat for both radiators. For the round tube radiator and coolant flow rate of  $0.1 \text{ l s}^{-1}$ , the average heat dissipation rates for water, mixture, EG and HTO were 10.2, 8.1, 4.8 and 3.5 kW, respectively. However, the average heat dissipation rates for water, mixture, EG and HTO reached to 16.0, 12.8, 7.5 and 5.5 kW, respectively, when the coolant flow rate was raised to  $0.3 \text{ l s}^{-1}$  for the round tube radiator. On the other hand, for the flat tube radiator and coolant flow rate of  $0.1 \text{ l s}^{-1}$ , the average heat dissipation rates for water, mixture, EG and HTO were 12.3, 11.3, 9.2 and 8.2 kW, respectively. When the coolant flow rate was raised to  $0.3 \text{ l s}^{-1}$  for the flat tube radiator, the average heat dissipation rates for water, mixture, EG and HTO became 16.3, 15.0, 12.2 and 10.8 kW, respectively. For the air speed of  $4 \text{ m s}^{-1}$  and coolant flow rate of  $0.1 \text{ l s}^{-1}$ , the flat tube radiator rejected 57.1% more heat than the round tube one as an average of the four coolants in the range of test conditions. On the other hand, when the coolant flow rate was raised to  $0.3 \text{ l s}^{-1}$  for the same air speed, the flat tube radiator rejected on average 32.4% more heat than the round tube one.



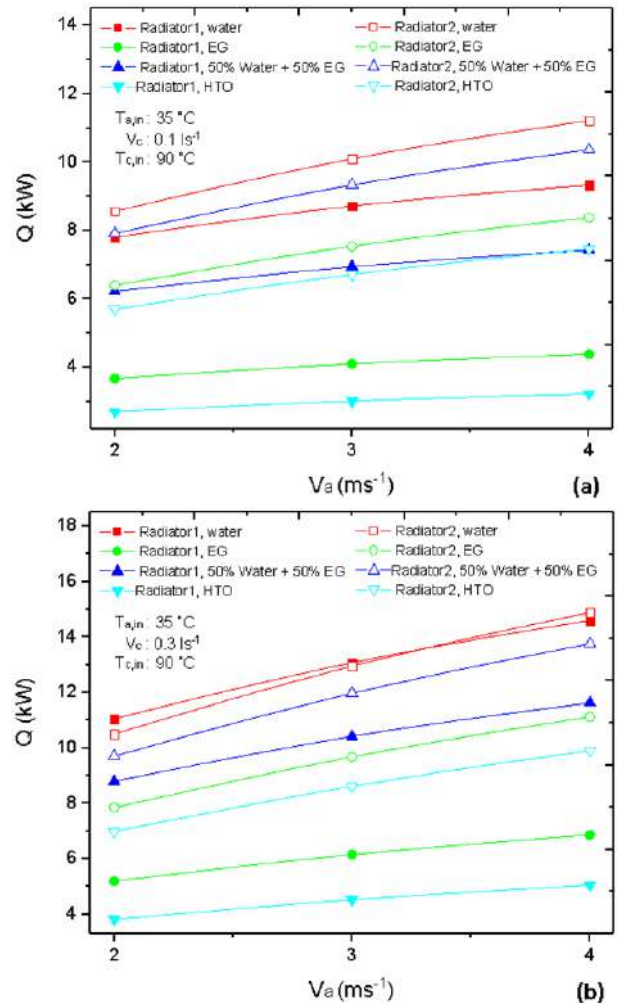
**Figure 7.** The radiator heat dissipation rates for  $4 \text{ m s}^{-1}$  air speed as a function of the air inlet temperature for two different coolant flow rates; (a)  $\dot{V}_c = 0.1 \text{ l s}^{-1}$ , (b)  $\dot{V}_c = 0.3 \text{ l s}^{-1}$ .



**Figure 8.** The radiator heat dissipation rates for 25 °C air inlet temperature as a function of the air speed for two different coolant flow rates; (a)  $\dot{V}_c = 0.1 \text{ l s}^{-1}$ , (b)  $\dot{V}_c = 0.3 \text{ l s}^{-1}$ .

Figure 8 shows the heat dissipation rates of both radiators for two different coolant volume flow rates, namely 0.1 and 0.3 l s<sup>-1</sup>, as a function of the air speed when the air temperature entering the radiators was maintained at 25 °C. When the air speed was raised, the heat dissipation rate increased for both radiators and all coolants. For the round tube radiator and coolant flow rate of 0.1 l s<sup>-1</sup>, the average heat dissipation rates for water, mixture, EG and HTO were 10.2, 8.2, 4.8 and 3.5 kW, respectively. When the coolant flow rate was increased to 0.3 l s<sup>-1</sup> in the round tube radiator, the average heat dissipation rates for water, mixture, EG and HTO reached to 15.4, 12.3, 7.3 and 5.3 kW, respectively. On the other hand, for the flat tube radiator and coolant flow rate of 0.1 l s<sup>-1</sup>, the average heat dissipation rates for water, mixture, EG and HTO were 11.9, 11.0, 8.9 and 7.9 kW, respectively. When the coolant flow rate was increased to 0.3 l s<sup>-1</sup> in the flat tube radiator, the average heat dissipation rates for water, mixture, EG and HTO became 15.2, 14.1, 11.4 and 10.1 kW, respectively. For the inlet air temperature of 25 °C and coolant flow rate of 0.1 l s<sup>-1</sup>, the flat tube radiator

rejected 50.9% more heat than the round tube one as an average of the four coolants. However, when the coolant flow rate was raised to 0.3 l s<sup>-1</sup> for the same air inlet temperature, the flat tube radiator rejected on average 28.0% more heat than the round tube one.

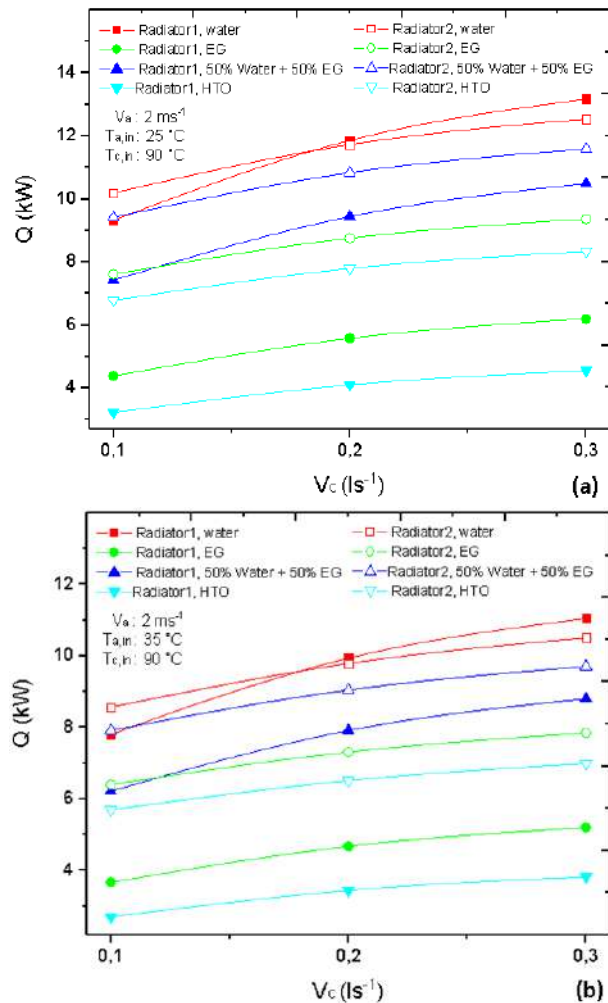


**Figure 9.** The radiator heat dissipation rates for 35 °C air inlet temperature as a function of the air speed for two different coolant flow rates; (a)  $\dot{V}_c = 0.1 \text{ l s}^{-1}$ , (b)  $\dot{V}_c = 0.3 \text{ l s}^{-1}$ .

Figure 9 reports the heat dissipation rates of both radiators for two different coolant volume flow rates as a function of the air speed when the air temperature entering the radiators was kept at 35 °C. The heat dissipation rate increased for both radiators and all coolants with rising air speed. For the round tube radiator and coolant flow rate of 0.1 l s<sup>-1</sup>, the average heat dissipation rates for water, mixture, EG and HTO were 8.6, 6.9, 4.1 and 3.0 kW, respectively. However, the average heat dissipation rates for water, mixture, EG and HTO in the round tube radiator reached to 12.9, 10.3, 6.1 and 4.5 kW, respectively, when the coolant flow rate was increased to 0.3 l s<sup>-1</sup>. On the other hand, when the flat tube radiator was employed and coolant flow rate was kept at 0.1 l s<sup>-1</sup>, the average heat dissipation rates for water, mixture, EG and HTO were 10.0, 9.2, 7.4 and 6.6



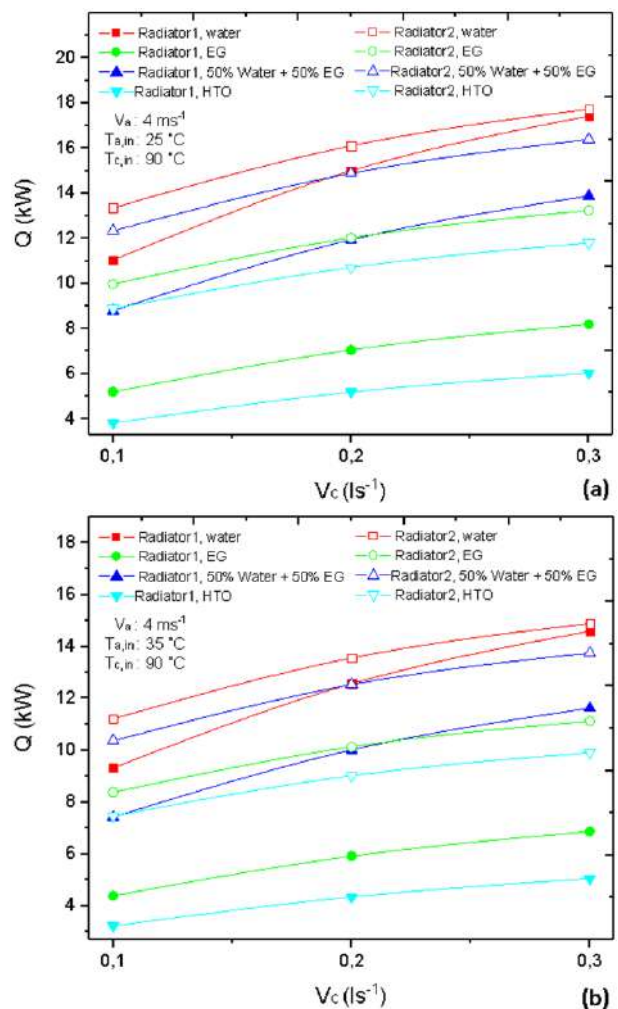
kW, respectively. On the other hand, the average heat dissipation rates for water, mixture, EG and HTO in the flat tube radiator reached to 12.8, 11.8, 9.6 and 8.5 kW, respectively, when the coolant flow rate was raised to 0.3 l s<sup>-1</sup>. For the inlet air temperature of 35 °C and coolant flow rate of 0.1 l s<sup>-1</sup>, the flat tube radiator rejected 49.6% more heat than the round tube one as an average of the four coolants. However, when the coolant flow rate was raised to 0.3 l s<sup>-1</sup> for the same air inlet temperature, the flat tube radiator rejected 28.6% more heat than the round tube one.



**Figure 10.** The radiator heat dissipation rates for 2 m s<sup>-1</sup> air speed as a function of the coolant flow rate for two different air inlet temperatures; (a)  $T_{a,in} = 25\text{ °C}$ , (b)  $T_{a,in} = 35\text{ °C}$ .

Figure 10 shows the heat dissipation rates of both radiators for two different air inlet temperatures, namely 25 and 35 °C, as a function of coolant flow rate when the air speed was maintained at 2 m s<sup>-1</sup>. When the coolant flow rate was raised, the heat dissipation rate increased for both radiators and all coolants. For the round tube radiator and air inlet temperature of 25 °C, the average heat dissipation rates for water, mixture, EG and HTO were 11.5, 9.1, 5.4 and 4.0 kW, respectively. When the air inlet temperature was increased to 35 °C in the round tube radiator, the average heat dissipation rates for water,

mixture, EG and HTO dropped to 9.6, 7.6, 4.5 and 3.3 kW, respectively. On the other hand, for the flat tube radiator and air inlet temperature of 25 °C, the average heat dissipation rates for water, mixture, EG and HTO were 11.5, 10.6, 8.6 and 7.6 kW, respectively. However, the average heat dissipation rates for water, mixture, EG and HTO reduced to 9.6, 8.9, 7.2 and 6.4 kW, respectively, when the air inlet temperature was increased to 35 °C in the flat tube radiator. For the inlet air temperature of 25 °C and air speed of 2 m s<sup>-1</sup>, the flat tube radiator rejected 27.7% more heat than the round tube one as an average of the four coolants in the range of test conditions. However, when the air inlet temperature was raised to 35 °C for the same air speed, the flat tube radiator rejected on average 28.4% more heat than the round tube one.



**Figure 11.** The radiator heat dissipation rates for 4 m s<sup>-1</sup> air speed as a function of the coolant flow rate for two different air inlet temperatures; (a)  $T_{a,in} = 25\text{ °C}$ , (b)  $T_{a,in} = 35\text{ °C}$ .

Figure 11 reports the heat dissipation rates of both radiators for two different air inlet temperatures as a function of coolant flow rate when the air speed was maintained at 4 m s<sup>-1</sup>. For the round tube radiator and air inlet temperature of 25 °C, the average heat dissipation rates for water, mixture, EG and HTO were 14.5, 11.5,

6.8 and 5.0 kW, respectively. When the air inlet temperature was raised to 35 °C in the round tube radiator, the average heat dissipation rates for water, mixture, EG and HTO reduced to 12.2, 9.7, 5.7 and 4.2 kW, respectively. On the other hand, for the flat tube radiator and air inlet temperature of 25 °C, the average heat dissipation rates for water, mixture, EG and HTO were 15.7, 14.5, 11.8 and 10.5 kW, respectively. However, the average heat dissipation rates for water, mixture, EG and HTO dropped to 13.2, 12.2, 9.9 and 8.8 kW, respectively, when the air inlet temperature was raised to 35 °C in the flat tube radiator. For the inlet air temperature of 25 °C and air speed of 4 m s<sup>-1</sup>, the flat tube radiator rejected 38.9% more heat than the round tube one as an average of the four coolants in the range of test conditions. On the other hand, when the air inlet temperature was raised to 35 °C for the same air speed, the flat tube radiator rejected on average 38.7% more heat than the round tube one.

#### 4. CONCLUSIONS

A radiator test system was developed, and the heat transfer performance of round and flat tube automobile radiators were experimentally evaluated for four different engine coolants, namely water, ethylene glycol, their 50/50 mixture and a commercial heat transfer oil. In all tests, the coolant temperature entering the radiator was kept at 90 °C, while the air stream temperature at the radiator inlet was changed between 25 and 35 °C with 5 °C intervals. On the other hand, the coolant flow rate was varied between 0.1 and 0.3 l s<sup>-1</sup> with 0.1 l s<sup>-1</sup> intervals, while the air speed was changed between 2 and 4 m s<sup>-1</sup> with 1 m s<sup>-1</sup> intervals. Thus, the tests were performed in a broad range of working conditions to simulate the operation of an actual automobile radiator. After evaluating the heat transfer performance of the radiators based on the steady-state test data, the following conclusions have been attained.

- Water resulted in the highest radiator heat dissipation rates in all tests, followed by 50/50 EG/water mixture, EG and HTO, respectively. Water yielded on average 16.0% higher radiator heat dissipation rate than 50/50 mixture, 63.4% higher dissipation rate than EG and 96.3% higher dissipation rate than HTO.
- When water was employed as coolant, the flat tube radiator rejected on average 4.8% more heat than the circular tube one. On the other hand, when the coolant was EG, the flat tube radiator rejected on average 66.4% more heat than the circular tube one. Moreover, when the coolant was 50/50 EG/water mixture, the flat tube radiator rejected on average 21.6% more heat than the circular tube one. Furthermore, the flat tube radiator rejected on average 101.6% more heat than the circular tube one when the coolant was HTO.
- As an average of the related tests, the flat tube radiator rejected 16.1% less heat when the air temperature at the radiator inlet was increased from 25 °C to 35 °C. Furthermore, it rejected on average 36.2% more heat when the air speed passing over the radiator was increased from 2 to 4 m s<sup>-1</sup>. Moreover, it rejected on average 28.4% more heat when the coolant flow rate was increased from 0.1 to 0.3 l s<sup>-1</sup>.
- As an average of the related tests, the round tube radiator rejected 16.3% less heat when the air temperature entering the radiator was raised from 25 °C to 35 °C. Moreover, it rejected on average 25.8% more heat when the air speed passing over the radiator was increased from 2 to 4 m s<sup>-1</sup>. Finally, it rejected on average 50.3% more heat when the coolant flow rate was increased from 0.1 to 0.3 l s<sup>-1</sup>.

These findings reveal that water yields the best heat transfer performance in expense of its corrosive nature and high freezing point, while the flat tube radiator rejects considerably more heat than the round tube one.

#### ACKNOWLEDGEMENT

The authors acknowledge the support provided by the Kocaeli University under the Project No. 2016/073.

#### DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS

The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission..

#### REFERENCES

- [1] Heywood J.B., “*Internal Combustion Engine Fundamentals*”, Mc-Graw-Hill, Inc., New York, (1998).
- [2] Patil P.S., Belsare S.N., Borse S.L., “Analysis of internal combustion engine heat transfer rate to improve engine efficiency, specific power & combustion performance prediction”, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 3: 447–452, (2012).
- [3] Gollin M. and Bjork D., “Comparative performance of ethylene glycol/water and propylene glycol/water coolants in automobile radiators”, *International Congress & Exposition*, Detroit, Michigan, U.S.A., February 26–29, (1996).
- [4] Oliet C., Oliva A., Castro J. and Segarra C.D.P., “Parametric studies on automotive radiators”, *Applied Thermal Engineering*, 27: 2033–2043, (2007).
- [5] Sany A.R.E., Saidi M.H. and Neyestani J., “Experimental prediction of Nusselt number and coolant heat transfer coefficient in compact heat exchanger performed with ε-NTU method”, *The Journal of Engine Research*, 18: 62–70, (2010).
- [6] Peyghambarzadeh S.M., Hashemabadi S.H., Hoseini S.M. and Jamnani M.S., “Experimental study of heat transfer enhancement using water/ethylene glycol based nanofluids as a new coolant for car radiators”,

- International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38: 1283–1290, (2011).
- [7] Amrutkar P.S. and Patil S.R., “Automotive radiator sizing and rating – simulation approach”, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 01–05, (2013).
- [8] Nieh H.M., Teng T.P. and Yu C.C., “Enhanced heat dissipation of a radiator using oxide nano-coolant”, *International Journal of Thermal Sciences*, 77: 252–261, (2014).
- [9] Sheikhzadeh G., Hajilou M. and Jafarian H., “Analysis of thermal performance of a car radiator employing nanofluid”, *International Journal of Mechanical Engineering and Applications*, 2: 47–51, (2014).
- [10] Vajjha R.S., Das D.K. and Ray D.R., “Development of new correlations for the Nusselt number and the friction factor under turbulent flow of nanofluids in flat tubes”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 80: 353–367, (2015).
- [11] Ahmed S.A., Ozkaymak M., Sözen A., Menlik T. and Fahed A., “Improving car radiator performance by using TiO<sub>2</sub>-water nanofluid”, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21: 996–1005, (2018).
- [12] Keklik E. and Hosoz M., “Development of a test rig for automotive radiators and preliminary tests using various engine coolants”, *9th International Automotive Technologies Congress*, Bursa, 559–568, (2018).
- [13] Klein, S.A., “*Engineering Equation Solver (EES) Software*”, F-Chart Software, Madison, WI, (2016).
- [14] Patel B.M., Modi A.J. and Rathod P.P., “Analysis of engine cooling water pump of car & significance of its geometry”, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 4: 100–107, (2013).
- [15] Tasuni M.L.M., Latiff Z.A., Nasution H., Perang M.R. M., Jamil H.M. and Misseri M.N., “Performance of a water pump in an automotive engine cooling system”, *UTM Jurnal Teknologi*, 78: 47–53, (2016).
- [16] Moffat R.J., “Describing the uncertainties in experimental results”, *Experimental and Thermal Fluid Science*, 1: 3–17, (1988).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Melez güç sistemlerinde zaman gecikmesinin kararlılık analizi

## *Time delay margins computation for stability of hybrid power systems*

Yazar(lar) (Author(s)): Halil EROL<sup>1</sup>, Saffet AYASUN<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-6171-0362

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-6785-3775

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Erol H., Ayasun S., “Melez güç sistemlerinde zaman gecikmesinin kararlılık analizi”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1131-1139, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.593892

# Melez Güç Sistemlerinde Zaman Gecikmesinin Kararlılık Analizi

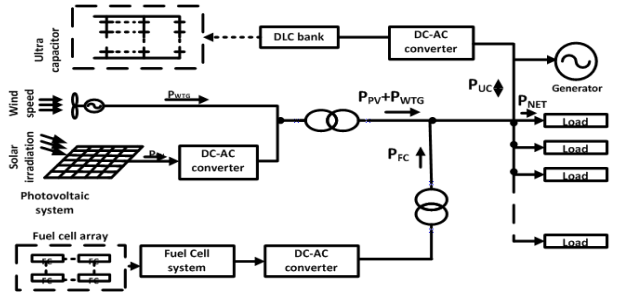
## Time Delay Margins Computation for Stability of Hybrid Power Systems

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Yerel melez enerji üretim sisteminin LFC'sinin gecikmeye bağlı kararlılık analizi gerçekleştirildi / Delay-dependent stability of the LFC of hybrid power generation subsystem is analyzed.
- ❖ Kurgulanan melez güç sisteminin matematiksel modeli ve simülasyonu yapıldı. / Mathematical model and simulation of the proposed hybrid power system is obtained.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Şekilde gösterilen melez güç sisteminin matematiksel modellemesi ve simülasyonu yapılmıştır. Sistem, rüzgar türbini jeneratörü (WTG), fotovoltaik sistem (PV), enerji depolama için ultra-kapasitör (UC) bankası, yakıt hücresi (FC) sistemi ve dizel jeneratör (DG) içermektedir. / Mathematical modeling and simulation of the hybrid power system shown in the figure is realized. The system includes wind turbine generator (WTG), photovoltaic system (PV), ultra-capacitor (UC) bank for energy storage, fuel cell (FC) system and diesel generator (DG).



### Amaç (Aim)

Bu çalışmada, genel tasarımı şekilde sunulan melez güç sisteminin kararlılık sınırları PI kontrolör kullanarak belirlenmesi sağlanmıştır. Kontrolör kazançlarının seçiminde oluşan zaman gecikme sınırları belirlenmesi hedeflenmiştir. / In this study, the stability limits of the hybrid power system, whose general design is presented in the way, are determined by using PI controller. It is aimed to determine time delay limits in the selection of controller gains.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Sistemin matematiksel modellemesi gerçekleştirildi. Model çözümünde tam çözüm sağlayan bir yöntem kullanılmıştır. Teorik çözümlerin doğruluğu simülasyon yapılarak doğrulanmıştır.

### Özgünlük (Originality)

Yerel melez enerji üretim sisteminin LFC'sinin gecikmeye bağlı kararlılık analizi gerçekleştirilmesi. / Delay-dependent stability of the LFC of hybrid power generation subsystem is analyzed.

### Bulgular (Findings)

Farklı  $K_P$ ,  $K_I$  değerleri için sistem ne kadar zaman gecikmesine müsaade edebilir, sorusu yanıtlanmıştır. Sonuçlar hem tablo şeklinde hem de grafik olarak değişik  $K_P$ ,  $K_I$  değerleri için elde edilmiştir. / For different  $K_P$ ,  $K_I$  values, how long delay, can the system stay in stable region, has been answered. The results were obtained both in tabular form and graphically for different  $K_P$ ,  $K_I$  values.

### Sonuç (Conclusion)

Önerilen sistemin farklı  $K_P$ ,  $K_I$  değerleri için, kontrolörün uzaktan kontrolünde olabilecek gecikme sürelerinin sınırları belirlenmiştir. / For the different  $K_P$  and  $K_I$  values of the proposed system, the limits of the delay times that may be in the remote control of the controller have been determined.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Melez Güç Sistemlerinde Zaman Gecikmesinin Kararlılık Analizi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Halil EROL<sup>1\*</sup>, Saffet AYASUN<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 18.07.2019 ; Kabul/Accepted : 06.11.2019)

## ÖZ

Yük frekans kontrolü (LFC) de, kontrol sinyallerinin ölçümlerini kontrol merkezinden kontrol ünitesine ve uzak terminal ünitelerinden (RTU) kontrol merkezine iletmek esastır. Bu nedenle, geleneksel iletişim kanallarının kullanılması nedeniyle zaman gecikmeleri kaçınılmaz hale geliyor. LFC sisteminin dinamik performansı bu gecikmelerle azalır. Bu makale, yerel melez enerji üretim sisteminin LFC'sinin gecikmeye bağlı kararlılığını analiz etmektedir. Çalışılan sistem, rüzgar türbini jeneratörü (WTG), fotovoltaik sistem (PV), enerji depolama için ultra-kapasitör (UC) bankası, yakıt hücresi (FC) sistemi ve dizel jeneratör (DG) içerir. Bu çalışmada, böyle bir sistemin modellenmesi ve benzetimi yapılmıştır. Gecikme marjı, LFC sisteminin kararlılık gecikmesinde üst sınırı belirtmektedir. Gecikme marjlarını hesaplamak için analitik bir yöntem kullanılmıştır. Gecikme marjları, oransal- integral (PI) kontrolörün geniş bir aralığı için hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, PI kontrolör parametrelerini, sistemin dinamik performansı ile gecikme marjı arasında dengeli bir seçim yapacak şekilde ayarlamak için kullanılabilir. Önerilen hibrit sistemin kontrolör parametrelerinin kararlılık çerçevesinde hangi aralıklarda seçilebileceği tespit edilerek, tablo ve grafik halinde sunulmuştur. Önerilen sistemin Matlab/Simulink ile benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmaları ile teorik çalışmaların sonuçları uyumluluk göstermiştir. Simülasyon çalışmaları önerilen yöntemin etkinliğini doğrulamaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Gecikmeye bağlı stabilite, gecikme marjı, elektriksel güç sistem kararlılığı, yük frekans kontrolü.

# Time Delay Margins Computation for Stability of Hybrid Power Systems

## ABSTRACT

In load frequency control (LFC), it is essential to transmit measurements of control signals from the control center to plant side and remote terminal units (RTU) to control center. Therefore, time delays become inevitable due to the use of conventional communication channels. The dynamic performance of LFC system would be degraded by these delays. This paper is dedicated to the delay-dependent stability of the LFC of hybrid power generation subsystem. The system studied includes wind turbine generator (WTG), photovoltaic system (PV), ultra-capacitor (UC) bank for energy storage, fuel cell (FC) system and diesel generator (DG). Delay margin is stated for the upper bound on the delay for stability of LFC system. An analytical method is used to compute delay margins. Delay margins are calculated for wide range of proportional-integral (PI) controller. Such results could be utilized to tune the PI controllers as to achieve a compromise between the dynamic performance and the delay margin. It has been determined in which intervals, the controller parameters of the proposed hybrid system can be selected while the system is in stable region. The results are presented in tables and graphs. Simulation study of the proposed system with Matlab / Simulink was performed. The results of the simulation studies and the theoretical studies showed compatibility. Simulation studies verify the effectiveness of the proposed method.

**Keywords:** Delay-dependent stability, delay margin, electrical power systems stability, load frequency control.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik şebekesinde son yıllarda büyük elektrik şebeke kesintileri yaşanmaktadır. Bu, bazı ülkelerin melez mikro şebekeleri kullanma eğilimini artırmıştır. Dahası, dünyadaki pek çok ülke ve özellikle kırsal bölgeler bağımsız elektrik üretim sistemlerini kullanmaya yönelmektedir. Bağımsız elektrik üretim güç sistemleri hakkında birçok literatür vardır [1]. Akaryakıt fiyat artışları, kirlilik ve çevresel ısınma nedeniyle,

şebekeden bağımsız sistem şeklindeki yenilenebilir enerji üretim tesisleri artmaktadır. Yenilenebilir enerji üretiminde, güneş ve rüzgar enerjisi üretimi en çekici iki yöntemden biridir. Hava koşulları nedeniyle, güneş ve rüzgar kaynaklarının enerji üretimi dalgalanıyor. Bu nedenle, batarya bankası ve FC gibi enerji depolama sistemlerine veya ek üretime genellikle ihtiyaç duyulur. Melez yenilenebilir enerji sistemlerinin modellenmesi ve frekans sapmalarının kontrolü literatürde yoğun olarak araştırılmaktadır [2]. Bunlar arasında izole edilmiş bir yüke bağlı bir melez güç üretim / depolama sisteminin küçük sinyal stabilite analizi yapılmıştır [3, 4]. Azaltılmış boşaltma yükü tekniği uygulanmış izole edilmiş küçük

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : halilerol@osmaniye.edu.tr

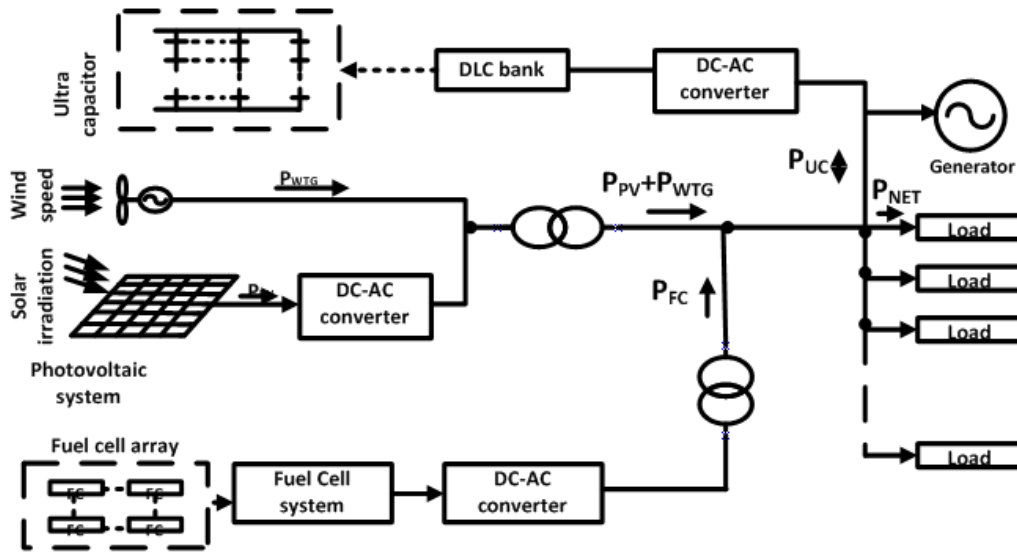


hidroelektrik santral için yük frekans kontrolü araştırılmıştır [5]. Birinci dereceden FC Dynamic modeli led/lag olarak incelenmiştir [6]. Deneysel verilere dayanan geçici olaylar, FC sistemlerinin tam olarak nasıl davrandığını göstermek için analiz edildi. Rüzgar türbini jeneratörünün çıkış gücü kontrolü, perde açısı değişimi kullanılarak, [7] ve [8]’de sunulmuştur. Kapalı devre sistemlerinin dinamik performansı, zaman gecikmeleri ile bozulabilir. Bu, bazen sistemin kararsızlığına bile neden olabilir [9]. Son zamanlarda, iletişim gecikmeleri olan LFC şema analizi / sentezi bazı makalelerde ele alınmıştır [10] [11]. Üçüncü parti LFC servisi için ağ gecikmesi modellemesi ve ağ iletişimi gereksinimi araştırılmış ve ayrıca serbest piyasada LFC planı için iletişim gecikmesinin etkileri gösterilmiştir [12]. Ayrıca, geleneksel bir LFC şemasının gecikmeye bağlı stabilite analizi sunulmuştur [13-15]. Zaman gecikmesi etkilerinin üstesinden gelmek için, lineer matris eşitsizliği (LMI) tekniğine dayanarak, merkezi olmayan bir durum geri bildirim denetleyicisi ve tam durum geri bildirim denetleyicisi tasarlanmıştır [9]. Zaman gecikmeleri, çarpanlı belirsizlikler olarak ele alınmaktadır [16] ve  $H_{\infty}$  teorisine dayanarak, serbest piyasada bir oransal integral tip LFC araştırılmıştır [17]. Dinamik sistemler gecikme marjı hesaplamaları temel olarak iki tip teorik yöntemle yapılır. Birincisi, sistemin karakteristik denkleminin veya kritik özdeğerlerin

kontrolü için analiz edilmiştir. İletişim gecikmesi olan yük frekans kontrolü için doğrusal matris eşitsizliği yöntemi [13] uygulanmıştır. [19] tarafından bildirilen mevcut çalışmalar, frekans bölgesi direkt yöntemlerinin, zaman bölgesi yöntemleri ile karşılaştırdığımızda daha doğru gecikme marjlarına yol açtığını göstermektedir.

Bu makale, sabit iletişim zaman gecikmeleri olan melez yenilenebilir enerji sistemlerinin kararlılık gecikme marjlarını belirlemek için [18] tarafından temsil edilen teorik bir yöntemi uygular. [20] tarafından bildirilen melez LFC sisteminin dinamik modeli, tüm iletişim zaman gecikmeleri dikkate alınarak geliştirilmiştir. Kontrolörün kantitatif etkisinin araştırılması için, oransal integral kontrolör kazançlarının farklı değerleri için gecikme marjları hesaplanmıştır. Son olarak, önerilen yöntemle hesaplanan teorik gecikme marjı sonuç doğruluğunu kanıtlamak amacı ile sonuçlar simülasyonlar kullanılarak doğrulanmıştır.

Makalenin genel ana hatları aşağıdaki gibi düzenlenmiştir. II. Bölüm’de, sorunun araştırılması ve LFC sisteminin dinamik modelinin formülasyonu gerçekleştirilmiştir. Bölüm III’te, zaman gecikmeleri olan melez LFC şeması altında, güç sistemlerinin kararlılığı için yeterli koşulların türetilmesi yapılmıştır. Kontrolör parametrelerine dayanarak vaka çalışmaları Bölüm IV’te yapılmıştır. Son olarak, sonuçlar ve sonuçlar hakkındaki yorumlar Bölüm V’de yapılmıştır.



Şekil 1. Melez Güç sistemi yapılandırması.(Configuration of the hybrid power system)

köklerini belirlemeyi amaçlayan frekans alanı yaklaşımlarına dayanır. Bu doğrudan yöntemlerin ortak başlangıç noktası, karakteristik denklemlerin sanal köklerinin belirlenmesidir [18]. Bu yöntemin temel uygulamaları, sabit zaman gecikmelerini analiz etmek için geliştirilmiştir. İkinci yöntem grubu, stabilite gecikme marjlarını belirlemek için LMI tekniğini ve Lyapunov stabilite teorisini uygulayan zaman alanı yaklaşımıdır. [11], gecikmeye bağlı kararlılıkta, sabit ve zamanla değişen gecikmelere sahip yüklerin frekans

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Şekil 1, analiz edilecek melez enerji üretim / enerji depolama sisteminin konfigürasyonunu göstermektedir. Bazı yazarlar tarafından bu yapılandırma, mikro şebeke bağlantısı olarak bilinir. Bu sistem uzaktan kontrol ediliyorsa, zaman gecikmesi olabilir. Böylece, uzak merkezden gönderilen komutlar zamanında yerine getirilemeye bilir. Bu durum güç sistemini dengesizleştirecektir. Güç sistemini dengesizleştiren zaman

gecikmesi, gecikme marjı olarak bilinir. Bu gecikme marjı, bu makalenin ana odağıdır. Yerel güç sistemi bir PV, bir WTG, bir FC ve bir UC içerir. Analiz edilen AC sistemiyle enerji alışverişinde sadece PV, FC ve UC'nin uygun güç dönüştürücüleri gerektirdiğini gözlemleyin. UC'nin, yerel sistem tarafından üretilen fazla enerjiyi depolayacak kadar kapasitesinin yüksek olduğu varsayılmaktadır.

Güç üretimi (PG)/güç dağıtım sisteminin (PDS) blok şeması, Şekil 2'de gösterilmiştir. Net güç üretimi  $P_{NET}$  şu şekilde belirlenir: (a) PV'lerin çıkış gücü ( $P_{PV}$ ), (b) WTG'lerden ( $P_{WTG}$ ) çıkış gücünün bir parçası (c) FC'lere bağlı, DC-AC dönüştürücüsünün çıkış gücü ( $P_{FC}$ ), (d) UC'lerin ( $P_{UC}$ ) deşiş tokuş gücü ve jeneratörün ( $P_{GEN}$ ) çıkış gücüne bağlıdır.

Stabilite analizi için, zaman gecikmeli melez LFC sistemi için karakteristik denklemin elde edilmesi ilk adımdır.

$$\Delta(s, \tau) = P(s) + Q(s)e^{-s\tau} = 0 \quad (1)$$

burada,  $\tau$  toplam zaman gecikmesini gösterir,  $Q(s)$  ve  $P(s)$  aşağıda verilen gerçek katsayılı polinomlardır:

$$P(s) = p_6 s^6 + p_5 s^5 + p_4 s^4 + p_3 s^3 + p_2 s^2 \quad (2)$$

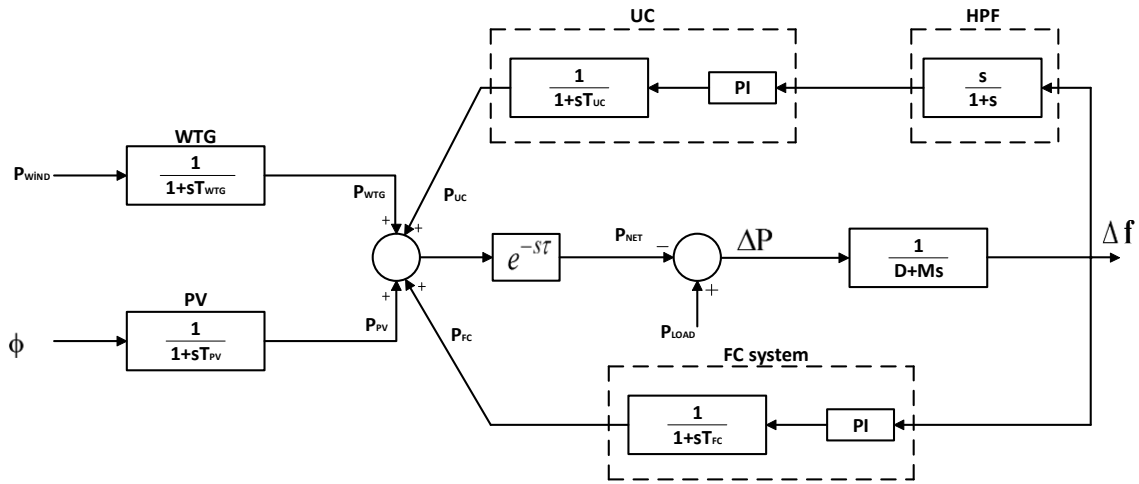
$$Q(s) = q_4 s^4 + q_3 s^3 + q_2 s^2 + q_1 s \quad (3)$$

burada  $p_i$  ve  $q_i$  ler şöyledir,

$$p_6 = MT_{FC} T_{UC}$$

$$p_5 = MT_{FC} T_{UC} + MT_{FC} + MT_{UC} + DT_{FC} T_{UC}$$

$$p_4 = MT_{FC} + MT_{UC} + M + DT_{FC} T_{UC} + DT_{FC} + DT_{UC}$$



Şekil 2. Melez Güç sistemi blok şeması.(Hybrid power system block diagram for investigation)

Melez LFC şeması geleneksel modeli, kontrol mekanizmasına zaman gecikmesi dâhil edilerek modifiye edilir. Bir kontrol cihazı olarak, modeldeki yük frekansını kontrol etmek için oransal integral kontrol kullanılır. LFC şeması birden fazla gecikmeye sahip olabilir. Örneğin, iletişim hatlarından veya geribildirim bölümünden olabilir. Bu çoklu gecikmeler basitleştirme için bu çalışmada sabit tek gecikme olarak kabul edilmiştir. Bu sadeleştirme dikkate alındığında, Şekil 2'de gösterildiği gibi basit bir model oluşturmak mümkündür. Model, durum değişkenlerinde oluşan tek bir zaman gecikmesinin uygun bir şekilde gösterilmesini sağlar. Önerilen sistemde, uzun vadede DLC bankasının boşalmasını ve şarjını azaltmak için, yüksek geçiren bir filtre (HPF) de kullanılır. HPF'nin yardımıyla, genel sistem frekans sapması iki bölüme ayrılmıştır. Hızlı yanıt süresine sahip olması nedeniyle, yüksek frekanslı sapmanın telafisi DLC bankaları tarafından bastırılır. FC sistemi düşük frekans sapmasını telafi etmek için kullanılır [18].

(4)

$$p_3 = M + DT_{FC} + DT_{UC} + D$$

$$p_2 = D$$

$$q_4 = K_P T_{FC} + K_P T_{UC}$$

$$q_3 = K_I T_{FC} + 2K_P + K_I T_{UC} + K_P T_{UC}$$

$$q_2 = 2K_I + K_I T_{UC} + K_P q_1 = K_I$$

Karakteristik denklemin (1) kök konumu, zaman gecikmesi olan melez LFC sisteminin kararlılığını hesaplamak için hesaplanmalıdır. Bir sonraki bölüm, üstel terimlerin ortadan kaldırılması kullanılarak kararlılık probleminin gerçekleştirilmesi ve melez LFC sistemi kararlılık analizinin tanımlanmasına ayrılmıştır.

## 2.1 Zaman gecikmesinde kararlılık analizi

Zaman gecikmesi olan sistemlerin karakteristik denklemi denge noktasında sonsuz boyuttadır. Bu nedenle, sistemin kararlılık haritalarını çıkarmak zordur. Bu, sistemin özdeğerlerinin sonsuz olduğu anlamına gelir. Bununla birlikte, melez LFC sisteminin kararlılık analizi

çin (1) 'de verilen karakteristik denklemin tüm köklerini bulmak gerekli değildir. Sistem karakteristik denkleminin zaman gecikmesine göre nasıl değiştiğini değerlendirmek yeterlidir. Gecikmeden bağımsız sistem için (yani,  $\tau = 0$ ), LFC sisteminin kararlılığı sistemin karakteristik denkleminin denklem (1) ile tanımlanan kök yerlerine dayanır. Bu köklerin  $\tau$ 'nin fonksiyonu olduğu ve zaman gecikmesi içerdiği açıktır.  $\tau$  değiştiğinde, bazı köklerin yerleri değişebilir. Karakteristik denklem köklerinin bazı sınırlı zaman gecikmeleri için  $s = jw_c$  konumunda (burada  $c$  "geçiş frekansı" için kullanılmakta), yani sanal eksen üzerinde olduğunu varsayalım. Karmaşık kökler, karmaşık eşlenik simetrisine sahip olduğundan,  $\Delta(-s, \tau) = 0$  denklemi,  $\tau$  zaman gecikmesinin aynı değeri için  $s = jw_c$ 'de aynı kökü içerecektir. Sonuç olarak, problem,  $\Delta(-s, \tau) = 0$  ve  $\Delta(s, \tau) = 0$  'in  $s = jw_c$ 'de ortak köklere sahip olan  $\tau$  zaman gecikmesi değerlerinin hesaplanmasına dönüşür. Bu durum aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir,

$$\Delta(s, \tau) = P(s) + e^{-s\tau}Q(s) = 0 \quad (5)$$

$$\Delta(-s, \tau) = P(-s) + e^{s\tau}Q(-s) = 0 \quad (6)$$

Denklem (3) deki üstel ifadeyi yok edebilmek için  $s = \pm jw_c$ , olarak kullanabiliriz.

$$\Delta(jw_c, \tau) = P(jw_c) + e^{-jw_c\tau}Q(jw_c) = 0 \quad (7)$$

$$\Delta(-jw_c, \tau) = P(-jw_c) + e^{jw_c\tau}Q(-jw_c) = 0 \quad (8)$$

Üstel terimin yok edilmesi yöntemi uygulandığında, karakteristik denklem (7),

$$W(w_c^2) = P(jw_c) * P(-jw_c) - Q(jw_c) * Q(-jw_c) = 0 \quad (9)$$

$P(s)$ ,  $Q(s)$  değerlerini denklem (2) ve (3) deki denklem (5) 'e değiştirerek aşağıdaki yeni polinom elde edilir. Bu polinomda üstel terimler yok edilmiştir.

$$W(w_c^2) = t_{12}w_c^{12} + t_{10}w_c^{10} + t_8w_c^8 + t_6w_c^6 + t_4w_c^4 + t_2 \quad (10)$$

buradaki  $t_i$ 'ler, aşağıda verildiği gibi  $p$  ve  $q$ 'nun fonksiyonlarıdır.

$$\begin{aligned} t_{12} &= p_6^2 \\ t_{10} &= -2 * p_4 * p_6 + p_5^2 \\ t_8 &= 2 * p_2 * p_6 - 2 * p_3 * p_5 + p_4^2 - q_4^2 \\ t_6 &= -2 * p_2 * p_4 + 2 * q_2 * q_4 + p_3^2 - q_3^2 \\ t_4 &= p_2^2 + 2 * q_1 * q_3 - q_2^2 \\ t_2 &= -q_1^2 \end{aligned} \quad (11)$$

Kararlılık sorunu, bu yöntem ile etkili bir şekilde, gecikme terimi içermeyen bir düzeye indirgenir. Bunun anlamı, sorunu yalnızca (10) 'daki tek değişkenli bir polinomun köklerini hesaplamaya indirgenmesidir. Denklem (1) 'de üstel terimlerle olan 6. mertebeden karakteristik denklemin, üstel bir terim olmadan denklem

(10) ile gösterilen bir 12. derece polinoma dönüştüğüne dikkat edin. (10) 'un gerçek pozitif kökleri, denklem (1)'in sanal köklerinin büyüklüğü ile eşleşir,  $s = \mp jw_c$ . Gerçek denklemin pozitif köklerini (10) hesaplamak, denklemlerin (1)'in tamamen sanal köklerinin hesaplanmasından çok daha kolaydır.

Melez LFC sisteminin gecikme bağımlılığı, (10) 'un yeni polinomun pozitif gerçek kökleri tarafından kolayca belirlenebilir. Eğer modifiye karakteristik denklem(10)  $\tau \geq 0$  için, (bütün gecikmeler için) gerçek pozitif kök içermemesi durumunda, sistemin gecikmeden bağımsız kararlı olduğu söylenir. Melez LFC sistemi, türetilmiş karakteristik denklem(10), en az bir pozitif gerçek köke sahip olması durumunda, gecikmeye bağlı kararlı olarak bilinir. Bu tür köklerin varlığı, denklem (10) köklerinin sınırlı bir gecikme süresi için  $s = \mp jw_c$ 'deki sanal ekseni kestiği anlamına gelir.

Denklem(10) köklerinin sanal ekseni geçtiği gecikme sınırı olarak adlandırılan zaman gecikmesi, [18] yöntemi ile aşağıda hesaplanmıştır.

$$\tau^* = \frac{1}{w_c} * \tan^{-1} \left( \frac{k_9 w_c^9 + k_7 w_c^7 + k_5 w_c^5 + k_3 w_c^3}{k_{10} w_c^{10} + k_8 w_c^8 + k_6 w_c^6 + k_4 w_c^4} \right) \quad (12)$$

burada

$$k_{10} = p_6 * q_4,$$

$$k_8 = -p_4 * q_4 + p_5 * q_3 - p_6 * q_2,$$

$$k_6 = p_2 * q_4 - p_3 * q_3 + p_4 * q_2 - p_5 * q_1$$

$$k_4 = -p_2 * q_2 + p_3 * q_1 \quad (13)$$

Eğer denklem(10)'un pozitif kökleri varsa, o zaman denklem (1)'in kökünün  $s = jw_c$ 'deki sanal ekseni geçip geçmediğini,  $\tau$ 'yu arttırarak doğrulamamız gerekir. Bu,  $[ds / d\tau]$  'nın gerçek kısmının işareti ile kontrol edilebilir. Kritik karakteristik köklerin sanal ekseni sıfır olmayan bir hızla geçmesi durumunda sanal ekseni geçen bazı kökler vardır. Bu kökler şöyle belirlenir,

$$\text{Re} \left[ \frac{ds}{d\tau} \right]_{s=jw_c} \neq 0 \quad (14)$$

$$RT|_{s=jw_c} = \text{sgn}[W'(w_c^2)] \quad (15)$$

burada  $\text{sgn}$  işareti,  $w_c^2$  ye göre denklem(10)'un türevini ifade eder. Denklem (15) in nasıl elde edilebileceği, makale [21] de bulunabilir.

Bu ifade oldukça basit bir kıstas verir. Bu kriterine göre  $\tau$ ,  $\tau_1 = \tau^* - \Delta\tau$  'den,  $\tau_2 = \tau^* + \Delta\tau$ , ( $0 < \Delta\tau \ll 1$ ) değerine yükseldiğinde,  $s = jw_c$ 'deki köklerin geçiş yönü elde edilebilir. Kök  $s = jw_c$ , sanal ekseni ya kök eğilimi  $RT = -1$  olduğunda sabit sol yarım düzleme, ya da kök eğilimi,  $RT = +1$  olduğunda kararsız sağ yarım düzleme geçer. Tek gecikmeli durum için denklem(10) polinomu, tüm  $\tau \in \mathbb{R}^+$  için sınırlı sayıda gerçek pozitif köke sahip olur. Buna şöyle bir set diyelim,

$$\{w_c\} = \{w_{c1}, w_{c2}, \dots, w_{cp}\} \quad (16)$$

her  $w_{cm}$  için,  $m = 1, 2, \dots, p$ , denklem (12) kullanılarak periyodik olarak aralıklı birçok  $\tau_m^*$  değeri alabilir.

Bu seti şöyle adlandıralım

$$\{\tau_m^*\} = \{\tau_{m1}^*, \tau_{m2}^*, \dots, \tau_{mp}^*\} \quad m = 1, 2, \dots, p \quad (17) \quad \text{bozulması uygulanmış ve daha sonra } t = 0 \text{ s'de melez}$$

**Çizelge 1.** Çeşitli  $K_P$  ve  $K_I$  değerleri için elde edilen gecikme marjı sonuçları. Yükün atalet ve sönümleme faktörü  $M = 0.4$  ve  $D = 0.03$  sabit tutulmuştur. (Delay margin results obtained for various values of  $K_P$  and  $K_I$ . The inertia and damping factor of the load are held constant  $M=0.4$  and  $D=0.03$  respectively.)

$\tau^*$ (s)	$K_I$									
$K_P$	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
0.5	0,849	0,472	0,310	0,222	0,166	0,128	0,101	0,081	0,065	0,052
1	0,646	0,510	0,405	0,329	0,272	0,229	0,195	0,169	0,147	0,129
1.5	0,458	0,413	0,369	0,330	0,294	0,263	0,237	0,214	0,194	0,177
2	0,355	0,335	0,315	0,295	0,276	0,257	0,240	0,224	0,210	0,196
2.5	0,293	0,282	0,271	0,260	0,249	0,238	0,227	0,217	0,207	0,198
3	0,251	0,245	0,238	0,231	0,224	0,217	0,211	0,204	0,197	0,191
3.5	0,221	0,217	0,212	0,208	0,203	0,199	0,194	0,189	0,185	0,180
4	0,198	0,195	0,192	0,189	0,186	0,182	0,179	0,176	0,173	0,170
4.5	0,180	0,178	0,176	0,173	0,171	0,169	0,166	0,164	0,161	0,159
5	0,165	0,164	0,162	0,160	0,158	0,157	0,155	0,153	0,151	0,149

burada  $\tau_{m,r+1} - \tau_{m,r} = \frac{2\pi}{w_c}$  bir tekrarlama aralığıdır. Gecikme marjı tanımı dikkate alındığında, minimum  $\tau_m^*$ ,  $m=1, 2, 3, \dots, p$  sistemin gecikme marjıdır  $\tau^* = \min(\tau_m^*)$ .

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Gecikme marjları melez LFC sisteminde, çizelgelerde gösterildiği gibi değişik durumlar için hesaplanmıştır. Kontrolörün kantitatif etkisinin araştırılması için, PI kontrolör kazancının geniş bir değer aralığı için gecikme marjları elde edilmiştir. Ayrıca, simülasyon çalışmaları kullanılarak gecikme marjı doğruluğunun tespiti gerçekleştirilmiştir. Sistem parametreleri aşağıdaki gibi seçilmiştir;  $T_{WTG}$ , WTG sisteminin zaman sabiti: 1.5 sn;  $T_{PV}$ , PV sisteminin zaman sabiti: 1.8 sn;  $T_{FC}$ , FC sisteminin zaman sabiti: 0.26 sn;  $T_{UC}$ , UC sisteminin zaman sabiti: 0,01 sn. Yükün sönümleme faktörü  $D$ 'dir ve %3 olarak seçilmiştir. Toplam atalet  $M$ , 0.4 pu olarak seçilmiştir [18]. LFC sistemine  $\Delta P_d = 0,1$  pu pozitif yük

LFC sisteminin frekans tepkisi elde edilmiştir.

Gecikme marjlarının hesaplanması, çok sayıda PI kontrolör kazancı için denklem(7) kullanılarak yapılır. Bunlar Tablo I' de gösterilmiştir. Bu tablodan,  $K_P$  sabitlenirse  $\tau^*$ 'nın  $K_I$  arttıkça azaldığını görebilirsiniz. Bu,  $K_I$  arttığında, daha az karalı bir melez LFC sistemi ile sonuçlandığını göstermektedir.  $K_P$  sabitlenirse,  $K_I$ 'nın  $\tau^*$  üzerindeki etkisi,  $K_I$ 'nın artması  $\tau^*$ 'ın azalmasına neden olmaktadır.  $0 \leq K_I \leq 1$  ve  $0 \leq K_P \leq 1$  aralığında detaylı analiz yapılabilir. Bu aralık için  $K_P$  ve  $K_I$  değerlerine göre  $\tau^*$ 'ın davranışı Tablo 2'de gösterilmiştir.

Sonuçlar, sabit bir  $K_P$  için,  $K_I$  arttıkça  $\tau^*$ 'nın azaldığını göstermektedir.  $K_P$  sabitlenirse,  $K_I$ 'nın artması  $\tau^*$ 'ın azalmasına neden olmaktadır.  $K_P$ 'nin  $\tau^*$  gecikme marjı üzerindeki etkisinin sabit  $K_I$  için iki sonucu vardır. İlk eğilim,  $\tau^*$  gecikme marjının  $0 \leq K_P \leq 0.1$  aralığında  $K_P$  arttıkça artmasıdır. Ancak  $0.1 < K_P$  olduğunda, gecikme marjı  $K_P$  artarken azalmaktadır. En uzun gecikme marjı  $K_P=0.1$  ve  $K_I=0.05$  değerlerinde yakalanmıştır. Bu değer melez sistemin zaman gecikmesinden dolayı kararlı kalacağı en iyi durumu ifade etmektedir.

**Çizelge 2.**  $0 \leq K_I \leq 1$  and  $0 \leq K_P \leq 1$ ,  $M=0.4$ ,  $D=0.03$  için gecikme marjı sonuçları. (Delay margin results for  $0 \leq K_I \leq 1$  and  $0 \leq K_P \leq 1$ ,  $M=0.4$ ,  $D=0.03$ )

$\tau^*$ (s)	$K_I$						
$K_P$	0.05	0.1	0.15	0.2	0.4	0.6	1
0	1.0783	0.6490	0.4616	0.3502	0.1502	0.0739	0.0111
0.05	1.9799	1.1165	0.7773	0.5888	0.2716	0.1555	0.0605
0.1	2.5201	1.4691	1.0338	0.7906	0.3819	0.2319	0.1080
0.2	2.2097	1.6227	1.2546	1.0130	0.5489	0.3595	0.1986
0.4	1.0081	0.9483	0.8865	0.8254	0.6181	0.4755	0.3088
0.6	0.6298	0.6139	0.5974	0.5804	0.5116	0.4470	0.3426
1	0.3732	0.3694	0.3657	0.3618	0.3461	0.3300	0.2977

**Çizelge 3.** Çeşitli  $K_P$  ve  $K_I$  değerleri için elde edilen gecikme marjı sonuçları. Yükün atalet ve sönümlenme faktörü  $M = 0.8$  ve  $D = 0.03$  sabit tutulmuştur. (Delay margin results obtained for various values of  $K_P$  and  $K_I$ . The inertia and damping factor of the load are held constant  $M=0.8pu$  and  $D=0.03$  respectively)

$\tau^*$ (s)	$K_I$									
	$K_P$	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5
0.5	0.517	<b>0.334</b>	0.233	0.172	0.132	0.104	0.083	0.068	0.056	0.046
1	0.338	0.297	0.259	0.226	0.198	0.174	0.154	0.137	0.123	0.111
1.5	0.246	0.232	0.218	0.205	0.192	0.179	0.167	0.157	0.146	0.137
2	0.196	0.189	0.183	0.176	0.170	0.164	0.157	0.151	0.145	0.139
2.5	0.164	0.160	0.157	0.153	0.150	0.146	0.142	0.139	0.135	0.132
3	0.141	0.139	0.137	0.135	0.133	0.130	<b>0.128</b>	0.126	0.124	0.122
3.5	0.125	0.123	0.122	0.120	0.119	0.117	0.116	0.114	0.113	0.111
4	0.111	0.110	0.109	0.108	0.107	0.106	0.105	0.104	0.103	0.102
4.5	0.101	0.100	0.099	0.098	0.098	0.097	0.096	0.095	0.095	0.094
5	0.092	0.091	0.091	0.090	0.089	0.089	0.088	0.088	0.087	0.087

Yükün atalet ve sönümlenme faktörünün gecikme marjı üzerindeki etkisi tablo 3 ve tablo 4'te incelenmiştir. Tablolar karşılaştırılırsa, artan atalet  $M$ 'nin gecikme marjı  $\tau^*$ 'i arttırdığı gözlemlenebilir. Sönümlenme faktörünün artırılması veya azaltılması gecikme marjı  $\tau^*$  üzerinde önemli bir etkisi yoktur. Teorik gecikme marjlarının doğrulanması, zaman uzayında yapılan simülasyonlar tarafından gerçekleştirilmiştir. Teorik gecikme marjı sonuçlarının doğrulanması, zaman bölgesi simülasyonları için Matlab / Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir.  $P_I$  kontrolörü için tipik parametreler, Şekil 3'te aşağıdaki gibi seçilen kazanımlardır:  $K_I=1$   $K_P=0.5$ . Bu  $PI$  kazançları için teorik gecikme marjının Tablo 1'de gösterildiği gibi  $\tau^*=0.334s$  olarak hesaplanmıştır.

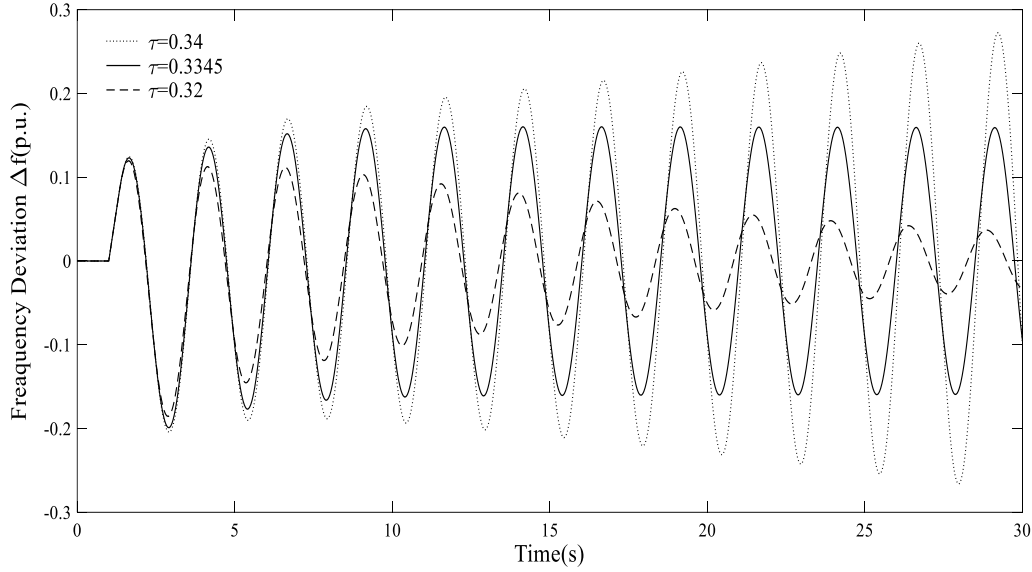
Şekil 3'teki simülasyon sonuçları, melez sistemin, sürekli salınımlar nedeniyle  $\tau = 0.3345$  s'de marjinal olarak stabil olduğunu göstermektedir. Ayrıca,  $\tau = 0.32$  s için LFC sistemi azalan salınımlarla kararlıdır. azaltılmasıyla  $\tau > 0.335$  s için artan eğilimli salınımlarla kararsızdır. Teorik gecikme marjları, simülasyonla elde edilen değerlerle tamamen aynıdır. Bu, önerilen yöntemin etkin bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Şekil 4'te  $PI$  kontrolörünün tipik parametreleri,  $K_I=3.5$   $K_P=3$  ve teorik gecikme marjı  $\tau^* = 0.128s$ 'dir. Şekil 4'te sunulan simülasyon sonuçları, melez sistemin, sürekli salınımlar nedeniyle  $\tau = 0.1294s$ 'lerde marjinal olarak stabil olduğunu göstermektedir. Ayrıca,  $\tau = 0.1285s$  için,

**Çizelge 4.** Çeşitli  $K_P$  ve  $K_I$  değerleri için elde edilen gecikme marjı sonuçları. Yükün atalet ve sönümlenme faktörü  $M = 0.4$  ve  $D = 0.1$  sabit tutulmuştur. (Delay margin results obtained for various values of  $K_P$  and  $K_I$ . The inertia and damping factor of the load are held constant  $M=0.4pu$  and  $D=0.1$  respectively)

$\tau^*$ (s)	$K_I$									
	$K_P$	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5
0.5	0,557	0,363	0,256	0,191	0,148	0,118	0,096	0,079	0,066	0,055
1	0,351	0,310	0,272	0,238	0,208	0,184	0,163	0,146	0,131	0,118
1.5	0,253	0,239	0,225	0,212	0,198	0,186	0,174	0,163	0,152	0,143
2	0,200	0,194	0,188	0,181	0,175	0,168	0,162	0,156	0,149	0,144
2.5	0,167	0,164	0,160	0,157	0,153	0,149	0,146	0,142	0,139	0,135
3	0,144	0,142	0,140	0,138	0,135	0,133	0,131	0,129	0,126	0,124
3.5	0,127	0,125	0,124	0,122	0,121	0,120	0,118	0,117	0,115	0,114
4	0,113	0,112	0,111	0,110	0,109	0,108	0,107	0,106	0,105	0,104
4.5	0,102	0,101	0,101	0,100	0,099	0,099	0,098	0,097	0,096	0,096
5	0,093	0,092	0,092	0,091	0,091	0,090	0,090	0,089	0,089	0,088





Şekil 3.  $K_I=1$ ,  $K_P=0.5$ , iken yük frekansının zamana göre değişimi (Deviation of load frequency versus time delays).

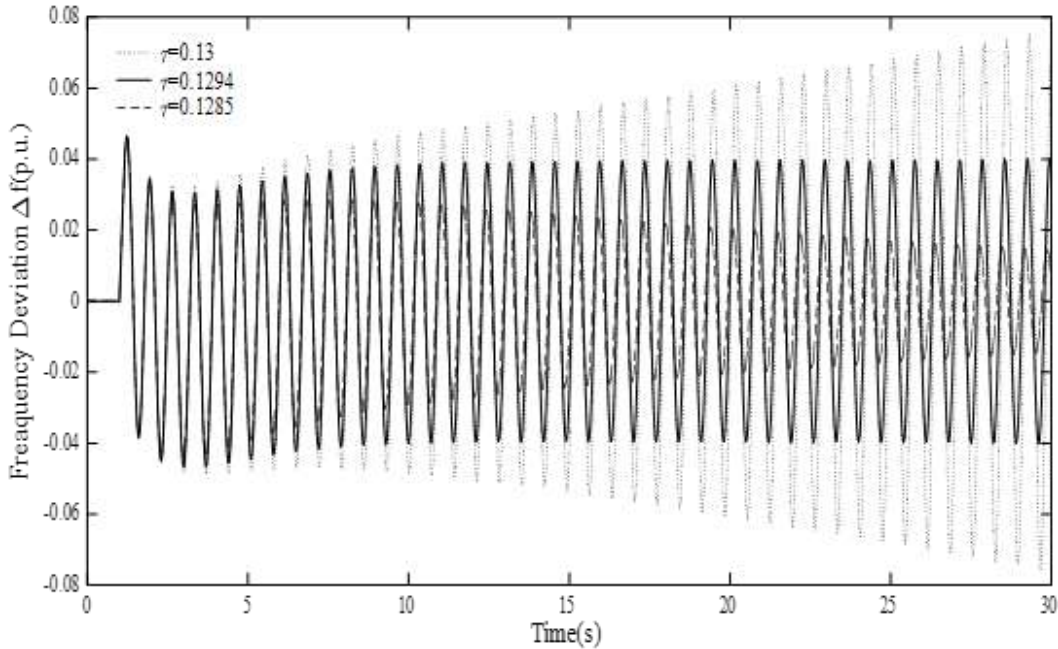
melez LFC sisteminin salınımların azalmasıyla stabil olduğu gözlemlenmiştir.  $\tau > 0.1295$  s için ise artan salınımlarla kararsız olduğu gözlemlenmiştir.

Hem Şekil 3 hem de 4'ten anlaşıldığı üzere, önerilen yöntemin melez LFC sisteminin gecikme sınırlarına yüksek doğrulukla yaklaştığı açıktır. Örneğin, tablo 1'de  $K_I=3.5$   $K_P=3$  için zaman gecikmesi  $\tau^*$ ,  $\tau^*=0.128$  sn. olarak hesaplanır. Şekil 4'te simülasyon sonucu,  $\tau^*=0.1294$  sn. için melez LFC sisteminin marjinal olarak stabil olduğunu göstermektedir. Bu sonuç teorik sonuçla uyumludur. Ayrıca,  $\tau^*=0,13$  sn. (gecikme marjından daha büyük) için, Şekil 4'te melez sistemin kararsız olduğu ve teorik sonuçla uyumlu olduğu görülmektedir.

Son olarak, Şekil 5'te,  $K_P=0.15$ 'in sabit olarak alınması ve  $K_I$  değerlerinin  $0.1 < K_I < 0.3$  arasında değişmesiyle, frekans sapması gözlemlenmektedir.  $K_I$  değerinin artmasının, salınım sürelerinde artışa neden olduğu gözlemlenmiştir.

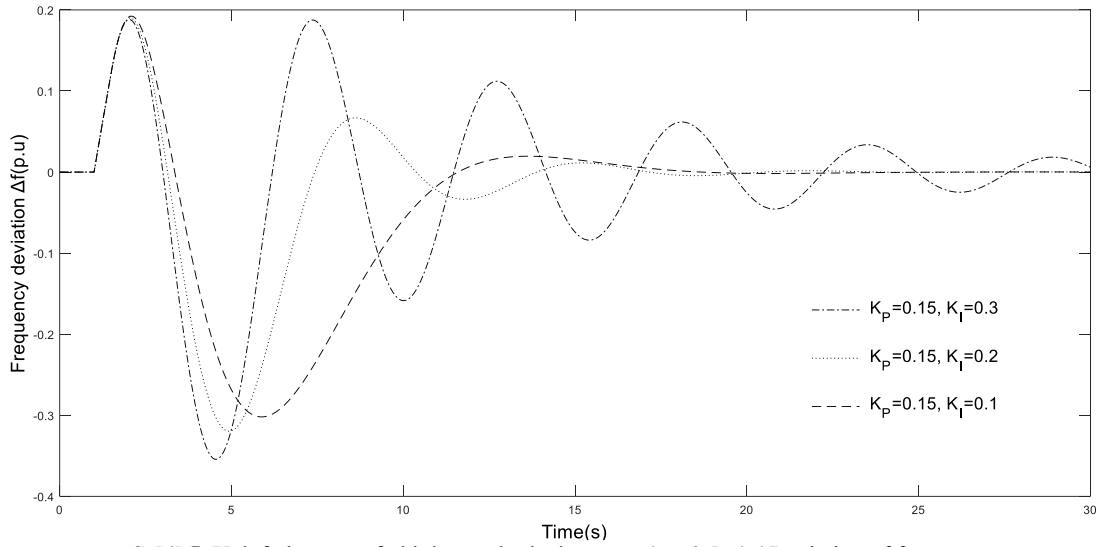
#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

İletişim kanallarının zaman gecikmeleri göz önüne alınarak, gecikmeye bağlı melez bir LFC programının kararlılık analizi incelenmiştir. Geleneksel melez LFC yapısı, bir PI-tipi kontrol cihazı ile çalıştırılan zaman gecikmelerine sahip doğrusal bir sistem olarak kabul edilmiştir. Daha sonra gecikme sınırlarını bulmak için gecikmeye bağlı stabilite kriteri kullanılmıştır. Yöntem,



Şekil 4. ( $K_I=3.5$ ,  $K_P=3$ ,  $\tau^*=0.1287$ ) iken yük frekansının zamana göre değişimi (Frequency deviation for different time delays ( $K_I=3.5$ ,  $K_P=3$ ,  $\tau^*=0.1287$ ))





Şekil 5. Yük frekansının farklı kazançlarda davranışı ( $\tau = 0.5\text{sn}$ ). (Deviation of frequency for different controller gains) ( $\tau = 0.5\text{sec}$ .)

karakteristik denklemin üssel terimlerini, polinomun geçiş frekansı değerlerine karşılık gelen pozitif gerçek kökler verecek şekilde elimine etmektedir. Geçiş frekansı, sistemin kararlılık niteliğinin değiştiği bir frekanstır. Örnek çalışmalar PI kontrolör parametrelerine dayanarak incelenmiştir. Analiz sonuçları, gecikme marjlarını etkileyen ana faktörlerden birinin PI kontrolörünün kazancı olduğunu göstermektedir. Sabit integral kazanç için ilk önce gecikme marjı yukarı doğru eğim yapar ve daha sonra oransal kazanç arttığında azalır. Gecikme marjı, PI kontrolörünün oransal kazancını  $0 < K_p \leq 0.1$  aralığında arttırırken, integral kazancı sabit tutulduğunda yükselir. Bununla birlikte,  $K_p > 0.1$  ötesinde oransal kazancı arttırmak, zaman gecikmesi marjını azaltmaktadır. Kontrolörün  $K_p$  kazançlarındaki küçük bir azalma  $K_p \leq 0,1$  gecikme marjı için önemli bir artışa neden olabilir. Genel olarak, önerilen melez sistemin kararlı bir şekilde çalışması için kontrolör parametrelerinin seçimi incelenmiştir. Uygun kontrolör parametre seçimi ile, sistemin daha fazla zaman gecikmesine müsaade edebileceği şekil ve tablolar yardımı ile açıklanmıştır. Gelecekteki çalışmalar için, zaman gecikmelerinin yük frekansı kontrollü melez enerji üretim / depolama sistemindeki stabilite üzerindeki etkileri kazanç ve faz marjları dikkate alınarak araştırılacaktır.

#### KISALTMALAR(NOMENCLATURE)

PG: güç üretimi  
PDS: güç dağıtım sistemi  
D: sönümleme katsayısı  
HPF: yüksek geçiren filtre  
PNET: net güç  
DG: dizel jeneratör  
PGEN: Jeneratörün çıkış gücü.  
FC: yakıt hücresi  
DLC: çift katmanlı kapasitör

KFC: yakıt hücresi kazancı  
KI: Yerel kontrolörün integral kazancı  
KP: yerel denetleyicinin oransal kazancı  
PI: oransal integral denetleyici  
PV: fotovoltaik  
LFC: yük frekans kontrolü  
LHP: sol yarım düzlem  
M: atalet momenti  
MG: mikro şebeke  
RHP: sağ yarı düzlem  
RT: kök eğilimi  
TUC: ultra kapasitörün zaman sabiti  
TFC: yakıt hücresinin zaman sabiti  
WP: rüzgar enerjisi  
 $\Delta f$ : frekans değişimi  
 $\Delta P$ : gerçek gücün değişmesi  
ESPES: elektroliz sisteminin çıkış gücünün değişmesi  
 $\Delta PFC$ : yakıt hücresinin çıkış gücünün değişimi  
 $\tau$ : zaman gecikmesi  
 $\tau^*$ : Sabit gecikmeler durumunda  
a elde edilen gecikme marjı

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Farid, K., Damir, Novosel. Sustainable Energy Trends, Opportunities, and Challenges. in Power Electronics Integration and Applications in *Distribution Sixth Conference on Innovative Smart Grid Technologies* (ISGT 2015), 2014.
- [2] Wang, G.Z., et al., Stability analysis and dynamic energy management of PV-hybrid storage based DC microgrid.

- Third International Conference on Energy Engineering and Environmental Protection*, 2019. 227.
- [3] Ghadiriyan, S. and M. Rahimi, Mathematical representation, stability analysis and performance improvement of DC microgrid system comprising hybrid wind/battery sources and CPLs, *Iet Generation Transmission & Distribution*, 13(10): 1845-1855, 2019.
- [4] Xie, B., et al., Two-Stage Battery Energy Storage System (BESS) in AC Microgrids with Balanced State-of-Charge and Guaranteed Small-Signal Stability, *Energies*, 11(2): 2018.
- [5] Doolla, S. and T.S. Bhatti, Load Frequency Control of an Isolated Small-Hydro Power Plant With Reduced Dump Load, *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(4): 1912-1919, 2006.
- [6] Obara, S.y., Analysis of a fuel cell micro-grid with a small-scale wind turbine generator. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(3): 323-336, 2007.
- [7] Wang, C. and M.H. Nehrir, Power Management of a Stand-Alone Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Energy System. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23(3): 957-967, 2008.
- [8] Tomonobu Senjyu, R.S., Naomitsu Urasaki, Hiroki Higa, Katsumi Uezato, and Toshihisa Funabashi, Output power control of wind turbine generator by pitch angle control using minimum variance control. *Electrical Engineering In Japan*, 154(2): 10 - 17, 2006.
- [9] Yong, H., et al. Output Feedback Stabilization for Discrete-time Systems with A Time-varying Delay in *Chinese Control Conference*, 2007.
- [10] Lou, G.N., et al., Stability Robustness for Secondary Voltage Control in Autonomous Microgrids With Consideration of Communication Delays. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(4): 4164-4178, 2018.
- [11] Jiang, L., et al. Delay-dependent stability for load frequency control with constant and time-varying delays, in *IEEE Power & Energy Society General Meeting*. 2009.
- [12] Xiaofeng, Y. and K. Tomsovic, Application of linear matrix inequalities for load frequency control with communication delays. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(3): 1508-1515, 2004.
- [13] S, B.K., Tomsovic ; A, Bose, Communication models for third party load frequency control. *IEEE Trans. Power Syst.*, 19(1): 543-548, 2004.
- [14] Shuai, Z.K., et al., A Maximum Power Loading Factor (MPLF) Control Strategy for Distributed Secondary Frequency Regulation of Islanded Microgrid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(3): 2275-2291, 2019.
- [15] Nourollah, S. and G.B. Gharehpetian, Coordinated Load Shedding Strategy to Restore Voltage and Frequency of Microgrid to Secure Region, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(4): 4360-4368, 2019.
- [16] Bevrani, H. and T. Hiyama, On Load Frequency Regulation With Time Delays: Design and Real-Time Implementation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 24(1): 292-300, 2009.
- [17] Saberi, H., S. Mehraeen, and B.Y. Wang, Stability Improvement of Microgrids Using a Novel Reduced UPFC Structure via Nonlinear Optimal Control, *Thirty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (Apec 2018)*, 3294-3300, 2019.
- [18] Nayeripour, M., M. Hoseintabar, and T. Niknam, Frequency deviation control by coordination control of FC and double-layer capacitor in an autonomous hybrid renewable energy power generation system, *Renewable Energy*, 36(6): 1741-1746, 2011.



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Toz metal $Al7075/B_4C/Si_3N_4$ kompozit malzemelerin üretimi ve aşınma özelliklerinin incelenmesi

## *Production of powder metal $Al7075/B_4C/Si_3N_4$ composite materials and investigation of wear properties*

Yazar(lar) (Author(s)): Halil KARAKOÇ

ORCID: 0000-0002-2444-6037

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Karakoç H., “Toz metal  $Al7075/B_4C/Si_3N_4$  kompozit malzemelerin üretimi ve aşınma özelliklerinin incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1141-1151, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.585813

# Toz Metal Al7075/B<sub>4</sub>C/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Kompozit Malzemelerin Üretimi ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi

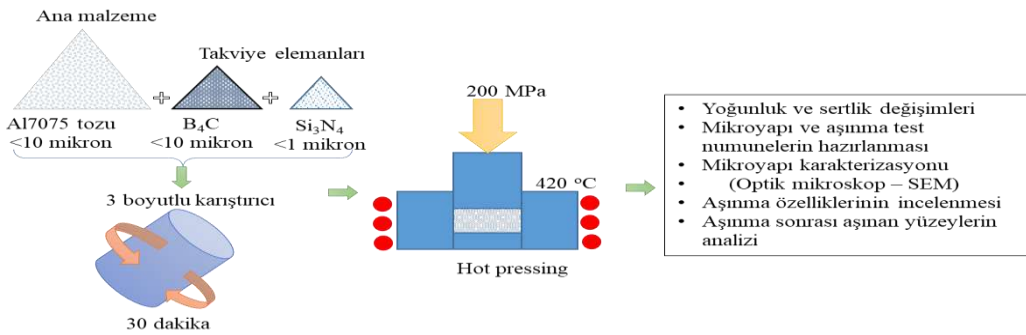
## Production of Powder Metal Al7075/B<sub>4</sub>C/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Composite Materials and Investigation of Wear Properties

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Al7075/B<sub>4</sub>C aşınma özellikleri. / Al7075/B<sub>4</sub>C wear characteristics.
- ❖ Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ilavesinin kompozitlerin aşınma özelliklerine etkisi. / The effect of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> addition on the wear properties of composites.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Al7075/B<sub>4</sub>C ve Al7075/B<sub>4</sub>C/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozit malzemeleri toz metalurjisi yöntemi ile üretilerek mikroyapı ve aşınma özellikleri araştırılmıştır. / The microstructure and wear properties of Al7075/B<sub>4</sub>C and Al7075/B<sub>4</sub>C /Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composite materials were produced by powder metallurgy method.



**Şekil.** Deneysel çalışmalardaki işlem sırası / **Figure.** Operation order in experimental studies

### Amaç (Aim)

Savunma sanayinde yaygın kullanımı olan Al7075 alaşımlarının B<sub>4</sub>C ve Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> parçacıkları ile takviye edilerek, otomotiv sanayinde aşınma dirençli malzemeler olarak kullanılabilirliği bu çalışmanın amacıdır. / The purpose of this study is that Al7075 alloys, which are widely used in the defense industry, can be reinforced with B<sub>4</sub>C and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> particles and can be used as wear resistant materials in the automotive industry.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Toz metal kompozit malzemeler sıcak presleme yöntemi ile üretilmişlerdir. / Powder metal composite materials are produced by hot pressing method.

### Özgünlük (Originality)

Bu çalışmada yeni nesil hibrid kompozit malzemeler doğrudan sıcak presleme yöntemi ile üretilmişlerdir/ In this study, new generation hybrid composite materials were produced directly by hot pressing method.

### Bulgular (Findings)

Ağırlıkça B<sub>4</sub>C ve Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ilavesine bağlı olarak aşınma miktarlarında düşüş meydana gelmiştir. En düşük ağırlıkça kayıplar Al7075/%15B<sub>4</sub>C/%2Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> malzemesindedir. / The highest weight losses occurred in Al7075 alloy. Due to the weight addition of B<sub>4</sub>C and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, there was a decrease in the amount of wear. The lowest weight losses are in Al7075/15 %B<sub>4</sub>C/2%Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> material.

### Sonuç (Conclusion)

En düşük sertlik Al7075 alaşımında (36,8 HB) görülürken en yüksek sertlik ise Al7075/%15B<sub>4</sub>C/%2Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozit malzemesinde (110 HB) görülmüştür. En yüksek sürtünme katsayı değeri takviyesiz olan Al7075 alaşımında gerçekleşmiştir. / While the lowest hardness was observed in Al7075 alloy (36.8 HB), the highest hardness was observed in Al7075 / 15% B<sub>4</sub>C / 2% Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composite material (110 HB). The highest friction coefficient value was realized in Al7075 alloy, which is without reinforcement.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Toz Metal Al7075/B<sub>4</sub>C/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Kompozit Malzemelerin Üretimi ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Halil KARAKOÇ\***

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

(Geliş/Received : 02.07.2019 ; Kabul/Accepted : 13.11.2019)

## ÖZ

Bu çalışmada, bir alüminyum alaşımı olan saf Al7075 ile Al7075/B<sub>4</sub>C ve Al7075/B<sub>4</sub>C/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozit malzemeleri toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen kompozitlerde ön alaşımlı Al7075 tozları kompozit matrisini oluştururken, B<sub>4</sub>C ve Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> seramik parçacıkları takviye elemanı olarak kullanılmıştır. Ağırlıkça karışım oranları belirlenen tozlar 3 boyutlu karıştırıcıda 15 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karışım tozlar önceden ısıtılan sıcak presleme kalıbında 450 °C sıcaklıkta 30 dakika boyunca tek yönlü olarak preslenmiştir. Presleme sonrası 90x40x12 mm<sup>3</sup> ebatlarında kompozitler elde edilmiştir. Kompozit malzemeler tel erezyon tezgahında kesilmiş ve CNC torna tezgahında işlenerek aşınma numuneleri üretilmiştir. Yapılan çalışmalarla üretilen kompozit malzemelerin yoğunluk, gözeneklilik, sertlik, mikroyapı ve aşınma özellikleri incelenmiştir. Saf Al7075 alaşımının yoğunluğu kompozit malzemelere göre daha yüksek çıkmıştır. B<sub>4</sub>C ve Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> oranlarının artması ile kompozitlerde gözenek miktarları artmıştır. %5 ve %10 B<sub>4</sub>C takviyeli kompozit malzemelerde parçacıklar mikroyapıda homojen dağılmıştır. En yüksek sertlik değeri Al7075/%15B<sub>4</sub>C/%2Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozit malzemesinde (110 HB) elde edilmiştir. En yüksek sürtünme katsayı değerleri ise saf Al7075 alaşımlarında belirlenmiştir. Numunelerin sertlik değerlerindeki artış ile sürtünme katsayısı değerleri düşmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Al7075, B<sub>4</sub>C, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, mikroyapı, aşınma.

## Production of Powder Metal Al7075/B<sub>4</sub>C/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Composite Materials and Investigation of Wear Properties

### ABSTRACT

In this study, Al7075 alloy, Al7075/B<sub>4</sub>C composite material and Al7075/B<sub>4</sub>C/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composite materials were produced by powder metallurgy method. Prealloyed Al7075 powders were used as matrix material to produce composites. The powders whose mixing ratios were determined by weight were mixed in the 3D mixer for 15 minutes. The mixture powders were pre-heated in a preheated hot stamping mold at 450 °C for 30 minutes. 90x40x12 mm<sup>3</sup> composites were obtained after pressing. Composite materials were cut at wire EDM (Electrical discharge machine) and CNC lathes were processed to produce wear samples. Density, porosity, hardness, microstructure and abrasion properties of composite materials produced by the studies were investigated. The density of Al7075 alloy was higher than the composites. Pore amount increased with increasing B<sub>4</sub>C and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ratio. In 5% and 10% B<sub>4</sub>C reinforced composite materials, the particles were homogeneously distributed in microstructure. The highest hardness was observed in Al7075/15% B<sub>4</sub>C/2%Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composite material (110 HB). The highest coefficients of friction were found in the Al7075 alloy, which was not reinforced.

**Keywords:** Al7075, B<sub>4</sub>C, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, microstructure, wear.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kompozit malzemeler farklı fiziksel veya kimyasal özelliklere sahip iki veya daha fazla bileşenin mikro, mezo veya makro ölçekte bir araya gelmesi ile oluşurlar [1,2]. Kompozit malzemelerin pek çok sınıflandırılması olmakla beraber matris malzemesine göre (i) metal matrisli kompozit malzemeler, (ii) polimer matrisli kompozit malzemeler ve (iii) seramik matrisli kompozit malzemeler olarak üç ana grupta incelenirler [1,2]. Bu gruplar içerisinde yer alan metal matrisli kompozit malzemeler (MMKM) farklı türde takviye elemanları ile güçlendirilirler [3]. Seramik parçacıklar ile takviye edilmiş MMKM'ler yüksek dayanım, aşınma direnci,

yüksek sertlik ve hafif olmaları gibi üstün özelliklerinden dolayı otomotiv sanayi, havacılık ve savunma sanayinde tercih edilmektedirler [4,5]. MMKM'lerde matris malzemesi olarak Al, Ti ve Mg kullanılmaktadır [6,7,8]. Bu matris malzemeleri içerisinde alüminyumun (Al) hafif olması, iyi korozyon direnci ve kolay şekil alması avantaj oluşturmaktadır [9]. Alüminyumun matris malzemesi olarak kullanılmasından dolayı bu malzemelere alüminyum matrisli kompozit malzemeler (AMKM) denilmektedir [10]. Son zamanlarda farklı türde alüminyum alaşımları kullanılarak kompozit malzemeler üretilmektedir. Bu alaşımlar içerisinde Al7075 alaşımları yüksek tokluğa ve çekme dayanımına sahip olmalarından dolayı havacılık ve otomotiv sanayinde kullanılmaktadır [11]. AMKM'lerde takviye elemanı olarak B<sub>4</sub>C, SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve MgO gibi

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

seramik parçacıklar kullanılmaktadır [12,13,14]. B<sub>4</sub>C, hafiflik, iyi termal ve kimyasal karalılık gibi özelliklerinden dolayı oldukça ilgi çekmektedir [15]. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ise yüksek kimyasal ve termal stabilite, yüksek sertlik, mükemmel korozyon, aşınma ve sürünme direnci sergilemektedir [16].

Son yıllarda takviye elemanı olarak birbirinden farklı seramik parçacıkların bir araya getirilmeleriyle hibrid kompozit malzemeler üretilmektedirler [17]. Bu hibrid kompozit malzemeler farklı mekanik özellikler sergileyebilmektedirler [18]. Bu nedenle son zamanlarda alüminyum hibrid kompozit malzemeler (AHKM) üzerine çalışmalar yoğunlaşmaktadır [19]. Gökmen, [20] yaptığı çalışmada ön alaşımsız Al2024 tozuna farklı seramik parçacıklar ilave ederek hibrid kompozitler üretmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin takviye elemanına bağlı olarak farklı mekanik özellikler sergilediğini bildirmiştir.

Yıldırım ve Özyürek [21], Al7075 alaşımına %4 Ti ve farklı oranlarda (%3-6-9) B<sub>4</sub>C ilavesi yaparak hibrid kompozit malzemeler üretmişlerdir. Üretim yöntemi olarak toz metalurjisi tekniğini kullanan yazarlar kompozitlerin yoğunluk, sertlik ve aşınma özelliklerini karakterize etmişlerdir. Yazarlar ağırlıkça %B<sub>4</sub>C oranının artması ile beraber yoğunlukta düşüş, sertlikte ve ağırlık kaybında artışın meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Kumar ve Dhiman [22], Al 7075 matrisli ağırlıkça % 7 SiC ve % 3 grafit parçacık takviyeli hibrid kompozit malzemeler üreterek kuru kayma şartlarında disk üzerinde pim tipi aşınma test cihazı üzerinde aşınma testleri yapmışlardır. Farklı bir çalışmada ise Çinici ve ark. [23], Al7075 matrisli B<sub>4</sub>C parçacık ilaveli fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemeler üreterek çapraz kırılma dayanımlarını incelemişlerdir. Ambıgı ve Prabhu [24], Al-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nano kompozit ve Al-Gr-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> hibrid kompozit malzemeler üreterek aşınma özelliklerini optimize etmişlerdir. Yazarlar Al-Gr-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozitler ile Al-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nano kompozit malzemeleri kıyasladıklarında, 1 km kayma mesafesinde Al-Gr-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozitlerin aşınma oranlarının %25 oranında daha az olduğunu belirtmişlerdir.

Hasırcı ve Gül [25], otomotiv sanayinde kullanılabilir B<sub>4</sub>C parçacık takviyeli Al matrisli kompozit malzemeler üretmişler ve kuru aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Yazarlar, % 10 B<sub>4</sub>C parçacık takviyeli kompozit malzemelerin en iyi aşınma direncine sahip olduklarını belirtmişlerdir.

Yapılan bu makale çalışmasında ticari Al7075 alaşımları B<sub>4</sub>C parçacıklar ile güçlendirilerek aşınma özellikleri iyileştirilmiştir. Ayrıca Al7075/B<sub>4</sub>C kompozit malzemelerinin içerisine Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> parçacıklar ilave edilerek hibrid kompozit malzemeler üretilmiştir. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ilavesinin kompozitlerin aşınma özelliklerine etkisinin olup olmadığı araştırılmıştır. Özellikle savunma sanayinde yaygın kullanımı olan Al7075 alaşımlarının B<sub>4</sub>C ve Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> parçacıkları ile takviye edilerek, otomotiv sanayinde aşınma dirençli malzemeler olarak

kullanılabilirliği bu çalışmanın amaçlarından bir tanesidir. Bu çalışma ile hafif, korozyona karşı dirençli ve aşınma özellikleri iyileştirilmiş kompozit malzemeler üretilmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Kompozit malzemelerin üretilmesinde matris malzemesi olarak Al7075 alaşım tozları, takviye elemanı olarak ise B<sub>4</sub>C ve Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> seramik tozları kullanılmıştır. Kullanılan tozların fiziksel özellikleri Çizelge 1’de, Al7075 alaşımının kimyasal bileşimi ise Çizelge 2’de verilmiştir.

**Çizelge 1.** Tozların fiziksel özellikleri (Physical properties of powders)

Kullanılan tozlar	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Ortalama toz tane boyutu (µm)
Al7075	2,8	<100
B <sub>4</sub> C	2,52	<10
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	3.2	<1

**Çizelge 2.** Al7075 alaşımının kimyasal kompozisyonu (Chemical composition of Al7075 alloy)

Element	Ağırlıkça %
Fe	0,03
Cr	0,17
Si	0,26
Mn	0,27
Cu	1,56
Mg	2,3
Zn	6,0
Al	Kalan

Kompozit malzemelerin üretilmesinde ilk olarak karışım oranları belirlenmiştir. Karışım oranlarının belirlenmesinde literatüre göre en uygun ağırlıkça % oranlar baz alınmıştır [26,27]. Üretimi planlanan kompozitlerin toz karışım oranları Çizelge 3’de verilmiştir. Çalışmada üç farklı malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. İlk olarak takviyesiz Al7075 alaşımları üretilmiştir. Daha sonra sırası ile Al7075/B<sub>4</sub>C kompozit malzemeler ve Al7075/B<sub>4</sub>C/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> hibrid kompozit malzemeler üretilmiştir. Precisa marka hassas terazi yardımı ile tartılan tozlar, plastik bir kap içerisine konularak 3 boyutlu Turbula marka karıştırıcı yardımı ile 30 dakika karıştırılmışlardır. 40x90 mm<sup>2</sup> kesit alanına sahip sıcak presleme kalıbına yerleştirilen karışım tozlar 420 °C sıcaklıkta 30 dakika bekletildikten sonra 200 MPa basınç altında preslenmişlerdir. Sıcak preslenen toz metal blok numuneler oda sıcaklığına kadar bekletildikten sonra kalıp içerisinden çıkartılmışlardır. 40x90x12 mm<sup>3</sup> hacmine sahip kompozit blok numuneler tel erezyon tezgahında kesilmiş, CNC torna tezgahında işlenmiş ve aşınma numuneleri (tam çap 10 mm, boy 15 mm) haline getirilmişlerdir. Ayrıca mikroyapı uygulamaları içinde 10x10x15 mm ebatlarında numuneler çıkartılmıştır.



**Çizelge 3.** Kompozitlerin üretiminde kullanılan tozların ağırlık karışım oranları (Weight mixing ratios of powders used in the production of composites)

Slz. no	Toz malzemeler (ağırlıkça %)		
	Al7075	B <sub>4</sub> C	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
1	100	---	---
2	95	5	---
3	90	10	---
4	85	15	---
5	93	5	2
6	88	10	2
7	83	15	2

Kompozit malzemelerin mikroyapılarının karakterize edilmesinde numunelerin yüzeyleri sırası ile 400, 600, 800, 1000 ve 1200 mesh zımpara ile zımparalanmıştır. Zımparalama sonrası 3 ve 1 mikron keçeler ile partlatılmıştır. Son olarak ise Keller dağılayıcı kullanılarak dağlanmıştır. Numunelerin optik mikroyapı incelemeleri Leica DM4000M marka optik mikroskopta yapılmıştır. Aşınan yüzeylerin incelenmesinde ise JEOL JSM 6060LV marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Al matris yapı içerisinde dağılım sergileyen takviye elemanı parçacık tayininde ise yine SEM cihazında EDS analizleri yapılmıştır. Kompozit malzemelerin sertliklerinin belirlenmesinde EmcoTest marka Duravision 200 model sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Numune sertlikleri ASTM E-10 standardına göre Brinell sertlik türünde ölçülmüştür (2,5 mm bilye çapı, 31,25 kgf yük). Altı farklı bölgeden alınan sertlik değerlerinin ortalaması hesaplanarak kompozit malzemelerin sertlikleri belirlenmiştir.

Kompozit malzemelerin deneysel yoğunluk ölçümleri arşiment prensibine (Eşitlik 1) göre Precisa marka hassas yoğunluk ölçme kitinde yapılmıştır. Kompozit malzemelerin teorik yoğunlukları ise karışım kuralına göre belirlenmiştir (Eşitlik 2). Kompozitlerin gözenek oranı ise deneysel ve teorik yoğunluktan elde edilmiştir (Eşitlik 3) [28,29].

$$p = \frac{(M_{Al7075} + M_{B_4C} + M_{Si_3N_4})}{(V_{Al7075} + V_{B_4C} + V_{Si_3N_4})} \quad (1)$$

p: Yoğunluk, M: Kütle, V: Hacim

$$P_{kar} = [(\%W)_1 \times P_1] + [(\%W)_2 \times P_2] + \dots + [(\%W)_n \times P_n] \quad (2)$$

P<sub>kar</sub> : Toz karışımın teorik yoğunluğu

(%W)<sub>n</sub> : Her bir bileşenin karışım içindeki ağırlık yüzdesi

p<sub>n</sub> : Her bir bileşenin yoğunluğu

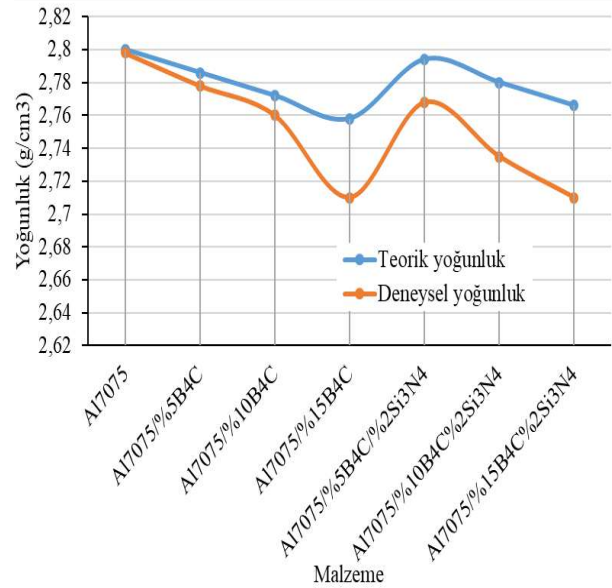
$$\% \theta = \left( 1 - \frac{p_{deneysel}}{p_{teorik}} \right) \times 100 \quad (3)$$

θ: Gözenek oranı

Üretilen malzemelerin aşınma testleri ASTM G99-05 standardına göre pin-on-disk tipi aşınma cihazında yapılmıştır [30,31]. Aşınma testleri 1,08 m/sn kayma hızında, 200 ve 400 m mesafede, farklı yüklerde (5-10-15N) ve 400'lük zımpara üzerinde gerçekleştirilmiştir.

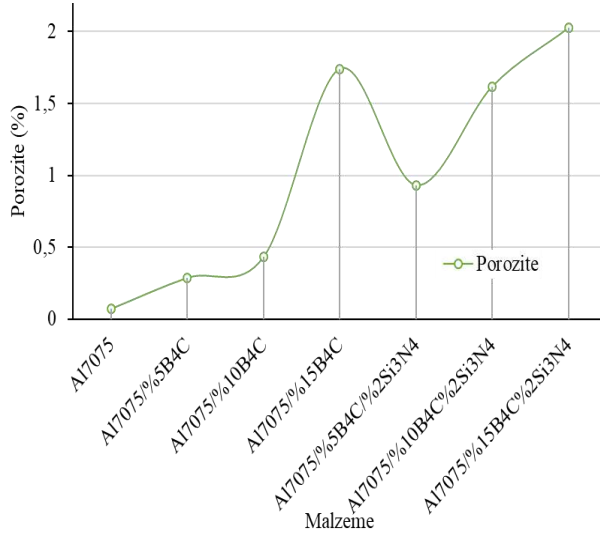
### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Üretilen malzemelerin içeriğine bağlı olarak teorik yoğunlukları, deneysel yoğunlukları ve porozite oranları hesaplanmıştır (Şekil 1 ve Şekil 2). Malzemelerin teorik ve deneysel yoğunlukları kıyaslandığında en yüksek yoğunluk değeri takviyesiz olan Al7075 alaşımında (2,798 g/cm<sup>3</sup>) meydana gelmiştir. En düşük yoğunluk ise Al7075/%15B<sub>4</sub>C/%2Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozit malzemesinde (2,710 g/cm<sup>3</sup>) oluşmuştur. Kompozit malzemelerde ağırlıkça B<sub>4</sub>C oranının artması ile deneysel yoğunluklarda azalmalar meydana gelmiştir. Bu sonuç literatür ile uyumluluk göstermektedir [32]. Tayebi ve ark. [33] Sıcak presleme yöntemi ile ağırlıkça farklı oranlarda B<sub>4</sub>C içeren Al-B<sub>4</sub>C kompozit malzemeler üretmişlerdir. Yazarlar B<sub>4</sub>C oranının artması ile beraber yoğunluğun azaldığını gözenekliliğin azaldığını tespit etmişlerdir. Özellikle sıkıştırma anında sert kırılğan olan B<sub>4</sub>C parçacıklarının kompozitin yoğunlaşmasına olumsuz etki ettiği düşünülmektedir. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ilaveli ve ilavesiz kompozit malzemeler birbiri ile kıyaslandığında, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ilaveli kompozitlerin yoğunluklarının ilavesizlere göre düşük olduğu anlaşılmıştır.



**Şekil 1.** Malzemelerin teorik ve deneysel yoğunluklarının değişimi (Variation of theoretical and experimental densities of materials)

Kompozit malzemelerin deneysel ve teorik yoğunluklarından elde edilen porozite oranları Şekil 2'de verilmiştir. En düşük porozite oranı Al7075 alaşımında, en yüksek porozite oranı ise Al7075/%15 B<sub>4</sub>C/%2Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozit malzemesindedir. Artan B<sub>4</sub>C miktarı ile porozite oranı artarken, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> partiküllerinin ilavesi porozite oranının artmasına katkı sağlamıştır.

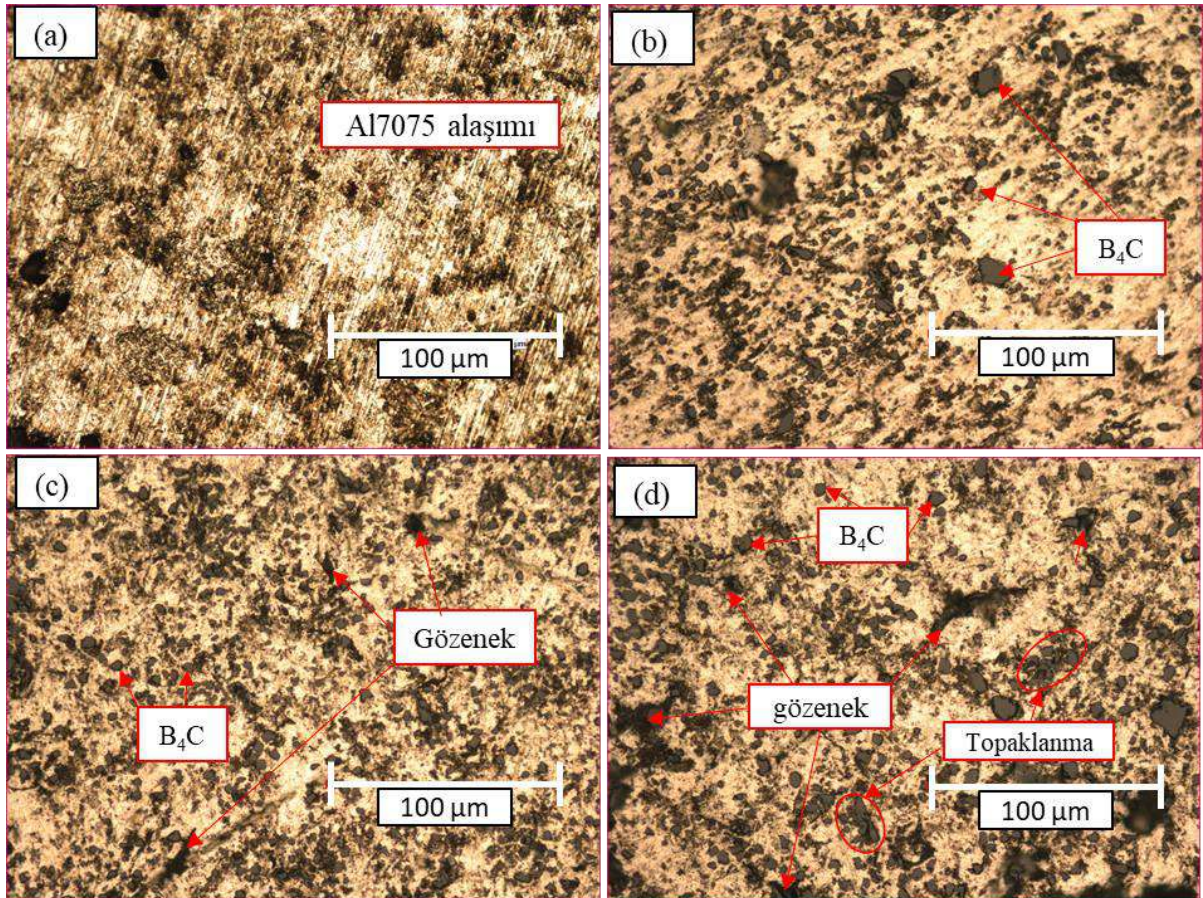


Şekil 2. Malzemelerin porozite miktarlarının değişimi (Variation of porosity amounts of materials)

Şekil 3 ve Şekil 4'de üretilen malzemelerin optik mikroskopta görüntülenmiş mikroyapı resimleri verilmiştir. Mikroyapılara bakıldığında %5 ve %10 B<sub>4</sub>C takviye ilavesinin Al7075 içerisinde homojen dağıldığı görülmüştür. %15 B<sub>4</sub>C ilavesi ile kısmen topaklanmaların oluştuğu görülmüştür. AMKM'lerde

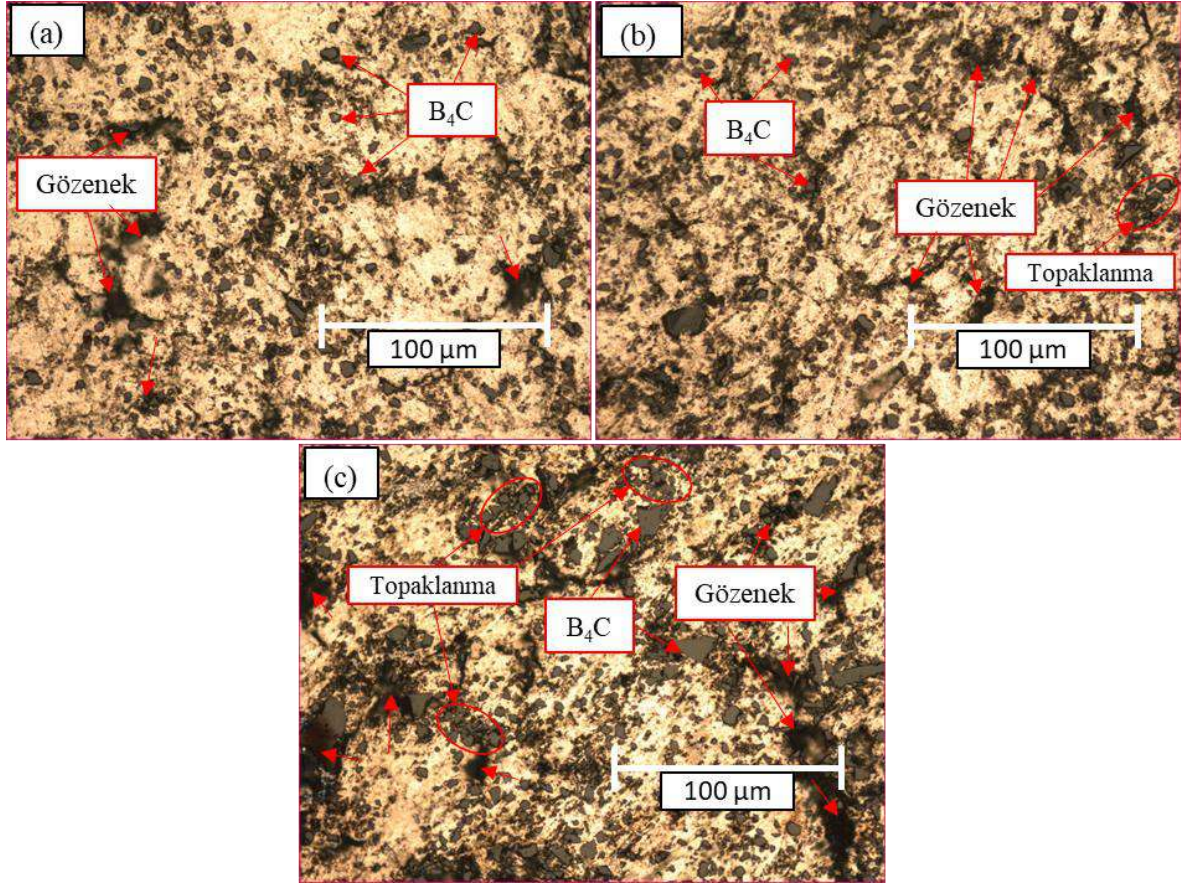
takviye elemanının ağırlıkça yüzde miktarının artması ile topaklanmaların meydana geldiği bilinmektedir [34,35]. B<sub>4</sub>C ilavesinin artması ile mikroyapıda mikro gözeneklerin oluştuğu görülmüştür. AMKM'lerde takviye elemanı parçacık boyutunun azalması ile topaklanmalar olabilmektedir [36]. Bu nedenle çalışmada kullanılan 1 mikron altı Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> parçacıkları topaklanmalar meydana getirmiştir.

Alüminyum matrisli seramik parçacık takviyeli kompozit malzemelerde takviye miktarının artması ile sertliğin arttığı bilinmektedir [37]. Şekil 5'de verilen sertlik grafiği incelendiğinde, özellikle seramik parçacık ilaveli ve ilavesiz alaşımını kıyasladığımızda, seramik ilaveli alaşımın sertliği artmaktadır. Bu durum sert kırılma fazda olan seramik parçacıklarının dağılım mukavemetlenmesi yaparak malzemenin sertliğini artırmasından kaynaklanmaktadır. Yapılan bu çalışmada da B<sub>4</sub>C ilavesinin artması ile sertliğinde önemli derecede arttığı görülmüştür. En düşük sertlik Al7075 alaşımında (36,8 HB) görülürken en yüksek sertlik ise Al7075/%15B<sub>4</sub>C/%2Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozit malzemesinde (110 HB) ölçülmüştür. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ilaveli ve ilavesiz kompozit malzemeler birbirleri ile kıyaslandığında Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ilaveli olanların sertlik değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 5).

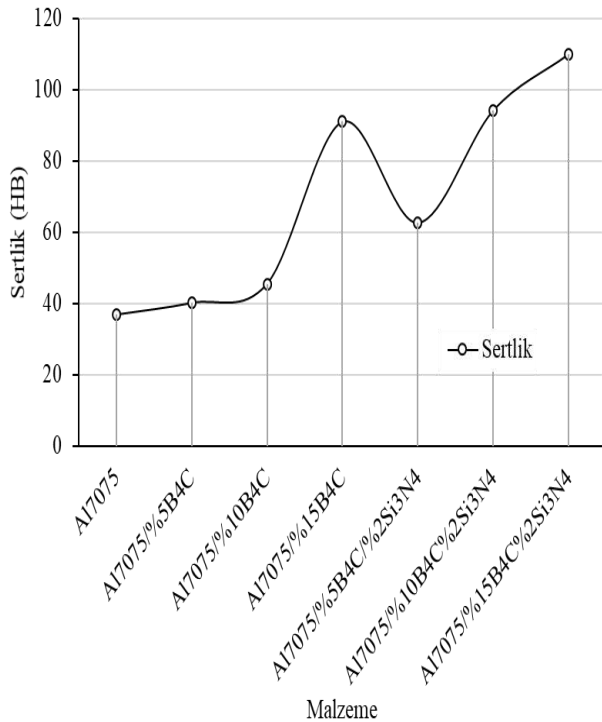


Şekil 3. Malzemelerin optik mikroskop resimleri (Optical microscope pictures of materials) (a) Al7075 alaşımı, (b) Al7075/%5B<sub>4</sub>C, (c) Al7075/%10B<sub>4</sub>C, (d) Al7075/%15B<sub>4</sub>C.





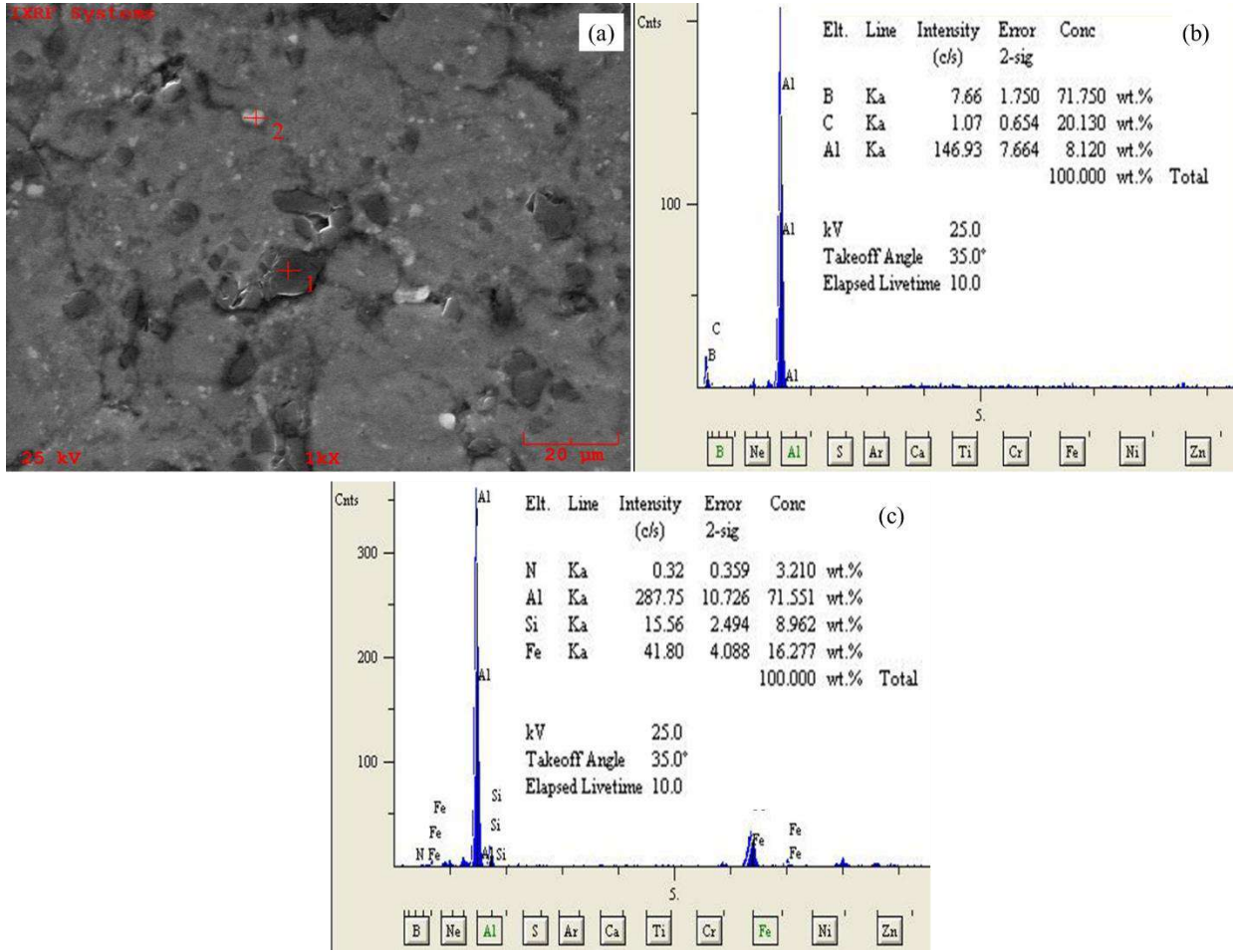
Şekil 4. Malzemelerin optik mikroskop resimleri (Optical microscope pictures of materials) (a) Al7075/5B<sub>4</sub>C/2Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, (b) Al7075/10B<sub>4</sub>C/2Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, (c) Al7075/15B<sub>4</sub>C/2Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>



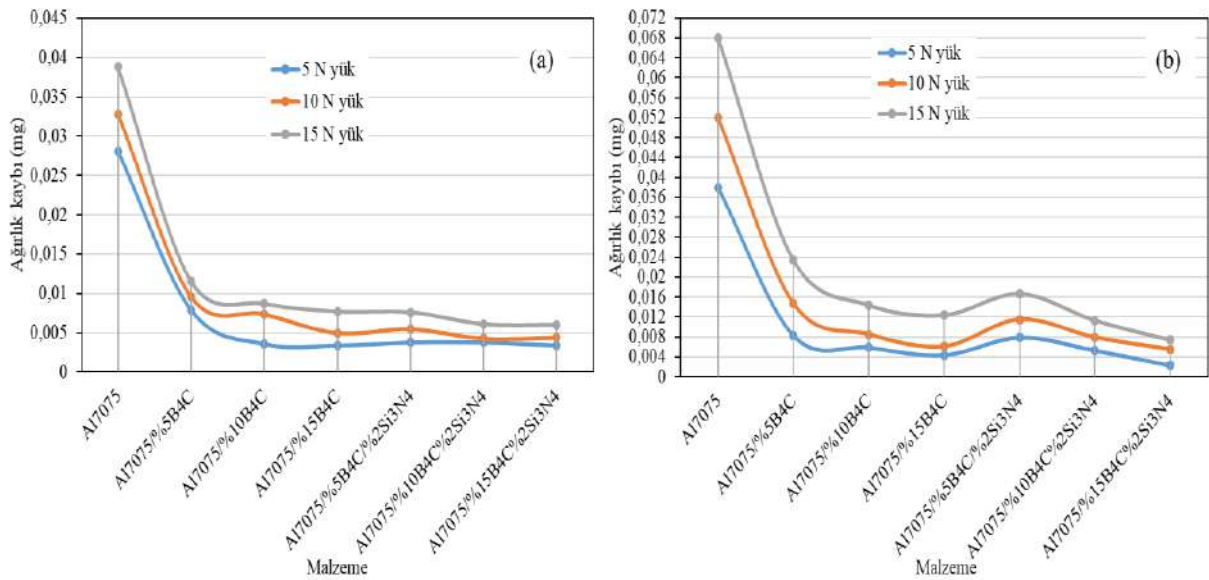
Şekil 5. Malzemelerin sertlik miktarlarının değişimi (Variation of hardness of materials)

Şekil 6'da Al7075/10B<sub>4</sub>C/2Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozit malzemesinin SEM resmi ve EDS sonuçları verilmiştir. SEM resmine ve EDS sonuçlarına bakıldığında koyu gri paçaların B<sub>4</sub>C olduğu beyaz renkte olanların ise Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> olduğu anlaşılmaktadır. SEM resminde B<sub>4</sub>C partiküllerinin etrafında boşlukların olduğu görülmektedir. Oluşan bu boşluklar Al7075 matris alaşımı ile B<sub>4</sub>C parçacıklarının iyi bir arayüzey oluşturmamasından kaynaklanmaktadır. Literatürde B<sub>4</sub>C partikülleri ile alüminyum arayüzeyinde ıslatma problemi olduğu belirtilmektedir [38].

Şekil 7'de malzemelere ait ağırlık kayıpları verilmiştir. Her iki grafik birbiri ile örtüşen sonuçlar vermektedir. En yüksek ağırlıkça kayıplar Al7075 alaşımında meydana gelmiştir. Ağırlıkça B<sub>4</sub>C ve Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ilavesine bağlı olarak aşınma miktarlarında düşüş meydana gelmiştir. En düşük ağırlıkça kayıplar Al7075/15B<sub>4</sub>C/2Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> malzemesindedir. Grafiklerden 400 metre mesafede yapılan aşınma testinde Al7075/15B<sub>4</sub>C kompozit malzemesinin ağırlık kaybının Al7075/5B<sub>4</sub>C/2Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> hibrid kompozit malzemesinden daha az olduğu ve 200 metreye göre bu farkın açıldığı anlaşılmıştır.



Şekil 6. Al7075/%10B<sub>4</sub>C/%2Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozit malzemesinin (a) SEM resmi, (b) 1. noktanın, (c) 2. noktanın EDS sonuçları ((A) SEM picture of Al7075/%10B<sub>4</sub>C/2%Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composite material, (b) EDS results of point 1, (c) point 2.)

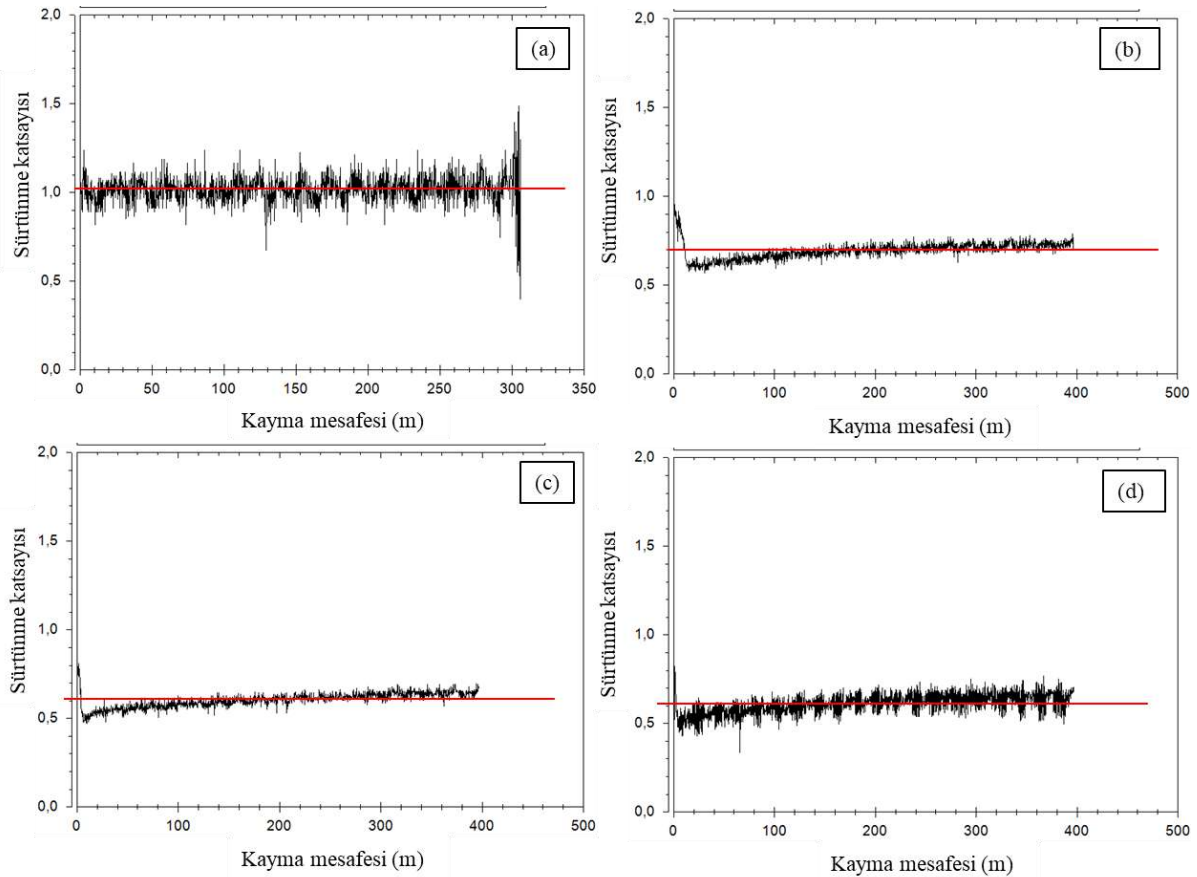


Şekil 7. Aşınma test sonrası malzemelerde meydana gelen aşınma kayıpları (a) 200 metre mesafe, (b) 400 metre mesafe (Abrasion losses of materials after abrasion test (a) 200 meters distance, (b) 400 meters distance)

Aşınma testleri sonrası elde edilen sürtünme katsayı değerleri Şekil 8 ve Şekil 9'da verilmiştir. En yüksek sürtünme katsayı değeri saf Al7075 alaşımında gerçekleşmiştir. Kompozit malzemelere bakıldığında ise B<sub>4</sub>C oranının artmasına bağlı olarak sürtünme katsayılarında azalma olduğu gözlenmiştir. Benzer bir çalışmada takviyesiz Al alaşımının sürtünme katsayısı takviyeli kompozitlere göre daha yüksek çıkarken, takviye elemanının artan ağırlık yüzdesiyle sürtünme katsayısının azaldığı görülmüştür [39]. Arık [40], Al alaşımı ve Al-SiC kompozit malzemesinin sürtünme katsayısının kıyaslamış ve Al-SiC kompozit malzemesinin sürtünme katsayısının daha düşük olduğunu belirtmiştir. Üretilen malzemelerde sertliğe bağlı olarak sürtünme katsayılarının değiştiği görülmektedir. Al alaşımlarının sertliğinin artması ile beraber sürtünme katsayılarının azaldığı literatürde belirtilmiştir [41]. Aşırı sert ve kırılğan yapıda olan B<sub>4</sub>C parçacıklarının yağlayıcı özelliğinden ve aşınmaya karşı olan mukavemetinden dolayı sürtünme katsayısı değerini düşürdüğü düşünülmektedir. Mikron boyutta ilave edilen Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesinin de sürtünme katsayısı değerini düşürdüğü düşünülmektedir. En düşük sürtünme katsayısı değeri

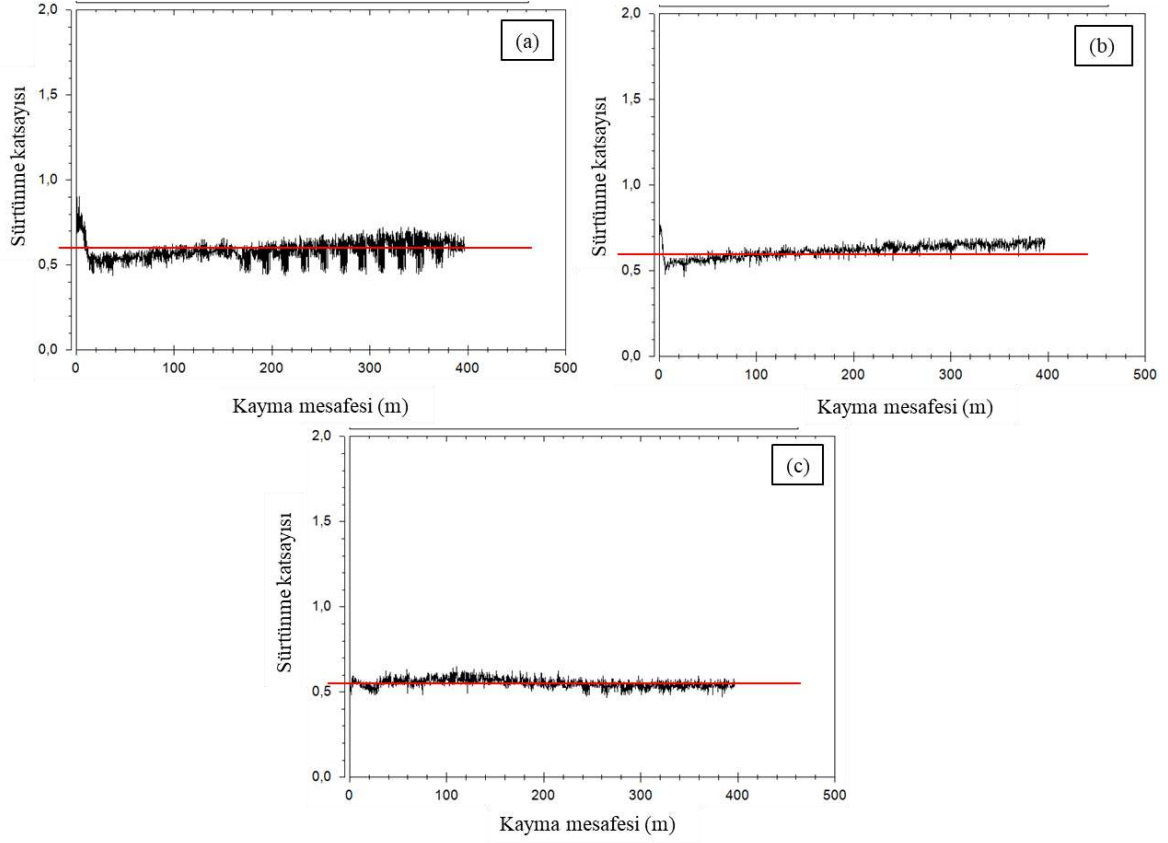
Al7075/%15B<sub>4</sub>C/%2Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozit malzemesinde çıkmıştır.

Şekil 10 ve Şekil 11'de aşınma test yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir. SEM resimleri incelendiğinde aşınan yüzeylerde derin çiziklerin ve yırtılmaların meydana geldiği görülmektedir. Hasırcı ve Gül [25], Al-B<sub>4</sub>C kompozitlerin takviye hacim oranına bağlı abrasif aşınma davranışlarını incelemiştir. Yazalar, takviye elemanının artması ile topaklanmaların meydana geldiğini ve bu nedenle matrisin takviye elemanını tamamen çevreleyemediğini belirtmişlerdir. Matris ile takviye elemanları arasındaki bu boşluk aşınma testi esnasında takviye elemanının matristen kolaylıkla çıkmasına neden olmaktadır. Matristen kopan sert takviye elemanları yüzeyde çizik ve büyük oyuklaşmalara neden olmaktadır [25]. Artan B<sub>4</sub>C ilavesine bağlı olarak aşınan yüzeyde gözeneklerin meydana geldiği görülmüştür. Bu durum aşınma yüzeyinde alüminyum matris içerisinden B<sub>4</sub>C parçacıklarının ayrılmasından kaynaklanmaktadır. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ilaveli kompozitlerde ise derin çiziklerin ve yırtılmaların olduğu görülmektedir.

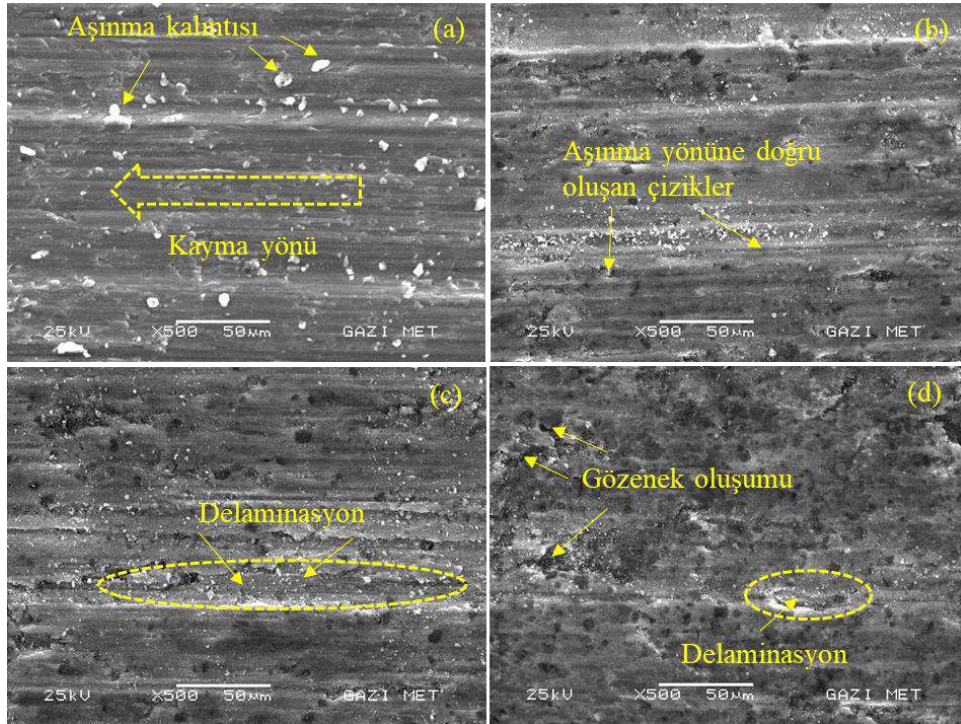


**Şekil 8.** Malzemelerin sürtünme katsayıları değişimi (a) Al7075 alaşımı, (b) Al7075/%5B<sub>4</sub>C, (c) Al7075/%10B<sub>4</sub>C, (d) Al7075/%15B<sub>4</sub>C (Change of friction coefficients of materials (a) Al7075 alloy, (b) Al7075/%5B<sub>4</sub>C, (c) Al7075/%10B<sub>4</sub>C, (d) Al7075/%15B<sub>4</sub>C)



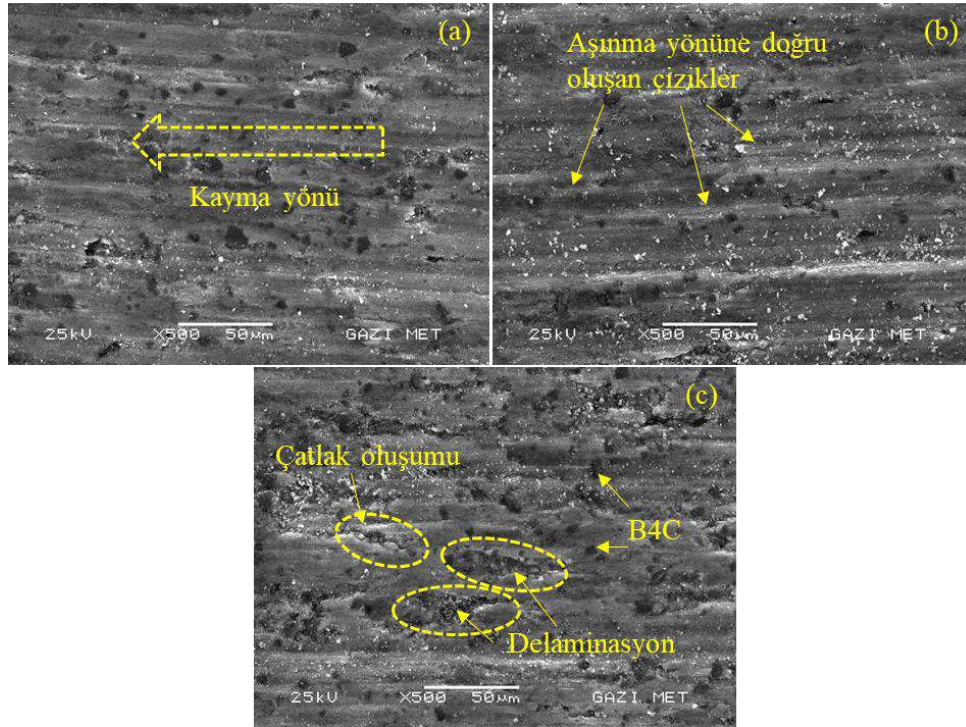


**Şekil 9.** Malzemelerin sürtünme katsayıları değişimi (a)Al7075/%5B<sub>4</sub>C/%2Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, (b)Al7075/%10B<sub>4</sub>C/%2Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, (c) Al7075/%15B<sub>4</sub>C/%2Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (Friction coefficients change of materials (a) Al7075/%5B<sub>4</sub>C/%2Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, (b) Al7075/%10B<sub>4</sub>C/%2Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, (c) Al7075/%15B<sub>4</sub>C/%2Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)



**Şekil 10.** Aşınma yüzeylerinin SEM resmi (a) Al7075 alaşımı, (b) Al7075/%5B<sub>4</sub>C, (c) Al7075/%10B<sub>4</sub>C, (d) Al7075/%15B<sub>4</sub>C (SEM image of wear surfaces (a) Al7075 alloy, (b) Al7075/%5B<sub>4</sub>C, (c) Al7075/%10B<sub>4</sub>C, (d) Al7075/%15B<sub>4</sub>C)





**Şekil 11.** Aşınma yüzeylerinin SEM resmi (a)Al7075/%5B<sub>4</sub>C/%2Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, (b)Al7075/%10B<sub>4</sub>C/%2Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, (c) Al7075/%15B<sub>4</sub>C/%2Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (SEM image of the wear surfaces (a) Al7075/5B<sub>4</sub>C/2%Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, (b) Al7075/10B<sub>4</sub>C/2%Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, (c) Al7075/15B<sub>4</sub>C/2%Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada sıcak presleme yöntemi ile Al7075 alaşımı, Al7075/B<sub>4</sub>C kompozit malzemesi ve Al7075/B<sub>4</sub>C/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> hibrid kompozit malzemesi üretilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda;

- En yüksek yoğunluk değeri takviyesiz olan Al7075 alaşımında (2,798 g/cm<sup>3</sup>) meydana gelmiştir. En düşük yoğunluk ise Al7075/%15B<sub>4</sub>C/%2Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozit malzemesinde (2,710 g/cm<sup>3</sup>) oluşmuştur.
- Kompozit malzemelerde ağırlıkça B<sub>4</sub>C oranının artması ile beraber deneysel yoğunluklarda azalmalar meydana gelmiştir.
- En düşük porozite oranı Al7075 alaşımında en yüksek porozite oranı ise Al7075/%15 B<sub>4</sub>C/%2Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozit malzemesinde görülmüştür. B<sub>4</sub>C miktarının porozite oranını arttırdığı görülürken bu durum Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesinin artması ile artmıştır.
- Mikroyapılara bakıldığında %5 ve %10 B<sub>4</sub>C takviye ilavesinin Al7075 içerisinde homojen dağıldığı görülmüştür. %15 B<sub>4</sub>C ilavesi ile kısmen toplanmaların olduğu görülmüştür. B<sub>4</sub>C ilavesi ile mikroyapıda mikro gözeneklerin olduğu görülmüştür. Malzemelerde Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ilave olan ve olmayanları kıyasladığımızda Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ilavesinin mikroyapıda toplanmaları ve gözenekleri arttırdığı görülmüştür.

- En düşük sertlik Al7075 alaşımında (36,8 HB) görülürken en yüksek sertlik ise Al7075/%15B<sub>4</sub>C/%2Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kompozit malzemesinde (110 HB) görülmüştür. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ilaveli ve ilavesiz kompozit malzemeleri birbiri ile kıyasladığımızda Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ilaveli olanların sertlik değerlerinin daha yüksek olduğu anlaşılmıştır.
- En yüksek sürtünme katsayı değeri takviyesiz olan Al7075 alaşımında gerçekleşmiştir. Kompozit malzemelere bakıldığında ise B<sub>4</sub>C oranının artmasına bağlı olarak sürtünme katsayılarında azalma olduğu gözlemlenmiştir.
- Artan B<sub>4</sub>C ilavesine bağlı olarak aşınan yüzeyde gözeneklerin meydana geldiği görülmüştür. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ilaveli kompozitlerde ise derin çiziklerin ve yırtılmaların olduğu görülmektedir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Sağlamış olduğu laboratuvar imkanlarından dolayı Gazi üniversitesi Metalurji ve malzeme Bilimi Bölüm Başkanlığına teşekkür ederim. Mikroyapı resimlerinin çekiminde laboratuvar imkanlarından faydalanmış olduğum KOSGEB Ankara Sincan Müdürlüğüne teşekkür ederim.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Chawla, K. K., “Composite materials: science and engineering”, *Springer Science & Business Media*, (2012).
- [2] Gay, D., “Composite materials: design and applications”, *CRC press*, (2014).
- [3] Chawla, K. K., “Metal matrix composites”, *Materials Science and Technology*, (2006).
- [4] Kaczmar, J. W., Pietrzak, K., & Włosiński, W., “The production and application of metal matrix composite materials”, *Journal of materials processing technology*, 106(1-3): 58-67, (2000).
- [5] Pol, N., Verma, G., Pandey, R. P., & Shanmugasundaram, T., “Fabrication of AA7005/TiB<sub>2</sub>-B<sub>4</sub>C surface composite by friction stir processing: Evaluation of ballistic behaviour”, *Defence Technology*, (2018).
- [6] Bodunrin, M. O., Alaneme, K. K., & Chown, L. H. “Aluminium matrix hybrid composites: a review of reinforcement philosophies; mechanical, corrosion and tribological characteristics”, *Journal of materials research and technology*, 4(4): 434-445, (2015).
- [7] Zhang, L. C., & Attar, H., “Selective laser melting of titanium alloys and titanium matrix composites for biomedical applications: a review”, *Advanced Engineering Materials*, 18(4): 463-475, (2016).
- [8] Yao, Y. T., Jiang, L., Fu, G. F., & Chen, L. Q., “Wear behavior and mechanism of B<sub>4</sub>C reinforced Mg-matrix composites fabricated by metal-assisted pressureless infiltration technique”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25(8): 2543-2548, (2015).
- [9] Mazzolani, F. M., (Ed.). “Aluminium structural design” (Vol. 443). *Springer*, (2014).
- [10] Torralba, J. D., Da Costa, C. E., & Velasco, F., “P/M aluminum matrix composites: an overview”, *Journal of Materials Processing Technology*, 133(1-2): 203-206, (2003).
- [11] Tajally, M., Huda, Z., & Masjuki, H. H., “A comparative analysis of tensile and impact-toughness behavior of cold-worked and annealed 7075 aluminum alloy”, *International Journal of Impact Engineering*, 37(4): 425-432, (2010).
- [12] Shorowordi, K. M., Laoui, T., Haseeb, A. S. M. A., Celis, J. P., & Froyen, L., “Microstructure and interface characteristics of B<sub>4</sub>C, SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reinforced Al matrix composites: a comparative study”, *Journal of Materials Processing Technology*, 142(3): 738-743, (2003).
- [13] Ma, Z. Y., Tjong, S. C., Li, Y. L., & Liang, Y., “High temperature creep behavior of nanometric Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> particulate reinforced aluminium composite”, *Materials Science and Engineering: A*, 225(1-2): 125-134, (1997).
- [14] Pul, M., Calin, R., & Gül, F., “Investigation of abrasion in Al-MgO metal matrix composites”, *Materials Research Bulletin*, 60: 634-639, (2014).
- [15] Toptan, F., Kumdalı, F., & Kerti, I., “Al-B<sub>4</sub>C kompozitlerinin fren diski olarak kullanılabilirliğine genel bir bakış”, *Metallurji*, 145: 11-18, (2006).
- [16] Gromov, A. A., & Chukhlomina, L. N. (Eds.), “Nitride Ceramics: Combustion Synthesis, Properties and Applications”, *John Wiley & Sons*, (2015).
- [17] Singh, J., & Chauhan, A., “Characterization of hybrid aluminum matrix composites for advanced applications—A review”, *Journal of Materials Research and Technology*, 5(2): 159-169, (2016).
- [18] Prasad, D. S., Shoba, C., & Ramanaiyah, N., “Investigations on mechanical properties of aluminum hybrid composites”, *Journal of Materials Research and Technology*, 3(1): 79-85, (2014).
- [19] Kaushik, N. C., & Rao, R. N., “Effect of applied load and grit size on wear coefficients of Al 6082–SiC–Gr hybrid composites under two body abrasion”, *Tribology International*, 103: 298-308, (2016).
- [20] Gökmen, U., “Sıcak Ekstrüze Edilmiş Al 2024 Matrisli B<sub>4</sub>C/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Takviyeli Hibrit Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu”, *Politeknik Dergisi*, 19(4): 445-453, (2016).
- [21] Yıldırım, M., & Özyürek, D., “An Investigation of Wear Behaviors of AA7075 Al Hybrid Composites”, *High Temperature Materials and Processes*, 37(7): 619-624, (2018).
- [22] Kumar, R., & Dhiman, S., “A study of sliding wear behaviors of Al-7075 alloy and Al-7075 hybrid composite by response surface methodology analysis”, *Materials & Design*, 50: 351-359, (2013).
- [23] Çinici, H., Gökmen, U., Kırmızı, G., & Çamkerten, R., “Sıcak Presleme Yöntemiyle Üretilmiş B<sub>4</sub>C Takviyeli AA 7xxx Matrisli Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin Çapraz Kırılma Dayanımının Belirlenmesi”, *Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(1): 383-386, (2017).
- [24] Ambigai, R., & Prabhu, S., “Optimization of friction and wear behaviour of Al–Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nano composite and Al–Gr–Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> hybrid composite under dry sliding conditions”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27(5): 986-997, (2017).
- [25] Hasırcı, H., & Gül, F., “B<sub>4</sub>C/Al kompozitlerin takviye hacim oranına bağlı olarak abrasif aşınma davranışlarının incelenmesi”, *SDU International Technologic Science*, 2(1): 15-21, (2010).
- [26] Baradeswaran, A. E. P. A., & Perumal, A. E., “Influence of B<sub>4</sub>C on the tribological and mechanical properties of Al 7075–B<sub>4</sub>C composites”, *Composites Part B: Engineering*, 54: 146-152, (2013).
- [27] Sharma, P., Sharma, S., & Khanduja, D., “Production and some properties of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> reinforced aluminium alloy composites”, *Journal of Asian Ceramic Societies*, 3(3): 352-359, (2015).
- [28] Matik, U., & Tanattı, K., “Sıcak Ekstrüze Edilmiş AA7075-Sicp Kompozitlerin Tribolojik Karakteristiklerine Isıl İşlemin Etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 20(4): 807-814, (2017).
- [29] Göde, C., “TM ile üretilmiş Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-231 SiCp ve B<sub>4</sub>Cp kompozitlerin farklı üretim yöntemlerinin mekanik özelliklere etkisi”, *Pamukkale Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2011).

- [30] Arık, H. & Orhun, D. Z., "Investigation of Dry Sliding Wear Behavior of Powder Metal (P/M) Materials Produced from Mixture of Fe-Cu-C Powders", *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 5(1): 37-48, (2018).
- [31] Höganäs PM-school, "Sintered iron-based materials", Page: 9-19, (2013).
- [32] Canakci, A., Arslan, F., & Varol, T., "Effect of volume fraction and size of B<sub>4</sub>C particles on production and microstructure properties of B<sub>4</sub>C reinforced aluminium alloy composites", *Materials Science and Technology*, 29(8): 954-960, (2013).
- [33] Tayebi, M., Jozdani, M., & Mirhadi, M., "Thermal expansion behavior of Al-B<sub>4</sub>C composites by powder metallurgy", *Journal of Alloys and Compounds*, 809: 151753, (2019).
- [34] Kalkanlı, A., & Yılmaz, S., "Synthesis and characterization of aluminum alloy 7075 reinforced with silicon carbide particulates", *Materials & Design*, 29(4): 775-780, (2008).
- [35] Alizadeh, M., Alizadeh, M., & Amini, R., "Structural and mechanical properties of Al/B<sub>4</sub>C composites fabricated by wet attrition milling and hot extrusion", *Journal of Materials Science & Technology*, 29(8): 725-730, (2013).
- [36] Ahmed, A., Neely, A. J., Shankar, K., Nolan, P., Moricca, S., & Eddowes, T., "Synthesis, tensile testing, and microstructural characterization of nanometric SiC particulate-reinforced Al 7075 matrix composites", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 41(6): 1582-1591, (2010).
- [37] Raj, R., & Thakur, D. G., "Qualitative and quantitative assessment of microstructure in Al-B<sub>4</sub>C metal matrix composite processed by modified stir casting technique", *Archives of civil and mechanical engineering*, 16(4): 949-960, (2016).
- [38] Zhixuan, W., Qiulin, L., Jiyun, Z., Wei, L., Guogang, S., Ping, W., & Ben, X., "Improving Al Wettability on B<sub>4</sub>C by Transition Metal Doping: a Combined DFT and Experiment Study", *Rare Metal Materials and Engineering*, 46(9): 2345-2351, (2017).
- [39] Harichandran, R., & Selvakumar, N., "Effect of nano/micro B<sub>4</sub>C particles on the mechanical properties of aluminium metal matrix composites fabricated by ultrasonic cavitation-assisted solidification process", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 16(1): 147-158, (2016).
- [40] Arık, H., "Toz Metalurjisi Metoduyla Al-SiC Kompozit Malzeme Üretimi ve Aşınma Özelliklerinin Araştırılması", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7(3): 741-754, (2019).
- [41] Özyürek, D., Tunçay, T., & Kaya, H., "The effects of T5 and T6 heat treatments on wear behaviour of AA6063 alloy", *High Temperature Materials and Processes*, 33(3): 231-237, (2014).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Evaluation of 3D modeling programs for industrial design use

## *3B modelleme programlarının endüstri tasarımında kullanım açısından değerlendirilmesi*

Yazar(lar) (Author(s)): Hüseyin Özkal ÖZSOY

ORCID: 0000-0001-5531-3539

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Özsoy H. Ö., “Evaluation of 3d modeling programs for industrial design use”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1153-1166, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.481241

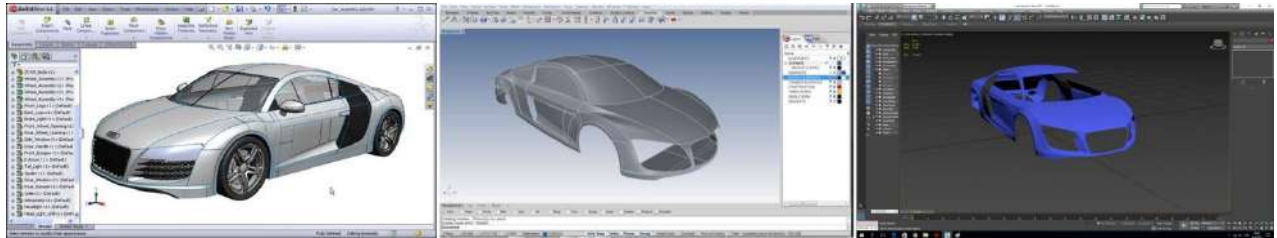
# Evaluation of 3D Modeling Programs for Industrial Design Use

## Highlights

- ❖ 3D modeling programs are investigated in terms of industrial design process requirements.
- ❖ Related criteria for evaluating 3D Modeling programs are determined.
- ❖ The use of Analytical Hierarchy Process is investigated.
- ❖ A model is proposed for performing analytical evaluations in industrial design.
- ❖ The proposed model is applied on the field study in which selected programs are evaluated.

## Graphical Abstract

In the article, Analytical Hierarchy Process (AHP) which had been used for evaluation purposes in numerous theoretic and practical fields in academic to industrial circles is investigated and the use of the method is explained in detail.



**Figure.** PC Program Packages (PP) one of which will be selected as the most suitable one for general industrial design use

## Aim

It is intended to introduce an analytical evaluation method to industrial design and demonstrate its use and benefits, improving the acceptance of such methods in the field.

## Design & Methodology

The research model, based on the AHP method is proposed and explained in detail. Then it is applied in a field study in which 3D modeling programs are evaluated for suitability to the industrial design use. Research data is gathered by interviews and processed with tools given in the article. The findings are presented and interpreted.

## Originality

The article is the outcome of an original research on the subject.

## Findings

The findings relate to the investigation of the suitability of 3D modeling programs to the process needs, cost/performance, reliability, technical support and documentation requirements of industrial design.

## Conclusion

The model proposed in the study has a flexible structure which enables the user to easily fine tune its properties according to each specific evaluation job at hand. This ease of use and flexibility makes the model very suitable for industrial design use.

## Declaration of Ethical Standards

The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.



# 3B Modelleme Programlarının Endüstri Tasarımında Kullanım Açısından Değerlendirilmesi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Hüseyin Özkal ÖZSOY\***

Endüstri Tasarımı Bölümü, Mimarlık Fakültesi, İstanbul Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 10.11.2018 ; Kabul/Accepted : 27.10.2019)

## ÖZ

Bu makalede, akademik ve sanayide teorik ve uygulamalı birçok konuda değerlendirme amacı ile kullanılan, karşılaştırılan alternatifler arasında yapılan ikili karşılaştırmalara dayalı olarak çalışan analitik hiyerarşi yöntemi(AHY, AHP: Analytical Hierarchy Process) incelenmekte ve yöntemin kullanımı detaylı şekilde açıklanmaktadır. Yöntem, bilgisayar destekli tasarım(BDT) ve 3B modelleme programlarının endüstri tasarımı alanında kullanıma uygunluğunun değerlendirildiği bir alan çalışmasıyla uygulamalı olarak sunulmaktadır. Sonuç bölümünde, çalışmada elde edilen bulgular açıklanmakta, yorumlanmakta ve yöntemin endüstri tasarımı alanına getirebileceği katkılar tartışılmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Analitik hiyerarşi yöntemi, endüstri tasarımı, ürün tasarımı, ikili karşılaştırma, yazılımların değerlendirilmesi.

## Evaluation of 3D Modeling Programs For Industrial Design Use

### ABSTRACT

In this article, Analytical Hierarchy Process (AHP) which had been used for evaluation purposes in numerous theoretic and practical fields in academic to industrial circles is investigated and the use of the method is explained in detail. The method is then demonstrated on a field study in which 3D modeling programs are evaluated for suitability to the industrial design field. At the results section, the obtained findings are explained, interpreted and methods possible benefits to the industrial design field is argued.

**Keywords:** Analytical hierarchy process, industrial design, product design, pairwise comparison, software evaluation.

### 1. INTRODUCTION

Analytical Hierarchy Process (AHP) is a well proven evaluation tool which has been extensively used in almost every field of research that involves multi criteria decision making. Developed by Saaty, it has been used in various evaluation and decision making applications in later years [1].

Competition is pushing design and production firms to do process optimizations to obtain better results in their businesses. That optimization process is a tough one as it requires lots of planning for the problem to be correctly identified best possible solution for it to be found and realized efficiently. To integrate and ease up the work necessary for such optimizations, a number of computer aided design (CAD) systems have emerged in time [2].

A CAD system is a critical part of a computer aided manufacture(CAM) system and integrates different kinds of design and engineering tasks of the product development process in a virtual environment by means of computing technologies [3]. Therefore using a CAM system is advantageous for a firm as it maintains and enables the concurrent, fast and safe execution of tasks in product development like industrial design, engineering, reverse-engineering, logistics etc. The detailed modeling

and analysis of a product for better understanding of its interior systems by using CAD programs during the design phase simplifies the management of the later production phases and product's life cycle [4].

Firms usually experience difficulties while they try to obtain the CAD-CAM software they need. Among these difficulties, probably the biggest one is the selection of the software package according to the company needs and expectations [5].

Software selection is a complex, multi-criteria decision making process that can be affected by many factors. As the costly failures experienced by firms due to the mistakes made in choosing and operating these kinds of systems are heard among other companies, making correct evaluations have started to get into more people's area of interest. Prices of these software systems are high and they generally require yet more expensive powerful computer systems to run. So it is an absolute necessity for the selected software-hardware system to provide a rise in design quality and flexibility in manufacture to cover and surpass all the expenses made for purchasing it [6].

For a firm specializing on industrial design, the selection of the CAD-CAM PC software package most suitable for their use is very important to be competitive in the global market. The product design process which contains many complex and multi-criteria decision making tasks can be

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta ozkal.azsoy@msgsu.edu.tr

simplified by using suitable tools that deal with and simplify these tasks individually [7]. Determining the most suitable 3D modeling program for industrial design can be thought of one of these individual tasks and to accomplish it, a versatile tool which is immune to external and internal influences can be helpful. This tool should be methodic, easy to use and suitable for use in a computer environment. AHP comes up as one of the available tools that can be used for this purpose, fulfilling the needs of the evaluation processes in industrial design. This article investigates AHP's suitability for use in industrial design and proposes a method for its application. First, the history of AHP is introduced briefly, then the steps of the method is explained in detail and the sample application is presented in which the proposed method is used for evaluating 3 candidate 3D modeling programs for the PC and selecting the most suitable one to be used in industrial design.

## 2. ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS

AHP is first proposed by Myers and Alpert [8] and further developed for application in Wharton School of Business [1]. By means of the following studies in later years, AHP established a place for itself as a powerful and flexible tool in applications which require decision making and priority identification [9–12]. AHP is basically a measurement theory based on priority values obtained from pairwise comparisons between criteria and/or alternatives. It is very useful in solving decision making problems belonging to systems that incorporate complex relations with its subsystems and it works by analyzing and modeling these systems heuristically as a simplified hierarchical structure and studies them intuitively and logically [13]. By using this simplified structure, AHP prevents costly, distractive and delay imposing problems frequently encountered in large decision making processes like lack of focus, lack of involvement and planning mistakes [14].

AHP works mainly with weighted scale comparisons and its theoretical structure is based on four main axioms [15]:

**Axiom 1 (Reciprocity):** This is the basis for making pairwise comparisons. If the  $i^{\text{th}}$  criteria's importance value is  $x$ , then the importance value of the  $j^{\text{th}}$  criteria with respect to the  $i^{\text{th}}$  criteria shall be  $\frac{1}{x}$ .

**Axiom 2 (Homogeneity):** For the pairwise comparisons to be done correctly, any of the two criteria cannot be infinitely superior to the other.

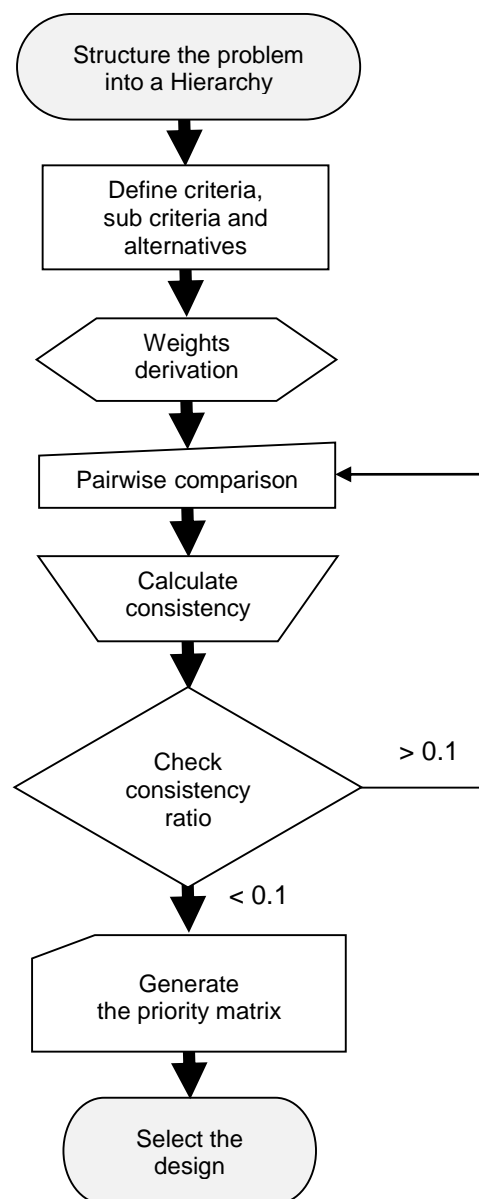
**Axiom 3 (Independency):** Criteria and alternatives are independent from each other.

**Axiom 4 (Hierarchy):** The human mind can make comparisons among things which carry similarities with respect to a common property. If a decision problem or task is divided into sub units and presented within a hierarchical structure, every unit at the hierarchy tree has other items next to, above or below to be compared to. So rearranging the units to be compared within a

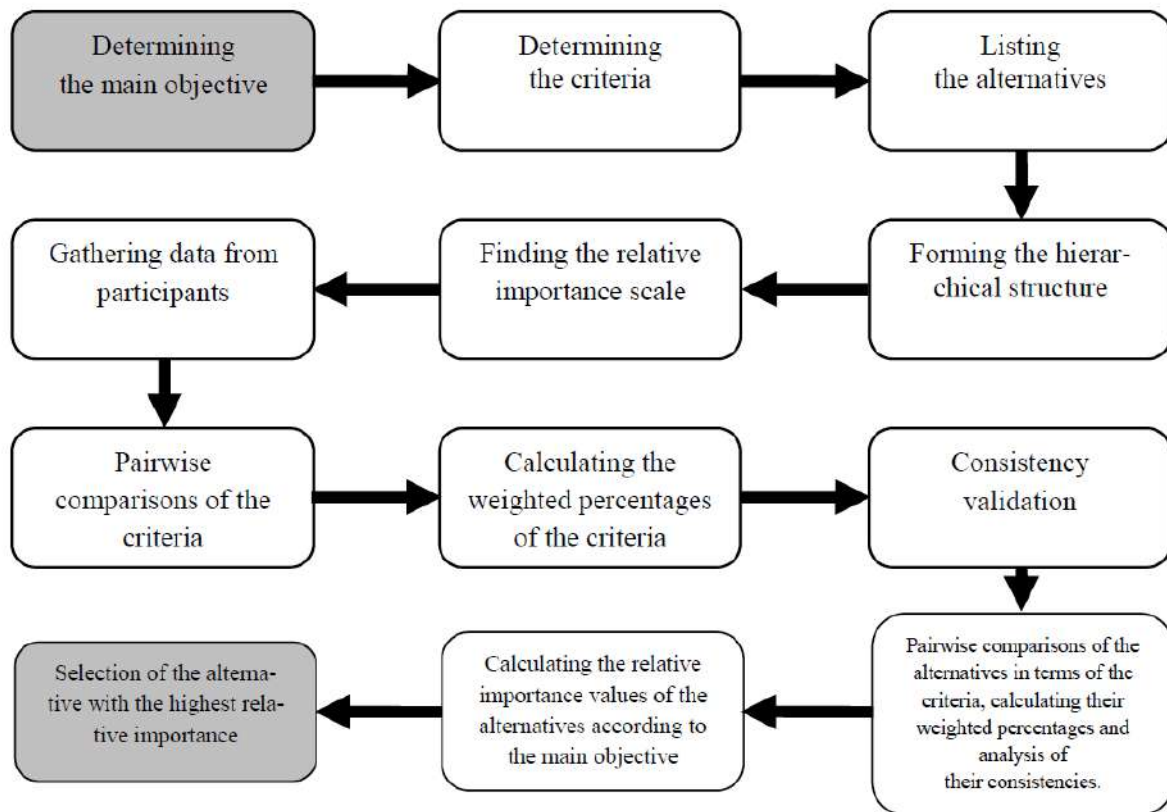
hierarchical order provides extra reference values and simplifies the comparison process.

### 2.1 The Application of Analytical Hierarchy Process

AHP is realized briefly in three main phases: building a hierarchy diagram, derivation of the weighted importance values and verifying consistencies [1]. The first phase is to convert the decision making problem into a three leveled hierarchy diagram. Then, matrices are prepared for each hierarchy level and they are filled with data obtained from comparisons performed in interviews with participants of the experiment. Finally, at the priority analysis phase, every comparison matrix is solved by using the eigenvector method, which determines the relative importance of criteria and performance values of the alternatives [16].



**Figure 1.** Flow chart of the Analytical Hierarchy Process



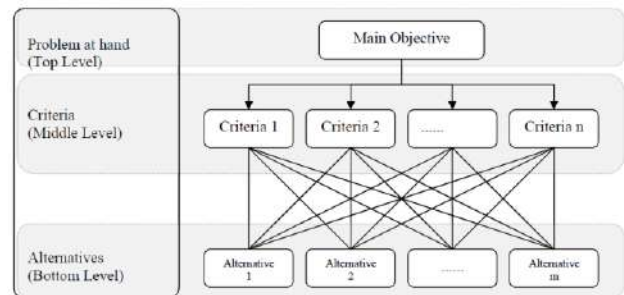
**Figure 2.** Analytic Hierarchy Process Steps

1) The first step is the determination of the main objective. It is the target which the decision makers would like to achieve by using AHP.

2) Criteria which will be used for evaluation are listed in this step. Care should be taken, as the success of the evaluations will depend on how correctly these criteria are determined. Experts of the field might be consulted and a needs list might help to decide which criteria should be considered in the process. The length of this list, as well as the amount of criteria can change according to the properties of the problem at hand [14].

3) The alternative to be further evaluated to reach the main objective is decided and prepared for evaluation.

4) A three leveled hierarchical structure is formed, with the main objective at the top, the criteria listed in second step occupying the middle and the alternatives in third step at the bottom level (Figure 3) and each group of items forming a hierarchically separate layer while the main objective occupies the whole top level on its own. Items which are at the same level are assumed to be independent according to Saaty's third axiom. The size of the hierarchical structure changes according to the complexity of the problem and the researchers' need for details to solve the problem [17]



**Figure 3.** General Hierarchical Structure of AHP

5) For the pairwise comparison matrices to be formed, a relative priority scale consisting of numbers that show the importance values of the criteria is prepared. This scale enables all criteria to be separately evaluated for their effects upon the final decision. Saaty had developed the 1-9 scale which consists of 5 main and 4 intermediate values [1]. These values, their conceptual meanings and explanations can be seen in table 1.

**Table 1.** Relative importance scales used in AHP and their definitions

Relative Importance Value	Conceptual Meaning	Explanation
1	Equal value	Two requirements are of equal value
3	Slightly more value	Experience slightly favors one requirement over the other
5	Essential or strong value	Experience strongly favors one requirement over the other
7	Very strong value	A requirement is strongly favored and its dominance is demonstrated in practice
9	Extreme value	The evidence favoring one over the other is on the highest possible order of affirmation
2,4,6,8	Intermediate values	These values should only be used when a compromise is needed.

6) During the application of the AHP, importance values of the criteria are rated by the participants in surveys or interviews according to the scale given in table 1. In this rating, every one of the criteria used in the process is compared one on one to every other criterion to obtain their relative importance values. As the consistency of the results and the final success of the evaluation will depend on the information gathered from the participants, they should be selected among people at least having sufficient knowledge or preferably experts of the field in which the main objective is about. They can be the members of the design team, designers from outside the firm or sometimes consumers who will eventually use the products. It is much easier to evaluate alternatives and make a final decision when this group has only one member; as the number of participants increase, it becomes more difficult to process all data manually and obtain a single judgment in the end. The average value of the data gathered from several people is calculated and used as a single entry during later calculations. While some researchers use the arithmetical mean average of data obtained from multiple people, Saaty states that this might create some consistency problems and believes that geometrical averaging would give better results [18]. 7) At this step, pairwise comparison matrices are formed by using data obtained in step 6. In a decision process with  $n$  criteria,  $\frac{n(n+1)}{2}$  comparisons are needed, producing  $n \times n$  sized pairwise comparison matrices [19] When the importance value of the  $i^{th}$  criteria and the  $j^{th}$

criteria is shown with  $a_{ij}$ , generally the pairwise comparison matrix becomes like the one below [20].

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

The contents of the matrix A, which are the importance values of the pairwise comparisons, are positive numbers ( $a_{ij} > 0, i, j = 1, 2, \dots, n$ ) while all diagonal values starting from  $a_{11}$  are 1. If the pairwise comparisons (matrix A) are fully consistent, the equation;

$$a_{ij} \cdot a_{jk} = \left(\frac{w_i}{w_j}\right) \cdot \left(\frac{w_j}{w_k}\right) = \frac{w_i}{w_k} = a_{ik}$$

$$i, j, k = 1, 2, \dots, n \text{ should be true [1].}$$

8) After the A matrix, which stores the importance values of the reciprocal comparisons is prepared, its value should be normalized. Various methods are used for this purpose. In the favorite method for many researchers, every column member is divided into the sum of the column where it is located. Where  $b_j$  shows the sum of the  $j^{th}$  column, the total value of the columns is calculated by using formula 1 below.

$$b_1 = \sum_{i=1}^n a_{i1} \tag{1}$$

Then, members of the reciprocal comparison matrix are divided into the total sum of the column in which they are located with the formula 2 below.

$$c_{ij} = \frac{a_{ij}}{b_i} \tag{2}$$

This gives us the C matrix (3) with  $n \times n$  dimensions, comprised of  $c_{ij}$  members which are the normalized values of the comparisons.

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nn} \end{bmatrix} \tag{3}$$

By using matrix C, relative importance or percentage weights of the criteria are calculated with the formula 4 below which gives the arithmetic mean of the line members of the C matrix.

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n c_{ij}}{n} \tag{4}$$

This gives us the W matrix (5) which is comprised of the mean values of the lines of matrix C and stores the percentage weights of all the criteria.

$$W = \begin{bmatrix} w_1 = \frac{c_{11} + c_{12} + \dots + c_{1n}}{n} \\ w_2 = \frac{c_{21} + c_{22} + \dots + c_{2n}}{n} \\ \dots \\ w_n = \frac{c_{n1} + c_{n2} + \dots + c_{nn}}{n} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \cdot \\ w_n \end{bmatrix} \tag{5}$$

Performed normalization and other calculations related to the percentage weights of the criteria are summarized in table 2.

**Table 2.** Calculating the percentage weights of the criteria

	Criteria 1	Criteria 2	..	Criteria n	Criteria percentage weights
Criteria 1	$c_{11} = \frac{a_{11}}{b_1}$	$c_{12} = \frac{a_{12}}{b_2}$	..	$c_{1n} = \frac{a_{1n}}{b_n}$	$w_1 = \frac{c_{11} + c_{12} + \dots}{n}$
Criteria 2	$c_{21} = \frac{a_{21}}{b_1}$	$c_{22} = \frac{a_{22}}{b_2}$	..	$c_{2n} = \frac{a_{2n}}{b_n}$	$w_2 = \frac{c_{21} + c_{22} + \dots}{n}$
...	...	...	..	...	...
Criteria n	$c_{n1} = \frac{a_{n1}}{b_1}$	$c_{n2} = \frac{a_{n2}}{b_2}$	..	$c_{nn} = \frac{a_{nn}}{b_n}$	$w_n = \frac{c_{n1} + c_{n2} + \dots}{n}$
Sum	$\sum_{i=1}^n c_{i1} = 1$	$\sum_{i=1}^n c_{i2} = 1$	..	$\sum_{i=1}^n c_{in} = 1$	$\sum_i w_i = 1$

9) Even though AHP has a very consistent system within its own, the success of its results still depends on the consistency of the pairwise comparison data gathered

**Table 3.** Number of criteria versus RI values.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

from the survey participants. So a consistency check function is also incorporated into AHP which is used to validate the individual comparisons by calculating their consistency ratio (CR). This function not only detects the erroneous evaluations that the participants perform during the surveys or interviews, it also shows exaggerated values in the data [14]. Calculating the CR depends on comparison between the number of criteria (n) and a coefficient called the base value (λ). For calculating λ, D column vector is calculated first by multiplying pairwise comparison matrix A with column vector matrix W which shows percentage weights of the criteria.

$$D = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \cdot \\ w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \cdot \\ d_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

By dividing each member of D matrix by the corresponding member of the W matrix, one e<sub>i</sub> value is found for each evaluation criteria (7).

$$e_i = \frac{d_i}{w_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

By using formula 8, the average mean of the e<sub>i</sub> values are calculated and used to calculate the base value (λ).

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n} \quad (8)$$

Then the consistency index (CI) value is calculated by formula 9.

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (9)$$

Finally as shown in equation 10, CR is obtained by dividing the calculated CI value by the RI value, which is the standard correction index value created by Saaty to calculate consistency ratio [1]. Number of criteria (n) versus corresponding necessary RI values are listed in table 3.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (10)$$

Acceptable upper limit for the consistency ratio is  $\frac{1}{10}$ .

Having this number as the CR means that the inconsistency is 10% and the probability of these criteria comparisons being completely random is 0.1. So a CR value less than 0.1 means that the pairwise comparisons are consistent. If the CR value is more than 0.1, it is recommended to renew the comparisons corresponding to that CR value. This analysis and validation is repeated for all of the comparisons done in the project [14].

10) At this step, the alternatives are pairwise compared according to each criterion by using the importance values listed in table 1. Therefore for n criteria and m alternatives, nxm comparisons are made. Later as it was done for the criteria, normalized values for the alternatives are also calculated by dividing pairwise comparison column values (s<sub>ij</sub>) by column sum (t<sub>i</sub>)



**Table 4.** Comparison of alternatives according to criteria

Pairwise comparisons of the alternatives according to criteria i					Normalized pairwise comparisons of the alternatives according to criteria i				Percentage weights of the alternatives according to criteria i
	Alt. 1	Alt. 2	...	Alt. m	Alt. 1	Alt. 2	...	Alt. m	$v_{ij}$
Alt. 1	$s_{11}$	$s_{12}$	...	$s_{1m}$	$\frac{u_{11}}{t_1} = \frac{s_{11}}{t_1}$	$\frac{u_{12}}{t_1} = \frac{s_{12}}{t_1}$	...	$\frac{u_{1m}}{t_1} = \frac{s_{1m}}{t_1}$	$v_{i1} = \frac{\sum_{j=1}^m u_{1j}}{m}$
Alt. 2	$s_{21}$	$s_{22}$	...	$s_{2m}$	$\frac{u_{21}}{t_1} = \frac{s_{21}}{t_1}$	$\frac{u_{22}}{t_1} = \frac{s_{22}}{t_1}$	...	$\frac{u_{2m}}{t_1} = \frac{s_{2m}}{t_1}$	$v_{i2} = \frac{\sum_{j=1}^m u_{2j}}{m}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Alt. m	$s_{m1}$	$s_{m2}$	...	$s_{mm}$	$\frac{u_{m1}}{t_1} = \frac{s_{m1}}{t_1}$	$\frac{u_{m2}}{t_1} = \frac{s_{m2}}{t_1}$	...	$\frac{u_{mm}}{t_1} = \frac{s_{mm}}{t_1}$	$v_{im} = \frac{\sum_{j=1}^m u_{mj}}{m}$
Sum	$t_1 = \sum_{i=1}^n s_{i1}$	$t_2 = \sum_{i=1}^n s_{i2}$	...	$t_m = \sum_{i=1}^n s_{im}$	1	1	...	1	1

Percentage weights ( $v_{ij}$ ) for every alternative and related criterion is calculated by taking mean averages of these values normalized for every criterion and every alternative. This shows the percentage weight of the  $j^{th}$  alternative according to the  $i^{th}$  criterion. Then as it was done for the criteria, consistency ratios are also calculated for the alternatives by taking these percentage weights into account. If the consistency ratio of the alternatives for the  $i^{th}$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) criterion is less than 0.1( $CR<0.1$ ), it can be said that participants have made a consistent evaluation at the pairwise comparison of the alternatives according to the  $i^{th}$  criterion. If  $CR>0.1$ , then pairwise comparisons for the alternatives according to the  $i^{th}$  criterion should be renewed to obtain more consistent values.

11) Before giving the final decision, the alternatives' relative importance values according to the main objective are calculated by using the weighted values obtained at the solution phase of the problem. For this, percentage weights for each alternative and each criterion ( $v_{ij}$   $i=1,2,\dots,n$ ;  $j=1,2,\dots,m$ ) and percentage weights obtained by pairwise comparisons of the criteria ( $w_i$   $i=1,2,\dots,n$ ) are multiplied one to one. Then the results of these multiplications for each alternative are summed up to obtain the relative importance values ( $Z_j$ ) of the alternatives.

12) At this final decision step, the relative importance value  $Z$  for each alternative is compared and the one with the highest value is selected as the strongest candidate to be used in reaching the main objective while fulfilling all requirements of the selected criteria.

**2.2 Literature Review**

After it was developed for application by Saaty, AHP had been used extensively in fields that mostly deal with

qualitative data and need to have complex decision making and evaluation problems to be solved [9–12].

The tool's usage is in continuous rise today as it helps the analysis and solution of complex, multi criteria problems with its ease of use and flexibility. The method became even easier to use by means of several PC software packages that automated most of the paperwork and computing required for the process. There are even several online program packages nowadays which can be used free of charge. This enabled the method to be used in less professional environments and/or for more complex problems all of which helped to widen its spread [21,22].

To date, AHP had been used in econometrics, statistics, planning, energy management, resource allocation, health, dispute resolution, project selection, marketing, computing technologies, budget allocation, finance, education, sociology, architecture, and many other fields [17].

There are several studies in the literature about using AHP in product design but they have been usually concentrated on the engineering aspects of product development [23].

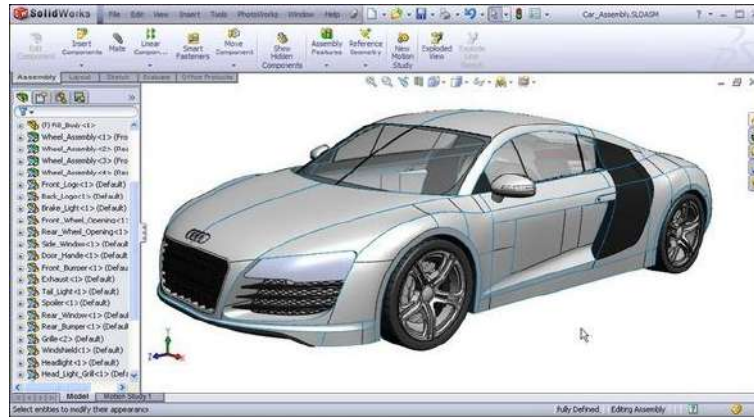
Some applications of AHP in product development are: planning a concurrent industrial product design process for a musical toy [24], the selection of the best energy type for a cooling product [25], evaluation of alternatives for a product design [26], selection of the best supplier firms in the design phase of a communications system [27].

There are also a number of preliminary studies in product design and development for the application of AHP in CAD software selection [28,29] or simulating the development of CAD systems [30].

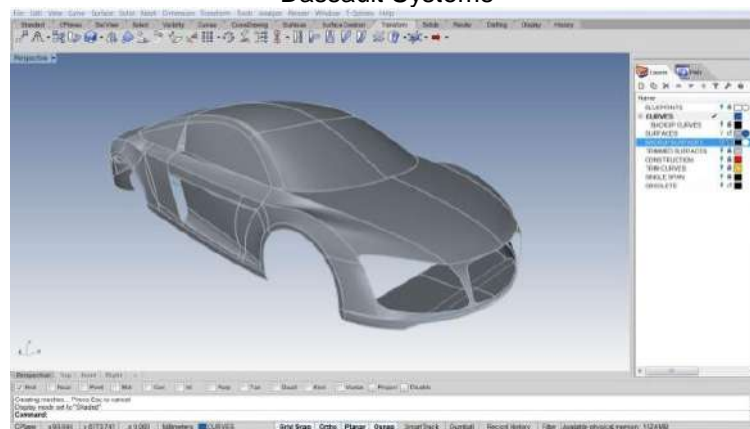
### 3. USING AHP FOR EVALUATION OF SOFTWARE PACKAGES FOR INDUSTRIAL DESIGN

This research is done in a university design research center with the participation of an industrial designer who is an expert in multidisciplinary studies with experience on all three software packages. Three PC program alternatives (Figure 4) taken among various programs

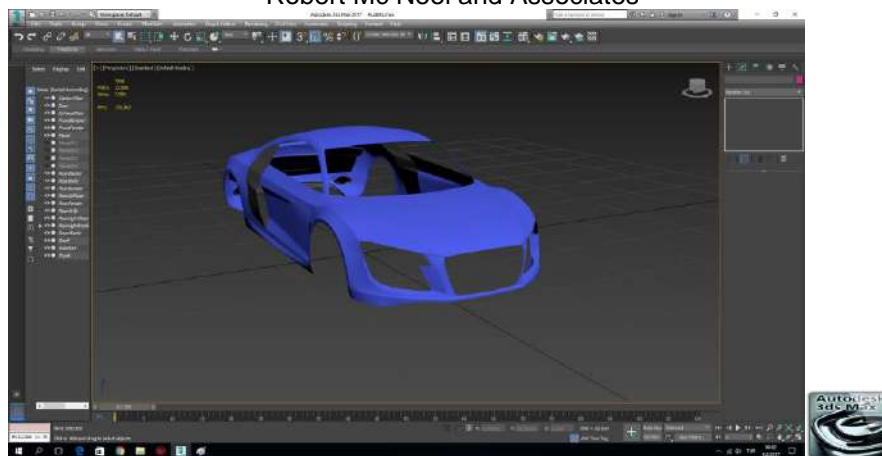
used for industrial design were used in the process. These program packages are accepted as the input for the research and used in the evaluation-selection experiment. This experiment is performed to demonstrate the use of AHP at the decision process in which one of the candidate PC programs is selected as the most suitable software package for general industrial design use.



PP-1: Solidworks  
Dassault Systems



PP-2: Rhinoceros 3D  
Robert Mc Neel and Associates



**Figure 4.** PC Program Packages (PP) one of which will be selected as the most suitable one for general industrial design use.

This article aims primarily to introduce AHP to industrial design and to demonstrate the usage of it on a simple application with no intention to actually evaluate all candidate PC programs and determine which one is the most suitable for design purposes. There are a great number of 3d modeling program packages which are used in industrial product design. Therefore only three of the programs on the market are taken into the context of the selection job to obtain a process which is easy to demonstrate.

For a PC program for use in industrial design to be chosen, the flowchart and the steps of AHP shown in figure 1-2 are executed. The first step is the definition of the main objective and it is determined as "selecting the best 3D modeling program"

motion simulation, structural validation, assembly animation, photo-realistic screen images, rendering, walk-through animation, reliability, documentation, technical support. After the determination of the criteria and the sub criteria (Figure 5), alternatives are required to be listed. The 3 PC program packages are named as PP-1, PP-2 and PP-3as the alternatives in this study (Figure 4).

Most important phase of the AHP process is forming the hierarchical structure and it should be done very carefully as any mistake might negatively affect the later stages of the process. At the complete hierarchical structure in figure 6, the top level shows the main purpose of the study, medium level lists the criteria-sub criteria and the bottom level lists the alternatives to be evaluated. This

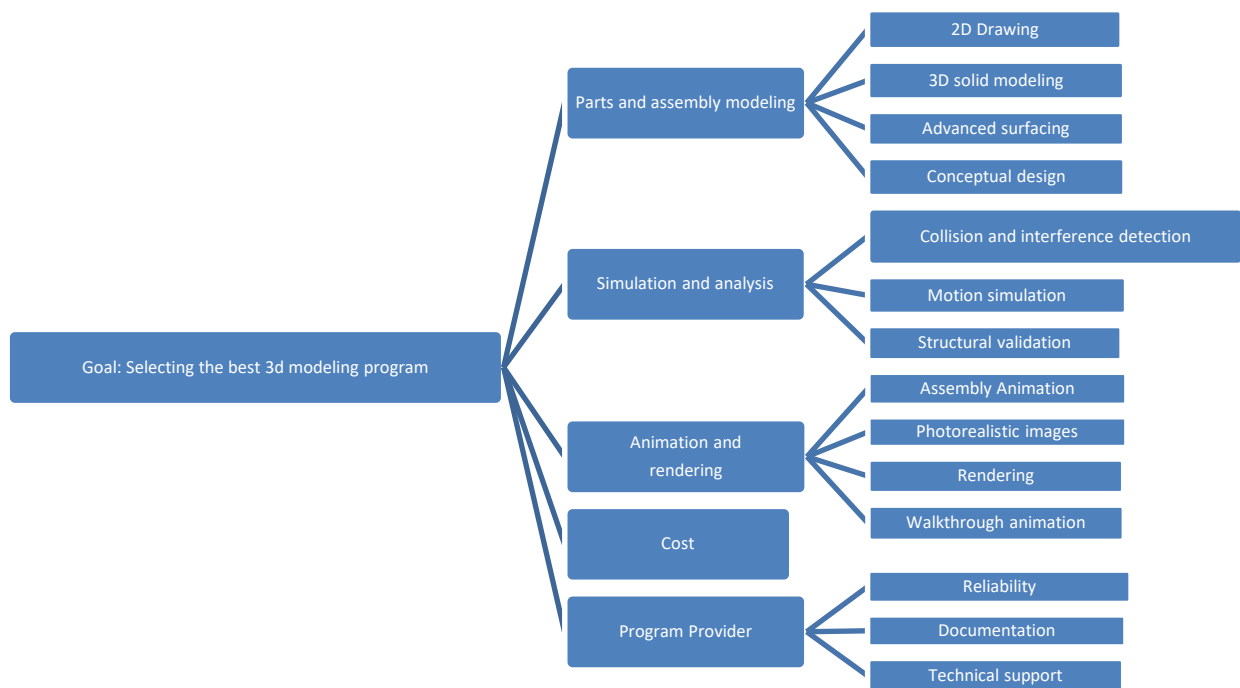
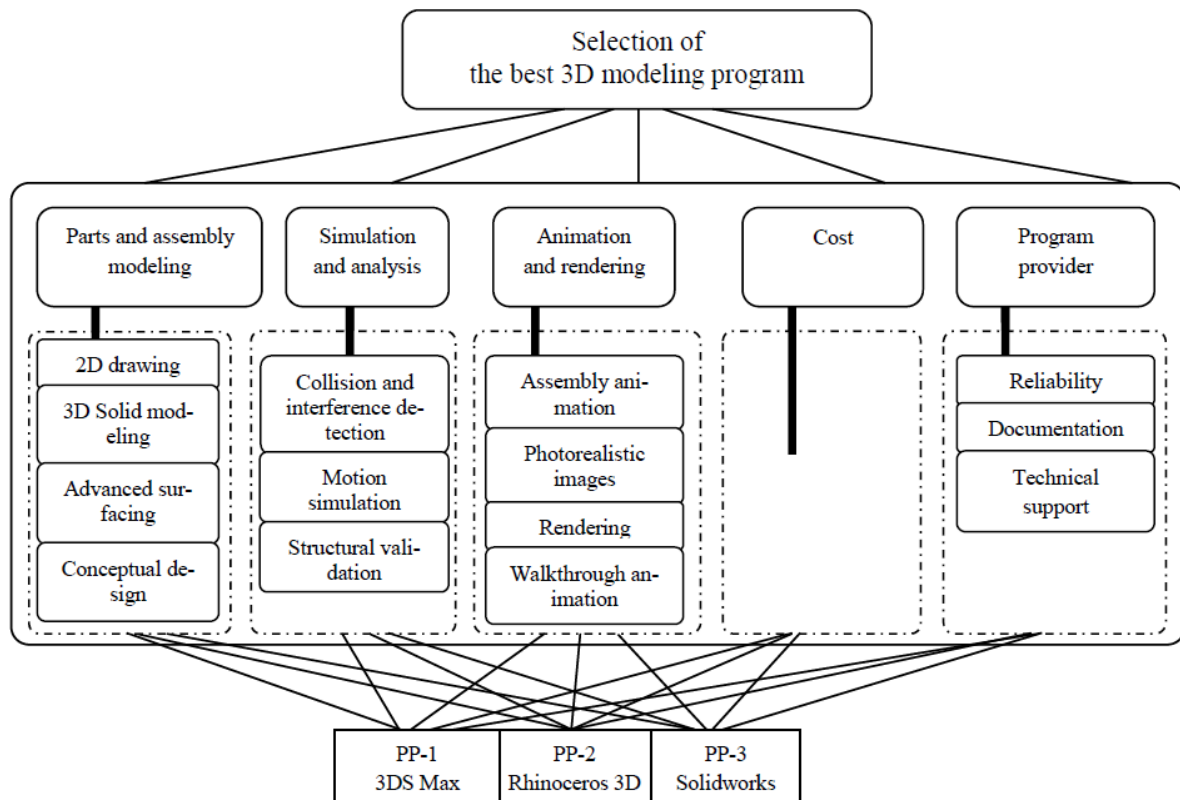


Figure 5. Main goal, criteria and subcriteria in a hierarchy tree

After defining the main objective and carefully studying other academic studies related to software evaluation, [2,5,34,6,11,11,19,28,31–33] the criteria which will be taken into account during selection are defined as: Parts and assembly modeling capability, simulation and analysis capability, animation and rendering capability, cost, program provider's capabilities. Then by utilizing the combined experience of the research participants, these main criteria are divided into 14 sub criteria as; 2D drawing, 3D solid modeling, advanced surfacing, conceptual design, collision and interference detection,

structure is also used for maintaining the order of its contents while they are used in the process. First the criteria and sub criteria are used as the input for a PC program specifically designed to be used in the application of AHP.

Then empty pairwise comparison matrices generated by the program are filled with data gathered from the participants during the interviews. The computer program then executed the sequence of AHP steps shown in figure 1 which have also been explained in detail in the previous section.



**Figure 6.** Complete AHP hierarchical model which will be used in the study

### 3.1 Statistical Findings

Findings obtained from our study and their interpretations are presented at this section. All criteria, sub criteria and alternatives were subjected

similar result can be seen in general analysis of the model which is shown in table 6. The highest importance value of 60.1% belongs to the criteria of parts and assembly modeling.

**Table 5.** Results for the pairwise comparisons of the main criteria

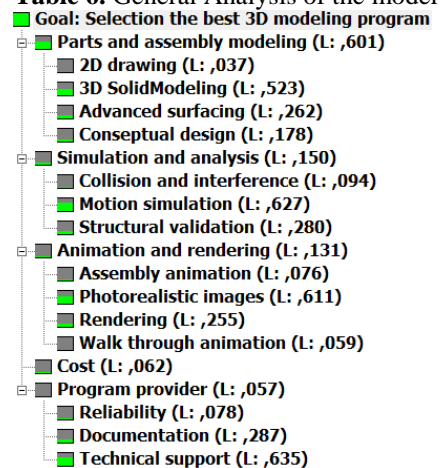
Priorities with respect to:  
Goal: Selection the best 3D modelling program



to comparisons two at a time, starting with the main criteria listed at table 5. After pairwise comparison matrices generated by the PC program are filled with data obtained from the interview, the program is executed and calculated results are summarized below

According to the findings presented in table 5, the most important criteria for the 3D modeling program is turned out to be parts and assembly modeling capability and it is followed by simulation and analysis capability, animation and rendering capability, cost and program provider's capabilities. As the inconsistency ratio is  $0.09 < 0.1$ , the performed evaluation is deemed to be successful. A

**Table 6.** General Analysis of the model



The values for the sub criteria are also seen in table 6, together with the values for criteria. When these weighted results are examined, it is seen that "3D solid modeling" (52%) which is a sub criteria of parts and assembly modeling, "motion simulation"(62.7%) which is a sub criteria of simulation and analysis, "photo realistic images"(61.1%) which is a sub criteria of animation-rendering and "technical support"(63.5%) which is a sub criteria of program provider had the highest values and are therefore found to be the most important criteria in the evaluation. The consistency ratio is below 0.1, validating these values.

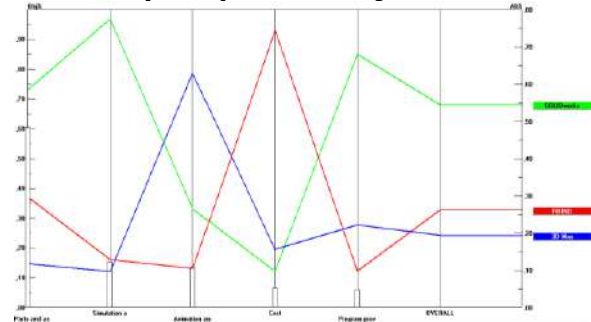
**Table 7.** Weighted results for the program package alternatives.

	Program Package Alternatives	Weighted Results
PP-1	3DS MAX	0.193
PP-2	Rhinoceros 3D	0.262
PP-3	Solidworks	0.545

Finally the resulting weighted importance values for the 3 program package alternatives are listed in table 7. When these values are examined, it is seen that 3D

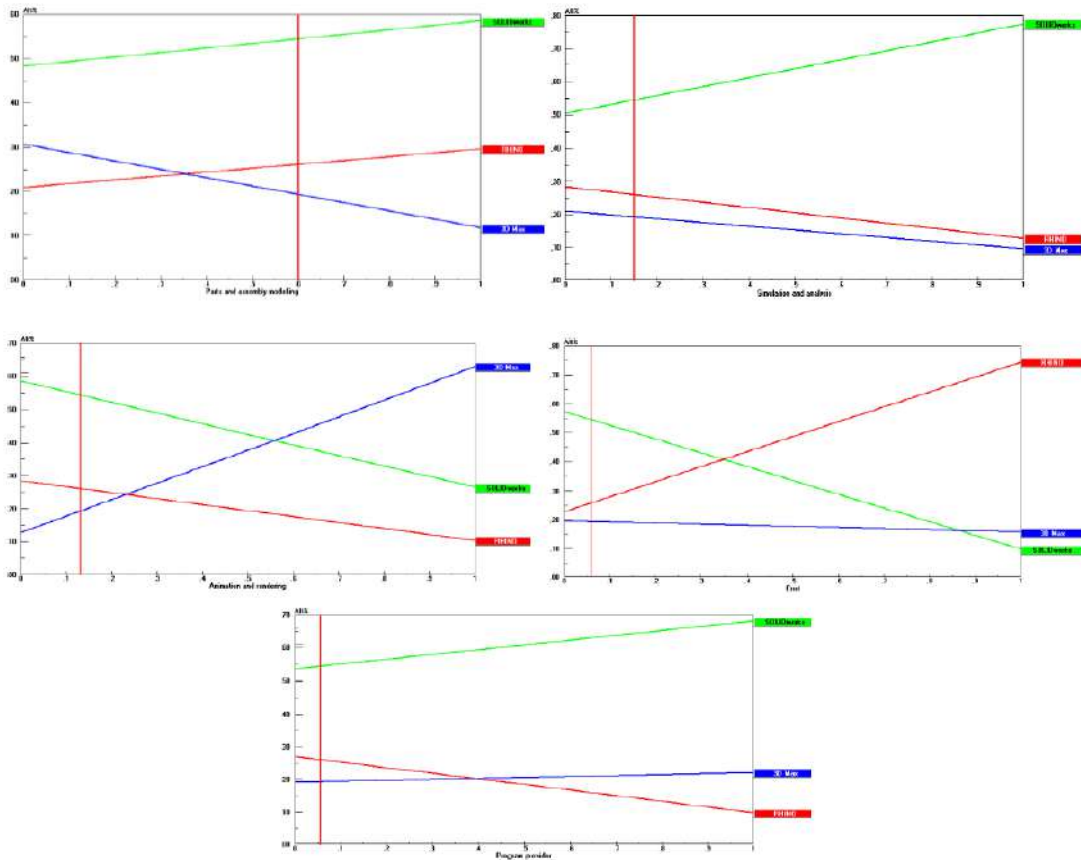
modeling program no 3 (PP-3: Solidworks) has the highest weighted importance value (54.5%)

**3.2 Sensitivity Analysis and Interpretation**



**Figure 7.** Sensitivity Percentages of Alternatives According to Criteria

According to the results presented in figure 7, the success levels for parts and assembly criteria of PP-3(Solidworks) is found to be 73% while PP-2(Rhinoceros) is 36% and PP-1(3DS) is 15% successful, for the simulation and analysis criteria, PP-1 is 15%, PP-2 is 17%, PP-3 is 97% successful, for animation and rendering criteria, PP-1 is 15%, PP-2 is 36%, PP-3 is 34% successful, for cost criteria, PP-1 is 22%, PP-2 is 36% and PP-3 is 16% successful, for program provider's capabilities criteria, PP-1 is 25%, PP-2 is 15% and PP-3 are 85% successful.



**Figure 8.** Gradient Sensitivity



Alternatives' criteria based relative relations to each other are shown in the gradient charts which are usually generated for the main criteria. The charts above (figure 8) display the changes of the weighted importance of the alternatives according to changes at the weighted importance of the performance criteria

the highest, PP-3 and the lowest, PP-1, in their responses to the changes in criteria importance. Figure 10 below shows the comparison for PP-1 and PP-2. Other alternatives can also be compared in a similar if required.

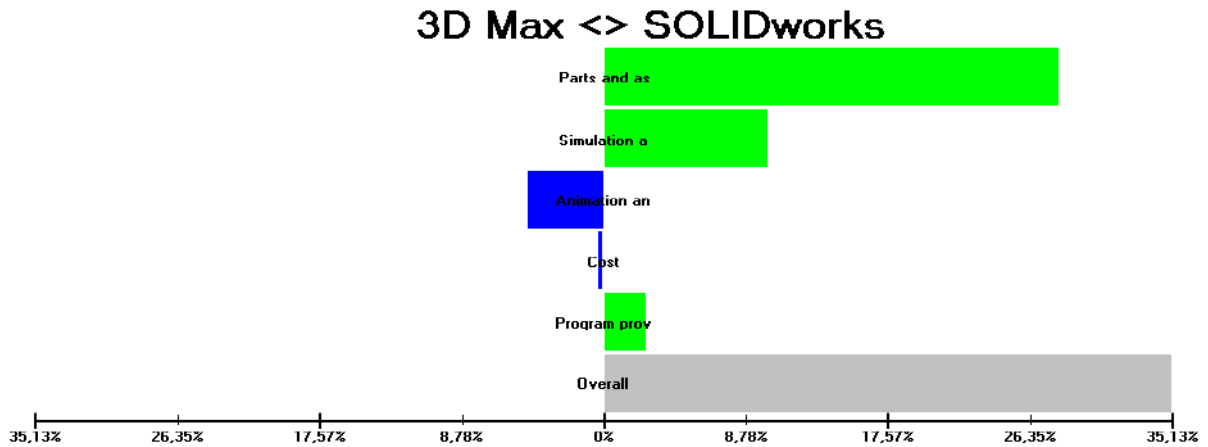


Figure 9. Head-to-Head Sensitivities for 3DS Max and Solidworks

The head-to-head sensitivity graphic in figure 9 shows the comparison of two selected alternatives,

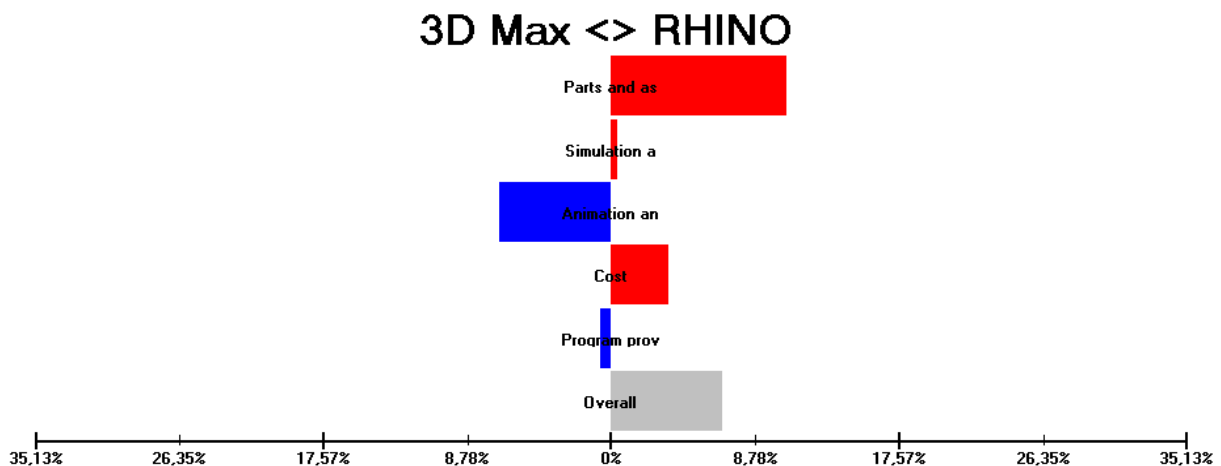


Figure 10. Head-to-Head Sensitivities for 3DS Max and Rhinoceros 3D

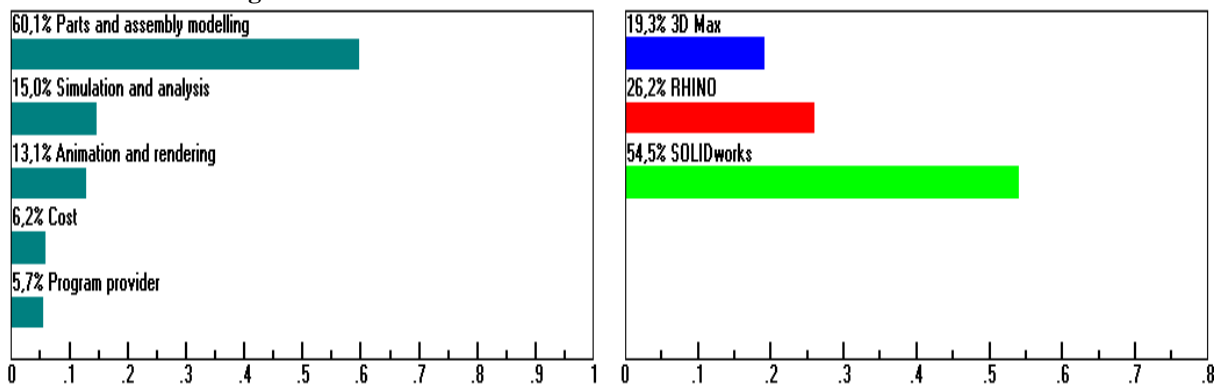


Figure 11. Dynamic Sensitivity

According to the criteria based dynamic sensitivity shown in figure 11, parts and assembly modeling is the most important(60.1%) main criteria while program provider's capabilities is found to be the least important(5.7%). For the alternatives, PP-3(Solidworks) has the highest value (54.5%) and PP-1(3DS Max) has the lowest (19.3%). Therefore after considering all criteria and sub criteria, PP-3 comes up as the best 3D modeling program for use in industrial design processes.

### 3.3 Verification of the Findings

As the last step of the research, a validation interview was conducted to evaluate the obtained results with the participation of an industrial design instructor who uses and/or gives lectures on all three program packages. General questions were prepared about the overall structure, specifications and functions of the programs to aid the validation process and were asked to the participant during the interview which was performed like an informal talk. Similar to the validation procedure performed by Harputlugil [35], the questions were ranked by using 1-10 scale (Table 8). During the interview, the questions and rankings were also assessed and argued in detail with the participant.

**Table 8.** Interview questions and obtained rankings

	Questions	Rankings
1	Please rank PP-1 in terms of interface and overall use	7
2	Please rank PP-2 in terms of interface and overall use	6
3	Please rank PP-3 in terms of interface and overall use	9
4	Please rank PP-1 for its functions' suitability to industrial design	6
5	Please rank PP-1 for its functions' suitability to industrial design	5
6	Please rank PP-1 for its functions' suitability to industrial design	9
7	Please rank the reliability of PP-1	8
8	Please rank the reliability of PP-2	5
9	Please rank the reliability of PP-3	9
8	Please rank your recommendation of PP-1 for the industrial design process	5
9	Please rank your recommendation of PP-2 for the industrial design process	4
10	Please rank your recommendation of PP-3 for the industrial design process	8

According to the validation survey results, PP-3(Solidworks) with its sophisticated interface design, feature history, parametric design, assembly creation and many other capabilities has a higher capacity to fulfill the requirements of a professional industrial designer than PP-1 (3DS) and PP-2 (Rhinoceros). It was argued in the interview that PP-3 is more capable in terms of its functions and also found to be more reliable in operation. While PP-2 received a higher rank for its low cost, PP-1 has received a slightly higher rank for being the oldest and the most mature software among the three. And while PP-1 and PP-2 with their balancing advantages and disadvantages showed similar overall performances in this validation and receiving close ranks in overall, PP-3 received a considerably higher rank for being more suitable for use in the industrial design process therefore verifying the findings obtained in the article by using the AHP method.

### 4. RESULTS

In this study, the use of AHP as a multiple criteria evaluation and decision making tool is investigated for use in general industrial design process and a model is proposed for its application. The tool and the model are demonstrated with a sample industrial design study in which several PC programs for 3d modeling are evaluated according to their suitability for industrial design and then the best one is selected according to the obtained findings.

During the process of evaluations and selections in industrial design, many criteria are required to be taken into consideration to correctly determine which of the available alternatives to be chosen. In the specific application model used in this study, a selection of five criteria and eleven sub criteria are used. The quantitative importance for each of these criteria is calculated. Then sensitivity analyses for the importance weights of main criteria are performed for investigating how much and towards which direction the results are affected by the changes in the criteria. With the solution of the model, main criteria are ordered from high to low according to weighted importance values, displaying their real world importance according to the experts participated in the study. After the alternatives are processed by the computer program according to the criteria, their weighted importance final values are obtained in a decreasing order. This sequence of values produced by the program enabled the decision makers to clearly and easily see which of the alternative pc programs has a better suitability to industrial design purposes.

The AHP model used in our study has a flexible structure which enables the user to add or change criteria, sub criteria and/or alternatives easily. This flexibility of the model and the speed of the computer program give the user the chance to see the changes in any of the output values simultaneously when any one of the inputs changes. This enables the necessary changes and/or corrections to the process to be performed quickly.

With its consistency checking features, AHP enables decisions to be made according to many qualitative and

quantitative criteria by using data which might even be to a degree unreliable and/or personal. As AHP includes the tools for working with both objective and subjective inputs along with the tools to validate the processes, it ensures that the results of the selections are as consistent and unbiased as possible. Therefore it is a very suitable methodology for use in various tasks of the industrial design process that require difficult multi-criteria decisions to be made by using data gathered from people that mostly reflect their personal thoughts. The methodic nature of AHP makes it a useful, effective and valuable tool for industrial designers by simplifying the design tasks with the use of automation, enabling more successful design projects to be completed in shorter time.

Using computer programs in the application of AHP simplifies the use of the method, ensures the process steps are executed in the right order and prevents mistakes which are likely to happen when manually entering data during interviews and doing matrix calculations in later stages. It also enables the method to be used on more complex problems which would be very hard to implement manually.

Consequently, as a method well known for its simplicity, flexibility, ease of use and ease of interpretation in the analysis of complex multi-criteria decision problems, AHP is suitable for use at the industrial design process with its capability of being applied to various tasks of the process easily. The use of AHP is expected to simplify and shorten the design process, enabling products with higher design quality to be created and presented to consumers in the future.

#### DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS

The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

#### REFERENCES

- [1] T.L. Saaty, "The Analytic Hierarchy Process", *McGraw-Hill*, New York, (1980).
- [2] Z. Ayag, "A combined fuzzy AHP-simulation approach to CAD software selection", *International Journal of General System*, 39(7): 731–756, (2010).
- [3] K.L. Narayan, K.M. Rao, M. Sarcar, "Computer Aided Design and Manufacturing", *Prentice Hall of India*, ISBN-978-81-203-3342-0, New Delhi, (2008).
- [4] M. Evans, "The Potential of Computer Aided Industrial Design to Act as a Catalyst for Greater Professional Collaboration", *ASIS Midyear Proceedings in Collaboration Across Boundaries: Theories, Strategies, and Technology*, Orlando, Florida, (1998).
- [5] J.A.W. Mulebeke, L. Zheng, "Analytical network process for software selection in product development: A case study", *Journal of Engineering and Technology Management*, 23(4): 337–352, (2006).
- [6] A.S. Jadhav, R.M. Sonar, "Evaluating and selecting software packages: A review", *Information and Software Technology*, 51(3): 555–563, (2009).
- [7] L. Xu, Z. Li, S. Li, F. Tang, "A decision support system for product design in concurrent engineering", *Decision Support Systems*, 42(4): 2029–2042, (2007).
- [8] J.H. Myers, M.I. Alpert, "Determinant buying attributes: Meaning and Measurement", *Journal of Marketing*, 32: 13–20, (1968).
- [9] O.S. Vaidya, S. Kumar, "Analytic hierarchy process: An overview of applications", *European Journal of Operational Research*, 169(1): 1–29, (2006).
- [10] S.C. Cheng, T.C. Chou, C.L. Yang, H.Y. Chang, "A semantic learning for content-based image retrieval using analytical hierarchy process", *Expert Systems with Applications*, 28(3): 495–505, (2005).
- [11] V.S. Lai, R.P. Trueblood, B.K. Wong, "Software selection: A case study of the application of the analytical hierarchical process to the selection of a multimedia authoring system", *Information & Management*, 36(4): 221–232, (1999).
- [12] H. Min, "Location analysis of international consolidation terminals using the analytic hierarchy process", *Journal of Business Logistics*, 15(2): 25, (1994).
- [13] H.Ü. Özden, "Analitik Hiyerarşi Yönetimi İle İlkokul Seçimi", *Marmara Üniversitesi İktisadi ve İdari Birimler Dergisi*, 24(1): 299–320, (2008).
- [14] A. Koçak, "Yazılım Seçiminde Analitik Hiyerarşi Yöntemi Yaklaşımı ve Bir Uygulama", *Ege Academic Review*, 3(1): 67–77, (2003).
- [15] T.L. Saaty, "Decision making with the analytic hierarchy process", *International Journal of Services Sciences*, 1(1): 83, (2008).
- [16] S.C. Cheng, M.Y. Chen, H.Y. Chang, T.C. Chou, "Semantic-based facial expression recognition using analytical hierarchy process", *Expert Systems with Applications*, 33(1): 86–95, (2007).
- [17] F. Zahedi, "The Analytic Hierarchy Process: A Survey of the Method and Its Applications", *Interfaces*, 16(4): 96–108, (1986).
- [18] T.L. Saaty, "The analytic hierarchy process: what it is and how it is used", *Mathematical Modeling*, 9(3): 161–176, (1987).
- [19] A. Kuruüzüm, N. Atsan, "Analitik Hiyerarşi Yönteminin İşletmecilik Alanındaki Uygulamaları", *Akdeniz İ.İ.B.F Dergisi*, (1): 83–105, (2001).
- [20] A. Oğuzlar, "Analitik Hiyerarşi Süreci ile Müşteri Şikayetlerinin Analizi", *Akdeniz İ.İ.B.F Dergisi*, (14): 122–134, (2007).
- [21] E. Forman, S. Gass, "The Analytic Hierarchy Process – An Exposition", *Operations Research*, 49(4): 469–486, (2001).
- [22] S. Felek, Y. Yuluğkural, Z. Aladağ, "Comparing

- AHP and ANP Results to Estimate Market Share in Mobile Communication Sector", *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 18(1): 6–22, (2007).
- [23] A. Hambali, S.M. Sapuan, I. Napsiah, Y. Nukman, "Use of analytical hierarchy process (AHP) for selecting the best design concept", *Jurnal Teknologi*, 49(A): 1–18, (2008).
- [24] S. Hsiao, "Concurrent design method for developing a new product", *International Journal of Industrial Ergonomics*, 29(1): 41–55, (2002) .
- [25] F. Dweiri, F.M. Al-Oqla, "Material selection using analytical hierarchy process", *International Journal of Computer Applications in Technology*, 26(4): 182–189, (2006).
- [26] R.D. Henderson, S.P. Dutta, "Use of the analytic hierarchy process in ergonomic analysis", *International Journal of Industrial Ergonomics*, 9(4): 275–282, (1992).
- [27] M.C.Y. Tam, V.M.R. Tummala, "An application of the AHP in vendor selection of a telecommunications system", *The International Journal of Management Science*, 29(2003): 171–182, (2001).
- [28] S. Dönmez, "Computer Aided Industrial Design Software Selection in Industrial Product Design Education at Turkey Using Expert Choice Program", *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 106: 682–689, (2013).
- [29] Z. Ayağ, "Cad software evaluation for product design to exchange data in a supply chain network", *International Journal of Supply Chain Management*, 4(1): 30–38, (2015).
- [30] Z. Ayag, "An analytic-hierarchy-process based simulation model for implementation and analysis of computer-aided systems", *International Journal of Production Research*, 40:(13): 3053–3073, (2002).
- [31] T. Tomiyama, Y. Umeda, H. Yoshikawa, "A CAD for Functional Design", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 42 (1): 143–146, (1993).
- [32] J. Karlsson, C. Wohlin, B. Regnell, "An evaluation of methods for prioritizing software requirements", *Information and Software Technology*, 39(14–15): 939–947, (1998).
- [33] D.R. Jeske, X. Zhang, "Some successful approaches to software reliability modeling in industry", *Journal of Systems and Software*, 74(1 SPEC. ISS.): 85–99, (2005).
- [34] S. Ereeş, E. Kuruoğlu, N. Moralı, "An Application of Analytical Hierarchy Process for Simulation Software Selection in Education Area", *Frontiers in Science*, 3(2): 66–70, (2013).
- [35] T. Harputlugil, A.T. Gültekin, M. Prins, Y.I. Topçu, "Architectural design quality assessment based on analytic hierarchy process: A case study", *Metu Journal of the Faculty of Architecture*, 31(2): 139–161, (2014)



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



## Şişecam enerji yönetim sisteminde endüstri 4.0 ve nesnelerin interneti uygulaması

### *Industry 4.0 and internet of things implementation at Sisecam energy management system*

Yazar(lar) (Author(s)): Levent KILIÇ

ORCID: 0000-0002-9329-7418

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Kılıç L., “Şişecam enerji yönetim sisteminde endüstri 4.0 ve nesnelerin interneti uygulaması”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1167-1175, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.538279



# Şişecam Enerji Yönetim Sisteminde Endüstri 4.0 ve Nesnelerin İnterneti Uygulaması

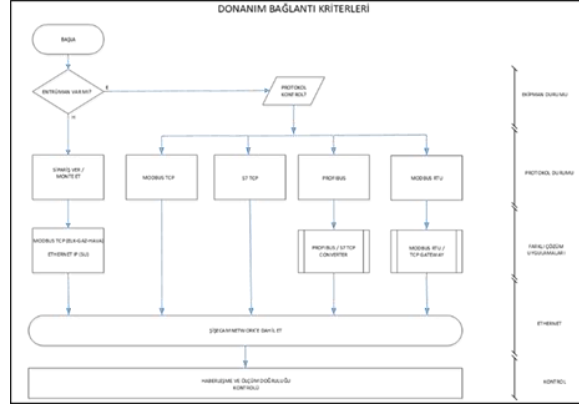
## Industry 4.0 and Internet of Things Implementation at Sisecam Energy Management System

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Enerji Yönetimi / Energy Management
- ❖ Endüstri 4.0 / Industry 4.0
- ❖ Nesnelerin İnterneti / Internet of Things
- ❖ Endüstriyel Tesis / Industrial Plant

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada, Şişecam'da 17 fabrikada kurulmuş olan ve genişlemeye açık olarak modellenmiş "Enerji Yönetim Sistemi –EnYS" projesinde, saha koşulları ve BT entegrasyon uygulaması anlatılmaktadır. / In this study, field conditions and IT integration application are explained in the "Energy Management System" project, which was established in 17 factories in Şişecam and is open to expansion.



Şekil A. Mevcut ve yeni donanımların uygun yazılım /Figure A. Existing and new software standartization

### Amaç (Aim)

Endüstriyel nesnelerin gerçek zamanlı izlenerek, veri tabanlı analizlerinin için standart yapı kurmak ve işletmektir. / To build a structure for monitoring, analysing and operating of energy consuming equipment by realtime data.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Saha mevcut yapısının ve teknik kısıtlarının belirlenmesi, nesnelerin Ethernet/ip tabanlı dönüştürülmesi şeklinde olmuştur. / Determining technical constraints of the field and conversion to Ethernet / ip.

### Özgünlük (Originality)

Çok sayıda gerçek endüstriyel tesisin ve ekipmanın eşzamanlı ve standartize edilmiş yapıda gerçek zamanlı donanımı ve yazılımı geliştirilmiş, dönüştürülmüş ve uygulanmıştır. / Realtime hardware and software of many real industrial plants and equipments in a synchronized and standardized structure have been developed, transformed and implemented.

### Bulgular (Findings)

Endüstriyel tesislerdeki ekipmanların gerçek zamanlı verimlilik göstergeleri belirlenmiştir. / Realtime efficiency indicators of equipment in industrial facilities have been determined.

### Sonuç (Conclusion)

Saha ekipmanlarından iş analitiklerine verisel tabanlı geçiş sağlanmaktadır. / From field equipment to realtime business analytics was activated.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Şişecam Enerji Yönetim Sisteminde Endüstri 4.0 ve Nesnelerin İnterneti Uygulaması

Araştırma Makalesi / Research Article

Levent KILIÇ\*

Şişecam Bilim, Teknoloji ve Tasarım Merkezi, Gebze - Kocaeli, Türkiye

(Geliş/Received : 11.03.2019 ; Kabul/Accepted : 13.11.2019)

## ÖZ

Şişecam, ülkemiz enerji tüketiminin, doğalgazda %4, elektrikte ise %1'e yaklaşan toplam tüketim oranları olan enerji yoğun fabrikalara sahiptir. Bu enerjisinin bir kısmını kendi kombine çevrim, kojenerasyon, atık ısı, buhar ve güneş santralleri ile karşılamakla birlikte, şebekeden de, toplamda, 145 MW'a yakın sürekli güçte elektrik enerjisi çekmektedir. Enerji yönetimi, enerji kaynaklarının ve enerjinin verimli kullanılmasını sağlamak amacıyla yürütülen inceleme, ölçme, izleme, planlama, uygulama ve eğitim çalışmalarının bütünüdür. Bu büyüklükte enerji tüketimi, fırınlar gibi proses, kompresör, pompa, ısıtma, soğutma, iklimlendirme, motor, sürücü, aydınlatma, atıkların kontrolü, vb. gibi statik ve dinamik ekipmanın işletilmesiyle oluşmaktadır. Ekipmanı yönetebilmek, ancak kendileri hakkında veri elde edebilmek ve bunu yorumlayacak bilgi sahibi olmakla mümkün olacaktır. Fabrika geneli düşünüldüğünde, dağıtılmış olarak tesis edilmiş sayıca çok fazla olan bu ekipmanın standart olarak izlenebilmesi için belli kurallar ve kabuller mevcuttur. Bunlar, ekipmanın seçiminden, bilgisayar ekranında görüntülenebilmesine kadar bir dizi zorlu işlemi gerektirmektedir. Endüstriyel otomasyon ve bilgi teknolojileri, günümüze kadar ayrı ayrı yürütülen işlemler olarak öne çıkmıştır. Ancak, Endüstri 3.0'dan itibaren küçük de olsa entegrasyon başlamış, günümüz Endüstri 4.0, nesnelerin interneti, büyük veri, veri analizi ve dijitalleşme trendleri ile ise entegrasyon kaçınılmaz duruma gelmiştir. Kavramsal olarak bahsedilen bu trendlerin, enerji yönetimine yönelik fiziki kurulumundan değerlendirme aşamasına kadar getirilmesi önem taşımaktadır. Bu çalışmada, Şişecam'da 17 fabrikada kurulmuş olan ve genişlemeye açık olarak modellenmiş "Enerji Yönetim Sistemi –EnYS" projesinde, saha koşulları ve BT entegrasyon uygulaması anlatılmaktadır. Sıradaki aşama, verilerin teknik ve yönetsel analiz ve değerlendirilmesi olacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Enerji yönetimi, endüstri 4.0, nesnelerin interneti.

## Industry 4.0 and Internet of Things Implementation at Sisecam Energy Management System

### ABSTRACT

Şişecam has energy intensive factories with total consumption rates of 4% in natural gas and 1% in electricity of Turkey. Although it meets some of its energy with its own combined cycle, cogeneration, waste heat, steam and solar power plants, it also draws electricity from the grid to a total of 145 MW. Energy management is the whole of the survey, measurement, monitoring, planning, implementation and training activities carried out to ensure the efficient use of energy resources and energy. Energy consumption of this size is coming from, such as furnaces, compressors, pumps, heating, cooling, air conditioning, motor, drive, lighting, waste control, etc. static and dynamic equipment. To manage many kind of these equipment will be able to obtain data about themselves and to have information to interpret it. Considering the plant-side, there are certain rules and acceptances to monitor this equipment, which is too many in number and distributed as standard. These require a range of demanding operations, from the choice of equipment to the display on the computer screen. Industrial automation and information technologies have come to the fore as processes carried out separately. However, the integration has started since the end of Industry 3.0, and integration is inevitable with Industry 4.0, internet of objects, big data, data analysis and digitization trends. It is important that these trends, which are mentioned conceptually, be brought from the physical installation for energy management to the evaluation stage. In this study, field conditions and IT integration application are explained in the "Energy Management System" project, which was established in 17 factories in Şişecam and is open to expansion. The next stage will be the technical and managerial analysis and evaluation of the data.

**Keywords:** Energy management, industry 4.0, internet of things.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

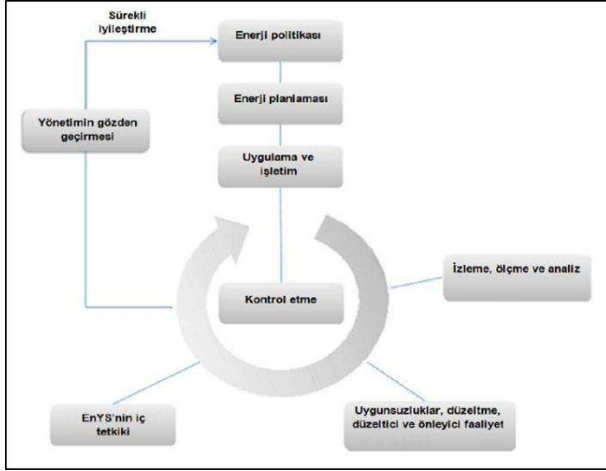
Enerji Yönetim Sistemi (EnMS), ülkemizde Şekil 1'deki şekilde modellenmektedir [1]. Aynı modelin uluslararası standartlarda da benzer şekilde tanımlandığı görülmektedir [2 – 6]. Döngüsel diyagramda başlangıç

noktasının izleme, ölçme ve analiz olduğu kabul edilebilir.

Ölçme, ölçüm ekipmanı ile tek seferlik ya da sürekli (online) yapılabilmektedir. İzleme, tüm sahadaki ekipmanları tek tek dolaşıp adam ve zaman gecikmeli kontrolü ile yapılabileceği gibi, ilgili haberleşmenin sağlanması ile tümünün aynı anda ve tek noktadan takibi (SCADA) ile daha etkin yapılabilir. Analiz, verilere, doğru soruyu soran ve cevabını tecrübesiyle birleştirerek

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : lkilic@sisecam.com

bulan çalışan ile sağlanır. Analizin etkinliği, verinin kaynaktan son noktaya kadar aynı standartta sağlanması ile güçlenir.



Şekil 1. TS EN ISO 50001: Enerji yönetim sistemi modeli (TS EN ISO 50001: Energy management system model)

Şişecam Enerji Yönetim Sistemi, tüm kısıtlarına rağmen 17 fabrikamızda, 100'e yakın teknik çalışan ve dış kaynakların etkin kullanımı ile Endüstri 4.0 kapsamına uygun, nesnelerin haberleşmesini sağlayarak, teknik ekibe analiz, satın almaya verimli ekipman, karar vericilere de geçmişe dönük değerlendirme ve strateji/politika oluşturmaya dönük bir araç olmaktadır.

## 2. ŞİŞECAM TEKNİK KISITLARI (SISECAM TECHNICAL CONSTRAINTS)

Bazı kavramların terminolojik açıklaması ileriki açıklamaların anlaşılmasında fayda sağlayacaktır [7]:

Data Haberleşmesi; SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), OPC (OLE – Object (Linking And Embedding For) Process Control, OPC UA (Open Platform Communication Unified Architecture)

Data Transfer Hızları (kbps); 9600, 19200, 38400, ... , 115200.

Endüstriyel Data Haberleşme Protokolleri; Modbus RTU, Modbus Gateway, Modbus DP/VO, Modbus TCP/IP, Modbus RTU Over Ethernet, SNMP, BACnet, Ethernet IP, S7-TCP, http, FTP (File Transfer), SMTP (Email Function), NTP (Time Synchronisation), TFTP

Arayüzler (Interfaces); RS232, RS485, USB, Profibus DP, M-Bus, Ethernet, Webserver/Email, OPC.

Endüstri 4.0, insan ve nesne arasındaki etkileşimin en üst düzeyde sağlandığı, olabilecek en üst düzeyde katma değer yaratabilmek için veri akışının eş zamanlı, organize ve sistemli bir biçimde sağlanabildiği, makine ve ekipmanların otonom olarak faaliyet gösterebildiği bir süreçtir. Bu perspektifte sistem kendisini en iyi koşullar çerçevesinde sürekli olarak optimize edebilmekte, bu yönüyle elde edilecek katma değeri olabildiğince arttırabilmektedir.

Endüstri 4.0 bileşenleri;

- Sistemler arası entegrasyon; insanlarla insanlar, insanlarla makineler arasındaki uyumun sağlanmasıdır.
- Sanallaştırma; operasyonların mükemmelleştirilebilmesi için kurulum öncesi simülasyon modellerin oluşturulabilmesidir.
- Veri toplama ve veri analizi; verilerin eşzamanlı olarak toplanması ve hızlı bir biçimde işlenerek anlamlı bilgiler haline dönüştürülmesidir. Tepkilerin hızlı biçimde verilebilmesidir.
- Modülerlik; bütün faaliyet ve fonksiyonların olabilecek en mikro düzeyde parçalara ayrılması ve bu anlamda tanımlanmasıdır.

Nesnelerin İnterneti (Internet of Things), benzersiz bir şekilde adreslenebilir nesnelerin kendi aralarında oluşturduğu, dünya çapında yaygın bir ağ ve bu ağdaki nesnelerin belirli bir protokol ile birbirleriyle iletişim içinde olmaları olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca bu kavram, kabaca, çeşitli haberleşme protokolleri sayesinde birbirleri ile haberleşen ve birbirine bağlanarak, bilgi paylaşarak akıllı bir ağ oluşturmuş ekipmanlar sistemi olarak da tanımlanmaktadır.

Nesnelerin interneti sisteminin bileşenleri;

- Tanımlanmış hareket ve durumlar dizisidir. Sistemi harekete geçirecek davranış, hareket ve eylemlerin farklı algoritmalar çerçevesinde tanımlanmış olması gerekmektedir.
- Bu hareket ve durumların tespit edilmesi için kullanılan ekipman ve unsurlardır. Bunlar çoğunlukla sensörler, radyo frekansı ile tanımlanmış sistemler ve elektronik enstrümanlardır. Bunlar, değişimleri tespit ederek, buna ilişkin verileri sisteme göndermektedirler.
- Üçüncü unsur, bu verilerin taşındığı internet şebekeleridir.
- Bir diğer faktör, bu verilerin işlemselleştirildiği ve komutlar haline getirildiği bilgi işlem sistemleri ve yazılımlardır. Bu sistemler, çeşitli vasıtalarla kendilerine taşınan verileri tanımlanmış algoritmalarla karşılaştırarak, mevcut duruma uygun optimal bir çözümü üretmesi ve bunu komutlar haline getirerek, diğer unsurlara bu komutların gönderilmesi gibi işlevler üstlenmektedir.
- Son olarak, nesnelerin interneti çerçevesinde bir diğer bileşen akıllı cihazlardır. Cep telefonları, bilgisayarlar, tabletler, vb. elektronik aygıtlar veri alma ve gönderme konusunda işlevler üstlenen makinelerdir.

Büyük Veri "Big Data", zamanla elde edilen, yapılandırılmış ya da yapılandırılmamış, yani henüz geleneksel yöntem veya araçlarla işlenerek kullanımına uygun hale getirilmemiş verilerdir. Big Data (Büyük Veri) nin oluşumunda 5 bileşen vardır. Bu bileşenler

sırasıyla; variety (çeşitlilik), velocity (hız), volume (büyüklük), verification (doğrulama) ve value (değer) 'dir. Genel olarak 5V şeklinde adlandırılmaktadır.

İşletmeler ve endüstrilerde karar alma süreçlerinde yer alan yönetici ve operatörler, çoğunlukla karar almalarında

Fabrikaların proses farklılıkları, yaşları, teknolojileri, ölçme sistemleri, projenin gerekliliğine inanmaları çeşitlilik göstermektedir. Proje başlangıcındaki mevcut durum Şekil 2'de görülmektedir. 2 yıllık kurulum süresinde, fabrika, sistem, vb. gibi önemli değişiklikleri de devam etmiştir.

	Elektrik (Analizör, Haberleşme, Scada)	Doğalgaz (Analizör, Haberleşme, Scada)	Basınçlı Hava (Analizör, Haberleşme, Scada)	Su
Paşabahçe_Trakya	Mevcut yapı ethernet tabanlı geliştirilmeli.	Mekanik ölçüm sistemi ethernet tabanlı geliştirilmeli.	Mevcut bir yapı yok. Ethernet tabanlı yapı kurulmalı	Mekanik ölçüm sistemi ethernet tabanlı geliştirilmeli.
Paşabahçe_Eskişehir	Mevcut yapı ethernet tabanlı geliştirilmeli.	Mekanik ölçüm sistemi ethernet tabanlı geliştirilmeli.	Mevcut bir yapı yok. Ethernet tabanlı yapı kurulmalı	Mekanik ölçüm sistemi ethernet tabanlı geliştirilmeli.
Paşabahçe_Mersin	Mevcut yapı ethernet tabanlı geliştirilmeli.	Mekanik ölçüm sistemi ethernet tabanlı geliştirilmeli.	Mevcut bir yapı yok. Ethernet tabanlı yapı kurulmalı	Mekanik ölçüm sistemi ethernet tabanlı geliştirilmeli.
Paşabahçe_Bulgaristan	Mevcut yapı ethernet tabanlı geliştirilmeli.	Mekanik ölçüm sistemi ethernet tabanlı geliştirilmeli.	Mevcut bir yapı yok. Ethernet tabanlı yapı kurulmalı	Mekanik ölçüm sistemi ethernet tabanlı geliştirilmeli.
Denizli Cam	Mevcut yapı ethernet tabanlı geliştirilmeli.	Mekanik ölçüm sistemi ethernet tabanlı geliştirilmeli.	Mevcut bir yapı yok. Ethernet tabanlı yapı kurulmalı	Mekanik ölçüm sistemi ethernet tabanlı geliştirilmeli.
ACS_Yenişehir	Mevcut yapı ethernet tabanlı geliştirilmeli.	Mekanik ölçüm sistemi ethernet tabanlı geliştirilmeli.	Mevcut bir yapı yok. Ethernet tabanlı yapı kurulmalı	Mekanik ölçüm sistemi ethernet tabanlı geliştirilmeli.
ACS_Eskişehir	Mevcut yapı ethernet tabanlı geliştirilmeli.	Mekanik ölçüm sistemi ethernet tabanlı geliştirilmeli.	Mevcut bir yapı yok. Ethernet tabanlı yapı kurulmalı	Mekanik ölçüm sistemi ethernet tabanlı geliştirilmeli.
ACS_Mersin	Altyapı hazır.	Mekanik ölçüm sistemi ethernet tabanlı geliştirilmeli.	Mevcut bir yapı yok. Ethernet tabanlı yapı kurulmalı	Mekanik ölçüm sistemi ethernet tabanlı geliştirilmeli.
Düzcüm_Yenişehir	Altyapı hazır.	Altyapı hazır.	Mevcut bir yapı yok. Ethernet tabanlı yapı kurulmalı	Mekanik ölçüm sistemi ethernet tabanlı geliştirilmeli.
Düzcüm_Mersin	Altyapı hazır.	Altyapı hazır.	Mevcut yapı ethernet tabanlı geliştirilmeli.	Mekanik ölçüm sistemi ethernet tabanlı geliştirilmeli.
Düzcüm_Trakya	Mevcut yapı ethernet tabanlı geliştirilmeli.	Altyapı hazır.	Mevcut yapı ethernet tabanlı geliştirilmeli.	Mekanik ölçüm sistemi ethernet tabanlı geliştirilmeli.
Düzcüm_Polatlı	Altyapı hazır.	Mekanik ölçüm sistemi ethernet tabanlı geliştirilmeli.	Mevcut bir yapı yok. Ethernet tabanlı yapı kurulmalı	Mekanik ölçüm sistemi ethernet tabanlı geliştirilmeli.
Düzcüm_Bulgaristan	Altyapı hazır.	Mekanik ölçüm sistemi ethernet tabanlı geliştirilmeli.	Mevcut bir yapı yok. Ethernet tabanlı yapı kurulmalı	Mekanik ölçüm sistemi ethernet tabanlı geliştirilmeli.
Otocam	Mevcut yapı ethernet tabanlı geliştirilmeli.	Mekanik ölçüm sistemi ethernet tabanlı geliştirilmeli.	Mevcut bir yapı yok. Ethernet tabanlı yapı kurulmalı	Mekanik ölçüm sistemi ethernet tabanlı geliştirilmeli.
Soda&Kromsan	Altyapı hazır.	Altyapı hazır.	Mevcut bir yapı yok. Ethernet tabanlı yapı kurulmalı	Mekanik ölçüm sistemi ethernet tabanlı geliştirilmeli.
Cam Elyaf	Altyapı hazır.	Altyapı hazır.	Mevcut bir yapı yok. Ethernet tabanlı yapı kurulmalı	Mekanik ölçüm sistemi ethernet tabanlı geliştirilmeli.
Holding Merkezi	Mevcut yapı ethernet tabanlı geliştirilmeli.	Altyapı hazır.	Mevcut bir yapı yok. Ethernet tabanlı yapı kurulmalı	Mekanik ölçüm sistemi ethernet tabanlı geliştirilmeli.

Şekil 2. Proje başlangıcındaki fabrikalar ve hazırlık durumları (Available plants and existing status before project start)

imkan sağlayabilecek düzeyde yeterli bilgiye sahip olmadıklarından ya da elde ettiklerinde bu bilgilerin güncelliklerini yitirmiş olduğundan şikayet etmektedirler.

İçerisinde bulunduğumuz süreçte endüstriler ve işletmeler kendi başlarına veri tabanı oluşturacak ve bunları yönetebilecek düzeyde değildir. Bunun iki önemli nedeni vardır. Birincisi, endüstriyel süreçlere etki eden bilgi ve veriler işletmelerin kapsamını çoktan aşmış, mevcut potansiyelle yönetilemez hale gelmiştir. İkinci olarak ise, endüstriler ve işletmeler küresel gelişmelerden ve sistemden bağımsız yapılar değildirler. Bu yönüyle, dışsal faktörlerden kaynaklanan etkileri yönetebilme olanağına da sahip olmaları günümüz şartlarında olanaklı görünmemektedir.

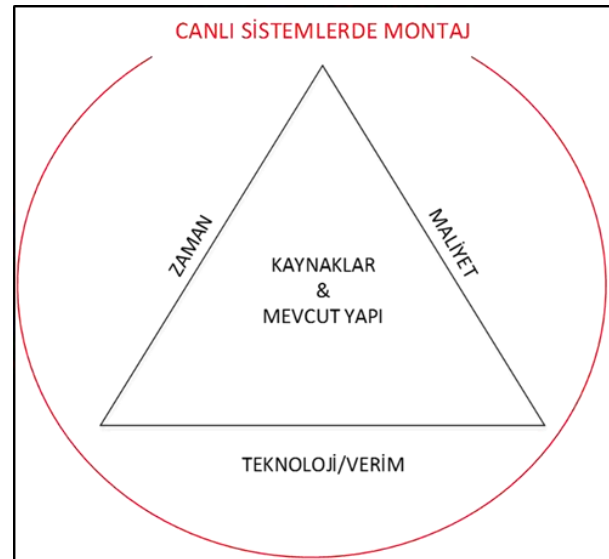
Büyük Veri bileşenleri;

- Esnek operasyonel yapı,
- Anlık optimizasyonu,
- Doğru ve eksiksiz veri
- Gerçek zamanlı veri,
- Verinin kullanılabilir veriye dönüştürülmesi,
- Süreçleri bilen, değerlendirebilir insan kaynağı,
- Standart algoritma işlevselliğinin sağlanmasıdır.

Proje Öncesi Mevcut Durum (Existing Status Before Project)

Saha Teknik Kısıtları (Plant Technical Constraints)

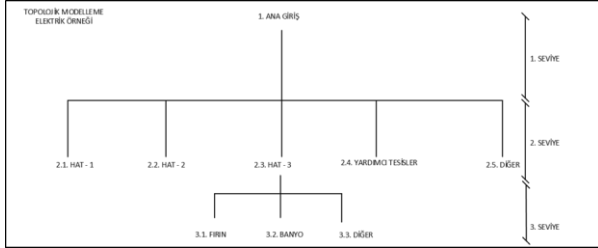
Fabrikalar, her an, yüksek gerilim, yüksek basınç, sürekli akış, yüksek sıcaklık altında çalışan canlı sistemlerdir. Özellikle cam fırınlarında, akışı keserek çalışmak mümkün olmamaktadır. Her noktada bypass (yedek) hatların olmadığı görülmektedir. Bu başlangıçta, ilk yatırımları düşürse de, sonrasındaki işlerin istenen nitelikte yapılabilmesinde zorluk oluşturmaktadır.



Şekil 3. Fabrika canlı sistemi (plant live system)

Ekipman montajı zorluğu ile birlikte diğer bir kısıt da zamandır. Belirlenen sürede, belirlenecek noktalara ve uygun nitelikleri haiz ekipmanlarla donatmak ve en optimal veriyi sağlamak projenin etkinliğini belirlemektedir, Şekil 3.

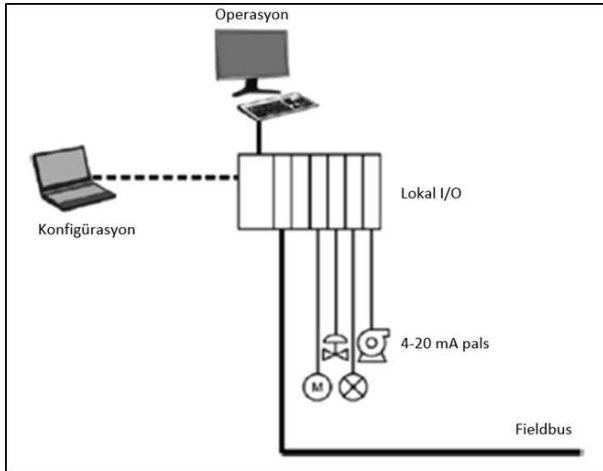
Fabrika girişinden uç noktalara kadar yüzlerce ölçme ekipmanı bulunmakla birlikte, EnMS için anlamlı topoloji oluşturmak önem taşımaktadır. Elektrik örneği için oluşturulan örnek topoloji Şekil 4’te verilmektedir. Bunun, değişik basınçlardaki basınçlı hava, doğalgaz, su, vd. akışlar için de oluşturulması zorunludur.



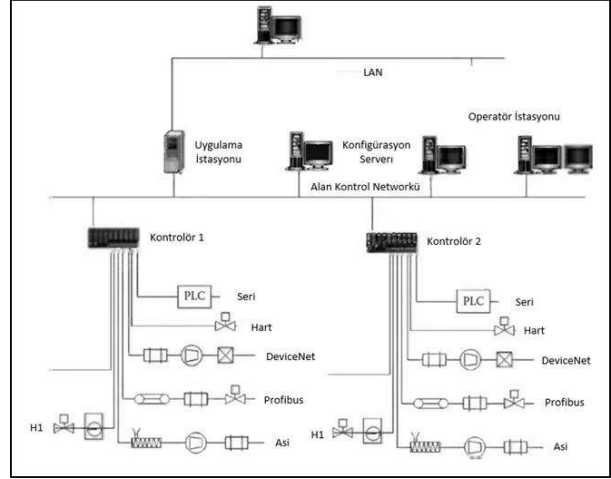
Şekil 4. Enerji akışkanları için örnek topoloji (energy flow topology as sample)

Endüstriyel Otomasyon Kısıtları (Industrial Automation Constraints)

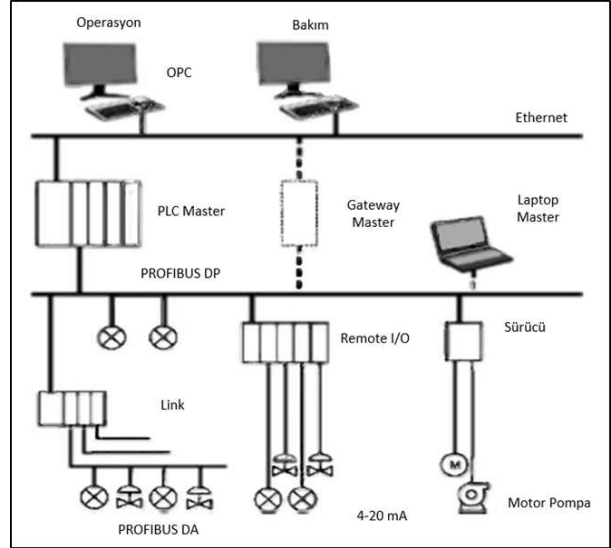
Fabrikalarımızda en yaygın görülmekte olan endüstriyel otomasyon sistemleri lokal kontrole sahip, ekipmanların ölçüm ve kontrolünün sağlandığı PLC’lerdir, Şekil 5.



Şekil 5. Tipik bir PLC (Programmable Logical Controller) mimarisi (a typical PLC architecture)

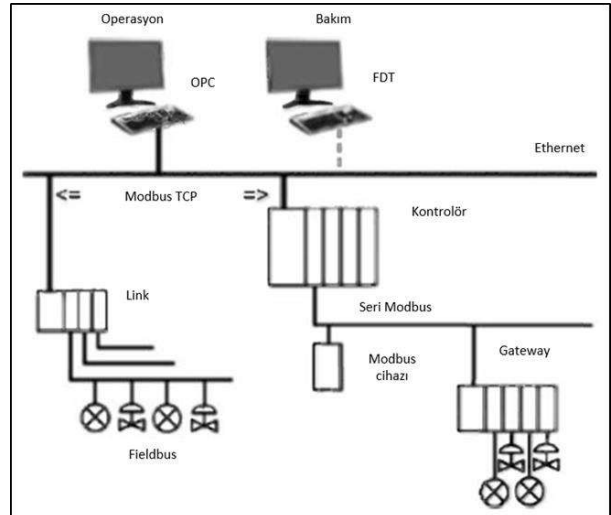


Şekil 6. Tipik bir DCS (Distributed Control System) mimarisi (a typical DCS architecture)



Şekil 7. Tipik bir PROFIBUS mimarisi (a typical PROFIBUS architecture)

Şekil 6 7 ve 8 fabrikalarımızdaki en yaygın ethernet bazlı olmayan lokal otomasyon ve haberleşme mimarilerini göstermektedir.

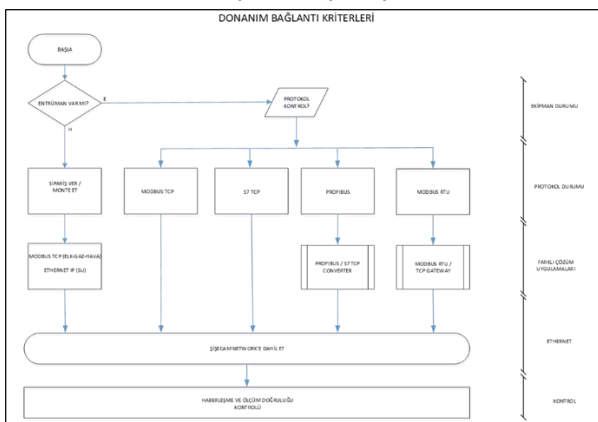


**Şekil 8.** Tipik bir MODBUS mimarisi (a typical MODBUS architecture)

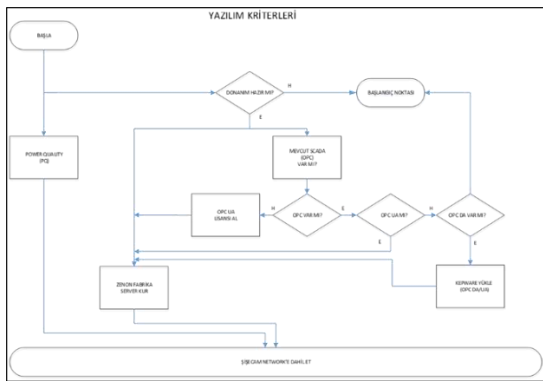
**Ethernet Bazlı Fieldbus (Ethernet Based Fieldbus)**

Fabrikaların mevcut ölçüm ekipmaları ve otomasyon yapılarını aynı forma getirmek için günümüzün ethernet bazlı bus yapısı baz alınmış, Şekil 9 ve Şekil 10’ daki modelleme gerçekleştirilmiştir. Mevcut ölçüm ekipmanlarının ve otomasyon seri haberleşmeye ve lokal erişime imkan sağlamaktadır. Bu durumda, ekipmana lokal erişim dışında erişim ve değerlendirme mümkün olamayacaktır.

EnMS sisteminde uygulanan sistem ethernet bazlı sistemdir. Böylelikle hem yeni ekipmanlar buna uygun seçilmiş ve hem de sahadaki ekipman ve kontrol sistemleri ethernet erişimine açılmıştır.



**Şekil 9.** Mevcut ve yeni donanımların aynı platforma getirilmesi (existing and new hardware standartization)

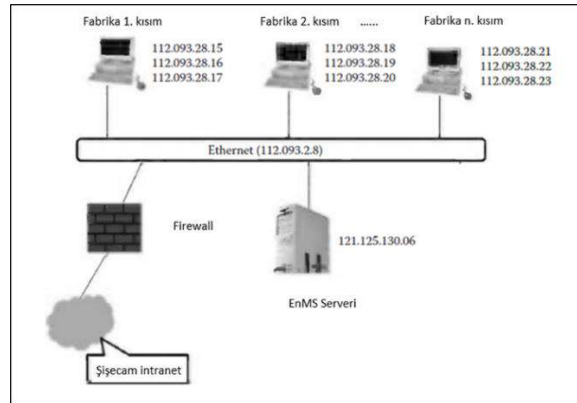


**Şekil 10.** Mevcut ve yeni donanımların uygun yazılım (existing and new software standartization)

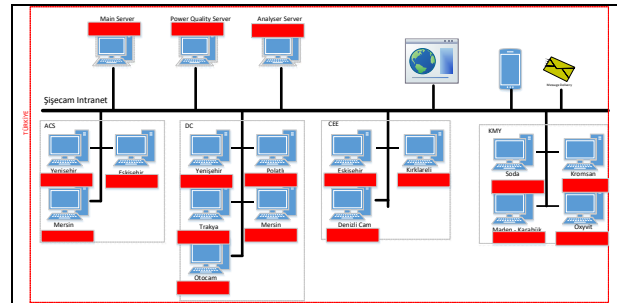
EnMS için, mevcut ve yeni yapılar, Modbus TCP/IP, Ethernet IP ve Profinet yapıya kavuşturulmuştur. Gelecek haberleşme yapısında, yönetim sistemleri için, IP tabanlı model zorunluluk haline gelmektedir.

Endüstriyel otomasyon sistemleri için şimdiye kadar belirtilen sistemlerden çıkış Şişecam intranetine olmaktadır. Bu gerek güvenlik kontrolü, gerek mevcut bilgi ve yeteneklerin kullanılması ve gerekse de önemli ilk yatırım avantajı bakımından etkili olmuştur. Şişecam intranet yapısına dahil Şekil 9 ve 10’daki intranet

kısımındaki kutucuğun Şekil 11a ve b’ye detaylandırılmasıdır.



**Şekil 11-a.** Fabrika endüstriyel haberleşme sistemlerinin intranete çıkışı (intranet connection of plant to corporate intranet)



**Şekil 11-b.** Şişecam network ve enerji yönetim sistemi (Şişecam network and energy management system)

**Ekipman Bazlı Değerlendirmeler ve Ayrıntılı Maliyet (Equipment Based Assessment and Detailed Cost)**

2015 yılının ikinci yarısında başlanılan projede, Şişecam bilgi teknolojileri (intranet, 15 saha ve 3 merkezi server) altyapısı kullanılarak, değerlendirmeye baz teşkil edecek (yaklaşık 2,000 ‘i yeni kurulum olmak üzere, farklı protokollerdeki yaklaşık 15,000 ekipmana ait) 30,000+ enerji datası akışı online başlamış, ekipman web arayüzleri ile ise teknik ve yöneticilere 410,000+ veriye online erişim imkanı oluşturmuştur.

Yeni takılan ekipmanlara web arayüzü ile doğrudan da ulaşılması mümkün olmakla beraber (doğrudan ulaşılması durumunda ekipmanın tüm verilerini görebilmek mümkündür), SEÖİS enerji izleme scadasına yalnızca anlık ve birikimli data aktarılmaktadır.

- Elektrik anlık güç ve birikimli enerji datasını sağlayan 1476 yeni elektrik analizörü
- Doğalgaz datasını sağlayacak 31 mekanik gaz sayacı
- Doğalgaz datasının sıcaklık ve basınç düzeltmesini sağlayan 126 gaz korrektörü
- Özellikle kompresör ve hatlara verilen havanın debisini sağlayacak, 214 hava debimetresi
- Su datasını sağlayan 73 su sayacı



- Her fabrika (sahaya) birer adet ve merkezde 3 adet (redundant) olmak üzere, toplamda 17 server montajı,
- Mevcut 13.000 olmak üzere toplamda 15.000 ekipmandan 30.000 veri akışı başlamıştır.
- Ayrıca, fabrika girişlerine, fabrika ile şebeke bağlantı noktasında şebeke elektriksel olaylarını analiz etmeye imkan sağlayan ve her biri yaklaşık 10,000 data sağlayan fabrika başına minimum 1 adet olmak üzere toplamda 23 adet Power Quality (PQ, Güç Kalitesi) analizörü montajı yapılmıştır.

Kıvrımlı maliyetler Çizelge 1’de görülmektedir.

Çizelge 1. Ayrıntılı maliyet yüzdesi (Detailed cost percentage)			
	toplam	malzeme	işçilik
yazılım	13	6,5	6,5
elektrik	29	23,2	5,8
basınçlı hava	27	26,7	0,3
doğalgaz	19	11,8	7,2
su	12	8,0	4,0
toplam	100	76,2	23,8

Risk ve Başarı Faktörü Değerlendirmeleri (Risk and Key Performance Assessment)

Şişecam’da bu türde ilk ve dünyanın sayılı projeleri arasına girebilecek büyüklükteki projenin riskleri de beraberinde gelmektedir. Aşağıda kısaca özetlenmektedir:

- Operasyonel ve yönetsel anlamda kullanılmaması,
- Enerji sözleşme ve anlık takibinde yararlanılmaması,
- Yatırımlar ve yeni satın alınacak ekipmanlarda eldeki verinin kullanılmaması,
- Enerji denetimlerinde doğrulamanın EnMS üzerinden yapılmaması,
- Altan üste doğru enerji ile KPI’ların EnMS üzerinden verilmemesi ve sonuçların kontrol edilmemesi,
- Yöneticilerin genişletme çabalarını bloke etmesi,
- Standart hale getirilmiş ekipman ve sistemlerin yatırımlarda uygulanmaması,
- İlk kurulumlarda ekipmanların kurulmaması,
- Haberleşme protokollerinin uygun seçilmemesi,
- Analiz yöntemlerinin incelendiği teknik ekiplerin oluşturulmaması vb. sayılabilecektir.

Kurulumdan itibaren geliştirilen projelerle ise, altta görülen bazı teknik kazanımlar görülmektedir:

- Kompresör çıkışlarına sağlanan sensörler (debimetreler) ile kompresörlerin, havayı ne verimlilikte ürettikleri karşılaştırılmıştır. Bu veri ışığında, saha yetkilileri ile yürütülen ortak çalışmalarda, yıllık yaklaşık 2 mioTL’lik bir kazanç görülmüş ve uygulamaya geçilmiştir.

- Kompresörlerin KPI’ları belirlenmiştir.
- Elektrik kesintileri, verisel analiz edilmiş ve mesnet izolatörden kaynaklandığı noktasal tespit edilerek giderilmiştir.
- Fırınlara spesifik enerji kullanımları belirlenmiş ve sorumlularına bildirilmiştir.
- Fırınlara kapasite kullanımının verimlerine ne kadar etkilediği ve farklı çalışma koşullarına sahip fırınlarda durumun ne olduğu netleşmeye başlamıştır.
- ISO 50001 denetimleri sorunsuz geçmiştir. SEÖİS energy management anlamında Türkiye’de uygulanan ilk scadadır.
- Saha ve IT arasında bu büyüklükte işletebilen bir proje olmuştur. İleriki dönemlere, çevre, fırın, vb. gibi tüm yaptırımları istenecek sistemler için yeni yatırıma gerek olmaksızın, üzerine inşa edilebilecektir.
- Röle ayarları, duruş sebeplerinin analizi, duruş sürelerinin azaltılması, cezai durumların belirlenmesi ve anında düzeltilmesi, vb. gibi teknik ekibe fayda sağlayacak işler yapılmıştır ve artarak devam etmesi beklenmektedir.
- Fabrika enerji beslemelerindeki gerilim dengesizliği tespit edilerek, giderilmesi sağlanmıştır.
- Ürün birim maliyetleri belirlenmiştir.
- Yüksek enerji tüketimi olan fırınlar ve ekipmanlar belirlenmiştir.
- 64 kişi ile sinerjik paylaşım eğitimi düzenlenmiş, bilgiler aktarılmıştır.
- Satın alma için ekipman verim haritaları oluşturulmuştur.

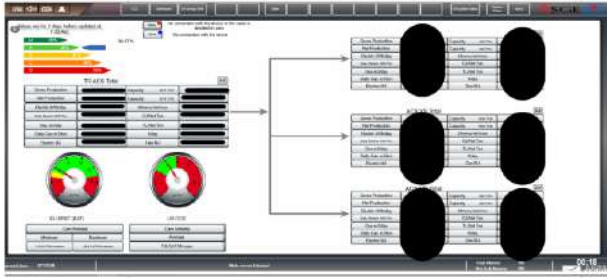
Saha Optimizasyonu (Plant Optimization)

Ekipmanların optimal yerleşimi, yaklaşık 700 km fiber optik + bakır kablo çekilmesi ile ethernet bazlı haberleşmenin sağlanması ve intranete çıkıştan sonra, yüzlerce kişinin uygulamasına açılan sistemin örnekleri alta verilmektedir.

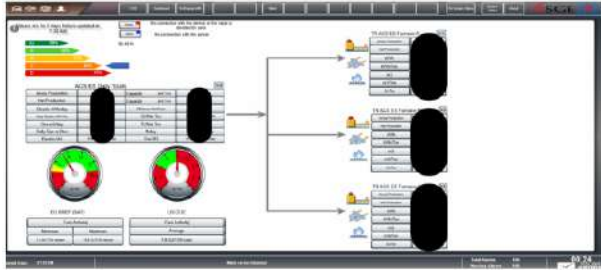
Yetkilendirme imkanı olmakla birlikte, Şekil 11’de görülen main server üzerinden tüm fabrikalara erişim ve SAP üretim değerleri üzerinden üretim – enerji korelasyonu sağlanmaktadır, Şekil 13-21.



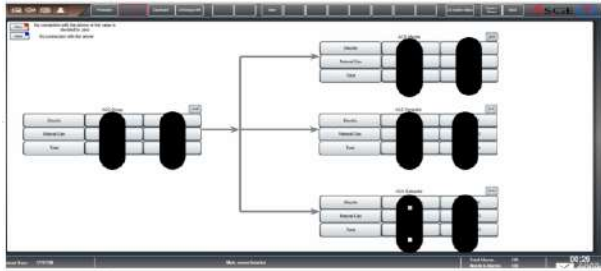
Şekil 12. Enerji yönetim sistemi SCADA’sı ana server açılış ekranı (energy management system SCADA main server screen)



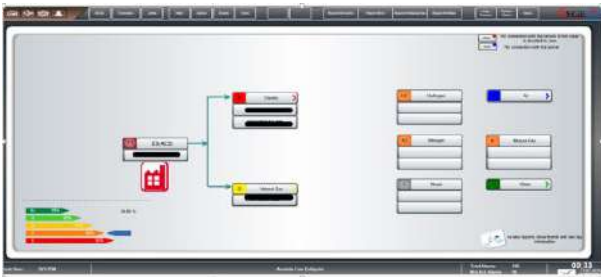
Şekil 13. Üretim – enerji korelasyon değerleri – ACS grup fabrikaları örneği (tüm gruplar için mevcuttur) (production-energy correlation data –for ACS group plants)



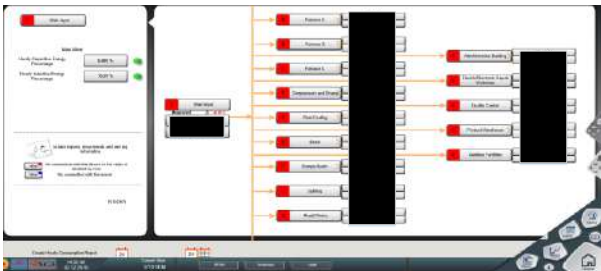
Şekil 14. Üretim – enerji korelasyon değerleri – ACS grup fabrikalarından Eskişehir örneği (tüm grup fabrikaları için mevcuttur) (production-energy correlation data – Eskişehir plant of ACS group plants)



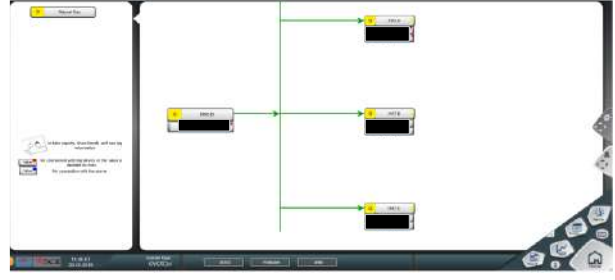
Şekil 15. CO<sub>2</sub> – enerji korelasyon değerleri (CO<sub>2</sub>-energy correlation data)



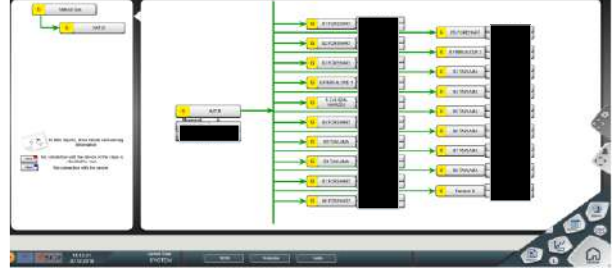
Şekil 16. ACS Eskişehir fabrikası örneği (ACS Eskişehir plant sample)



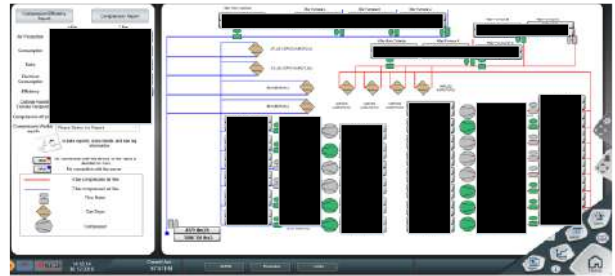
Şekil 17. ACS Eskişehir fabrikası elektrik örneği (ACS Eskişehir plant sample)



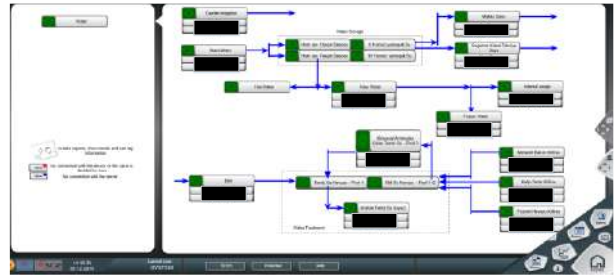
Şekil 18. ACS Eskişehir fabrikası doğalgaz örneği (ACS Eskişehir plant detailed natural gas flow sample)



Şekil 19. ACS Eskişehir fabrikası doğalgaz detay örneği (ACS Eskişehir plant detailed natural gas flow sample)



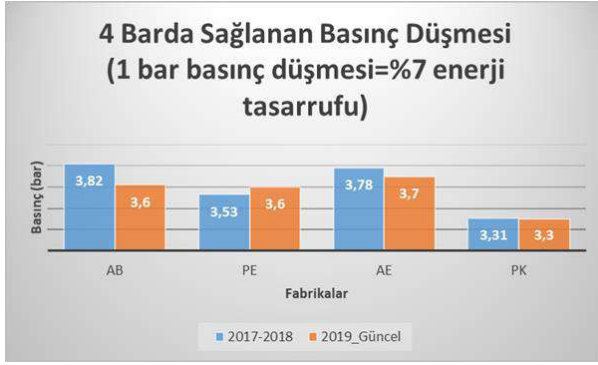
Şekil 20. ACS Eskişehir fabrikası basınçlı hava örneği (ACS Eskişehir plant detailed pressurized air flow sample)



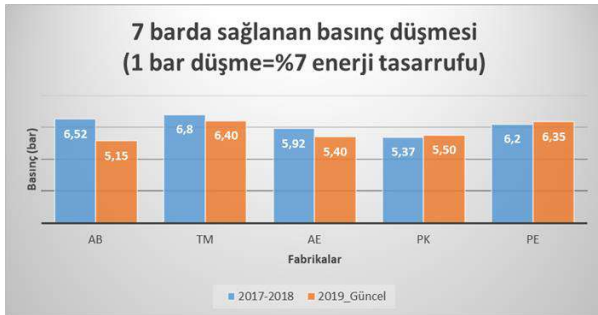
Şekil 21. ACS Eskişehir fabrikası su örneği (ACS Eskişehir plant detailed pressurized water flow sample)

Bazı Enerji Verimliliği Uygulama Örnekleri (Some Energy Efficiency Application Samples )

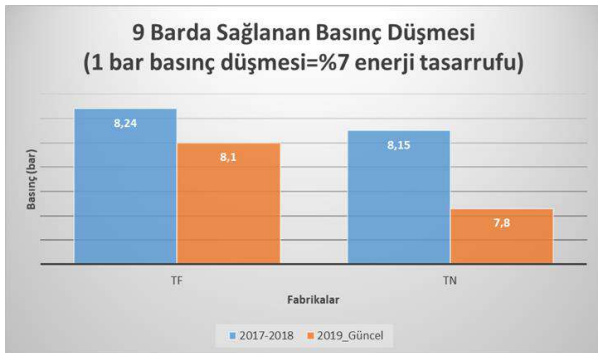
Fabrikalarda en yüksek elektrik enerjisi tüketicisi olan kompresörlerde çeşitli basınçtaki devrelerinde yapılan iyileştirmeler Şekil 22 a-b-c’de verilmektedir. Çalışılan kompresör yükünün yaklaşık 60 MW olması, verimliliğin büyüklüğünü göstermektedir.



Şekil 22.a. 4 bar basınçlı hava devresinde sağlanan enerji verimliliği çalışması (Energy efficiency work at 4 bars pressurized air circuit)

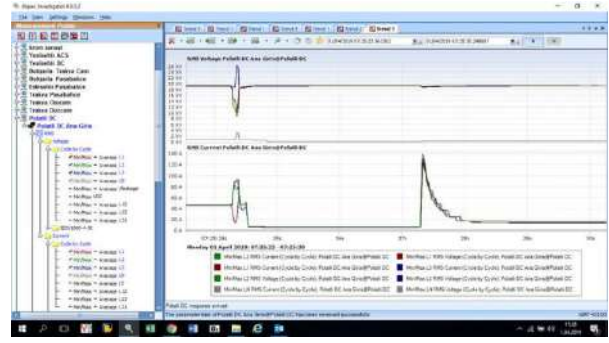


Şekil 22.b. 7 bar basınçlı hava devresinde sağlanan enerji verimliliği çalışması (Energy efficiency work at 7 bars pressurized air circuit)



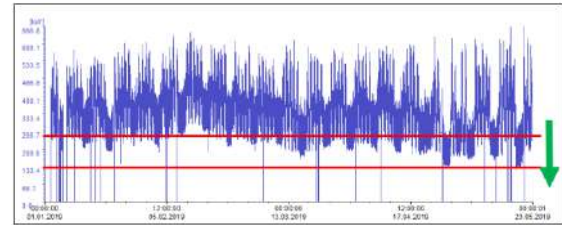
Şekil 22.c. 9 bar basınçlı hava devresinde sağlanan enerji verimliliği çalışması (Energy efficiency work at 9 bars pressurized air circuit)

Bir diğer verimlilik çalışması, şebeke olaylarındaki korumayı sağlayan röle koordinasyonunun sağlanmasıdır. Şebekede yaşanan, genliği EN 50160 tanımlama limitlerinin dışında kalan ancak süresi uzun olan olayda, fabrika rölelerinin bunu kesinti gibi hissedip, ana giriş kesicisini açtırarak generatörleri devreye sokması olumsuz durumdur. Röle selektivitesinin olmadığı yakalanan bu özel durum, tüm fabrikalarda düzeltilerek, yolda fabrika başına bir kaç kez devreden çıkma sağlanmıştır. Üretim verimliliğine olumlu etki sağlamış verimlilik arttırıcı projelerden olmuştur. Şekil 23, olayın yaşandığı bir andaki şebeke ve ana bara gerilim karakteristiklerini karşılaştırmalı göstermektedir.



Şekil 23. Şebeke – Fabrika gerilim analizi (Grid – Plant voltage analysis)

Diğer basit, fakat getirisi yüksek bir çalışma ise Şekil 24'te verilen bina enerji verimliliği uygulamasıdır. Belli bir süre izleme yapıldıktan sonra, yapılan optimizasyon çalışması ile bina talep – arzı (zaman yönetimi) sağlanarak yaklaşık 150 kW güç düşüşü sağlanmıştır.



Şekil 24. Bina yükünün optimizasyonu (Building demand optimization)

### 3. SONUÇ VE ÖNERİLER (RESULTS AND SUGGESTIONS)

Enerji Yönetim Sistemi projesi ile, 17 fabrikadan yaklaşık 15,000 ekipmanın enerji datası aynı veritabanına aktarılmıştır. Yaklaşık 30,000 enerji verisi ve 410,000 elektrik verisi inceleme ve analiz olanağına kavuşmuştur. Kök neden analizine dönük saha çalışanları tarafından yapılabilir analizler için elde edilebilir veri (data) bunun da üzerindedir.

Saha ekipmanları, topoloji haritaları, manuel raporlamalar, geriye dönük ve online trendsel analiz, grafikler, vb. gibi tüm teknik analiz ve istatistiksel yöntemler aktif edilmiştir.

Sistemin etkin işlerliği, genişlemeye uygun olması ve mevcut altyapıyı kullanarak gelecek yatırımlarda bütçesel tasarruf sağlaması ek kazanımlarından bazılarıdır.

### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Tümü, Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları A.Ş. kaynaklarında ve izniyle gerçekleştirilen proje çalışması ve çıktısı bu makale için onay vermiş yöneticilerimiz ve katkı koymuş seksen mühendis/teknisyene derin teşekkürlerimi arz ederim.

## **ETİK STANDARTLARIN BEYANI** (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

## **KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] **TS EN ISO 50001:2013**, “Enerji Yönetim Sistemleri – Şartlar ve kullanım için kılavuz”, Türk Standartları Enstitüsü, (2013).
- [2] **EN 50001:2011**, “Energy Management Systems – Requirements with guidance for use”, International Organization for Standardization, ( 2011).
- [3] **BS EN 16247-1:2012**, “Energy Audits – Part 1:General Requirements”, British Standards Institute, (2012).
- [4] **BS EN 16247-2:2014**, “Energy Audits – Part 2:Buildings”, British Standards Institute, (2014).
- [5] **BS EN 16247-3:2014**, “Energy Audits – Part 3:Processes”, British Standards Institute, (2014).
- [6] **IEEE Std 739-1995**, “IEEE Recommended Practice for Energy Management in Industrial and Commercial Facilities”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, (1984).
- [7] Liptak B. G., Eren H., “**Process Software and Digital Networks**”, CRC Press, (2012).
- [8] Görçün Ö. F., “**Endüstri 4.0**”, Beta, (2017)



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Çelik sektöründe güvenilirlikli üretim ve örnek bir uygulama: S355JR (EN 10025-2) çeliği akma ve kopma dayanımı güvenilirlik analizi

*Reliable production in steel industry and a case study: reliability analysis of yield and tensile strength of S355JR (EN 10025-2) steel*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Can ÇİVİ<sup>1</sup>, Hakan ERÇAY<sup>2</sup>

*ORCID<sup>1</sup>:*0000-0002-5302-9072

*ORCID<sup>2</sup>:* 0000-0002-3858-4246

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(To cite to this article):** Çivi C., ve Erçay H., “Çelik sektöründe güvenilirlikli üretim ve örnek bir uygulama: S355JR (EN 10025-2) çeliği akma ve kopma dayanımı güvenilirlik analizi”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1177-1182, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.579488



# Çelik Sektöründe Güvenirlikli Üretim ve Örnek Bir Uygulama: S355JR (EN 10025-2) Çeliği Akma ve Kopma Dayanımı Güvenirlik Analizi

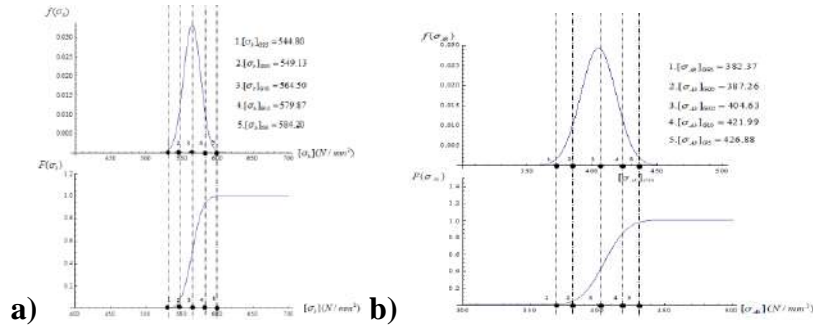
## Reliable Production in Steel Industry and a Case Study: Reliability Analysis of Yield and Tensile Strength of S355JR (EN 10025-2) Steel

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Çelik üretiminde güvenilirlik analizleri güvenli tasarımlar için önem arz etmektedir. / Reliability analysis in steel production is important for safe designs.
- ❖ Mekanik özellik kataloglarında verilen aralık değerleri kritik tasarımlarda risk oluşturmaktadır. / The range values given in the mechanical property catalogs pose a risk in critical designs.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Çalışmada çelik üretiminde güvenilirlik analizlerinin önemi tartışılmış ve örnek bir uygulama gerçekleştirilmiştir. / In this study, the importance of reliability analysis in steel production was discussed and an example application was performed.



Şekil. S355 JR Çeliği a) Akma b) Kopma Dayanımı Dağılım Eğrileri / Figure. S355 JR Steel Distribution Curves of a) Yield b) Tensile Strength

### Amaç (Aim)

Bu çalışmada çelik üretiminde ülkemizde ihmal edilen güvenilirlik kavramı ele alınmıştır. / In this study, reliability, which is a neglected concept in steel production in Turkey, is discussed

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Güvenirlik analizlerinde Shapiro-Wilk Normallik testi yapılmış, verilerin analizleri Gauss-Laplace fonksiyonuna göre yapılmıştır. / In reliability analysis, Shapiro-Wilk Normality test was performed, and the data was analyzed according Gauss-Laplace function.

### Özgünlük (Originality)

Mukavemet ve ömür analizlerinde güvenilirlikli değerlerin kullanılması gerekliliğinin vurgulanması çalışmanın özgün yanıdır. / The emphasis on the need to use reliable values in strength and life analysis is the original aspect of the study.

### Bulgular (Findings)

Güvenirlik değerlerinin artışıyla tasarım emniyetli olmakla birlikte boyutlar artar. / With the increase in reliability values, the design is become safe, but the dimensions increase.

### Sonuç (Conclusion)

Tasarımın kritiklik durumuna göre hesaplarda yüksek güvenilirlikteki değerler kullanılmalıdır. / High reliability values should be used according to the critical condition of the design.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.



# Çelik Sektöründe Güvenirlikli Üretim ve Örnek Bir Uygulama: S355JR (EN 10025-2) Çeliği Akma ve Kopma Dayanımı Güvenirlik Analizi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Can ÇİVİ<sup>1\*</sup>, Hakan ERÇAY<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Özkan Demir Çelik Sanayi A.Ş., İzmir, Türkiye

(Geliş/Received : 18.06.2019 ; Kabul/Accepted : 03.11.2019)

## ÖZ

Makine ve imalat sektöründe çelik, dayanım ve maliyet faktörleri göz önüne alındığında vazgeçilmez bir malzemedir. Günümüz koşullarında teknolojinin ve buna bağlı olarak tasarımların geldiği noktada, özellikle vasıflı çelikler büyük önem kazanmış, üstün mekanik dayanım ve yorulma özellikleri makine ve imalat endüstrisinin tamamına yakınında bu çeliklerin kullanımını zorunlu hale getirmiştir. Bu çalışmada çelik üretiminde ülkemizde ihmal edilen bir kavram olan güvenirlik ele alınmış, üretimde ve tasarımlarda yapılacak güvenirlik analizlerinin getireceği katkı tartışılmıştır. Çalışma kapsamında örnek bir uygulama olarak S355JR (EN 10025-2) Çeliğinin çekme testinin güvenirlik analizi gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Güvenirlik, çelik üretimi, çekme dayanımı.

## Reliable Production in Steel Industry and a Case Study: Reliability Analysis of Yield and Tensile Strength of S355JR (EN 10025-2) Steel

### ABSTRACT

Considering the strength and cost factors, steel is the essential material in the machinery and manufacturing sector. In today's condition of technology and accordingly today's designs, especially qualified steels have gained great importance, and their superior mechanical strength and fatigue properties make it necessary to use these steels in close proximity to the entire machinery and manufacturing industry. In this study, reliability, which is a neglected concept in steel production in our country, has been discussed, and the contribution of reliability analyzes in production and design was discussed. As a case study, the reliability of the tensile test of S355JR (EN 10025-2) steel was performed.

**Keywords:** Reliability, steel production, tensile strength.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Makine ve imalat sektöründe elemanlarının tasarım hesaplarında güvenirlik ve emniyet kavramları önem taşımaktadır. Konstrüksiyon elemanlarında, zorlayıcı yüklerin maksimum mukavemet değerlerinin altında kaldığını gösteren parametre emniyet katsayısı olarak tanımlanır ve bu katsayı "1" rakamına eşit veya daha büyük olarak hesaplarda kullanılır. Emniyet katsayısı "1" den büyük olsa dahi bir tasarım elemanında öngörülen kullanım süresini gerçekleştirme garantisini gösteren parametre güvenirliliktir. Bunun değeri %100 den yani "1" rakamından küçüktür. Hasar ise güvenirliliğin olmadığı durumda meydana gelir. Hasar ve güvenirliliğin toplamı "1" rakamını verir.

Klasik konstrüksiyon (tasarım) metodu emniyet fikri üzerine kurulmuştur. Bu konstrüksiyon metodunda belirli bir yükün altında etki eden gerilmeler karşısında

herhangi bir teknik sistemin elemanlarının, teorik olarak sonsuz ömrü gerçekleştirdiği varsayılır. Diğer bir metot olan istatistik konstrüksiyon metodunun temel fikri ise, elemanların sonsuz ömre sahip olmasından ziyade belirli bir ömür değerlerine sahip olduğudur. Bu yöntemde tasarımdaki her bir parçanın işletme şartlarında hasar görmeksizin belirli sürelerde çalışmasını esas olarak güvenirlik yüzdeleri hesaplanır. Güvenirlik, istatistik analiz ve olasılık teorisine dayanmaktadır. Bir tasarımda, elemanların hem emniyet hem de güvenirlik parametrelerinin matematiksel olarak belirlenmesi en uygun çözümdür [1, 2].

Güvenirlilik, karakteristik bir özellik olup, bir malzemenin veya tasarımın kendi koşullarında belirlenen ömrü veya mekanik özellikleri gerçekleştirip gerçekleştiremeyeceğini açıklar [3]. Ülkemizde çelik üretim sektöründe güvenirlik, bugüne kadar ihmal edilmiş bir kavramdır. Ancak güvenirlik kavramı, üretilen çelik profillerden konstrüksiyon oluşturacak tasarımcılar için önem arz etmektedir. Tüm sektörlerde

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : can.civi@cbu.edu.tr

kullanılan çeliklerin farklı çalışma şartlarında ve/veya farklı zorlanmalar altında görevini yapma gerekliliği, çelik profillerin güvenilirlik esasına göre tasarlanmasını gerekli kılmaktadır.

Güvenirlilik fikri, ilk defa 2. dünya savaşında kullanılan savaş araçları ile ilgili olarak ortaya atılmıştır. Savaştan sonra bu fikir gelişim göstererek, makine konstrüksiyonu alanında uygulanmaya başlanmıştır [4-6]. Günümüzde güvenilirlik, makine konstrüksiyonunu teşkil eden ana fikir olarak kabul edilmektedir [7]. Türkiye’de imal edilen metal malzemelerle ilgili verilen kataloglarda statik sınır mukavemet değerleri için sadece “minimum maksimum” kopma [N/mm<sup>2</sup>], akma [N/mm<sup>2</sup>] gerilme değerleri verilmektedir. Güvenirlilik [%] hakkında hiçbir bilgi verilmemektedir. Bu hususta istatistiksel verilerin oluşturulması önemli bir gerekliliktir. İstatistiksel verilerin işlenmesinde frekans poligonu, birikimli frekans diyagramı ve histogramlarla basit ön incelemeler gerçekleştirilebileceği gibi, deney sayılarının artırılması ile çeşitli eğriler oluşturularak istatistiksel incelemeler daha doğru şekilde gerçekleştirilebilir [8].

Bu çalışma kapsamında çelik ve özellikle vasıflı çelik üretiminde üretilen çeliğin mekanik testlerinde güvenilirlik kavramı ele alınmış ve örnek sayısal bir uygulama üzerinden yapılan analiz ile kavramın getirisi ve gerekliliği ortaya konmaya çalışılmıştır.

## 2. GÜVENENİRLİK KAVRAMI (DEFINATION OF RELIABILITY)

Herhangi bir teknik sistem, belirli bir fonksiyonu belirli şartlar altında, öngörülen belirli bir zaman aralığında üstlenmek üzere belirli bir amaç için tasarlanır. Güvenirlilik, bu teknik sistemin kendisinden beklenen amacı gerçekleştirme olasılığı ele alır. Konstrüksiyon, imalat-montaj, kalite kontrol, kullanım, bakım gibi olgular teknik sistemin işe yararlık durumunu doğrudan etkiler [7]. Güvenirlilik, ürün özelliklerinin, ürüne uygulanan testlerin ve ürünün kullanım ömrünün incelendiği bir kavramdır [9]. Güvenirlilik teorisi, güvenirlilik problemlerini istatistiksel yollarla çözmenin matematiksel yaklaşımıdır. Güvenirlilik çok farklı sayıda uygulamalı bilim dalını kapsamakta ve ölçüm güvenirliliği de bu alanlar arasında yer almaktadır. Güvenirlilik, malzemelerin yalnızca bazı kısımlarından elde edilen belirli sayıdaki ölçümlerin (testler) bütünü temsilindeki istatistiksel durumunu da analiz eder [10]. Güvenirliliğin ilgilendiği bir diğer alan da ömür değerleridir. Tasarımlar gerçekleştirilirken, tasarımdaki parçaların %90’ına yakınının dinamik (değişken) yükler altında çalışacağı ve burada yorulma ve ömür konusu ile karşılaşılacağı öngörülmelidir. Yorulma, değişken yükler altında çalışan malzemenin veya makine parçalarının mekanik özellik değerlerindeki azalma olarak tanımlanabilir. Genelde yorulma, herhangi bir yapıyı veya bu yapıdaki parçalardan bazılarını etkileyen bir problemdir. Tipik olarak dinamik zorlanmada hasar, statik zorlanmadaki maksimum gerilme değerlerinden çok daha düşük seviyelerde gerçekleşir [11,12]. Bir

tasarımda dinamik bir yük söz konusuysa burada mutlaka ömür analizleri yapılmalı ve tasarlanan her parça için bir ömür öngörüsü olmalıdır. Özellikle çeliklerin dinamik gerilme altındaki boyutlandırılmalarında önemli bir parametre olarak ele alınan sürekli mukavemet sınırlarının malzemenin kopma dayanımları ile bağlantılı olduğu bilinmektedir. Güvenirlikli ömür analizleri için de üretilen çeliklerin mekanik özelliklerinin istatistiki incelemeleri önem taşımaktadır [13].

## 3. TÜRKİYE’DE DEMİR-ÇELİK SEKTÖRÜNÜN MEVCUT DURUMU (CURRENT STATUS OF IRON-STEEL INDUSTRY IN TURKEY )

Demir-Çelik imalatı sektörü ülke ekonomisinin gelişmesinde önemli rol oynayan bir sektördür. Demir çelik ürünlerinin birçok sektörde girdi olarak kullanılması bu düşüncüyü açıklamaktadır. 2016 yılı çelik sektöründe üretimin yeniden yükseliş trendine girdiği bir yıl olmuştur. 2007-2012 aralığında, en büyük on çelik üreticisi ülke arasında, Çin ve Hindistan’ın ardından, üretimini en hızlı arttıran 3. ülke, Türkiye’dir. 2012-2015 aralığında ise %12.2 oranında üretimde azalma meydana gelmiştir. Sektördeki üretim miktarlarının arka arkaya üç yıl gerilemesini müteakiben, 2015 yılında 31.5 milyon tona kadar düşen Türkiye’nin ham çelik üretimi, 2016 yılında %5.2 oranında artışla, 33.2 milyon tona ulaşmıştır. Buna rağmen, üretim 2012 yılındaki seviyesinin %7.6 oranında altında kalmıştır [14]. Günümüzde demir-çelik sektörlerinde imalat, yüksek fırına dayalı üretim yapan entegre tesisler ve elektrik ark ocaklı tesisler tarafından yapılmaktadır. Hurda fiyatlarındaki artışın ve entegre tesislerin hammaddesi olarak tanımlanan cevher fiyatlarındaki inişin sonrasında hurda ile cevher fiyatları arasındaki makasın genişlemesinin etkisiyle elektrik ark ocaklı tesislerin ham çelik imalatı 2015 yılında %13.8 düşüşle 20.48 milyon tona gerilerken, entegre tesislerin ham çelik imalatı %7.3 artışla 11.03 milyon tona yükselmiştir [15].

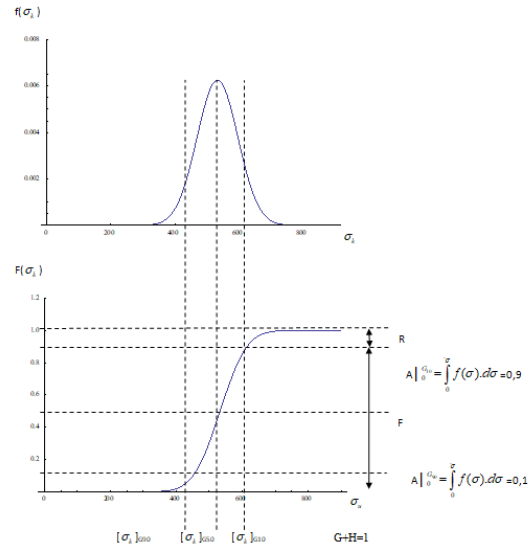
Türkiye’de 31 adet çelik üreticisi bulunmaktadır. Bunlardan Erdemir, Kardemir ve İsdemir Entegre Bazık Oksijen Fırını kullanırken diğerleri Elektrik Ark Ocağı kullanmaktadır. Özkan Demir Çelik Sanayi A.Ş., Habaş, Ege Çelik, İzmir Demir Çelik, Sider, Çebitaş Demir Çelik Endüstrisi A.Ş., Egedemir, MMK Metalürji San. Tic. Ve Liman İşl. A.Ş., Nursan Metalürji Endüstrisi A.Ş., Yazıcı Demir Çelik San. Ve Turizm Tic. A.Ş., Ekinciler, Egemen, Tosçelik Profil ve Sac End. A.Ş., Baştuğ Metalürji San. A.Ş., Koç Metalürji, Platinum Demir Çelik San. Ve Tic. A.Ş., Kaptan Demir Çelik End. Ve Tic. A.Ş., İçdaş Çelik Enerji Tersane ve Ulaşım San. A.Ş., Asil Çelik San. Ve Tic. A.Ş., Çemtaş Çelik Makina San. Ve Tic. A.Ş., Çolakoğlu Metalürji A.Ş., Diler Demir Çelik Endüstrisi ve Tic. A.Ş., Kroman Çelik Sanayi A.Ş., Sıddık Kardeşler Haddecilik San. ve Tic. A.Ş., Bilecik D.Ç., Makine Kimya Endüstrisi Kurumu, Yeşilyurt Demir Çelik End. Ve Liman İşl. Ltd. Şti. ve Sivas D.Ç. Elektrik Ark Ocağı kullanmaktadır.

2010 yılı itibarıyla tüm Avrupa ülkelerinin Dünya ham çelik imalatındaki pazar payı %14.6'dır. Türkiye %2.1'lik pazar payı ile Almanya'nın ardından Avrupa'daki en büyük ikinci ham çelik üreticisi konumundadır. Avrupa'da Türkiye'den sonraki büyük çelik üreticisi %1.8'lik 2010 yılı pazar payı ile İtalya'dır [16]. Dünyada teknolojik bakımdan gelişmiş olarak kabul edilen ülkeler, demir-çelik üretiminde miktardan ziyade; vasıflı ve katma değeri yüksek çeliklerin üretimine yönelmişlerdir. Vasıflı çelik; kendisinden beklenen kimyasal, metalürjik, mekanik ve fiziksel özellikleri sağlayan ve güvence altına alan, üretimin en son adımında, tüm kontrol, muayene ve onarım işlemleri yapılarak, bu özellikleri garanti altına alan, karbon, orta ve yüksek alaşımlı çelik mamulleridir. TÜİK verilerine göre vasıflı çelik ihracatımız 2013 yılından 2017 yılına kadar yaklaşık 2.5 kat artarak 663.661 tona ulaşmıştır. Buna karşın ithalat miktarında da artış gözükmektedir. 2013 yılında 1.418.232 ton olan vasıflı çelik ithalatımız 2017 yılında 2.848.729 ton seviyelerine ulaşmıştır [17].

Türkiye'deki ham çelik imalatının dörtte üçü kadarı ark ocaklı tesisler, dörtte biri kadarı ise entegre tesisler tarafından üstlenilmektedir. Sektörün yoğun olarak ark ocaklı tesislere yönelmesi, yatırımın daha kolay olmasından ve Türkiye'de entegre tesislerin temel hammadde olan demir cevherinin mevcut olmamasından kaynaklanmıştır [16].

#### 4. ÇELİKLERİN MEKANİK TESTLERİNDE GÜVENİRLİK ANALİZLERİ (RELIABILITY ANALYSIS OF MECHANICAL TESTS OF STEELS)

Güvenilirlik değerlendirmesi için rasgele değişkenlerin olasılık dağılımları elde edilmelidir. Genel olarak, olasılık dağılımları, istatistiksel verilerin ortalama ve standart sapmasından değerlendirilen parametreler kullanılarak belirlenir. [18]. Güvenilirlik analizlerinde yapılan analize uygun olacak şekilde birçok farklı dağılım kullanılabilir [19]. Bu dağılımlardan rastgele değişkenin dağılımı için en yaygın kullanılan model normal dağılımdır. Normal dağılımın diğer adı Gauss dağılımıdır [20]. Normal dağılımın, gaz molekülü hızı, aşınma, ses, alüminyum alaşımlı çeliklerin gerilme mukavemeti, elektriksel kondansatörlerin kapasite değişimi, bir alanda elektriksel güç tüketimi, jeneratör çıkış gerilimi ve elektrik direnci gibi birçok farklı örnek uygulaması gösterilmiştir ve dağılım birçok farklı sistemin fiziksel, mekanik veya kimyasal özelliklerini modellemek için kullanılır [21]. Literatürde çelik malzemelerin mukavemet ve sertlik testlerinde elde edilen değerlerinin de normal dağılıma uyum gösterdiği belirtilmiştir [7, 22]. Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen çeliklerin kopma dayanımı üzerine gerçekleştirilen ve Gauss dağılımı (normal dağılım) kullanılarak yapılan örnek bir analiz, Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Toz metal çeliğin kopma dayanımı üzerine yapılan bir güvenilirlik incelemesi [22] (A reliability study on the tensile strength of a powder metal steel).

Şekil 1'de de görüldüğü gibi analizlerde elde edilen verilerin farklı güvenilirlikteki değerleri grafiklerden elde edilebilmektedir. Bu grafiklerin elde edilmesinde ve analizlerde aşağıdaki denklemler kullanılmaktadır:

Belirli bir statik dayanım değeri için, herhangi bir mekanik değerlerin ortalaması;

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (1)$$

Standart sapma;

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (2)$$

Herhangi bir güvenilirlik değerine sahip mekanik özellik değeri;

$$[X]_{GXX} = \bar{X} \pm z \cdot S_x \quad (3)$$

Olarak ifade edilebilir Burada X değerlendirilecek mekanik özellik değerini, S, standart sapmayı ve G, elde edilmesi istenen güvenilirlik değerini ifade etmektedir. Buradaki z değeri, standart normal dağılım tablosundan elde edilmektedir. Örnek olarak % 90 güvenilirlik değeri için z tablosundan alınan değer kullanılarak bir malzemenin kopma dayanımı ( $\sigma_K$ ) değerleri analiz edildiğinde;

$$[\sigma_K]_{G90} = \bar{\sigma}_K - 1.28 \cdot S_{\sigma_K} \quad (4)$$

Denklemleri kullanılabilir. Burada denklemde kopmama (kopma hasarına uğramama) güvenilirliği değerinin hesabı belirtilmiştir. Ayrıca kopma güvenilirliği hesabı da yapılabilir. Aşağıda çelik üretiminde örnek bir güvenilirlik analizi yer almaktadır.

## 5. ÇELİK ÜRETİMİNDE AKMA VE KOPMA DEĞERLERİNİN ÖRNEK BİR GÜVENİRLİK ANALİZİ (A SAMPLE RELIABILITY ANALYSIS OF YIELD AND TENSILE STRENGTH IN STEEL PRODUCTION)

Çelik üretiminde güvenilirlik için bakış açısı oluşturmak ve bu analizlerinin basit bir uygulamasını incelemek üzere bu çalışmada örnek bir analiz olarak, Özkan Demir Çelik Sanayi A.Ş bünyesinde üretilen S355JR (EN 10025-2) çeliğinin çekme deneyi ile elde edilen akma ve kopma dayanımı değerleri ele alınmıştır. Çeliğin kimyasal özellikleri Çizelge 1’de görülmektedir.

**Çizelge 1.** S355JR (EN 10025-2) Çeliği Kimyasal Özellikleri (Chemical Properties of S355JR (EN 10025-2) Steel )

C %	Si %	Mn %	P %	S %	V %
0.19-0.23	0.18-0.24	0.96-1.07	0.004-0.011	0.005-0.023	0.020-0.026

Güvenirlik analizinin doğruluğunun yüksek olması amacı ile 24 adet çelik numuneye çekme testi gerçekleştirilmiştir. Çekme test sonuçları Çizelge 2’de görülmektedir.

**Çizelge 2.** S355JR (EN 10025-2) Çeliği Çekme Test Sonuçları (Tensile Test Results of S355JR (EN 10025-2) Steel)

Numune No	Akma Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Kopma Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )
1	395	575
2	400	548
3	406	557
4	409	566
5	401	554
6	394	552
7	425	581
8	379	541
9	417	579
10	442	579
11	407	562
12	406	570
13	413	577
14	403	565
15	396	562
16	409	580
17	397	566
18	417	549
19	382	542
20	401	560
21	385	561
22	408	574
23	419	571
24	400	577

Güvenirlik analizleri için literatürdeki bilgiler doğrultusunda normal dağılım kabulünden yola çıkılmıştır. Ayrıca normal dağılımı kanıtlamak üzere Shapiro-Wilk normallik testi gerçekleştirilmiştir. Akma gerilmesi için  $p=0.56206$  ve Kopma için  $p=0.17636$  değerleri elde edilmiştir ve dağılımlar  $p>0.05$  olduğu için normal dağılıma uymaktadır. Güvenirlik analizlerinde kullanılan denklemler aşağıda yer almaktadır.  $\sigma$ , Akma veya kopma dayanımı değerlerini ifade etmektedir.

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i}{n} \quad (5)$$

$$S_{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_i - \bar{\sigma})^2}{n - 1}} \quad (6)$$

Denklem (4), (5) ve (6) kullanılarak ve z dönüşümü ile standart normal dağılım tablosundan okunan değerler vasıtası ile farklı güvenilirlik değerlerine sahip akma ve kopma gerilmesi değeri elde edilebilir. Bu değerler Çizelge 3 ve Çizelge 4’te görülmektedir.

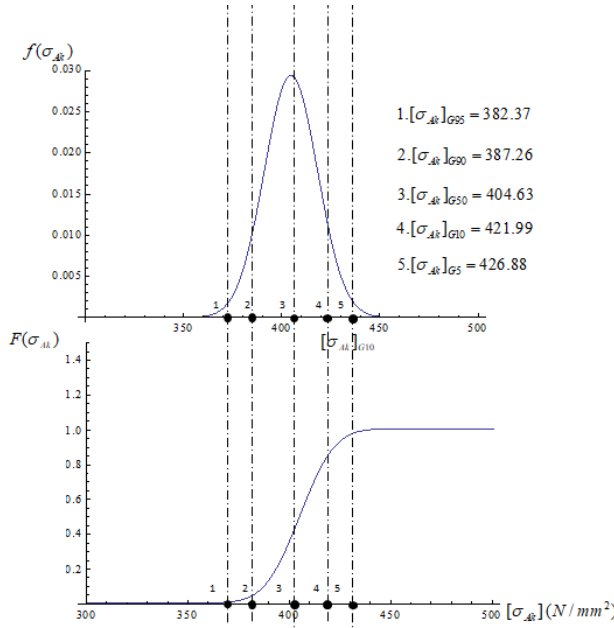
**Çizelge 3.** S355JR (EN 10025-2) Çeliği Akma Gerilmesi Değerlerinin Güvenirlik Analizi (Reliability Analysis of Yield Stress Values of S355JR (EN 10025-2) Steel)

$[\sigma_{Ak}]_{G50}$	$[\sigma_{Ak}]_{G90}$	$[\sigma_{Ak}]_{G95}$
404.63	387.26	382.37

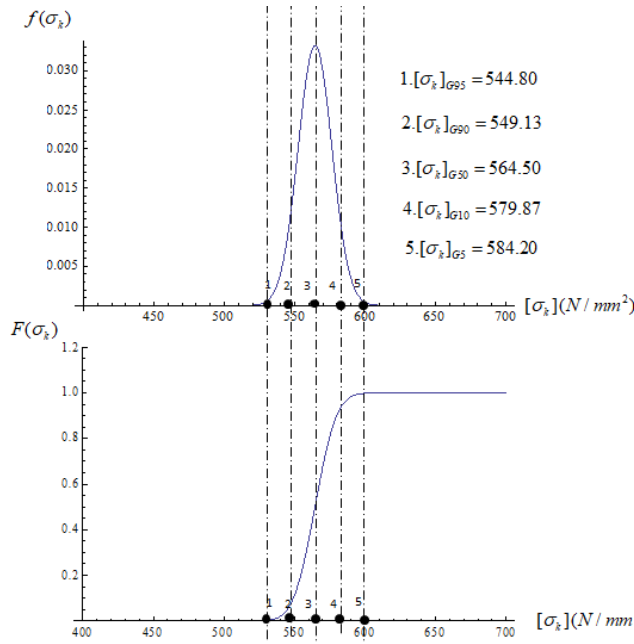
**Çizelge 4.** S355JR (EN 10025-2) Çeliği Kopma Gerilmesi Değerlerinin Güvenirlik Analizi (Reliability Analysis of Tensile Stress Values of S355JR (EN 10025-2) Steel)

$[\sigma_k]_{G50}$	$[\sigma_k]_{G90}$	$[\sigma_k]_{G95}$
564.50	549.13	544.80

Çizelge 3 ve Çizelge 4’te de görüldüğü gibi, güvenilirlik değerleri yükseldikçe, tasarımlarda kullanılacak olan mekanik dayanım değerleri düşüş gösterir. Şekil 2 ve Şekil 3’te S355JR (EN 10025-2) Çeliğinin akma ve kopma dayanımı değerlerinin normal ve birikimli (kümülatif) dağılım eğrileri görülmektedir.



Şekil 2. Akma Dayanımı Değerlerinin Normal ve Kümülatif Dağılım Eğrileri (Normal and Cumulative Distribution Curves of Yield Strength Values)



Şekil 3. Kopma Dayanımı Değerlerinin Normal ve Kümülatif Dağılım Eğrileri (Normal and Cumulative Distribution Curves of Tensile Strength Values)

Şekil 2 ve 3'te görüldüğü gibi, çekme deneyi gerçekleştirilen çeliğin akma ve kopma dayanımı değerlerinin normal ve birikimli dağılım eğrileri çizdirildiğinde, istenen herhangi bir güvenilirlik aralığı için kullanılacak değer, grafiklerden okunabilir. Şekillerde %5-10-50-90 ve 95 güvenilirlik değerlerine karşılık gelen akma ve kopma değerleri belirtilmiştir. Bu da tasarımcıların kullanacağı mukavemet değerlerinde istedikleri güvenilirlikli değerleri seçmelerine ve hem

nümerik analizlerde hem de sayısal hesaplamalarda bu değerleri kullanmalarını sağlayacaktır. Aynı şekilde sertlik ölçümleri, tane boyutu analizleri, çentik darbe deneyi verileri vs. gibi diğer tüm mekanik veya mikroyapı inceleme değerlerinin verileri, uyum gösterdiği dağılımlar tespit edilerek analiz edilebilir. Bu sayede tüm bu testler için güvenilirlik analizleri gerçekleştirilebilir.

Güvenirlik analizinin tasarım hesaplarına örnek olarak yansıtılması Denklem (7), (8) ve (9)' da görülmektedir. Makine parçalarının tasarımlarında genel olarak kullanılan denklemlerden biri olan Soderberg denklemi göz önüne alınırsa,  $\sigma_{ort}$ , ortalama gerilme,  $\sigma_D^*$  makine parçasının sürekli mukavemet sınırı,  $\sigma_g$  genlik gerilmesi olmak üzere, % 90 güvenilirlik için denklem aşağıdaki şekle dönüşür [8,23].

$$\sigma_{ort} + \frac{[\sigma_{Ak}]_{G90}}{[\sigma_D^*]_{G90}} \cdot \sigma_g = \frac{[\sigma_{Ak}]_{G90}}{S_{em}} \quad (7)$$

Örneğin, tam değişken bir eğilme gerilmesi için silindirik bir şaftta %90 güvenilirlikli çap aşağıdaki şekilde elde edilebilir.

$$[d]_{G90} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_e}{\sigma_g \cdot \pi}} \quad (8)$$

Benzer bir yaklaşım gözetilerek, makine parçalarının ömür analizlerinde kullanılan logaritmik denklemlerde güvenilirliği yüksek mekanik özellik değerlerinin kullanımı, ömür denklemlerin güvenilirliğini de artırmaktadır [24-26]. Bu yaklaşım denklem (9)'da görülmektedir

$$[\text{LogN}]_{G90} = 3 + 3 \left[ \frac{0,9 \cdot [\sigma_k]_{G90} - \sigma_g}{0,9 \cdot [\sigma_k]_{G90} - [\sigma_D]_{G90}} \right] \quad (9)$$

Denklem (9) vasıtası ile %90 güvenilirlikli logaritmik çevrim olarak ömür değerinin denklemi, Wöhler eğrileri vasıtasıyla süreli ömür değerleri için elde edilebilir.

## 6. SONUÇ (CONCLUSION)

DeneySEL çalışmalarda veya ticari kataloglarda verilen ortalama değerler ya da değer aralıkları, ancak %50 güvenilirlik değerlerine tekabül etmektedir. Ancak, bir tasarımcın konstrüksiyonu tasarlariken kullanacağı elemanların malzeme seçimleri için ortalama (%50 güvenilirlikli) değerleri kullanması, özellikle kritik tasarımlarda, güvenirliliğin düşük olmasına yol açmaktadır. Tasarımın kritiklik durumuna göre tasarım hesaplarında daha yüksek güvenilirlikteki değerler kullanılmalıdır. Kritiklik düzeyi düşük tasarımlarda ise daha düşük güvenirlilikler alınarak boyutlar ve buna bağlı olarak ağırlıklar ve maliyetler düşürülebilir. Bu hususlar göz önüne alınarak hem üretimlerde hem de tasarımlarda güvenirlilik analizlerinin gerçekleştirilmesi önem arz etmektedir. Üreticiler bu hususta katalog değerleri olarak minimum ve maksimum değerlerin yerine yapacağı istatistiksel hesaplarla çeşitli güvenirlilik aralıklarını tablolara yansıtmalıdır.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Tahralı N. “Konstrüksiyon Elemanlarında Güvenirlik Emniyet Ve Ömür Değerlendirmeleri”. İstanbul, **5. Savunma Sanayindeki Teknolojik Gelişmeler Sempozyumu**, Kara Harp Okulu, Ankara Bildiriler Kitabı: 921-930, 5-6 Haziran, (1997).
- [2] Tahralı N. Dikmen F. “Reliability and life calculations for machine elements”. **Yıldız Technical University Press**, İstanbul, (2004).
- [3] Ebelign C.E. “Reliability engineering: theory and practice (6th ed.)”, **Springer**, Zürich, (2010).
- [4] Carter AD. S. “Mechanical Reliability”, **Macmillan**, London (1972).
- [5] Lipson, C., Sheth, N. J. “Engineering Experiments”, **McGraw-Hill Book Company**, New York, (1973).
- [6] Pieruschaka, E. “Principles of Reliability”, **Prentice Hall**, New Jersey., (1963).
- [7] Akkurt, M. “Makine Kontrüksiyonunda Güvenirlik”. **Birsen Yayınevi** İstanbul, (1997).
- [8] Tahralı N. Atik E. Çivi C. “Konstrüksiyon Elemanlarında Güvenirlik (Reliability) ve Ömür Hesapları”, Teorik Açıklamalar ve Uygulamalar, **Seçkin Yayıncılık**, Ankara, (2017).
- [9] Condra L.W. “Reliability improvement with design of experiment, second ed.”, **CRC Press**, New York, (2001).
- [10] Klaassen, K.B. Van Peppen, J.C.L, “System reliability: concepts and applications, first ed.”, **VSSD**, Netherlands, (1989-2006).
- [11] Meyers M. A. Chawla K. K. “Mechanical Behavior of Materials”, **Prentice Hall**, (1999).
- [12] Saatçi, G.E. Tahralı N. “Birlikimli Hasar Teorileri ve Hareket İletim Elemanına Uygulanması”. **Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi**, 1(1): 21-30, (2003).
- [13] Tahralı, N. Atik E. “Konstrüksiyon Elemanlarında Güvenirlik ve Ömür Hesapları, Teorik Açıklamalar ve Uygulamalar”, **Celal Bayar Üniversitesi Yayınları**, Manisa, (2012).
- [14] Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği “38.Türkiye Demir Ve Demir Dışı Metaller Meclisi SektörRaporu”. (2016).
- [15] Maden Metal Ve Orman Ürünleri Daire Başkanlığı-Ekonomi Bakanlığı Raporu, “Demir-Çelik, Demir-Çelikten Eşya Sektörü”, (2016).
- [16] Ersöz T. Dügenci M. Ünver M. Eyiöl B. “Demir Çelik Sektörüne Genel Bir Bakış ve Beş Milyon Ton Üstü Demir Çelik İhracatı Yapan Ülkelerin Kümeleme Analizi ile İncelenmesi”. **Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi**, 4(2): 75-90, (2015).
- [17] Tuna, C. Gökçül, K. Erçay H. Dikici T. “Investigation on the effect of boron on the hardenability of high strength structure steel”. **3.Uluslararası Malzeme Bilimi Ve Teknolojisi Konferansı** Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Nevşehir, 17-19 Eylül (2018).
- [18] Zhao Y.G. Zhang X.Y Lu Z.H. “A flexible distribution and its application in reliability engineering”. **Reliability Engineering & System Safety** 176: 1–12, (2018).
- [19] Gnedenko B. Ushakov I. “Probabilistic Reliability Engineering”, **John Wiley & Sons**, New York, (1995).
- [20] Montgomery D.C. Runger G.C. “Applied statistics and probability for engineers, third ed.”, **John Wiley & Sons**, United States of America, (2003).
- [21] Ireson, W.G. Coombs, C.F. Moss, R.Y. “Handbook of reliability engineering and management, second ed.”, **McGraw – Hill**, New York, (1996).
- [22] Çivi C. Tahralı N. Atik E. “Reliability Of Mechanical Properties Of Induction Sintered Iron Based Powder Metal Parts”. **Materials & Design**, 53: 383–397, (2014).
- [23] Shigley JE “Shigley’s mechanical engineering design Ninth Edition” Tata **McGraw-Hill Education**, (2011).
- [24] Dikmen F, Bayraktar M, Guclu R, “Railway axle analyses: Fatigue damage and life analysis of rail vehicle axle” **Stroj Vestnik/Journal Mech Eng** 58: 545–552, (2012).
- [25] Bayraktar M, Tahralı N, Guclu R, “Reliability and fatigue life evaluation of railway axles” **J Mech Sci Technol**, 24: 671–679, (2010).
- [26] Bayraktar M, Guclu R, Tahralı N, “A New Approach for Reliability Life Prediction of Rail Vehicle Axle by Considering **Vibration Measurement**” **Math Probl Eng**, 1–12, (2014).





POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



## Deformation and microstructural analysis of fiber laser and TIG welding of thin Ti6Al4V sheet by coordinate measurement machine (CMM)

*İnce Ti6Al4V saçların fiber lazer ve TIG kaynağı sonrası koordinat ölçme makinası (CMM) ile deformasyonunun ve mikroyapısal analizinin yapılması*

*Yazar(lar) (Author(s)): Ahu CELEBI*

*ORCID: 0000-0003-0401-5384*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Celebi A., “Deformation and microstructural analysis of fiber laser and TIG welding of thin Ti6Al4V sheet by coordinate measurement machine (CMM)”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1183-1188, (2020).

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

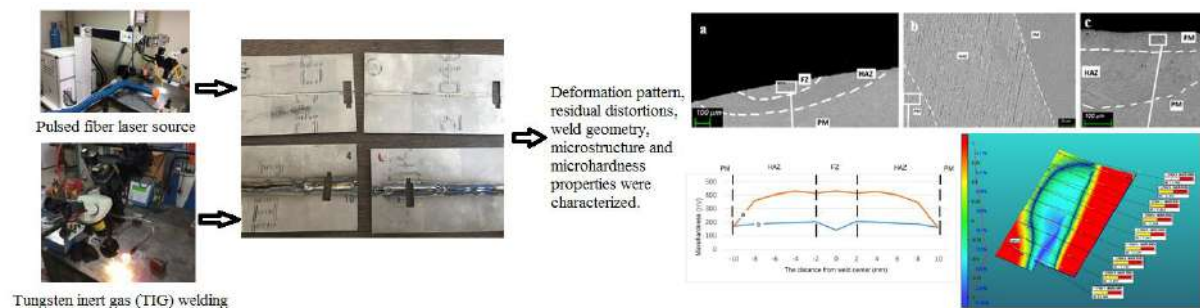
**DOI:** 10.2339/politeknik.581574

# Deformation and Microstructural Analysis of Fiber Laser and TIG Welding of Thin Ti6Al4V Sheet by Coordinate Measurement Machine (CMM)

## Highlights

- ❖ The mechanical and deformation properties of Ti6Al4V titanium alloy joints between a pulsed fiber laser source and a tungsten inert gas (TIG) welding were compared.
- ❖ The welded by fiber laser has narrow heat affected zone (HAZ), small overall residual distortion, fine microstructure, high Vickers hardness.
- ❖ Joining the Ti6Al4V sheet with the laser welding method is more mechanically favorable because of low heat input and high cooling rate can cause extreme hardness and brittleness in the material.

## Graphical Abstract



**Figure.** Deformation pattern, residual distortions, weld geometry, microstructure and microhardness properties of the joints produced with fiber laser source and tungsten inert gas welding were compared.

## Aim

This paper reports on a study to compare the mechanical and deformation properties of Ti6Al4V titanium alloy joints between a pulsed fiber laser source and a tungsten inert gas (TIG) welding. Ti6Al4V alloy sheets - 0.8 mm thick-deformation modifications were investigated via a 3D laser scanner integrated to a portable-arm Coordinate Measurement Machine (CMM) and PC-DMIS software.

## Design & Methodology

All specimens welded by pulsed fiber laser and TIG processes, have been scanned to inspect deformation amounts. HP-L.8.9 3D laser scanner integrated to Romer 7320 portable CMM and Pc-Dmis software have been used for acquiring data as point clouds. Specification of HP-L.8.9 3D laser scanner is given Table 3. CAD model of the specimens has been imported to Pc-Dmis and used as the reference for all 3D scanning operations.

## Originality

Deformation pattern, residual distortions, weld geometry, microstructure and microhardness properties of the joints produced with fiber laser source and tungsten inert gas welding were compared. It is easily possible to detect the distortion amounts with 3D laser scanner after welding.

## Findings

When compared distortion amounts of a specimen before and after welding both TIG and pulsed fiber laser welding specimens, remarkable distortion has been observed after welding. However, the distortion generated by fiber laser welding is much smaller as compared to TIG welding. The effect on the microstructure is less than that of the fused zone because the heat affected zone temperature is lower than the fused zone. The fused zone in the pulsed fiber laser welding also shows the presence of needle-like  $\alpha$  martensite in along with acicular within the equiaxed grains.

## Conclusion

Joining the Ti6Al4V sheet with the laser welding method is more mechanically favorable because of low heat input and high cooling rate can cause extreme hardness and brittleness in the material.

## Declaration of Ethical Standards

The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Deformation and Microstructural Analysis of Fiber Laser and TIG Welding of Thin Ti6Al4V Sheet by Coordinate Measurement Machine (CMM)

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Ahu CELEBI\***

Engineering Faculty, Metallurgical and Materials Engineering Department, Manisa Celal Bayar University, Turkey

(Geliş/Received : 24.06.2019; Kabul/Accepted : 26.11.2019)

## ABSTRACT

This paper reports on a study to compare the mechanical and deformation properties of Ti6Al4V titanium alloy joints between a pulsed fiber laser source and a tungsten inert gas (TIG) welding. Ti6Al4V alloy sheets - 0.8 mm thick-deformation modifications were investigated via a 3D laser scanner integrated to a portable-arm Coordinate Measurement Machine (CMM) and PC-DMIS software. Deformation pattern, residual distortions, weld geometry, microstructure and microhardness properties of the joints produced with fiber laser source and tungsten inert gas welding were compared. Compared with the TIG, the welded by fiber laser has narrow heat affected zone (HAZ), small overall residual distortion, fine microstructure, high Vickers hardness. It can be concluded that fiber laser welding is more suitable for welding the thin Ti6Al4V titanium alloy plate than TIG welding; due to the small beam focus characteristics of fiber lasers enabling deep penetration welding.

**Keywords:** Fiber laser welding, joint properties, Ti6Al4V titanium alloy, TIG welding.

## İnce Ti6Al4V Saçların Fiber Lazer ve TIG Kaynağı Sonrası Koordinat Ölçme Makinası (CMM) ile Deformasyonunun ve Mikroyapısal Analizinin Yapılması

### ÖZ

Bu çalışmada, Ti6Al4V ince saçların kaynağında kullanılan darbeli fiber lazer ile tungsten ark kaynağı (TIG) arasındaki mekanik ve deformasyon özelliklerini karşılaştırmaya yönelik bir araştırma sunulmaktadır. Ti6Al4V alaşımlı levhalar - 0,8 mm kalınlıkta - deformasyon ölçümleri için portatif Koordinat Ölçüm Cihazına (CMM) ve PC-DMIS yazılımına entegre edilmiş bir 3D lazer tarayıcı ile taranmıştır. Fiber lazer ve tungsten ark kaynağı kullanılan kaynak numunelerinde deformasyon paterni, artık çarpılmalar, kaynak geometrisi, mikroyapı ve mikro sertlik özellikleri karşılaştırılmıştır. TIG ile karşılaştırıldığında, fiber lazer ile kaynaklı numunelerde dar ısıdan etkilenmiş bölgeden (HAZ) dolayı, daha küçük deformasyonlara, ince mikro yapıya, yüksek Vickers sertlik ölçümlerine rastlanmıştır. Fiber lazer kaynağının Ti6Al4V alaşımına sahip levhaların kaynaklanmasında TIG kaynağından daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır; Fiber lazerlerin küçük ışın odaklama özelliği sayesinde daha derin penetrasyon kaynağı sağladığı gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Fiber lazer kaynağı, kaynak özellikleri, Ti6Al4V titanyum alaşımları, TIG kaynağı.

### 1. INTRODUCTION

Ti6Al4V alloy is extensively used in manufacturing of the electric power industry, nuclear power, petrochemical, automotive, medical industry and the aerospace components because of the combination of high strength-to-weight ratio, low density, high stiffness, excellent fatigue properties, fracture toughness and good corrosion resistance [1]. In addition to all these, in recent years, Ti6Al4V sheets are particularly used in space laboratory chambers, air inlets, fuel tanks, and the titanium capsules that contain the Iodine-125 radioisotope used for cancer radiotherapy. Today,

titanium alloys are an important part of the industry, while new technologies and applications for these alloys continue to evolve [2]. With increased applications of titanium alloys in the various industries, welding methods like friction welding, electron beam welding (EBW), laserbeam welding (LBW), laser hybrid welding, TIG welding have been developed and are widely used for the joining of titanium alloys for different applications [3-9]. Both conventional and solid state welding techniques are employed for joining of titanium alloys [10]. However, conventional arc welding is mostly used due to ease of automation and low cost operation [11]. Furthermore, laser welding has also proven to be very effective especially for titanium alloys due to its focused and dense heat source and low heat input

\*Sorumlu yazar (Corresponding Author )  
e-mail : ahu.celebi@cbu.edu.tr

resulting in narrow heat affected zone [9]. Laser welding has certain key beneficial aspects compared to the conventional arc welding process and therefore is being used as an alternative welding process. Short et al. [11] reported that the power density for laser welding is in the range of approx. 1012 W/m<sup>2</sup>, whereas, it is approx. 109 W/m<sup>2</sup> for the conventional TIG welding process. This high power density for laser welding results in high penetration in a single pass resulting in a reduced overall heat input. Therefore, the grains in the weldzone are relatively fine, hence narrower HAZ and reduced structural distortions are observed as compared to TIG welding process.

Recently, for titanium alloy particularly in sheet form, TIG welding is one of the most widely used welding methods. A main disadvantage of TIG welding is its high heat input, and this is also the cause of resulted greater distortion and higher risk of contamination [9]. Additionally, according to Cao and Jahazi although the geometrical shape of the laser welds strongly depended on the welding speed, Nd:YAG laser welding is a suitable method for Ti6Al4V sheet [12,13].

Gao and et al. (2013) attracted attention that compared with the joints TIG welded, laser welding joints have better combination of strength and ductility [9]. Akman et al. (2009) investigated the effect of the laser welding parameters - the pulse energy, pulse duration, peak power - on the microstructure and weld penetration investigated for the Ti-6Al-4V alloy [1]. When the thickness of the plate is higher than 20 mm, joints deteriorates since it is difficult to join, and large internal stress will be generated. Huang et al. (2016) reported that the welding deformation was linearly related to the laser power imposed per unit length, therefore the increase in welding

peed can reduce the plate deformation and the larger plates would have more out of plane deformations under the same welding conditions [14]. Since both pulsed fiber laser and TIG welding are frequently used for welding of titanium alloys, their comparison from the perspective of mechanical properties and strength has always remained an area of prime concern. In this work, in order to get a better understanding of the influence of the pulsed fiber laser welding and conventional welding method (tungsten inert gas -TIG) laser method on the properties of Ti6Al4V joints, Ti6Al4V sheets with a thickness of 0.8 mm were welded respectively with the pulsed fiber laser and TIG arc. While the pulsed fiber laser and TIG welding process, deformation modifications were investigated via a 3D laser scanner integrated to a portable-arm Coordinate Measurement Machine (CMM) and PC-DMIS software. In previous studies [14-17], it was mentioned that both the TIG welding and the pulsed fiber laser welding were subjected to deformation measurement analyse, but there is no sufficient research analysis using the CMM device performed for especially Ti6Al4V sheets. Our research using CMM device has obtained the distortion amounts of deformation. In addition microstructure changes and hardness values was analyzed in relation to deformation changes.

**2. MATERIAL and METHOD**

**2.1. Material and Welding Conditions**

Welding was carried out on Ti-6Al-4V sheet with a dimension of 165x40x0.8 mm using pulsed fiber laser and TIG welding processes. Manufacturer’s chemical composition data of titanium alloy sheet is given in Table1.

**Table 1.** The composition of Ti6Al4V (wt %)

Material	Ti	Al	V	Fe	Si	C	N	H	O
Content	Bal	5.5-6.8	3.5-4.5	<0.3	<0.15	<0.1	<0.05	<0.015	<0.2

**Table 2.** Welding parameters for fiber laser and TIG.

**Welding parameters for fiber laser.**

Current (A)	Pulse duration (ms)	Pulse frequency (Hz)	Welding Speed (mm/min)	Heat input (kJ/mm)
250 A	6,5	9 Hz	150	0,4– 0,7

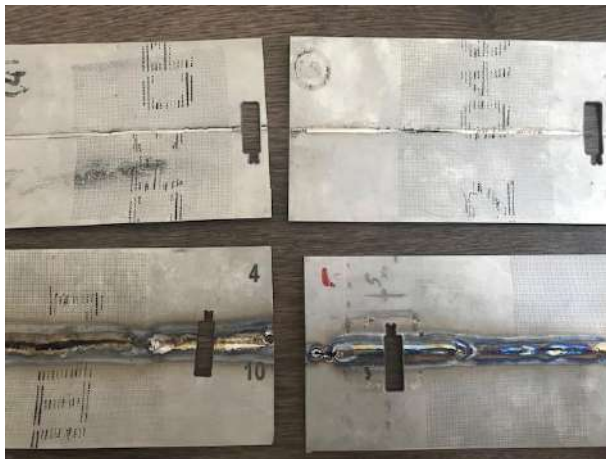
**Welding parameters for TIG.**

Current (A)	Voltage (V)	Current type (AC/DC) / Pole	Welding speed (mm/s)	Heat input (kJ/mm)
24-25	9,5-9,7	DC (-)	65 – 90,1	1,2– 1,6

The rust on the plate surface around the weld line was removed before welding. The room temperature was about 20 °C during experiment. The welding parameters and conditions to achieve bead-on-plate weldments for each of the welding processes are presented in Table 2. Argon gas was used for shielding a pulsed fiber laser machine used for the welding process is shown in Figure 1a, TIG machine used for the welding process is shown in Figure 1b and the laser source construction technical drawing is shown in Figure 1c. The welded specimens are shown in Fig. 2(a), (b), (c), (d) and respectively.



**Figure 1.** a) Pulsed fiber laser welding machine (Alseko-Sisma SWA 300) b) TIG welding machine (Tig-400) c) Ti-6Al-4V sheet technical drawing.



**Figure 2.** The welded specimens a) Pulsed fiber laser welding specimen (L1) b) Pulsed fiber laser welding specimen (L2) c) TIG welding specimen (T1) d) TIG welding specimen (T2).

## 2.2. Measurement of Deformation after Welding

All specimens which welded by pulsed fiber laser and TIG welding processes, have been scanned to inspect deformation amounts. HP-L.8.9 3D laser scanner integrated to Romer 7320 portable CMM and Pc-Dmis software have been used for acquiring data as point clouds. Specification of HP-L.8.9 3D laser scanner is given Table 3. CAD model of the specimens has been imported to Pc-Dmis and used as the reference for all 3D scanning operations.

After scanning of each specimen, the acquired point clouds have been aligned to CAD model to inspect deformation amounts.

**Table 3.** Specification of HP-L.8.9 3D laser scanner[3].

Accuracy	40 $\mu$ m 2 sigma
Point acquisition rate	45 000 points per second
Points per line	750
Line rate	60 Hz
Line width (mid-field)	80 mm
Stand-off distance	135 mm +/- 45 mm
Minimum point spacing	0,08 mm
Laser power adjustment	Semi-automatic

## 2.3. Microstructure and Hardness

After welding, a CNC abrasive water-jet cutting machine was used to cut samples for Optical microscope (OM, Olympus DP72) and scanning electron microscope (SEM, ZEISS Sigma 300 VP) observation, respectively. Moreover, the cross- sections of the weld were prepared in order to see the shape of the molten pool and to measure the width and the depth of penetration. Metallographic samples were ground mechanically using SiC paper (250, 400, 600, 800, 1000, 2000) and polished with 1 $\mu$  Struers diamond paste suspension and etched by the Kroll agent (92 ml distilled water 6 ml HNO<sub>3</sub> and 2 ml HF) and then with 0.2% HF for metallographic study. Digital Micro-hardness Tester (Emco test DuraScan) with 100 grams in a force load under 15 s of dwell time was employed to measure the micro-hardness of the weld, HAZ, and base metal.

## 3. RESULTS and DISCUSSION

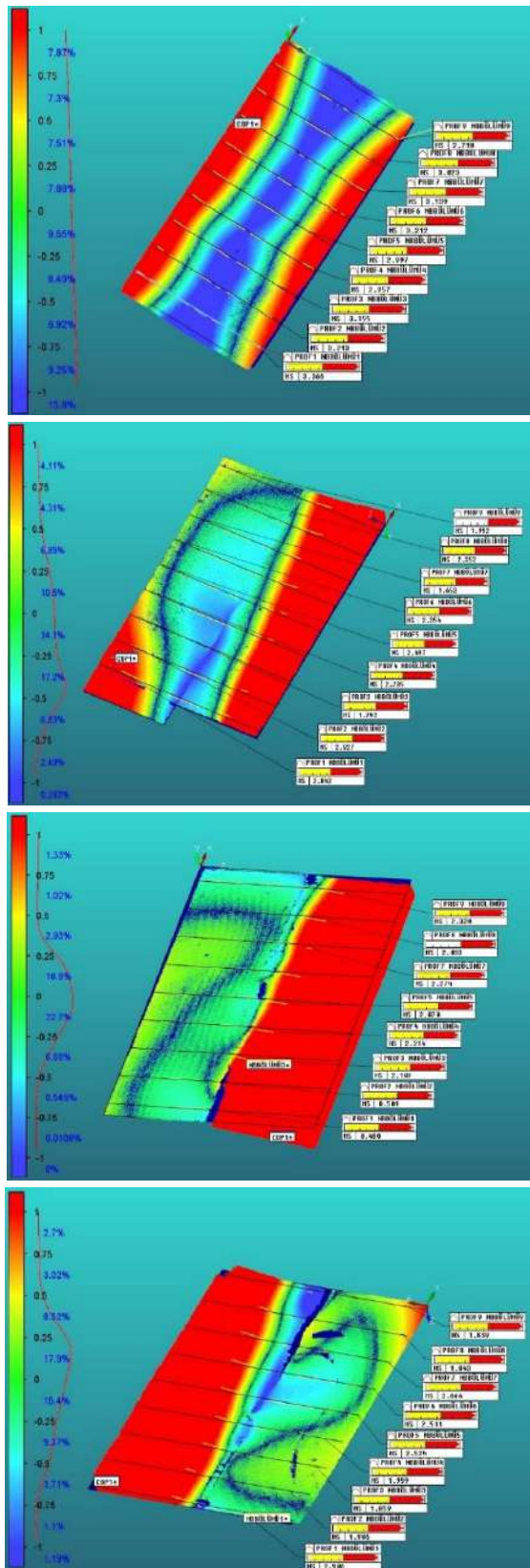
### 3.1. Comparison of Deformations and Distortions

A measurement method is needed to inspect the shape and acquire the point data of the shape. The coordinate measuring machine (CMM) is characterized with high accuracy and versatility, which has a widespread application in aerospace and manufacturing engineering. The welded sheets were scanned with a laser scanner (Hexagon) to observe the difference in deformation after welding. These Ti6Al4V sheet was welded, overlapped, In order to measure the deformation of the TIG and pulsed fiber laser source, the deviations from 9 different points were recorded using the PC-DMIS program, and deformation of the pulsed fiber laser and TIG welding was observed. Sheet which is not imposed any welding point clouds data was matched with after welding data. Figure 3 shows the comparison results of the measured points and the final section shape. TIG welding specimens (T1, T2) is given Figures 3.a and b, also Figures 3.c and 3.d show the deformation of the pulsed fiber laser welding specimens (L1, L2).

When compared distortion amounts of a specimen before and after welding both TIG welding specimens and pulsed fiber laser welding specimens, remarkable distortion has been observed after welding. However, the distortion generated by fiber laser welding is much



smaller as compared to TIG welding for a 0,8 mm thick Ti6Al4V plate.



**Figure 3.** Cad model, point cloud (COP-Cloud of Point) and sections. a) TIG welding specimen (T1) b) TIG welding specimen (T2) c) Pulsed fiber laser welding specimen (L1) d) Pulsed fiber laser welding specimen (L2).

It can easily detect that distortion amounts of Figures 3 (a,b) are higher than Figures 3(c,d). The distortions in red and dark blue regions showed in the Figure 3 are higher and in the green regions are lower. The results of the other scanned point clouds are similar. Beside the whole point cloud comparison inspection, sections have been created in Pc-Dmis and max. deviation amount of point clouds in the sections have been measured. The values have been given in Table 4 for after welding. As shown in Figure 3.a, it can be seen that; 15.8% in the point cloud between -1 and -1.25 in the negative deviation, 7.87% in the point between 0.75 and 1 in the positive deviation. On the other hand, in Figure 3.c, maximum deviation amount of point clouds is more in the region near 0 and the point cloud densities are less in the positive and negative direction deviations. As expected, pulsed fiber laser welding specimens (L1, L2) showed the minimum distortion in comparison to the TIG welding processes because of the lower heat input and consequently narrower HAZ.

Whereas TIG welding specimens (T1, T2) showed the maximum distortion because of the higher heat input that resulted in a wider HAZ. The results by the CMM measurement and their associated measured ones are presented in Table 4.

**3.2. Microstructural Evolution**

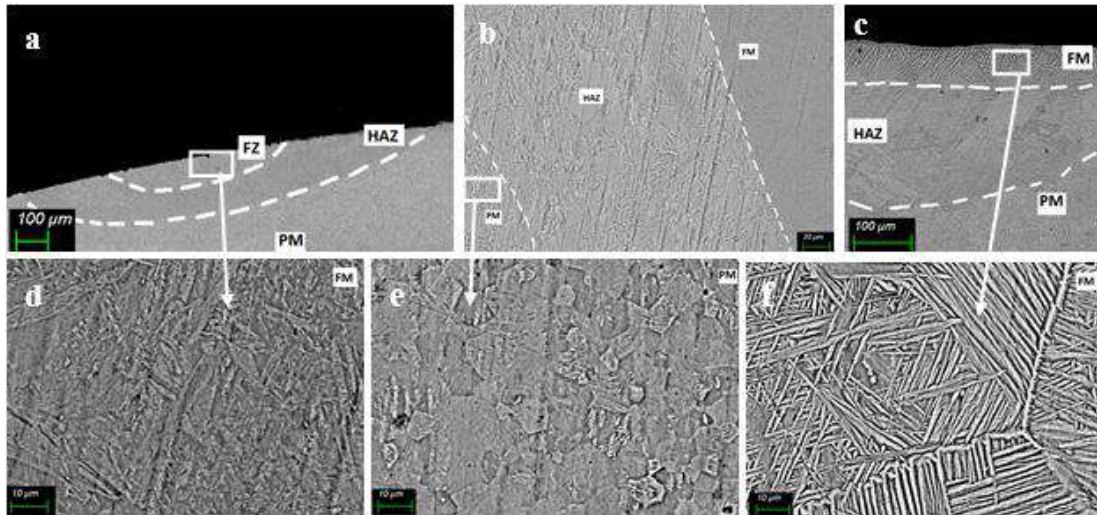
Figure 4.e shows the typical microstructure of base Ti6Al4V plate. The alloy consists of equiaxed grains in prior matrix as shown in Figure 4.e. Microstructures of different zones (FZ, HAZ and PM) of pulsed fiber laser and TIG weldings are shown in Figures. 4.a, b and 4.c, respectively. Also, the welded joint of pulsed fiber laser and TIG weldings (2000X) are shown in was observed by secondary electron microscope (SEM) in Figure 4d and 4.f, respectively.

TIG welding achieves a power density of 102-104 W / cm<sup>2</sup>, while the laser beam provides a power density of 106-108 W / cm<sup>2</sup> at the focal point. In addition, gas tungsten arc welds are low in cooling rates, generally 100–101 K / s, while laser welds have heating and cooling at very high rates, such as 105 K / s. Low heat input in laser welding, fast heating and cooling rates, more control over grain size in welding joints [18-20]. The fused zone of pulsed fiber laser weldment consists of very fine  $\alpha$  martensite as shown in Figure 4(f). This is due to low heat input and relatively higher cooling rate in fused zone of pulsed fiber laser as compared to fused zone of TIG weldment. Owing to the dense nature of heat source of pulsed fiber laser welding, the top and bottom width of HAZ was significantly less than that of TIG weldments (Figure 2). This is predicted to develop due to the small focal diameter of the laser source and higher cooling rate properties due to the high speed and low heat input, as mentioned in the literature [18-20]. It is also recognizable that the HAZ becomes narrower with decreasing heat input (Table 2, Figure 2).



**Table 4.** Maximum deviations in section after welding of samples.

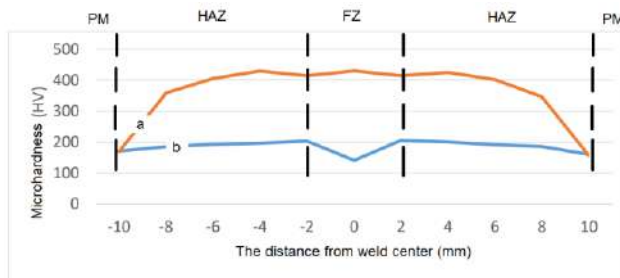
Samples	Max. Deviations in Sections (%)								
	(After Welding)								
Sections	Section 1	Section 2	Section 3	Section 4	Section 5	Section 6	Section 7	Section 8	Section 9
T1	3.366	3.213	3.155	2.957	2.997	3.212	3.139	3.023	2.718
T2	2.842	2.927	1.792	2.735	2.497	2.354	1.653	2.352	1.992
L1	0.480	0.501	2.107	2.214	2.070	2.271	2.274	2.033	2.320
L2	2.906	1.986	1.859	1.999	2.524	2.511	2.666	1.843	1.839



**Figure 4.** (a) TIG welding specimen with different zone (250X) (b) TIG welding specimen with different zone (1000X) (c) Pulsed fiber laser welding specimen with different zone (250X) (d) TIG welding specimen fused zone (e) TIG welding specimen based zone (f) Pulsed fiber laser welding specimen fused zone

**3.3. Microhardness Evolution**

The vickers hardness tests were applied to all welded samples to determine the hardness change in the weld zone (PM, HAZ and FZ) in titanium materials were joint with pulsed fiber laser and TIG weldments by two different sources.



**Figure 5.** Vickers microhardness distribution on the cross-section of a) pulsed fiber laser and b) TIG welded joints.

Figure 5 shows the vickers microhardness distribution on the cross section of the pulsed fiber laser and TIG welded joint. When the hardness graphs are examined; it is seen that there is a drastic decrease from the FZ to PM for pulsed fiber laser welding. The highest hardness values

are measured from the FZ, followed by the HAZ and PM in the pulsed fiber laser.

When the hardness results obtained are examined, the region affected by the source is wider because the heat input is higher in the TIG welding than in the laser source, and the hardness values of the substrate and the welding region of the TIG welding samples are lower than those of the laser welding. The extent of martensitic transformation gives an estimate of the microhardness of the FZ since martensite is much harder than acicular and equiaxed phase. Due to higher proportion of martensite (Figure 4.c, 4.f), the measured values of microhardness in the FZ of laser weldments was on more than that of TIG weldments. As the cooling rate increases, finer microstructures are produced. Note that high cooling rate results in much closer spacing between cellular or dendrite arms. Eventually, the finer microstructure leads to increased mechanical properties. As shown in Figure 5, the FZ in the pulsed fiber laser welded joint exhibits the highest hardness due to the formation of the  $\alpha$  martensite, then the hardness values drop rapidly in the HAZ of pulsed fiber laser. The microhardness in the fusion zone of TIG welded joint is much lower than that of BM in Figure 5. The reason may be the low strength-index filler wire used in the TIG welding process.

The fiber laser welding is much more mechanically favorable for Ti6Al4V sheet because of high heat input and high cooling rate causing extreme hardness and brittleness in the material.

#### 4. CONCLUSION

Deformation pattern, residual distortions, weld geometry, microstructure and microhardness properties of the joints produced with fiber laser source and tungsten inert gas welding were compared. Considering all results, the following can be said:

- It is easily possible to detect the distortion amounts with 3D laser scanner after welding. 3D laser scanners and quality control software are useful in order to control the appropriateness of the welding parameters. When compared distortion amounts of a specimen before and after welding both TIG and pulsed fiber laser welding specimens, remarkable distortion has been observed after welding. However, the distortion generated by fiber laser welding is much smaller as compared to TIG welding for a 0,8 mm thick Ti6Al4V plate. It can be easily observed that distortion amounts of Figures 3 (a,b) are higher than Figures 3(c,d). The distortions in red and dark blue regions showed in the Figure 3 are higher and in the green regions are lower.
- The heat applied during welding is absorbed by the fusion zone and the heat affected zone. However, the effect on the microstructure is less than that of the fused zone because the heat affected zone temperature is lower than the fused zone. The fused zone in the pulsed fiber laser welding also shows the presence of needle-like  $\alpha$  martensite in along with acicular within the equiaxed grains in Figure 4(f). This confirms that diffusion less transformation of to  $\alpha$  martensite has also occurred within the prior grains of FZ.
- Joining the Ti6Al4V sheet with the laser welding method is more mechanically favorable because of low heat input and high cooling rate can cause extreme hardness and brittleness in the material.

#### DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS

The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

#### REFERENCES

- [1] Akman E., Demir A., Canel E. and Sınmazçelik T., "Laser welding of Ti6Al4V titanium alloys", *J. Mater. Process. Technol.*, 209(8): 3705-3713, (2009).
- [2] Veiga C., Davim J. P. and Loureiro A. J. R., "Properties and applications of titanium alloys: A brief review", *Rev. Adv. Mater. Sci.*, 32: 14-34, (2012).
- [3] Yang X., Li S., Qi H., "Ti-6Al-4V welded joints via electron beam welding: microstructure, fatigue properties, and fracture behaviour", *Mater Sci Eng A*, 597: 225-231, (2014).
- [4] Wu M., Xin R., Wang Y., Zhou Y., Wang K., Liu Q., "Microstructure, texture and mechanical properties of commercial high-purity thick titanium plates jointed by electron beam welding", *Mater Sci Eng A*, 677: 50-57, (2016).
- [5] Lu W., Li X., Lei Y., Shi Y., "Study on the mechanical heterogeneity of electron beam welded thick TC4-DT joints", *Mater Sci Eng A*, 540: 135-141, (2012).
- [6] Karpagaraj A, Siva N, Sankaranarayananasamy K, "Some studies on mechanical properties and microstructural characterization of automated TIG welding of thin commercially pure titanium sheets", *Mater Sci Eng A*, 640: 180-189, (2015).
- [7] Lathabai S., Jarvis B.L., Barton K.J., "Comparison of keyhole and conventional gas tungsten arc welds in commercially pure titanium", *Mater Sci Eng A*, 299: 81-93, (2001).
- [8] Yunlian Q., Ju D., Quan H., Liying Z., "Electron beam welding, laser beam welding and gas tungsten arc welding of titanium sheet", *Mater Sci Eng A*, 280: 177-81, (2000).
- [9] Gao X-L, Zhang L-J, Liu J, Zhang J-X, "A comparative study of pulsed Nd:YAG laser welding and TIG welding of thin Ti6Al4V titanium alloy plate", *Mater Sci Eng A*, 559: 14-21, (2013).
- [10] Lu W., Shi Y., Lei Y., Li X., "Effect of electron beam welding on the microstructures and mechanical properties of thick TC4-DT alloy", *Mater Des*, 34: 509-515, (2012).
- [11] Short A.B., "Gas tungsten arc welding of titanium alloys: are view", *Mater Sci Technol*, 25: 309-324, (2009).
- [12] Gao X. L., Liu J., Zhang L. J. and Zhang J. X., "Effect of the overlapping factor on the microstructure and mechanical properties of pulsed Nd:YAG laser welded Ti6Al4V sheets", *Mater. Charac.*, 93: 136-149, (2014).
- [13] Cao X. and Jahazi M., "Effect of welding speed on butt joint quality of Ti-6Al-4V alloy welded using a high-power Nd:YAG laser", *Opt Laser Eng.*, 47: 1231-124, (2009).
- [14] Huang, H., Wang, J., Li, L., Ma, N., "Prediction of laser welding induced deformation in thin sheets by efficient numerical modelling", *J. Mater. Process. Technol.*, 227: 117-128, (2016).
- [15] Luo, Y., Murakawa, H., Ueda, Y., "Prediction of welding deformation and residual stress by elastic FEM based on inherent strain. Second report: deformation and residual stress under multiple thermal cycles", *J. Soc. Nav. Archit Jpn.*, 182: 783-793, (1997).
- [16] Ma, N., Huang H., Murakawa H., "Effect of jig constraint position and pitch on welding deformation", *J. Mater. Process. Technol.*, 221: 154-162, (2015).
- [17] Junaid M. et al., Junaida M., Baig M.N., Shamir M., Khand F.N., Rehmana K., Haider J., "A comparative study of pulsed laser and pulsed TIG welding of Ti-5Al-2.5Sn titanium alloy sheet", *J. Mater. Process. Technol.*, 242: 24-38, (2017).
- [18] Hensley, W. E. "Welding Stainless Steel, In Handbook of Stainless Steels", (Ed. Peckner, D., Bernstein, I. M.) *McGraw Hill Book Inc.*, New York, (1997).
- [19] Steen, W. M. "Laser Material Processing", *Springer-Verlag Ltd.*, London, 148: 207-216, (1998).
- [20] Rakesh, K., Ganesh, P., Tripathi, P., Nandedkar, R. V., Nath, A. K., "Comparison of Laser and Gas Tungsten Arc Weldments of Stabilized 17 wt % Cr Ferritic Stainless Steel, *Materials and Manufacturing Processes*", 18: 4, (2006).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



## Low concentration NO gas detection of SnO<sub>2</sub> and Zn<sub>0.50</sub>Sn<sub>0.50</sub>O sensors

### *SnO<sub>2</sub> ve Zn<sub>0.50</sub>Sn<sub>0.50</sub>O sensörlerinin düşük NO gaz konsantrasyonu algılama özellikleri*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Irmak KARADUMAN ER<sup>1\*</sup>, Tuğba ÇORLU<sup>2</sup>, Memet Ali YILDIRIM<sup>3</sup>, Aytunç ATEŞ<sup>4</sup>, Selim ACAR<sup>5</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-3786-3865

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0001-5828-207X

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0002-6175-1807

ORCID<sup>4</sup>: 0000-0002-6175-1807

ORCID<sup>5</sup>: 0000-0003-4014-7800

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Karaduman Er I., Çorlu T., Yıldırım M.A., Ateş A. ve Acar S., “SnO<sub>2</sub> ve Zn<sub>0.50</sub>Sn<sub>0.50</sub>O sensörlerinin düşük no gaz konsantrasyonu algılama özellikleri”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1189-1196, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.621181

# Low Concentration NO Gas Detection of SnO<sub>2</sub> and Zn<sub>0.50</sub>Sn<sub>0.50</sub>O Sensors

## Highlights

- ❖ The sensitivity and given response to 50 ppb NO gas
- ❖ The response to low temperature (105 °C)

## Graphical Abstract

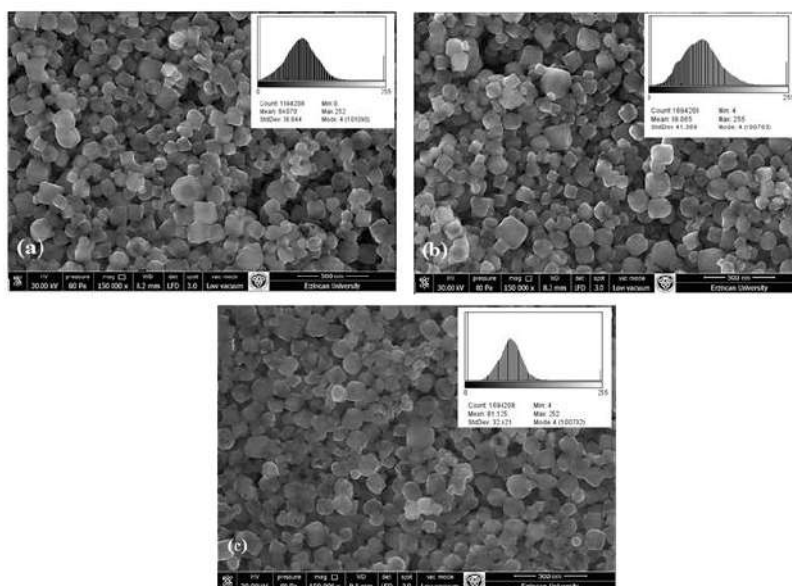


Figure. SEM Analysis (Zn<sub>0.50</sub>Sn<sub>0.50</sub>O)

## Aim

In this study, the gas sensing properties of SnO<sub>2</sub> and Zn<sub>0.50</sub>Sn<sub>0.50</sub>O samples produced by Succession Ionic Layer Adsorption and Reaction (SILAR) method with different SILAR cycles against NO gas were investigated.

## Design & Methodology

In this study, sensors were produced with the cheap, practical and fabricated Succession Ionic Layer Adsorption and Reaction (SILAR) method.

## Originality

The sensors can be seen to show high responses to a relatively low NO gas concentration, such as 50 ppb.

## Findings

For 50 ppb NO gas concentration, 3.01, 3.74% and 4.16% sensitivities were obtained for 20, 30 and 40 cycles, respectively, while for 25 ppm 18%, 20% and 34% sensitivities were obtained, respectively.

## Conclusion

The results show that Zn doping greatly increases the response sensors. Also, Zn doping introduces some defects in the sensors, and these defects make the structure unstable and more possible to react with gas molecules.

## Declaration of Ethical Standards

The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# SnO<sub>2</sub> ve Zn<sub>0.50</sub>Sn<sub>0.50</sub>O Sensörlerinin Düşük NO Gaz Konsantrasyonu Algılama Özellikleri

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Irmak KARADUMAN ER<sup>1\*</sup>, Tuğba ÇORLU<sup>2</sup>, Memet Ali YILDIRIM<sup>3</sup>, Aytunç ATEŞ<sup>4</sup>, Selim ACAR<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Department of Medical Services and Techniques, Eldivan Medical Services Vocational School, Çankırı Karatekin University, Çankırı, Turkey

<sup>2</sup>Innovative Technologies Application and Research Center, Suleyman Demirel University, Isparta, Turkey

<sup>3</sup>Department of Electric Electronic Engineering, Engineering Faculty, Erzincan Binali Yıldırım University, Erzincan, Turkey

<sup>4</sup>Department of Metallurgy and Material Engineering, Engineering and Natural Sciences Faculty, Ankara Yıldırım Beyazıt University, Ankara, Turkey

<sup>5</sup>Department of Physics, Science Faculty, Gazi University, Ankara, Turkey

(Geliş/Received : 17.09.2019 ; Kabul/Accepted : 03.12.2019)

## ÖZ

Bu çalışmada, SnO<sub>2</sub> ve Zn<sub>0.50</sub>Sn<sub>0.50</sub>O örnekleri Ardışık İyonik Katman Adsorpsiyon ve Reaksiyon yöntemiyle 3 farklı döngüde üretildi ve NO gaz algılama özellikleri incelendi. Üretilen numunenin farklı sıcaklıklarda (35°C-135°C) ve farklı gaz konsantrasyonlarında (50 ppb-25 ppm) elektriksel karakterizasyonu yapıldı. Çalışma sıcaklığı 105 °C olarak bulundu. Sensörler 50 ppb NO gazına karşı kabul edilebilir düzeyde duyarlılık sergiledi. Zn<sub>0.50</sub>Sn<sub>0.50</sub>O sensörü, 105 °C çalışma sıcaklığında SnO<sub>2</sub> sensörüne kıyasla daha yüksek algılama performansı gösterdi. 20, 30 ve 40 döngü SnO<sub>2</sub> sensörlerinin 50 ppb NO gaz konsantrasyonu için gösterdiği duyarlılıklar sırasıyla % 1.74,% 2.15 ve % 3.37 olarak hesaplandı. Öte yandan, Zn<sub>0.50</sub>Sn<sub>0.50</sub>O sensörlerinin 50 ppb NO gaz konsantrasyonu için gösterdiği duyarlılıklar sırasıyla % 3.01,% 3.74 ve % 4.16 olarak elde edilmiştir. Ölçüm sonuçları, numunelerin gaz algılama özelliklerinin katılma ve üretim döngüsüne bağlı olarak değiştiğini gösterdi.

**Anahtar Kelimeler:** Gaz algılama, SILAR metot, NO gaz.

## Low Concentration NO Gas Detection Of SnO<sub>2</sub> And Zn<sub>0.50</sub>Sn<sub>0.50</sub>O Sensors

### ABSTRACT

In this study, the gas sensing properties of SnO<sub>2</sub> and Zn<sub>0.50</sub>Sn<sub>0.50</sub>O samples produced by Succession Ionic Layer Adsorption and Reaction (SILAR) method with different SILAR cycles against NO gas were investigated. Electrical characterization of the produced sample at different temperatures (35 °C-135 °C) and different gas concentrations (50 ppb-25 ppm) were performed. The working temperature was found at 105 °C. The sensors were proved to have acceptable responses towards 50 ppb NO gas. Zn<sub>0.50</sub>Sn<sub>0.50</sub>O sensor exhibited improved sensing performance at working temperature of 105 °C compared to SnO<sub>2</sub> sensor.. The responses of SnO<sub>2</sub> sensors for the 50 ppb NO gas concentration, sensitivities of 1.74%, 2.15% and 3.37% were obtained for 20, 30 and 40 cycles, respectively. On the other hand, the responses of Zn<sub>0.50</sub>Sn<sub>0.50</sub>O sensors for the 50 ppb NO gas concentration sensitivities of 3.01%, 3.74% and 4.16% were obtained for 20, 30 and 40 cycles, respectively. The measurement results showed that the sensitivity of the sensors changed depending on the doping and producing cycles.

**Keywords:** Gas sensing, SILAR method, NO gas.

### 1. INTRODUCTION

The monitoring and environmental control of pollutants in the atmosphere has increased recently due to their harmful effects on human health and global warming [1]. Among various pollutants, nitric oxide is color less, readily diffusible, highly reactive and chemically unstable free radical gas [2]. Nitric oxide (NO) as a biological mediator plays an important role in a variety of biological processes and is a fundamental component in the fields of biochemistry, physiology, immunology and neuroscience [3]. It is well-known today that NO acts in the human body as signalling molecule of key

importance in the nervous system as a weapon against infections, as a regulator of blood pressure and as a gatekeeper of blood flow to different organs. It is also established that NO concentration in the exhaled air increases in inflammatory conditions of the airways. Especially, sensitive and selective detection of NO in human breath plays an important role in the diagnosis of asthma. However, obtaining a reliable response to ppb levels of NO is still great challenges [4].

Designing better sensors which are faster, more sensitive and selective is a continuing need to satisfy the standard in various applications [5]. The development of gas sensors is currently being carried out intensively since environmental pollution and security in the world and

\* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : irmakkaradumaner@karatekin.edu.tr

domestic ambient atmospheres represent acute problems with a high social impact [6].

Among them, Metal-oxide semiconductors (MOS) gas sensors which monitor and detect the explosive, inflammable or toxic gases in the environment are investigated, extensively. Development of gas sensors with high surface to volume ratio, porous surface, different production methods, different doping materials, the use of different metal oxide surfaces are shown positive signs for the detection of pollutant gases. In as much as formation of (i) mixture in atomic level, (ii) dopant materials and (iii) porosity- surface area with desirable size and surface morphology are significant issues about performance of devices, especially, in fabrication of gas sensors [7].

Among them, SnO<sub>2</sub> based sensors are the most preferred materials for gas sensor applications due to their ability to easily detect various gases which cause environmental pollution even at low concentrations and have the ability to respond quickly and have high gas sensitivity [8]. Mixing of suitable dopant in crystal lattice modify the defect chemistry and microstructure of the system which further results in a change of its properties [9]. The addition of cationic dopants produces high densification and reduced particle size [10]. Researchers have shown that the doping increased the sensor response of MOS materials. Guan et al. have reported that doping the SnO<sub>2</sub> sensors with Zn exhibited the high responses which was about 3.2 times higher compared to the pure SnO<sub>2</sub> [11]. Gupta et al. have shown that Zn-doping has been found to increase the sensitivity of oxygen than the pure SnO<sub>2</sub> [12]. Singh et al. have studied that the doping concentration of zinc (x=0.20%) exhibited the maximum response within the concentration of 100 ppm of each gases compared to the SnO<sub>2</sub> [13].

The gas sensitivity, gas selectivity, the ability to respond in the gas medium and the working temperature range of the sensor are generally the most critical features of the gas sensors. These critical sensor features need to be checked for the production of high-performance gas sensors. For this, the material structure-property relationship should be discussed and it should be decided which material properties affect these critical gas sensor properties. So, the selection of economic and effective production techniques is required.

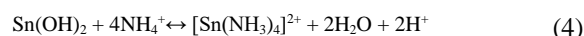
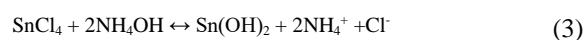
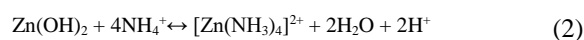
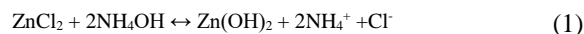
One of the most economic and effective production technique for producing thin films is Succession Ionic Layer Adsorption and Reaction (SILAR) method. SILAR is an aqueous solution method that involves sequential reactions at the substrate-solution interface. It is a simple method that allows thin films to be formed by immersing the base material in aqueous solutions containing ions of each species in a certain order and precipitating on the base material. As it is a low temperature process, oxidation and corrosion of the base material is prevented. From this point of view, SILAR method includes several advantages such as production of well-defined oxides with excellent homogeneity and incorporation of dopant

materials with extreme purity for fabrication of gas sensor components [14]. The SILAR method has many advantages: (i) to add the film in any proportion to any element, it is enough to include it only in certain forms of the cationic or anionic solution, and this is a very simple way. (ii) SILAR does not require a high-quality target or substrate, or vacuum at any stage, which provides great convenience and low cost compared to other thin-film growth techniques. (iii) The thickness of the thin film to be produced can be easily controlled by varying the SILAR cycle number. (iv) with room temperature operations, the film can be enlarged [15]. In addition, it is useful for deposition in a cheap, simple and wide area compared to other methods. In present work, the SnO<sub>2</sub> and Zn<sub>0.50</sub>Sn<sub>0.50</sub>O thin films have been produced by SILAR method and NO gas sensing properties have been studied.

## 2. EXPERIMENTAL SETUP

The SnO<sub>2</sub> and Zn<sub>0.50</sub>Sn<sub>0.50</sub>O samples were produced by SILAR method. Before producing the samples, the metal contacts for the samples were generated using the thermal evaporation system on the glass substrates. For interdigital contact, high purity (99.999%) gold (Au) was placed on the tungsten filament in the thermal evaporation system. SILAR is an aqueous solution technique involving a series of sequential reactions between the substrate and the solution, in which the material used as the substrate is immersed in aqueous solutions containing ions of each type of compound semiconductor to be grown [15].

When the solutions of ZnCl<sub>2</sub>, SnCl<sub>4</sub> and NH<sub>3</sub> are mixed, reactions occur and a complex of [Zn(NH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>]<sup>2+</sup> and ([Sn(NH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>]<sup>4+</sup>) (pH≅10) is formed. Substrate material was suspended in [Zn(NH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>]<sup>2+</sup> and ([Sn(NH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>]<sup>4+</sup>) solution for 20 seconds and the thin film layer was coated on the substrate (given in Eqs. (1)- (4)). The substrate was removed from the solution and waited in distilled water at 90 °C for 7 seconds. Substrates were kept in air for 60 seconds. Thereafter, it was left in distilled water at room temperature for 30 seconds. A SILAR cycle was thus completed and Zn<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>O films were grown on substrates. ('x' is defined as doping ratio for producing samples). Possible reactions were given as follows;

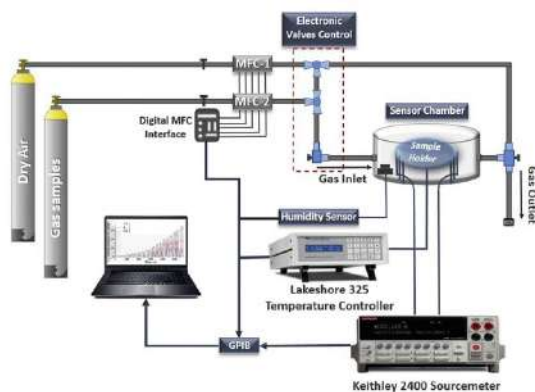


Throughout our previous works, samples were produced in various cycles and SILAR cycles were optimized [14-17]. It has been determined in our previous studies that the most suitable cycles are 20, 30 and 40. According to our previous studies; the samples were prepared for 20, 30 and 40 SILAR cycles.



The thickness of thin films was measured using a stylus ellipsometer system (J. A. Woolam Co, Inc., V-VASE). The thickness of Zn<sub>0.50</sub>Sn<sub>0.50</sub>O films were measured 70 nm, 79 nm, 89 nm for 20, 30 and 40 cycles and SnO<sub>2</sub> were measured 75 nm, 84 nm, 92 nm for 20, 30 and 40 cycle, respectively. For structural, morphological, compositional and optical studies, the Panalytical empyrean X-Ray Diffractometer (using Cu K $\alpha$   $\lambda=1.5405\text{\AA}$  radiation) and the FEI Quanta FEG 450 model Scanning Electron Microscope (SEM) were used, respectively. The gas-sensing performance of the sensors has been carried out a computer-controlled measurement system [14-15].

The gas sensor was connected into the sensing system according to the test circuit and the changes of sensor resistance were recorded in real time [16]. The gas sensor system includes computer controlled mass flow controllers (MKS Series), A Lakeshore 325 temperature controller, Keithley 2400 sourcemeter, the data was collected in real time using the data acquisition hardware and software of the same company. Figure 1 shows the gas sensing measurement system.

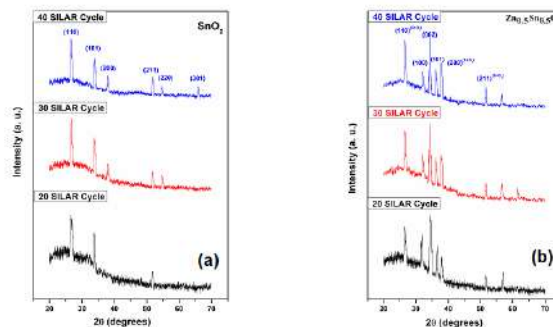


**Figure 1.** The gas sensing measurement system [17].

### 3. RESULTS AND DISCUSSIONS

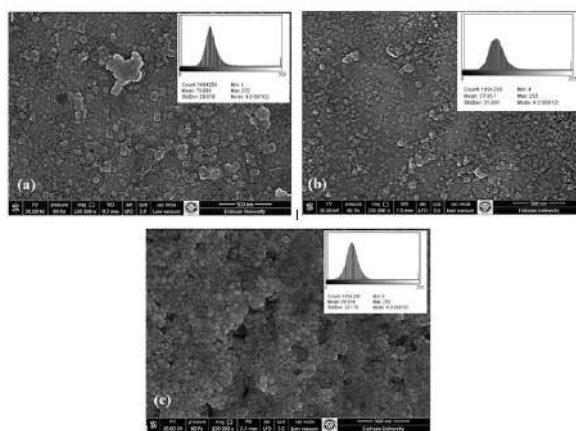
Fig. 2 shows the XRD patterns of thin films. As seen in Fig. 2, all the thin films have polycrystalline nature and well-defined peaks belonging to ZnO and SnO<sub>2</sub>. The diffractogram of the pure ZnO reveals that all the peaks are in good agreement with the JCPDS data belonging to hexagonal ZnO structure (Card No. 36-1451). It was determined that the quality of the ZnO thin films and the crystallization were influenced by rinsing period. The peaks belonging to ZnO thin film decreased and began to disappear with increasing Sn concentration [17]. The intensities of the characteristic peaks of ZnO the diffractogram of the pure SnO<sub>2</sub> reveals that all the peaks are in good agreement with the JCPDS data belonging to tetragonal phase. (JPCDS Card No:41-1445) [17]. The films with compositions in the range of  $0 < x < 1$  have both hexagonal wurtzite and tetragonal crystal phases. The crystal quality of the thin films deteriorated with increasing Sn concentration [18]. This degradation may be connected to the changing in the atomic environment due to the external doping (Sn) of ZnO thin film. Besides,

Sn doping concentrations were changed the peak positions smoothly bigger refraction angles. It has been related to the unit cell size changes in the structures with the substitution of Sn<sup>4+</sup> for Zn<sup>2+</sup>, because the ionic radius of Zn<sup>2+</sup> (0.74 Å) and Sn<sup>4+</sup> (0.69 Å) are different values. Also, the Zn(OH)<sub>2</sub> phase was not detected by XRD. This suggests that Zn(OH)<sub>2</sub> might exist inside the thin film as an amorphous phase.

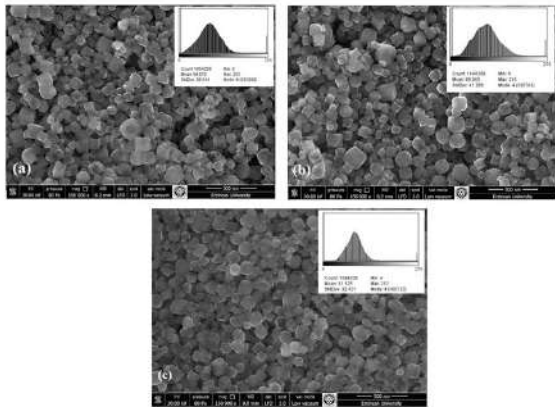


**Figure 2.** The XRD analysis of SnO<sub>2</sub> (a) and Zn<sub>0.50</sub>Sn<sub>0.50</sub>O (b) samples

Figure 3 depicts the SEM images of SnO<sub>2</sub> samples, 20 cycle (a), 30 cycle (b) and 40 cycle (c). It was observed that a smooth film structure homogeneously spreading to the surface was observed for all cycles. Figure 4 depicts the SEM images of Zn<sub>0.50</sub>Sn<sub>0.50</sub>O samples, 20 cycle (a), 30 cycle (b) and 40 cycle (c). For all cycles, cubic-like structures were observed in Zn<sub>0.50</sub>Sn<sub>0.50</sub>O samples with dopant effect [19]. 40 cycle Zn<sub>0.50</sub>Sn<sub>0.50</sub>O sample has more porous sphere and localized cubic-like structures compared to other ones. It can be also seen on the SEM analysis; according to particle distribution analysis; Figure 3 (a); 76.886 , Figure 3 (b); 77.857 , Figure 3 (c); 68.654 and Figure 4 (a); 84.070 , Figure 4 (b); 89.065 , Figure 4 (c); 81.125 values are calculated with image j programme.

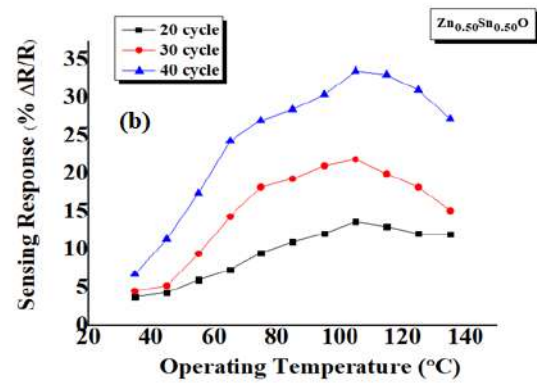
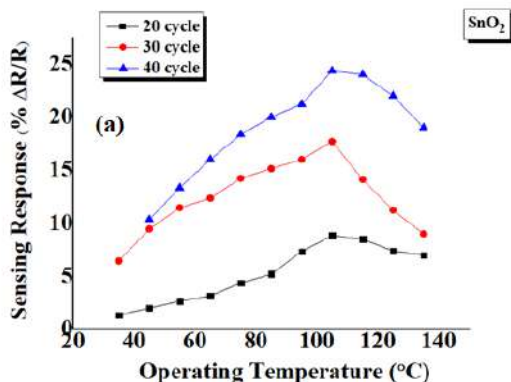


**Figure 3.** The SEM images of SnO<sub>2</sub> samples, 20 cycle (a), 30 cycle (b) and 40 cycle (c)



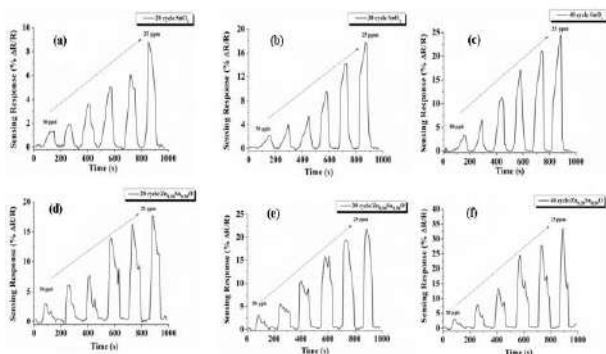
**Figure 4.** The SEM images of  $Zn_{0.50}Sn_{0.50}O$  samples, 20 cycle (a), 30 cycle (b) and 40 cycle (c)

The working temperature of a gas sensor is one of the main factors for the gas detection of the sensors. Increasing temperature is necessary to acceleration surface reactions and a considerable sensitivity. However, high temperatures can deteriorate the material structure and affect the life of the sensor. For this reason, it is necessary to determine the elevated working temperatures for the sensor materials. Figure 5 shows the the responses of  $SnO_2$  and  $Zn_{0.50}Sn_{0.50}O$  samples for 20,30 and 40 cycles as a function of working temperature for 25 ppm NO gas. As seen in the graphs, there was an increase in the responses as the temperature increased. The working temperature was found at 105 °C. After this temperature, the responses began to decrease. Actually, the temperature (thermal energy) at which the gas response is maximum is necessary to arouse the material in reaction. However, the adsorbed oxygen began to desorb from the sensing surface and with this the response decreased at higher working temperature [20]. The increase in film thickness (SILAR cycle) can be attributed to the improvement in crystal structure, morphological changes, the decrease in the forbidden energy range, changes in particle size and atomic distances. In addition, some defect levels that occur during the amplification process are combined with the conductivity band as the film thickness increases, thus reducing the forbidden energy range.



**Figure 5.** The responses of  $SnO_2$  (a) and  $Zn_{0.50}Sn_{0.50}O$  (b) samples for 20,30 and 40 cycles as a function of working temperature for 25 ppm NO gas concentrations

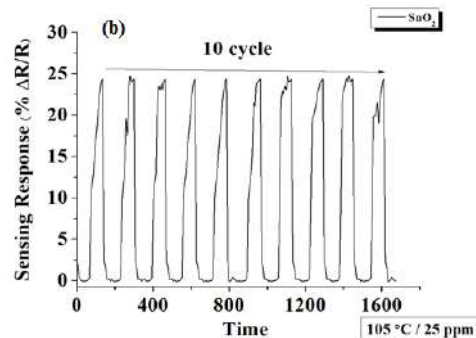
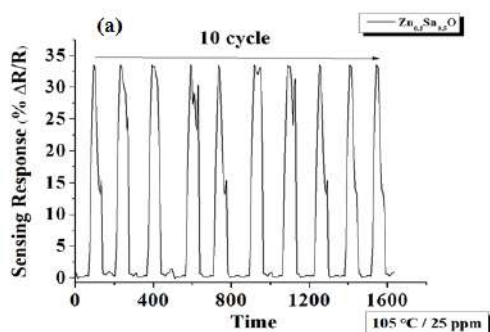
Figure 6 shows the responses of  $SnO_2$  and  $Zn_{0.50}Sn_{0.50}O$  samples as a function of gas concentrations from 50 ppb to 25 ppm at 105 °C. As seen from the fig 6 (a), (b) and (c) the response of 40 cycle of  $SnO_2$  was obtained 24%, while 20 and 30 cycles were obtained 9% and 18% , respectively. Also, it is determined that the sensors produced can select each gas concentration separately. For the 50 ppb NO gas concentration, sensitivities of 1.74%, 2.15% and 3.37% were obtained for 20, 30 and 40 cycles, respectively. As shown in the graph, NO gas was adsorbed on the surface and caused an increase in sensitivity. When exposed to dry air, the response began to baseline value. Figure 6 (d), (e) and (f), the response of 25 ppm NO gas for  $Zn_{0.50}Sn_{0.50}O$  sensors was obtained 18%, 20% and 34%, were obtained for 20,30 and 40 cycles, respectively. It can be noticed that the samples exhibited high responses to very-low NO gas concentration (50 ppb). For the 50 ppb NO gas concentration, sensitivities of 3.01%, 3.74% and 4.16% were obtained for 20, 30 and 40 cycles, respectively. The above results show that Zn doping greatly increases the response sensors. The adsorption and desorption of Zn atoms with  $O_2$  gases are more quickly than that of Sn atoms. Also, Zn doping introduces some defects in the sensors, and these defects make the structure unstable and more possible to react with gas molecules [21]. In addition the working temperature of the sensors, it was reported in the literature that the thickness of the produced sensors had an effect on the sensor parameters [22-24].



**Figure 6.** The responses of SnO<sub>2</sub> (a,b,c) and Zn<sub>0.50</sub>Sn<sub>0.50</sub>O (d,e,f) samples as a function of gas concentrations at 105 °C.

An ideal sensor should have a long life with high sensitivity, dynamic sensing range, selectivity stability and fast response time. All these parameters are used to characterize the sensor. However, all these parameters are not needed depending on the application areas and the usage areas of the sensors. Usually, some of these features are selected according to the application area and their improvement is emphasized. One of the main challenges to the metal-oxide gas sensors is high selectivity [1]. The results show that the sensors show different sensitivities to each gas concentration. Sensitivity increases as gas concentration increases. The sensor responses exhibit a linear increase.

Reproducibility is a crucial parameter for real-time gas sensors as it surely affects the sustainability and reliability of the sensor [25]. Hence, Fig 7. depicts the reproducibility of Zn<sub>0.50</sub>Sn<sub>0.50</sub>O (a) and SnO<sub>2</sub> (b) samples at 105 °C and they were displayed quite stable response after ten repeatable cycles (Fig. 7(a) and (b)). Therefore, Reproducibility tests clearly indicated that our sample is a quite stable with a little degradation.



**Figure 7.** The reproducibility of Zn<sub>0.50</sub>Sn<sub>0.50</sub>O (a) and SnO<sub>2</sub> (b) samples at 105 °C.

The gas sensing mechanism consists of chemical reactions between chemically absorbed oxygen and target gases. As a result of these reactions, resistance change occurs in the sensor. Firstly, dry air exposed to the sensing surface and oxygen atoms adsorbed. The adsorbed oxygen species capture electrons from the conduction band, creating a depletion region in the samples. The electron transfer from the conduction band to the adsorbed oxygen species, decreasing the electron concentration of the surface [26]. After that, when the surface is exposed to NO gas, they react with the chemisorbed oxygen. Therefore, they capture the electrons from the sensing surface, enlarging the depletion region. A rapid increase in the resistance of the film with time up to stabilization was observed [25]. Possible reactions were given below as follow [27];



The chemical nature of oxygen bonding states which can act as active sites for NO molecule absorption, more active sites are available for NO gas. The adsorption of NO molecules will be promoted by the increased surface states, as results oxidizing molecules needs to be captured the electrons from surface. This enhanced ionosorption due to surface states result in a decreased activation energy. The obtained NO gas-sensing results were compared with the literature and tabulated in Table 1. It is confirmed that our samples has an acceptable response to very-low NO gas concentration.



**Table 1.** NO gas-sensing results comparison with previous reports

Materials	Producing Method	Gas Concentration	Sensing Response	Operating Temperature	References
ZnO nanorod thin films	Dip coating	70 ppm	90	300 °C	[28]
ZnGa <sub>2</sub> O <sub>4</sub> thin films	metalorganic chemical vapor deposition	6.25ppm	22.21	300 °C	[29]
Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> powder	mixed with an organic dispersant for obtaining a paste	1 ppm	1.2	200 °C	[30]
WO <sub>3</sub> nanoparticles	an ICP-assisted hot wire system	350 ppb	15.93	150 °C	[31]
ZnO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> TiO <sub>2</sub> /ZnO film /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	screen-printing	10 ppm	50 / 150	320 °C	[32]
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZnO	The chemical bath precipitation	10 ppm	8	100 °C	[33]
Zn <sub>0.50</sub> Sn <sub>0.50</sub> O /SnO <sub>2</sub>	SILAR	50 ppb	3.37	105 °C	In this work

With the doping of Zn, Zn atoms in substitutional Sn positions (Zn<sub>Sn</sub>) favor the formation of V<sub>O</sub> due to charge compensation [21]. It is probably because Zn atoms doped in SnO<sub>2</sub> sensor are more active than Sn atoms. The adsorption and desorption of Zn atoms with O<sub>2</sub> gases are more quickly than that of Sn atoms. Also, the surface area has an important influence on the gas sensing performance. Finally, Zn<sub>0.50</sub>Sn<sub>0.50</sub>O exhibited the higher responses compared to the pure SnO<sub>2</sub>.

#### 4. CONCLUSION

In this work, SnO<sub>2</sub> and Zn<sub>0.50</sub>Sn<sub>0.50</sub>O sensors have been grown by SILAR method. The working temperature was found at 105 °C. After this temperature, the responses began to decrease. The responses of SnO<sub>2</sub> and Zn<sub>0.50</sub>Sn<sub>0.50</sub>O samples as a function of gas concentrations from 50 ppb to 25 ppm at 105°C. The effect of doping material is shown that the responses improved with increasing doping concentrations. The effect of film thickness, as well as the sensing temperature, on the sensor characteristics of sensing films, were reported. The response of 40 cycle of SnO<sub>2</sub> was obtained 24%, while 20 and 30 cycles were obtained 9% and 18% , respectively. Also, it is determined that the sensors produced can select each gas concentration separately. For the 50 ppb NO gas concentration, sensitivities of 1.74%, 2.15% and 3.37% were obtained for 20, 30 and 40 cycles, respectively. The results show that Zn doping greatly increases the response sensors. The adsorption and desorption of Zn atoms with O<sub>2</sub> gases are more quickly than that of Sn atoms. Also, Zn doping introduces some defects in the sensors, and these defects make the structure unstable and more possible to react with gas molecules. Therefore, the response of 25 ppm NO gas for Zn<sub>0.50</sub>Sn<sub>0.50</sub>O sensors was obtained 18%, 20% and 34%, were obtained for 20,30 and 40 cycles, respectively. For the 50 ppb NO gas concentration, sensitivities of 3.01%, 3.74% and 4.16% were obtained for 20, 30 and 40 cycles, respectively. This improvement in response can be

explained by the doping of sensors. On the other hand, the substantial improvement in the response of sensors was attributed to the morphology of the sensors and the SILAR cycle. The film thickness has affected the responses of the sensors, increasing with increasing the film thicknesses. As a result, our study may ensure basic and new information for investigations on alternative gas sensor materials.

#### ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by TUBITAK with Project No. 115M658 and Gazi University Scientific Research Fund Project No. 05/2016-21.

#### DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS

The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

#### REFERENCES

- [1] Onofre Y.J., Catto A.C., Bernardini S., Fiorido T., Aguir K., Longo E., Mastelaro V.R., da Silva L.F. and de Godoy M.P.F., "Highly selective ozone gas sensor based on nanocrystalline Zn<sub>0.95</sub>Co<sub>0.05</sub>O thin film obtained via spray pyrolysis technique", *Appl. Surf. Sci.*, 478: 347–354, (2019).
- [2] Shah C., Dixit R. and Anand A.K., "Nitric Oxide In Health And Diseases", *Global Journal of Medicine and Public Health*, GJMEDPH, 1(1): 73-78, (2012).
- [3] Khazan M. and Hdayati M., "The Role of Nitric Oxide in Health and Diseases", *Scimetr.* 3(1): 20987, (2015).
- [4] Rei Vilar M., El-Beghdadi J., Debontridder F., Naaman A. Arbel R., Ferraria A.M. and Botelho Do Rego A.M., "Development of nitric oxide sensor for asthma attack prevention", *Materials Science and Engineering C* 26: 253 – 259, (2006).
- [5] Gao H., Yu Q., Chen K., Sun P., Liu F., Yan X., Liu F., Lu G., Ultrasensitive gas sensor based on hollow tungsten trioxide-nickel oxide (WO<sub>3</sub>-NiO) nanoflowers for fast and selective xylene detection, *J. Colloid Interface Sci.*, 535: 458-468, (2019).
- [6] Samerjai T., Channei D., Khanta C., Inyawilert K., Liewhiran C., Wisitsoraat A., Phokharatkul D. and Phanichphant S., "Flame-spray-made Zn-In-O alloyed nanoparticles for NO<sub>2</sub> gas sensing", *J Alloy. Compd.*, 680, 711-721, (2016).
- [7] Bai S., Tong W., Tian Y., Fu H., Zhao Y., Shu X., Luo R., Li D. and Chen A., "Facile synthesis of Pd-doped ZnSnO<sub>3</sub> hierarchical microspheres for enhancing sensing properties of formaldehyde", *J. Mater. Sci.*, 54(3): 2025–2036, (2019).

- [8] Karaduman I., Barin Ö., Yıldız D.E. and Acar S., "Atomik Tabaka Biriktirme Metodu ile Üretilen HfO<sub>2</sub> Tabanlı Sensörlerin Hidrojen Gaz Algılama Özelliklerinin İncelenmesi", *Journal of Polytechnic*, 19(3): 223-229, (2016).
- [9] Kumar V., Singh K., Sharma J., Kumar A., Vij A. and Thakur A., "Zn-doped SnO<sub>2</sub> nanostructures: structural, morphological and spectroscopic properties", *J. Mater. Sci.: Mater. Elektron*, 28(24): 18849–18856, (2017).
- [10] Saadeddin I., Hilal H.S., Pecquenard B., Marcus J., Mansouri A., Labrugere C., Subramanian M.A. and Campet G., "Simultaneous doping of Zn and Sb in SnO<sub>2</sub> ceramics: Enhancement of electrical conductivity", *Solid State Sci.*, 8(1): 7-13, (2006).
- [11] Guan Y., Wang D., Zhou X., Sun P., Wang H., Ma J. and Lu G., "Hydrothermal preparation and gas sensing properties of Zn-doped SnO<sub>2</sub> hierarchical architectures", *Sens. Actuators B*, 191: 45-52, (2014).
- [12] Gupta P., Sharma S.K., A study of oxygen gas sensing in Zn-doped SnO<sub>2</sub> nanostructures, *Mater. Res. Express*, 4: 065010, (2017).
- [13] Singh D., Singh Kundu V. and Maan A. S., "Structural, morphological and gas sensing study of zinc doped tin oxide nanoparticles synthesized via hydrothermal technique", *J. Mol. Struct.*, 1115: 250-257, (2016).
- [14] Galioglu S., Karaduman I., Çorlu T., Akata B., Yıldırım M. A., Ateş A. and Acar S., "Zeolite A coated Zn<sub>1-x</sub>Cu<sub>x</sub>O MOS sensors for NO gas detection", *J. Mater. Sci.: Mater. Elektron*, 29(2): 1356-1368, (2018).
- [15] Çorlu T., Karaduman I., Galioglu S., Akata B., Yıldırım M.A., Ates A. and Acar S., "Low level NO gas sensing properties of Cu doped ZnO thin films prepared by SILAR method", *Mater. Lett.*, 212: 292–295 (2018).
- [16] Soltabayev B., Karaduman Er I., Surel H., Coşkun A, Yıldırım M.A., Ateş A. and Acar S., "Influence of Ni doping on the nitric oxide gas sensing properties of Zn<sub>1-x</sub>Ni<sub>x</sub>O thin films synthesized by silar method", *Mater. Res. Express* 6: 086419, (2019).
- [17] Karaduman Er I., Çağırtekin A.O., Çorlu T., Yıldırım M.A., Ateş A. and Acar S., "Low-level NO gas sensing properties of Zn<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>O nanostructure sensors under UV light irradiation at room temperature", *Bull. Mater. Sci.*, 42(32), (2019).
- [18] Vermaa M., Dwivedib P. K. and Das B., "Structure–property correlation of pure and Sn-doped ZnO nanocrystalline materials prepared by co-precipitation", *Journal of Experimental Nanoscience*, 10(6): 438–448, (2015).
- [19] Zhang Z., Yi J.B., Ding J., Wong L.M., Seng H.L. and Wang S.J. "Cu-Doped ZnO Nanoneedles and Nanonails: Morphological Evolution and Physical Properties", *J. Phys. Chem. C*, 112: 9579, (2008).
- [20] Patil A., Dıghavkar C., and Borse R., "Al Doped ZnO Thick Films As CO<sub>2</sub> Gas Sensors", *J. Optoelectron Adv. M.*, 13(10): 1331-1337, (2011).
- [21] Zhou Q., Chen W., Xu L., Kumar R., Gui Y., Zhao Z., Tang C. and Zhu S., "Highly sensitive carbon monoxide (CO) gas sensors based on Ni and Zn doped SnO<sub>2</sub> nanomaterials", *Ceram. Int.* 44: 4392–4399, (2018).
- [22] Zheng L., Xu T., Li G. and Q Yin, "Influence of thickness on oxygen-sensing properties of TiO<sub>2</sub> thin films on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>," *J. Appl. Phys., Part 1* 41: 4655-4658, (2002).
- [23] Hossein-Babari F. and Orvatinia M., "Analysis of thickness dependence of the sensitivity in thin film resistive gas sensors", *Sens. Actuators B* 89: 256-261, (2003).
- [24] Christoulakis S., Suche M., Koudoumas E., Katharakis M., Katsarakis N. and Kiriakidis G., "Thickness influence on surface morphology and ozone sensing properties of nanostructured ZnO transparent thin films grown by PLD", *Appl. Surf. Sci.*, 252: 5351-5354, (2006).
- [25] Çorlu T., Karaduman I., Yıldırım M.A., Ateş A. and Acar S., "Effect of Doping Materials on the Low-Level NO Gas Sensing Properties of ZnO Thin Films", *J. Electron. Mater.*, 46(7): 3995–4002, (2017).
- [26] Najafi V., Zolghadr S. and Kimiagar S., "Remarkable reproducibility and significant sensitivity of ZnO nanoparticles covered by Chromium (III) oxide as a hydrogen sulfide gas sensor", *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* 182: 249–256, (2019).
- [27] Chang B.-Y., Wang C.-Y., Lai H.-F., Wu R.-J. and Chavali M., "Evaluation of Pt/In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–WO<sub>3</sub> nano powder ultra-trace level NO gas sensor", *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 45: 1056–1064, (2014).
- [28] Yulianto B., Ramadhani M.F. and Wieno H. Nugraha. "Fabrications of NO Gas Sensors Based on ZnO Nanorod Thin Films", *International Journal of Materials Science and Engineering* 2(1): 1, (2014)
- [29] Wu M.-R., Li W.-Z., Tung C.-Y., Huang C.-Y., Chiang Y.-H., Liu P.-L. and Horng R.-H., "NO gas sensor based on ZnGa<sub>2</sub>O<sub>4</sub> epilayer grown by metalorganic chemical vapor deposition", *Scientific Reports* 9: 7459, (2019).

- [30] Akamatsu T., Itoh T., Izu N. and Shin W., “NO and NO<sub>2</sub> Sensing Properties of WO<sub>3</sub> and Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Based Gas Sensors”, *Sensors* 13: 12467-12481, (2013)
- [31] Lin, C.-H., Chang, S.-J., and Hsueh, T.-J., “A WO<sub>3</sub> Nanoparticles NO Gas Sensor Prepared by Hot-Wire CVD”. *IEEE Electron Device Letters*, 38(2): 266–269, (2017).
- [32] Lin, C.-Y., Chen, J.-G., Feng, W.-Y., Lin, C.-W., Huang, J.-W., Tunney, J. J., and Ho, K.-C. “Using a TiO<sub>2</sub>/ZnO double-layer film for improving the sensing performance of ZnO based NO gas sensor”. *Sens. Actuators B*, 157(2): 361–367, (2011).
- [33] Fang Y.Y., Lin C.W., Tunney J.J., and Ho K.C.. “Fabrication of NO<sub>x</sub> gas sensors using In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>– ZnO composite films”. *Sens Actuators B*, 146: 28–34. (2010).





POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Quadrotor itme ve tork katsayılarının optimizasyonu ve Matlab/Simulink ile simülasyonu

## *Optimization of Quadrotor's thrust and torque coefficients and simulation with Matlab/Simulink*

Yazar(lar) (Author(s)): Ömer BAYRAKTAR<sup>1</sup>, Abdulmecit GÜLDAŞ<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-9858-5363

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-1865-2272

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Bayraktar Ö. ve Gültaş A. "Quadrotor itme ve tork katsayılarının optimizasyonu ve Matlab/Simulink ile simülasyonu", *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1197-1204, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.636950

# Quadrotor İtme ve Tork Katsayılarının Optimizasyonu ve Matlab/Simulink İle Simülasyonu

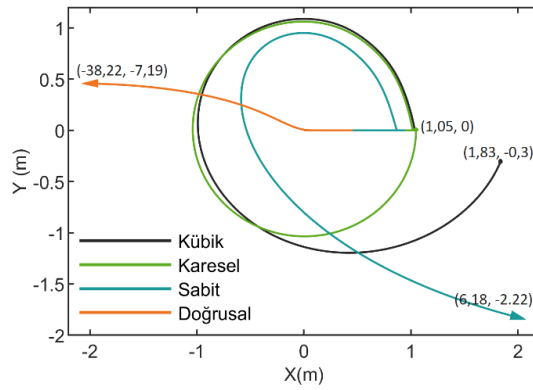
## Optimization of Quadrotor's Thrust and Torque Coefficients and Simulation with Matlab/Simulink

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ İtme ve tork katsayılarının optimizasyonu. / Optimization of thrust and torque coefficients.
- ❖ Quadrotorun dinamik modellenmesi ve simülasyonu. / Dynamic modeling and simulation of quadrotor.
- ❖ Yörünge takibindeki hatalar. / Trajectory tracking errors.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

İtme ve tork katsayılarının optimizasyonunun yörünge takibinde açıkça ortaya çıkmaktadır. / The importance of optimizing the thrust and torque coefficients clearly revealed in trajectory tracking.



**Şekil.** Regresyon yöntemlerine göre düzeltilmiş yörünge takibi. / **Figure.** Corrected trajectory tracking according to regression methods.

### Amaç (Aim)

İnsansız hava araçlarının yörünge takibindeki hataların en aza indirilmesi. / Minimization of errors in trajectory tracking of unmanned aerial vehicles.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

İtme ve tork katsayıları deneysel olarak ölçülerek regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen denklemler Matlab/Simulink yazılımı ile yörünge takibine göre incelenmiştir. / Regression analyzes were carried out by measuring the thrust and torque coefficients experimentally. The equations were examined according to trajectory tracking with Matlab/Simulink software.

### Özgünlük (Originality)

Literatürde itme ve tork kuvvetlerinin elde edilmesinde yaygın olarak kullanılan formülün yeterliliği araştırılmıştır. / Widely used in obtaining thrust and torque forces commonly used in the literature were investigated.

### Bulgular (Findings)

Yörünge takibindeki hata miktarı regresyon denklemine bağlı olarak 38,22m ile 0,05m arasında değişmektedir. / The amount of error in trajectory tracking varies between 38.22m and 0.05m depending on the regression equation.

### Sonuç (Conclusion)

Kübik ve Karesel itme ve tork kuvveti denklemleri yörünge takibinde diğer yöntemlere göre daha iyi sonuç vermiştir. / The Cubic and Quadratic thrust and torque forces equations gave better results in trajectory tracking.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Quadrotor İtme ve Tork Katsayılarının Optimizasyonu ve Matlab/Simulink ile Simülasyonu

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Ömer BAYRAKTAR\*, Abdulmecit GÜLDAŞ

Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 23.10.2019 ; Kabul/Accepted : 22.11.2019)

## ÖZ

Bu çalışmada, quadrotorların dinamiğini büyük ölçüde belirleyen itme ve tork kuvvetleri deneysel olarak ölçülmüş ve quadrotorun simülasyon modeli üzerinden optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Motor devrinin kontrolünde elektronik hız kontrol kartı kullanılmış ve darbe genişlik modülasyon (DGM) metodu ile 1100-2000 frekans aralığında kontrol edilmiştir. Motor ve pervane çiftinin itme kuvveti, tork değeri ve devir sayısı ölçümleri deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Bu deneysel verilerin regresyon analizleri motor devrine bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Regresyon analizleri doğrusal, karesel, kübik ve sabit katsayılı metodlar ile gerçekleştirilmiştir. Regresyon ile elde edilen denklemler Matlab/Simulink'te oluşturulan quadrotor modeline uygulanmış ve quadrotorun dairesel yörünge takibindeki hatalar kıyaslanmıştır. Momentum teoreminden elde edilen itme kuvveti ve tork değerlerinin 2 metrelik yörünge takibinde yüksek hata miktarına sahip olduğu gözlenmiştir. İtme kuvvetinin belirlenmesinde karesel regresyon yönteminin kullanılması ve tork değerinin belirlenmesinde kübik regresyon yönteminin kullanılması, yörünge takibindeki hata miktarını en aza indirdiği gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** İHA, quadrotor, PID kontrol, uçuş dinamiği.

## Optimization of Quadrotor's Thrust and Torque Coefficients and Simulation with Matlab/Simulink

### ABSTRACT

In this study, the thrust forces and torque values were experimentally measured which determine the quadrotor dynamics majorly and optimization was performed on the the quadrotor simulation model. The electronic speed controller, which regulates the speed of the rotors, is controlled in the frequencies range from 1100 to 2000 by pulse width modulation (PWM) method. Thrust force, torque value and rotor speed measurements were experimentally performed on motor and propeller pair. The regression analyzes of these parameters were performed according to the rotor speed. Regression analyzes were performed with linear, quadratic, cubic and constant coefficient methods. The obtained regression equations were applied to Matlab/Simulink quadrotor model and the errors in the quadrotor trajectory tracking were compared. It has been observed that the thrust and torque values obtained from momentum theorem have high deviation in 2-meter trajectory tracking. It has been observed that using the quadratic regression method to determine thrust force and using the cubic regression method to determine torque value minimize the amount of error in trajectory tracking.

**Keywords:** UAV, quadrotor, PID control, flight dynamics.

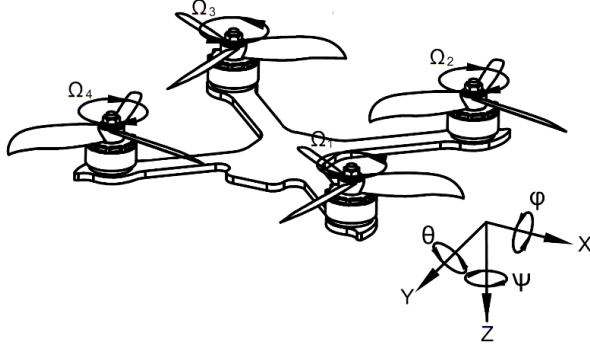
### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda hassas sensörlerin ve uçuş algoritmalarının geliştirilmesi ile insansız hava araçlarının kontrolü oldukça kolaylaşmış ve bu araçlara olan ilgi oldukça artmıştır. Özellikle quadrotorlar geniş kullanım alanı bulmuş, hatta hobi amaçlı olarak bile kullanılmaya başlanmıştır. Quadrotorlar itme kuvveti sağlayan dört motor yardımıyla 6 serbestlik dereceli hareket sağlayan İHA'lardır (Şekil 1). Quadrotorların en önemli sorunlarından biri istikrarlı bir sistem olmayışıdır. Bu İHA'lar bulunduğu çevresel koşulların sürekli değişken olması, güç kaynaklarının değişken voltaj ve gerilim sunması, matematiksel algoritmalarının hâlâ geliştiriliyor olması gibi sebeplerden dolayı kararlı değildir.

Quadrotorların kontrolü için PID kontrol [1], adaptif kontrol [2], robust kontrol [3], bulanık mantık [4] ve yapay sinir ağları [5] gibi algoritmalar sıklıkla kullanılmaktadır. Sürekli olarak geliştirilen bu kontrol algoritmaları birçok araştırmacı tarafından ilgi çeken bir araştırma konusu olmuştur. Bouabdallah (2007) quadrotorun kontrol sistemi üzerine çalışmıştır. PID kontrol, optimal kontrol, backstepping kontrol, sliding-mode kontrol gibi farklı teknikleri quadrotor üzerinde test etmiş, backstepping tekniğinin diğer tekniklere kıyasla daha başarılı olduğunu gözlemlemiştir [6]. Tomashevich ve Belyavskiy (2016) parametrik sinyal adaptif kontrolü üzerine çalışmışlardır. Simülasyon sonuçlarına göre parametrik sinyal adaptif kontrol algoritmasının, adaptif olmayan PD yasası ve geri besleme doğrusallaştırma kontrolüne göre daha iyi olduğu görülmektedir [7]. Ayrıca birçok araştırmacı kontrol sistemlerinin doğruluğunu araştırmak için

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

simülasyon programı yardımıyla yörünge takibi gerçekleştirmekte ve yörüngeden sapma hatalarını araştırmaktadır [8,9].



Şekil 1. Quadrotorun hareket yönleri (Movement directions of quadrotor)

Kontrol algoritmalarının dışında farklı tipte quadrotor tasarımları da araştırmacılar tarafından araştırılma konusu olmuştur [10,11,12]. Nandakumar vd. üst üste gelen pervane tasarımlı quadrotor ile İHA'nın taşıma kapasitesini arttırmıştır [13]. Badr (2016) vd. X tipi quadrotorun kollarına dik olarak eğilebilen motorlara sahip quadrotor tasarlamışlardır. Bu tasarım ile quadrotorun, yunuslama ve yuvarlanma hareketi yapmadan X ve/veya Y yönlerinde hareket edebilmesini sağlamışlardır [14].

Quadrotor üzerine gerçekleştirilen bu gibi çalışmalar ve diğer çalışmaların ortak noktası momentum teoremi yardımıyla elde edilen itme kuvveti ve tork değerlerinin bu teorem ile elde edilmesidir. Eşitlik 1'de pervane ve motordan elde edilen itme kuvveti denklemi verilmiş, formüle ait detaylar [15]'te belirtilmiştir. Eşitlik 2'de ise pervane ve motordan elde edilen tork kuvvetine ait denklem verilmiştir.

$$F = \rho A (\Omega R)^2 C_T \quad (1)$$

$$T = \rho A (\Omega R)^2 C_Q \quad (2)$$

Burada  $\rho$  hava yoğunluğu,  $A$  pervanenin yüzey alanı,  $\Omega$  pervanenin açısal hızı,  $R$  pervane yarıçapı,  $C_T$  itme kuvveti katsayısını ve  $C_Q$  tork kuvveti katsayısını temsil etmektedir.

Denklemdaki  $C_T$  ve  $C_Q$  katsayıları araştırmacılarca deneysel olarak bulunmaktadır. Denklemdaki hava yoğunluğu, pervanenin yüzey alanı, pervane yarıçapı, tork kuvveti katsayısı ve itme kuvveti katsayısı simülasyon süresi boyunca sabit olarak kabul edildiğinden, bu değişkenler itme kuvveti denkleminde  $b$  gibi yeni bir katsayı, tork kuvveti denkleminde  $k$  gibi bir katsayı olarak kabul edilmektedir.

$$F = b\Omega^2 \quad (3)$$

$$T = k\Omega^2 \quad (4)$$

Quadrotorların, hava gibi değişken ve düşük sürtünmeli bir ortam içerisinde sabit bir noktada durma, yörünge takibi gibi zor görevleri yerine getirebilmesi için pervanelerden elde edilen itme kuvvetinin ve tork kuvvetinin doğru hesaplanması oldukça önemlidir. Bu çalışmada araştırmacılarca kullanılan sabit katsayıları

ikincil dereceden itme ve tork kuvveti denklemlerinin yeterliliği araştırılmıştır. Deneysel olarak elde edilen itme kuvveti, tork değeri ve motor devri üzerinden regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Regresyon analizleri lineer, sabit katsayılı, karesel ve kübik olmak üzere 4 farklı yöntemle ve motor devrine bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen regresyon denklemleri ve araştırmacılar tarafından yaygın olarak kullanılan mevcut formülün kıyaslamaları gerçekleştirilmiştir.

## 2. MATEMATİKSEL MODEL (MATHEMATICAL MODEL)

Quadrotorun tam bir dinamik modelini oluşturmak için Newton-Euler denklemleri kullanılmıştır. Ayrıca dinamik hesaplamalarda aşağıdaki varsayımlar kabul edilmiştir.

1. Quadrotorun ağırlık merkezi geometrik olarak orta noktadır.
2. Quadrotor rijit bir cisimdir.
3. Quadrotor x ve y eksenlerinde simetrik.
4. Pervaneler rijittir.
5. Uçuş yüksekliği ve yerçekimi sabit kabul edilmiştir.

Denklemlerin elde edilmesinde iki ana referans sistemi vardır. Bunlar; referans koordinat sistemi ( $X_i, Y_i, Z_i$ ) ve quadrotor ağırlık merkezine sabitlenmiş rijit cismin referans sistemidir ( $X_b, Y_b, Z_b$ ). Quadrotorun pozisyon açıları ise yunuslama (x eksenini etrafındaki  $\varphi$  açısı), yuvarlanma (y eksenini etrafındaki  $\theta$  açısı) ve sapma (z eksenini etrafındaki  $\psi$  açısı) olarak adlandırılır. Doğrusal hızlar ise  $V = [u, v, w]$  ve açısal hızları  $\omega = [p, q, r]$  ile ifade edilir. Uzayda  $\theta$  gibi bir açısal konum tanımlanması yapmak mümkün değildir. Bu yüzden referans koordinat sistemine göre cismin açısal konumu ve açısal hızının ilişkilendirilmesi gereklidir. Bu amaçla Euler açıları kullanılır. Euler açıları rijit bir gövdenin yönelimini bir atalet koordinat sistemine göre tanımlamaya yarar [16].  $R_n^b$ : toplam rotasyon matrisini temsil etmektedir ve Eşitlik 5'te verilmiştir.

$$R_n^b = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & c\psi s\theta s\varphi - s\psi c\varphi & c\psi s\theta c\varphi + s\psi s\varphi \\ s\psi c\theta & s\psi s\theta s\varphi + c\psi c\varphi & s\psi s\theta c\varphi - c\psi s\varphi \\ -s\theta & c\theta s\varphi & c\theta c\varphi \end{bmatrix} \quad (5)$$

Burada  $c, s$  sembolleri *kosinus* ve *sinüs*'ü temsil etmektedir.

### 2.1 Kuvvetler ve Momentler (Forces and Moments)

Başlangıçta dinamik bir modeli oluşturabilmek için hangi kuvvetlerin cismi harekete geçirdiğinin tanımlanması gerekmektedir. Bir quadrotor'da motorlar tarafından oluşturulan kuvvetler ve torklar girdi olarak düşünülebilir ve genel olarak Newton'un ikinci hareket yasası, quadrotorun hareketini analiz etmede kullanılabilir. Quadrotorun üzerine etkiyen pervaneler ve

dönme hareketinden kaynaklı net kuvvet ve net moment aşağıdaki şekilde formüle edilir.

$$F_{net} = d/dt[mV] \text{ (kg.m/s}^2\text{)} \quad (6)$$

$$M_{net} = d/dt[I\omega] + \omega \times [I\omega] \text{ (kg.m}^2\text{/s}^2\text{, Nm)} \quad (7)$$

Burada  $m$  kütle,  $V$  hızı,  $\omega$  açısal hızı ve  $I$  atalet momentini temsil etmektedir.

Yerçekiminin vektörü ( $F_g$ ) quadrotoru referans koordinat sisteminde pozitif z eksenini yönünde çekmektedir. Quadrotorun gövdesi üzerindeki yerçekimi vektörü Eşitlik 8 ile ifade edilir.

$$F_g = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{bmatrix} \quad (8)$$

Pervanelerden gelen kuvvetin, quadrotor gövdesi üzerinde her zaman Z eksenine paralel olacağı varsayılır. Bu yüzden X ve Y yönlerinde itme kuvveti gerçekleşmez. Bu varsayım, rijit gövdeli titreşimsiz bir quadrotor için geçerlidir ve Eşitlik 9 ile ifade edilebilir.

$$F_{itme} = b \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2 \end{bmatrix} = b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2)\hat{Z}_b \quad (9)$$

Burada  $\Omega$  açısal hızı,  $\Omega$ 'nın indisleri ise motor numaralarını temsil etmektedir.

Yerçekiminin etkisi ve rotorlardan gelen itme kuvvetlerinin referans sistemi üzerindeki kuvvet vektörlerine ait kuvvetler toplamı aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir.

$$\sum \vec{F}^n = F_g + R_n^b \times F_{itme} \quad (10)$$

$$\sum \vec{F}^n = \begin{bmatrix} b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2)(\cos\psi\sin\theta\cos\varphi + \sin\psi\sin\varphi) \\ b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2)(\sin\psi\sin\theta\cos\varphi - \cos\psi\sin\varphi) \\ mg - (b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2))\cos\theta\cos\varphi \end{bmatrix} \quad (11)$$

Newton'un ikinci hareket yasasını uygulayacak olursak yeni denklem aşağıdaki gibi olur.

$$\begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \\ \ddot{Z} \end{bmatrix} = \frac{1}{m} \begin{bmatrix} b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2)(\cos\psi\sin\theta\cos\varphi + \sin\psi\sin\varphi) \\ b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2)(\sin\psi\sin\theta\cos\varphi - \cos\psi\sin\varphi) \\ mg - (b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2))\cos\theta\cos\varphi \end{bmatrix} \quad (12)$$

Quadrotor üzerinde X, Y, Z eksenleri boyunca gerçekleşen rotasyon momentleri sırasıyla aşağıdaki eşitlikler ile elde edilir.

$$\tau_\theta = bl_x(\Omega_1^2 - \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \quad (13)$$

$$\tau_\varphi = bl_y(-\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \quad (14)$$

$$\tau_\psi = k(\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_3^2 - \Omega_4^2) \quad (15)$$

Burada  $l_x$  ve  $l_y$  ağırlık merkezinin X ve Y eksenlerinde motor merkezine olan dik uzaklığıdır.

Rijit cisim dönüş yasasının (rigid body rotational law) uygulanması ile açısal ivme denklemleri elde edilir.

$$\vec{M}^b = I\dot{\vec{\omega}} + \vec{\omega} \times (I\vec{\omega}) - T_j \quad (16)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{\tau_\varphi}{I_{xx}} + \dot{\theta}\psi \left( \frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} \right) - \frac{I_{rotor}}{I_{xx}} \dot{\theta}\Omega_t \quad (17)$$

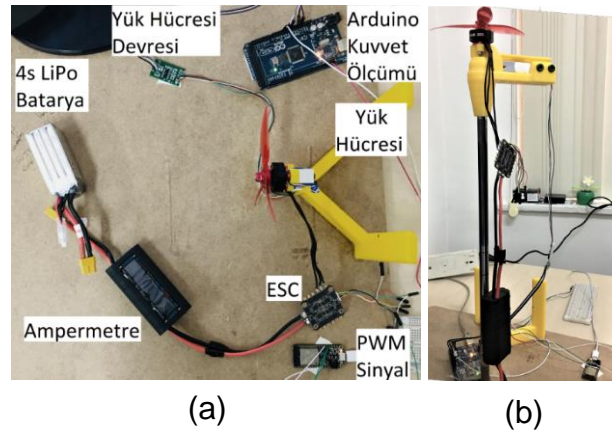
$$\dot{\theta} = \frac{\tau_\theta}{I_{yy}} + \dot{\varphi}\psi \left( \frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} \right) + \frac{I_{rotor}}{I_{yy}} \dot{\varphi}\Omega_t \quad (18)$$

$$\dot{\psi} = \frac{\tau_\psi}{I_{zz}} + \dot{\varphi}\dot{\theta} \left( \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \right) \quad (19)$$

Burada  $I_{xx}$ ,  $I_{yy}$  ve  $I_{zz}$  X, Y ve Z yönlerindeki quadrotorun ataletini,  $I_{rotor}$  motorun ataletini ve  $\Omega_t$  toplam motor devrini temsil etmektedir.

### 3. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

Quadrotor'un dinamik hesaplamalarında kullanılan ve manevra kabiliyetini ve hızını belirleyen Motor/Pervane'ye ait itme ve tork kuvvetleri deneysel olarak elde edilmiştir. Şekil 2.a'da kuvvet ölçüm düzeneği ve Şekil 2.b'de ise tork ölçümüne ait deney düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 2. Rotor/Pervane çiftinden elde edilen (a) itme kuvveti ölçüm düzeneği, (b) tork ölçüm düzeneği ((a) Thrust force testing device, (b) torque testing device, obtained from rotor/propeller pair)

İtme kuvveti ve tork değeri ölçümleri için hazırlanan test düzeneğinde, Adafruit Huzzah32 geliştirme kartından üretilen DGM sinyalleri ile elektronik hız kontrol (ESC) kartı kontrol edilmiştir. Rotorlara farklı voltaj gerilimi gönderen ESC kartı farklı DGM sinyallerinde kontrol edilmiştir. HX711 AD yük hücresi modülü ile Arduino geliştirme kartından kuvvet ölçüm değerleri alınmıştır. Motor devrinin ölçümünde dijital lazer takometre kullanılmıştır. Deney düzeneğinde kullanılan malzemelere ait bilgiler Çizelge 1.'de verilmiştir.

**Çizelge 1.** Deney düzeneğinde kullanılan malzemeler ve özellikleri (Materials and properties used in the experimental setup)

Ürün	Açıklama
Rotor	EMAX RSII 2306 2400KV
Pervane	Gemfan Flash 5149
ESC	Anniversary Special Edition Racerstar REV35 35A BLheli_S 3-6S 4 In 1 ESC
Batarya	TATTU - 1300mAh 14.8V 95C 4S1P R-Line LiPo Batarya
Yük Hücresi	5kg HX711 AD modül
Yük Ölçümü	Arduino Mega 2560 Rev3
Devir Ölçümü	BENETECH GM8905
DGM Sinyal	Adafruit Huzzah32

Deney düzeneğinden elde edilen devir, itme kuvveti ve tork değerlerine ait veriler Çizelge 2’de verilmiştir.

**Çizelge 2.** DGM sinyaline karşılık gelen devir, itme kuvveti ve tork değerleri (Rotation speed, thrust force and torque values corresponding to PWM signal)

DGM Sinyali	Devir (rpm)	İtme Kuvveti (N)	Tork (Nm)
1100	3756	0,28	0,0025
1200	7340	0,82	0,0094
1300	10580	1,66	0,0180
1400	13570	2,78	0,0315
1500	16107	3,98	0,0445
1600	18564	5,37	0,0590
1700	20988	6,87	0,0747
1800	23535	8,81	0,0949
1900	25540	10,50	0,1139
2000	27121	11,81	0,1294

#### 4. İTME VE TORK KUVVETİ DENKLEMLERİ (THRUST AND TORQUE FORCE EQUATIONS)

İtme ve tork kuvveti değerlerinin pervane hızına bağlı bir denklem olarak yazılabilmesi için İtme ve tork kuvveti

katsayıların belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için motor/pervane çiftinden elde edilen deneysel veriler Minitab 17.3.1 yazılımı ile regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Regresyon analizlerinden dördü tork ve dördü itme kuvveti olmak üzere toplam 8 denklem elde edilmiştir. Denklemlere ait ANOVA sonuçları Çizelge 3 ve Çizelge 4’te verilmiştir.

$$\text{Sabit Katsayılı } T_r = 1,7347x10^{-10} \cdot \Omega^2 \quad (R^2 = \%99,9)$$

$$F_i = 1,5896x10^{-8} \cdot \Omega^2 \quad (R^2 = \%99,9)$$

$$\text{Lineer } T_r = -3,420x10^{-2} + 5,50825x10^{-6} \cdot \Omega \quad (R^2 = \%95,1)$$

$$F_i = -3,1685 + 5,061x10^{-4} \cdot \Omega \quad (R^2 = \%94,8)$$

$$\text{Karesel } T_r = 1,850x10^{-3} - 4,0800891x10^{-7} \cdot \Omega + 1,87468x10^{-10} \cdot \Omega^2 \quad (R^2 = \%100)$$

$$F_i = 2,526x10^{-1} - 5,529909x10^{-5} \cdot \Omega + 1,778857x10^{-8} \cdot \Omega^2 \quad (R^2 = \%100)$$

$$\text{Kübik } T_r = -1,123x10^{-3} + 4,5318582x10^{-7} \cdot \Omega + 1,229257x10^{-10} \cdot \Omega^2 + 1,3866723x10^{-15} \cdot \Omega^3 \quad (R^2 = \%100)$$

$$F_i = 2,242x10^{-1} - 4,706694x10^{-5} \cdot \Omega + 1,717166x10^{-8} \cdot \Omega^2 + 1,325394x10^{-14} \cdot \Omega^3 \quad (R^2 = \%100)$$

Regresyon modelinden elde edilen denklemler ve deneysel sonuçlar arasındaki artık miktarları Şekil 3 ve Şekil 4’te gösterilmiştir. Sekiz regresyon denkleminin de yüksek  $R^2$  değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu nedenle denklemlerin sayısal olarak karşılaştırılabilmesi için Çizelge 5’te artık miktarları ve artık miktarlarının mutlak toplamları verilmiştir.

**Çizelge 3.** Tork değerleri için ANOVA sonuçları (ANOVA results for torque values)

Regresyon Modeli	Kaynak	DF	SS	MS	F	P
Lineer	Regresyon	1	0,0169326	0,0169326	155,54	0,000
	Artık	8	0,0008709	0,0001089		
Karesel	Regresyon	2	0,0177987	0,0088993	12880,57	0,000
	Artık	7	0,0000048	0,0000007		
Kübik	Regresyon	3	0,0178004	0,0059335	11579,03	0,000
	Artık	6	0,0000031	0,0000005		
	Toplam	9	0,0178035			



**Çizelge 4.** İtme kuvvetleri için ANOVA sonuçları (ANOVA results for thrust forces)

Regresyon Modeli	Kaynak	DF	SS	MS	F	P
Lineer	Regresyon	1	142,941	142,941	146,50	0,000
	Artık	8	7,806	0,976		
Karesel	Regresyon	2	150,739	75,3693	65245,42	0,000
	Artık	7	0,008	0,0012		
Kübik	Regresyon	3	150,739	50,2463	38040,31	0,000
	Artık	6	0,008	0,0013		
	Toplam	9	150,747			

**Şekil 3.** Tork değerlerine ait regresyon artık miktarları (Residual quantity in regression analysis for torque values)



**Şekil 4.** İtme kuvvetlerine ait regresyon artık miktarları (Residual quantity in regression analysis for thrust forces)



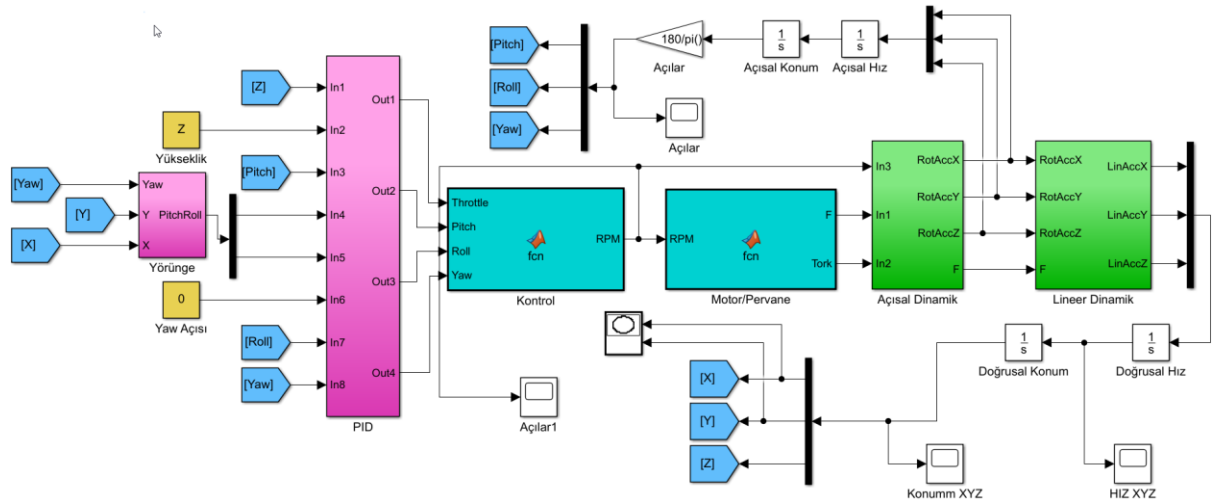
**Çizelge 5.** Regresyon denklemleri ve deneysel bulgular arasındaki farklar (Differences between regression equations and experimental findings)

Devir (rpm)	Deneysel Kuvvet Ölçümü (g)	İtme Kuvveti Artık Miktarları (g)				Tork Kuvveti Artık Miktarları (10 <sup>3</sup> .Nm)			
		Lineer	Sabit Katsayı	Karesel	Kübik	Lineer	Sabit Katsayı	Karesel	Kübik
3756	29	158,26	6,13	-1,17	0,61	16,07	0,10	-0,41	0,16
7340	84	28,29	-3,33	1,90	1,49	3,19	0,07	0,46	0,04
10580	169	-53,92	-12,45	-0,16	0,70	-6,02	-1,37	-0,47	-1,02
13570	283	-94,23	-15,50	-0,29	0,57	-8,96	-0,36	0,75	0,46
16107	406	-102,17	-14,55	0,44	0,49	-9,98	-0,47	0,62	0,68
18564	548	-86,98	-10,64	1,76	2,11	-9,00	-0,73	0,18	0,53
20988	701	-59,08	-13,05	-5,49	4,99	-6,65	-1,66	-1,11	-0,60
23535	898	6,46	0,12	0,16	0,53	-0,47	-1,12	-1,12	-0,75
25540	1071	75,98	13,62	5,98	5,95	7,52	0,84	0,28	0,26
27121	1204	127,38	11,66	-3,14	3,70	14,31	1,89	0,82	0,24
	<b>Mutlak Toplam</b>	<b>792,75</b>	<b>101,06</b>	<b>20,48</b>	<b>21,15</b>	<b>82,15</b>	<b>8,61</b>	<b>6,22</b>	<b>4,74</b>

**5.KONTROLÖR TASARIMI ve PARAMETRELER (CONTROLLER DESIGN AND PARAMETERS)**

Quadrotora ait matematiksel modelin analizini gerçekleştirebilmek için Matlab Simulink yazılımı ile model oluşturulmuştur (Şekil 5.). Bu simülasyon modelinde kullanılacak parametrelere ait bilgiler Çizelge 6’da verilmiştir. Oransal integral türevsel (PID)

denetleyici kontrol döngüsü için gerekli olan katsayılar ise Çizelge 7’de verilmiştir.



Şekil 5. Quadrotor simülasyon modeli (Quadrotor simülasyon modeli)

Çizelge 6. Deney parametreleri ve sembolleri (Test parameters and symbols)

Açıklama	Sembol	Değer
Rotor-Ağırlık merkezi uzaklığı	$l_x, l_y$	0,2m
Quadrotor Ağırlığı	$M$	0,95kg
Yerçekimi ivmesi	$g$	9,81m/s <sup>2</sup>
X eksenini etrafındaki ataleti	$I_{xx}$	0,0132Kg.m <sup>2</sup>
Y eksenini etrafındaki ataleti	$I_{yy}$	0,0132Kg.m <sup>2</sup>
Z eksenini etrafındaki ataleti	$I_{zz}$	0,0235Kg.m <sup>2</sup>
Rotor dönme ataleti	$J_r$	33.10 <sup>-6</sup> Kg.m <sup>2</sup>

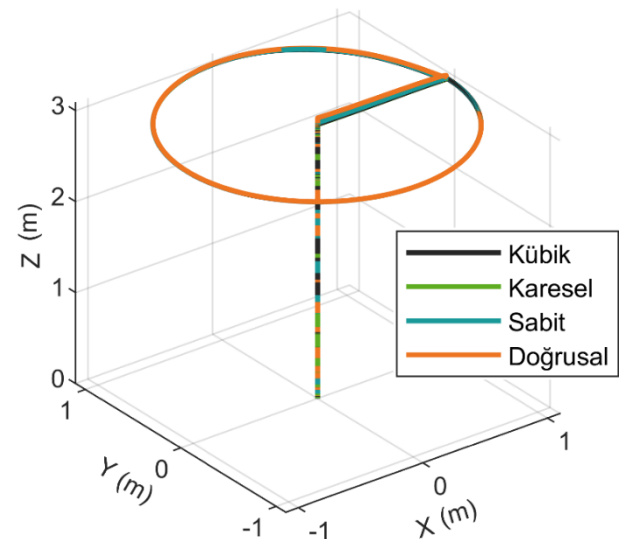
Çizelge 7. PID Katsayıları (PID Coefficients)

Açıklama	Yunuslama, Yuvarlanma	Sapma	Yükseklik (Z)	Yanal Konumlar (X,Y)
P	5	25	110	45
I	1.15	0	40	0
D	2	9.2	40	25

## 6. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

Deneyel olarak bulunan pervanelerin itme ve tork kuvvetlerinden, dört farklı regresyon yöntemi ile sekiz farklı regresyon denklemi elde edilmiştir. Kübik, karesel, sabit katsayılı ve doğrusal regresyon yöntemleri ile elde edilen denklemler Simulink modeline ayrı ayrı uygulanmıştır. Bu model quadrotorun zeminden 3 metre yükseldikten sonra 2 metre çapında bir daire çizerek

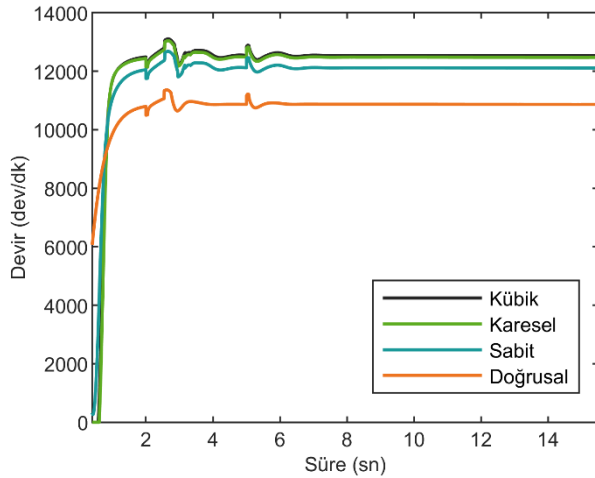
şekilde rotalandırılmıştır. Farklı regresyon yöntemlerinden elde edilen denklemlerinin Simulink modeline uygulanması sonucunda simülasyonlarda önemli bir fark gözlenmemiştir (Şekil 6.)



Şekil 6. Regresyon yöntemlerine göre yörünge takibi (Trajectory tracking with respect to regression methods)

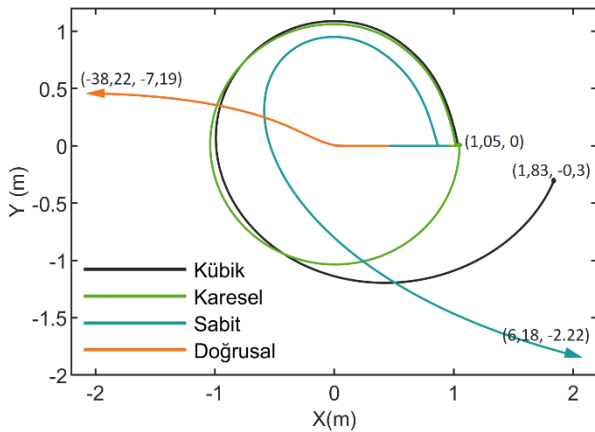
Hava gibi düşük sürtümlü bir ortamda hareket eden Quadrotor, küçük devir hatalarında bile pozisyonunun değişeceğini düşünürsek Şekil 6'daki durum gerçekleşemez. İtme ve tork kuvvetinin yaklaşık %5 hatalı olduğu doğrusal regresyon denklemi ile re-kare oranının %100 olduğu regresyon denklemlerinin aynı simülasyon sonucunu vermesi beklenemez. Şekil 7.'de bu simülasyona ait 1 numaralı motorların devirleri verilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde regresyon yöntemine bağlı olarak kübik yöntem ile karesel yöntem sonucu arasında yaklaşık 55 devir, sabit katsayılı yöntem sonucu arasında yaklaşık 426 devir ve doğrusal yöntem arasında yaklaşık 1666 devir fark gözlenmiştir. Havada sabit bir

yükseklikte kalma durumuna göre (7-15 s aralığı) bu farklar gözlemlenmiştir.



**Şekil 7.** Farklı regresyon yöntemlerine göre, 1 numaralı motorlar için devir sayıları (Rotation speed for motors numbered 1, according to different regression methods)

Simülasyonun gerçeğe en yakın sonucu verebilmesi için regresyon denklemlerinde mutlak toplamın en düşük olduğu, karesel itme kuvveti denklemi ve kübik tork kuvveti denklemi kullanılarak yeni bir Simulink modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan hata oranı daha düşük olan bu modele, önceki simülasyonda elde edilen devir sayıları uygulanmış ve Şekil 8'teki grafik elde edilmiştir.



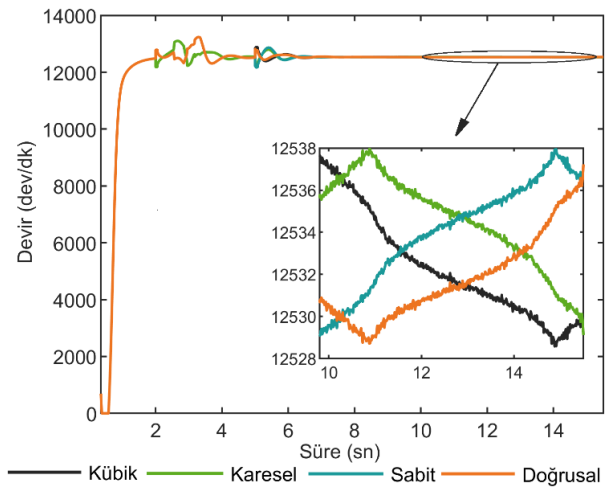
**Şekil 8.** Regresyon yöntemlerine göre düzeltilmiş yörünge takibi (Corrected trajectory tracking according to regression methods)

Şekil 8'den de anlaşılacağı üzere regresyon yönteminin doğru seçilmesi oldukça önemlidir. Karesel itme kuvveti denklemi ve kübik tork değeri denkleminin kullanılması ile hata oranı azaltılmıştır. Hata oranı azaltılmış bu Simulink modeli ve regresyonlardan elde edilen modeller arasında şu farklılıklar gözlemlenmiştir;

- Karesel yöntemde X ekseninde 0,05m hata ve Y ekseninde hata yoktur.

- Kübik yöntemde X ekseninde 0,83m'lik ve Y ekseninde 0,3m'lik hata bulunmaktadır.
- Sabit katsayılı yöntemde X ekseninde 5,18m'lik ve Y ekseninde 2,22m'lik hata bulunmaktadır.
- Doğrusal Yöntemde X ekseninde -39,22m'lik ve Y ekseninde -7,19m'lik hata gözlemlenmiştir.

Dönme hareketinin tam olarak gerçekleştirilebilmesi için quadrotorun 4 rotorundaki devir sayılarına ait grafik şekil 9'de verilmiştir. Şekil 9 incelendiğinde quadrotorun 2 metre çapındaki bir rotayı 0,6 m/s hızında takip edebilmesi için rotorlar arasında yaklaşık olarak 10 devir farklılık olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum istenilen itme kuvveti ve tork değerinin elde edilmesinde, devir sayısının hata payı düşük olacak şekilde hesaplanmasının önemi ortaya koymaktadır.



**Şekil 9.** Yörünge takibinde quadrotor rotorlarının devir sayıları (Rotation speed of quadrotor's rotors in trajectory tracking)

## 7. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada, İHA'lar arasında son zamanlarda kullanımı giderek yaygınlaşan quadrotor motorlarının DGM sinyaline bağlı olarak devir sayıları tahmininde kullanılan momentum teoreminin yeterliliği araştırılmıştır. Bu kapsamda devir sayılarının tahmininde dört farklı regresyon yöntemi kullanılmış ve itme ve tork kuvvetlerine ait 8 denklem elde edilmiştir. Bu denklemler quadrotor modeline uygulanarak, quadrotorun rota takibindeki hataları araştırılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre;

- Regresyon analizinde hataların mutlak toplamının en düşük olma durumuna göre değerlendirildiğinde, en düşük hatalı yörünge takibi gerçekleştirilmektedir.
- Karesel regresyon denklemi rota takibinde sadece X ekseninde 0,05m hata ile en doğru sonucu verirken, doğrusal regresyon denklemi X ekseninde -39,22m'lik ve Y ekseninde -7,19m'lik hata ile en yüksek hatayı vermiştir.

- Literatürde quadrotorların motor devirlerinin tahmininde kullanılan sabit katsayılı regresyon denkleminde göre X ekseninde 5,18m'lik ve Y ekseninde 2,22m'lik hata bulunmaktadır.
- En doğru sonucu vermesi beklenen Kübik regresyon denkleminde göre X ekseninde 0,83m'lik ve Y ekseninde 0,3m'lik hata bulunmaktadır.
- GPS gibi lokasyon kontrolü olmayan İHA'lar için, itme ve tork kuvveti tahminindeki küçük hatalar rotasyon takibinde büyük hatalara dönüşmektedir.
- Regresyon analiz sonuçlarına göre kübik, karesel ve sabit katsayılı denklemler, yüksek  $R^2$  değerlerine sahip olmasına rağmen hava gibi düşük sürtünmeli ortamlarda büyük hatalara dönüşebilmektedir.

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Chen X., Zhang. M., and Yang Y.-D., "Study of an Intelligent PID Attitude Controller for UAV", *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 6: 76-83, (2003).
- [2] Lee D., Kim H. J., and Sastry S., "Feedback linearization vs. adaptive sliding mode control for a quadrotor helicopter", *International Journal of Control Automation and Systems*, 7(3): 419-428, (2009).
- [3] Nicol C., Macnab C. J. B., and Ramirez-Serrano A., "Robust neural network control of a quadrotor helicopter", *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Niagara Falls, 1233-1237, (2008).
- [4] Santos M., López V., and Morata F., "Intelligent fuzzy controller of a quadrotor", *IEEE International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering*, Dalian, 141-146, (2010).
- [5] Madani T. and Benallegue A., "Adaptive control via backstepping technique and neural networks of a quadrotor helicopter", *IFAC Proceedings Volumes*, 41(1): 6513-6518, (2008).
- [6] Bouabdallah S. "Design and control of quadrotors with application to autonomous flying", *Ph.D Thesis*, École Polytechnique and Federale De Lausanne, Siegwart, Roland, (2007).
- [7] Tomashevich S. and Belyavskiy A., "Passification Based Simple Adaptive Control Of Quadrotor", *IFAC-PapersOnLine*, 49(13): 281-286, (2016).
- [8] Shao X., Liu J., and Wang H., "Robust back-stepping output feedback trajectory tracking for quadrotors via extended state observer and sigmoid tracking differentiator", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 104: 631-647, (2018).
- [9] Cabecinhas D, Cunha R., and Silvestre C. "A trajectory tracking control law for a quadrotor with slung load", *Automatica*, 106: 384-389, (2019).
- [10] Ryll M., Bulthoff H. H., and Giordano P. R., "A Novel Overactuated Quadrotor UAV: Modeling, Control and Experimental Validation", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 23(2): 540-556, (2015).
- [11] T. P. Shenoy, K. Praveen Shenoy, L. Khan, S. Aziz, S. Afran, and K. Kumar, "Design and development of a novel triphibian quadcopter," *International Journal of Engineering & Technology*, 7(2.21): 1-4, (2018).
- [12] Oosedo A., Konno A., Matsumoto T., Go K., Masuko K., and Uchiyama M., "Design and attitude control of a quadrotor tail-sitter vertical takeoff and unmanned aerial vehicle", *Advanced Robotics*, 26(3-4): 307-326, (2012).
- [13] Nandakumar G., Srinivasan A., and Thondiyath A., "Theoretical and Experimental Investigations on the Effect of Overlap and Offset on the Design of a Novel Quadrotor Configuration, VOOPS", *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 92(3-4): 615-628, (2018).
- [14] Badr S., Mehrez O., and Kabeel A. E., "A novel modification for a quadrotor design", *International Conference on Unmanned Aircraft Systems*, Dallas, 702-710, (2016).
- [15] Leishman, J. G., "Principles of helicopter aerodynamics", Cambridge Aerospace Series, *Cambridge University Press*, (2016).
- [16] Ercan Y., "İleri dinamik", ISBN: 978-605-030-981-2, (2014).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Buhar sıkıştırırmalı soğutma sisteminde R22 alternatifini soğutucu akışkanların termodinamik analizi

*The thermodynamic analysis of the refrigerants alternative to R22 in the vapor compression refrigeration system*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Zafer CİNGİZ<sup>1</sup>, Ferzan KATIRCIOĞLU<sup>2</sup>, Yusuf ÇAY<sup>3</sup>, Ahmet KOLİP<sup>4</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-3796-755X

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0001-5463-3792

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0003-4007-6168

ORCID<sup>4</sup>: 0000-0001-6666-1141

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Cingiz Z., Katırcıoğlu F., Çay Y., Kolip A., “Buhar sıkıştırırmalı soğutma sisteminde R22 alternatifini soğutucu akışkanların termodinamik analizi”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1205-1212, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.548115

# Buhar Sıkıştırımlı Soğutma Sisteminde R22 Alternatifi Soğutucu Akışkanların Termodinamik Analizi

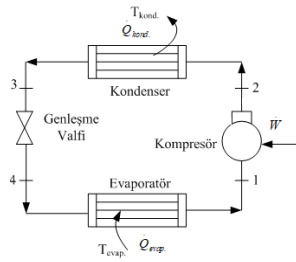
## The Thermodynamic Analysis of the Refrigerants Alternative to R22 in the Vapor Compression Refrigeration System

### Önemli noktalar (Highlights)

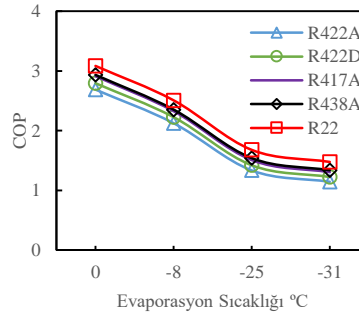
- ❖ R22 alternatifi olan R417A, R438A, R422A ve R422D soğutucu akışkanlarının performansları termodinamiğin birinci ve ikinci yasasına göre incelenmiştir./The performances of R417A, R438A, R422A and R422D, which are alternative to R22, were examined according to the first and second law of thermodynamics.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

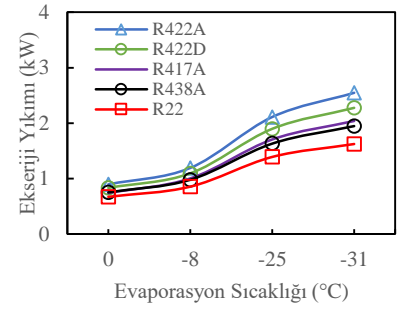
Tek kademeli, teorik buhar sıkıştırımlı soğutma çevriminde, sistemin performans analizi termodinamiğin birinci ve ikinci kanununa dayalı olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil. Buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimi. /Figure. Vapor compression refrigeration cycle.



Şekil. COP değerleri./Figure. COP values.



Şekil. Ekserji yıkımları. /Figure. Exergy destructions

### Amaç (Aim)

R417A, R422A, R422D ve R438A akışkanlarının performans analizinin yapılması amaçlanmıştır./Performance analysis of R417A, R422A, R422D and R438A refrigerants is aimed.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Soğutma sistemi tasarım parametreleri kullanılarak Chemours Refrigerant Expert programı ile simüle edilmiştir./Refrigeration system was simulated with Chemours Refrigerant Expert program using design parameters.

### Özgünlük (Originality)

Yoğuşma sıcaklığı sabit (50 °C) tutulurken, evaporasyon sıcaklıkları EUROVENT şartlarına göre (0 °C, -8 °C, -25 °C, -31 °C) belirlenmiştir./ While the condensation temperature is kept constant (50 °C), evaporation temperatures are determined according to EUROVENT conditions (0 °C, -8 °C, -25 °C, -31 °C).

### Bulgular (Findings)

R22'nin COP değeri, incelenen alternatif akışkan COP değerlerinden daha fazladır. En düşük ekserji yıkımı R22 akışkanında tespit edilmiştir. Ardından R438A, R417A, R422D ve R422A akışkanları gelmektedir./The COP value of R22 is higher than the alternative refrigerants COP values studied. The lowest exergy destruction was detected in R22 refrigerant. Subsequently, R438A, R417A, R422D and R422A refrigerants are followed.

### Sonuç (Conclusion)

Enerji ve ekserji analizi sonucunda, performans olarak, R22 soğutucu akışkanına en iyi alternatifin sırasıyla R438A, R417A, R422D ve R422A olduğu tespit edilmiştir./ As a result of energy and exergy analysis, it was determined that the best alternative to R22 refrigerant as performance is R438A, R417A, R422D and R422A, respectively.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.



# Buhar Sıkıştırılmalı Soğutma Sisteminde R22 Alternatifi Soğutucu Akışkanların Termodinamik Analizi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Zafer CİNGİZ<sup>1\*</sup>, Ferzan KATIRCIOĞLU<sup>2</sup>, Yusuf ÇAY<sup>3</sup>, Ahmet KOLİP<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Eğitimi Böl., Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Düzce MYO, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Düzce Üniversitesi, Türkiye

<sup>3</sup>Teknoloji Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 02.04.2019 ; Kabul/Accepted : 30.11.2019)

## ÖZ

Bu çalışmada, soğutma sistemlerinde yaygın olarak kullanılan R22 soğutucu akışkanına alternatif ve ozon tabakasına dost R417A, R438A, R422A ve R422D soğutucu akışkanlarının performansları termodinamiğin birinci ve ikinci yasasına göre incelenmiştir. Buhar sıkıştırılmalı çevrimin tasarımı için Chemours Refrigerant Expert 1.0 programı kullanılmıştır. Yapılan analizlerde yoğuşma sıcaklığı sabit (50 °C) tutulurken, evaporasyon sıcaklıkları EUROVENT şartlarına göre (0 °C, -8 °C, -25 °C, -31 °C) belirlenmiştir. Farklı evaporasyon sıcaklıklarına göre hesaplanan parametreler, gerekli kompresör gücü, performans katsayısı (COP) ve gerekli soğutucu akışkan kütle akış oranıdır. Sonuçlar, R438A ve R417A soğutucu akışkanlarının COP değerlerinin R22'ye çok yakın olduğunu göstermiştir. R22 soğutucu akışkanına göre COP değerleri, R438A'da %5, R417A'da %6, R422A'da %15 ve R422D'de %10 düşük olmuştur. Bu değerler R422D için %13 ve R422A için ise %17 olarak hesaplanmıştır. Analiz edilen sistemlere ait en yüksek ekserji verimi, -25 °C evaporasyon sıcaklığında R438A için %31.74, R417A için %31 ve R422A için %27.46 ve R422D için ise %29.24 olarak hesaplanmıştır. Çalışmanın sonunda, R22 soğutucu akışkanına alternatif olarak geliştirilen R417A, R438A, R422A ve R422D akışkanlarından, R438A akışkanının daha yüksek COP değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca kondenser ve kompresör yükleri incelendiğinde en iyi sonuçları sırası ile R438A, R417A, R422D ve R422A akışkanlarının verdiği görülmüştür. Genel olarak incelenen 4 alternatif akışkandan R438A ve R417A'nın, COP, ekserji verimliliği, ekserji yıkımları açısından R22 için daha iyi bir alternatif olacağı belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Enerji, soğutucu akışkan, ekserji, COP, GWP, ODP.

## The Thermodynamic Analysis of the Refrigerants Alternative to R22 in the Vapor Compression Refrigeration System

### ABSTRACT

In this study, the performances of the R417A, R438A, R422A and R422D refrigerants which are alternative to the commonly used and ozone layer-friendly R22 refrigerant are examined according to the first and second law of thermodynamics. Chemours Refrigerant Expert 1.0 and Genetron Properties 1.4 were used for the design of the vapor compression cycle. While the condensing temperature was kept constant during the analyses, the evaporation temperatures were determined according to the EUROVENT conditions (0 °C, -8 °C, -25 °C, -31 °C). The parameters calculated according to different evaporation temperatures are the required compressor power, performance coefficient (COP), and the required refrigerant mass flow rate. The results showed that the COP values of the R438A and R417A refrigerants were very close to that of R22. The COP values were 5%, 6%, 15% and 10% lower in R438A, in R417A, in R422A, and in R422D, respectively compared to the R22 refrigerant. The COP values were calculated as 13% for R422D and 17% for R422A. The highest exergy efficiency of the analyzed systems was calculated as 31.74% for R438A, 31% for R417A, 27.46% for R422A, and 29.24% for R422D at -25°C evaporation temperature. The results of our study revealed that among the R417A, R438A, R422A and R422D refrigerants developed as an alternative to R22 refrigerant, the R438A refrigerant had comparatively higher COP values. Also, when the condenser and compressor loads were examined, it was found that the R438A, R417A, R422D and R422A refrigerants yielded the best results, respectively. Among the four alternative refrigerants examined, R438A and R417A were found to be better alternatives to R22 in terms of COP values, exergy efficiency, and exergy destruction.

**Keywords:** Energy, refrigerant, exergy, COP, GWP, ODP.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bazı soğutma sistemi uygulamalarında kullanılan R22 soğutucu akışkanının ozon tabakasına verdiği zarardan

dolayı, yürürlükten kaldırılması ve yasaklanması bir takvime göre belirlenmiştir. AB düzenlemesi ile mevcut cihazların 1 Ocak 2015 tarihine kadar kullanılması, bu tarihten sonra da ozona zarar vermeyen soğutucu akışkan kullanan cihazlarla değiştirilmesi zorunluluğu getirilmiştir [1]. R22 soğutucu akışkanı ile çalışan

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : zafercingiz@duzce.edu.tr

mevcut cihazlarda yapısal bir değişiklik yapmadan, ekonomik yarar sağlaması açısından ozon tabakasına zarar vermeyen soğutucu akışkanlar kullanılabilir. Bakım ve arıza gibi nedenlerden dolayı, soğutma sistemleri soğutucu akışkanını kaybedebilmektedir. R22 klor atomu içermesi nedeniyle, ozon tabakasının yok olmasına sebep olmaktadır. Bu yüzden R22 ile çalışan sistemleri, ozon yok etme potansiyeli (ODP) değeri sıfır olan soğutucu akışkanlarla değiştirilmelidir. Uygun alternatif akışkanlar sistemlerde herhangi bir yapısal düzenleme yapılmadan doğrudan sisteme şarj edilebilecekleri gibi, bazı küçük değişiklikler uygulandıktan sonra da kullanılabilirler [2-4].

Soğutma sistemlerinde R22 akışkanına alternatif olabilecek akışkanların termodinamik ve çevresel etkileri üzerine farklı çalışmalar yapılmıştır. Rocca ve Panno [5], tarafından, buhar sıkıştırma soğutma sisteminde, R22 yerine R417A, R422A ve R422D kullanılarak yapılan bir çalışmada, önemli bir sistem düzenlemesi gerekmediği, ancak enerji verimliliğinde iyileşmeye ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir. Allgood ve Lawson [6], mevcut soğutma ve klima sistemlerinde R438A soğutucu akışkanı ile deneyler gerçekleştirilmiş ve R22 ile kıyaslandığında aynı soğutma performansı ve enerji verimliliğinin elde edildiği bildirilmiştir. Yenileme işlemi sırasında yağ değişiminde herhangi bir değişiklik olmadan elde edilen düşük deşarj sıcaklığı ve yakın değerlerde evaporatör ve kondenser basıncı gözlenmiştir. Panno ve Rocca [5], yaptıkları çalışmada, R22 ile çalışan bir buhar sıkıştırma soğutma sisteminin performansını ve 2037/2000 sayılı Yönetmeliğe göre, soğutucu akışkanın değiştirilmesi ile HFC soğutucu akışkanına oranla kıyaslayarak performansını ele alan deneysel analiz sonucunu ortaya koymuşlardır. Özellikle, sistemin çalışma verimliliği ilk olarak R22 soğutucu akışkanıyla daha sonrasında da üç yeni HFC akışkanı olan R417A,

R422A ve R422D ile test edilmiştir. İnceleme, yenileme ve değiştirme durumunda, kompresörde bir yağlayıcı olarak mineral yağ kullanımının devam etme avantajına rağmen, yeni test edilen akışkanlarla elde edilen performansın R22'ye göre verimli sonuç vermediğini doğrulamıştır. Elgandy vd. [7] yaptıkları çalışmada, R-22 ve alternatifleri arasındaki (R417A, R422D ve R438A) yaptıkları incelemede, R-438A'nın R22'ye en yakın soğutucu akışkan olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bu sayede, R-438A soğutucu akışkanı, R-22 kullanan sistemin, kılcal borusu değiştirilmeden kullanılabilir. Rocca vd. [8] buhar sıkıştırma soğutma sistemi üzerinde yapmış olduğu deneylerde, referans akışkan olarak R22 ve onun alternatiflerini, soğutucu akışkanların sıcaklığını, basıncını ve kütle miktarını incelemişlerdir. Bu çalışmada test edilen alternatif akışkanlar (R413, R417A, R422A ve R422D), yağ ve diğer ekipmanların değişimi yapılmadan, R22 ile rahatça yenilenebilir. Bu, herhangi bir özel ekipman olmadan ve çok düşük bir maliyetle gerçekleştirilebilen basit bir işlemdir. Ergün vd. [9], çalışmalarında soğuk depoculukta ve iklimlendirme sistemlerinde yaygın olarak kullanılan R22 soğutucu akışkanına alternatif olarak piyasaya sürülen ve ozon tabakasına dost olan, R417A ve R438A soğutucu akışkanlarını termodinamik açıdan incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada, R22, R417A ve R438A soğutucu akışkanlarının performanslarını karşılaştırmışlardır. Değişken yük koşulları altında (-8°C, 0°C, -25°C ve -31°C) her 3 soğutucu akışkanın bilgisayar ortamında bir simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Farklı evaporasyon sıcaklıkları için, soğutucu akışkanların performansları termodinamiğin birinci ve ikinci kanunu kullanılarak değerlendirilmiş ve sistemlere ait performans katsayıları (COP<sub>h</sub> ve COP<sub>c</sub>) hesaplanmıştır. Çalışmanın sonunda, R22 soğutucu akışkanına alternatif olarak geliştirilen R417A ve R438A akışkanlarından, R438A akışkanının daha yüksek COP<sub>h</sub>

**Çizelge 1.** Soğutucu Akışkanların Özellikleri (Properties of Refrigerants) [11, 12].

Soğutucu akışkan	Bileşim	Moleküler Ağırlık (kg/kmol)	Kritik Sıcaklık (°C)	Kaynama Noktası (°C)	ODP	GWP
R22		86.5	96.2	-40.8	0.05	1810
R417A	R-125 (% 46.6) R-134a (% 50) R-600 (% 3.4)	106.8	87.1	-39.1	0	2346
R422A	R-125 (% 85.1) R-134a (% 11.5) R-600a (% 3.4)	116	71.7	-48.6	0	3140
R422D	R-125 (% 65.1) R-134a (% 31.5) R-600a (% 3.4)	109.9	79.6	-43.2	0	2730
R438A	R-125 (% 45) R-134a (% 44.2) R-601a (% 0.6) R-32 (% 8.5)	99.1	85.3	-42.3	0	2264

ve COP<sub>c</sub> değerlerine sahip olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca kondenser ve kompresör yükleri incelendiğinde yine R438A akışkanının, R417A akışkanına göre daha olumlu değerlerde olduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak incelenen 3 akışkan için R22 akışkanına en iyi alternatifin R438A olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmada, iklimlendirme ve soğutma cihazlarında yaygın olarak kullanılan R22 soğutucu akışkan ile sistemde hiçbir değişiklik yapılmadan kullanılabilen 4 farklı HFC türü soğutucu akışkan termodinamik açıdan karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmada, R22 akışkanına alternatif olan ve ozon tabakasına dost R417A, R422A, R422D ve R438A akışkanlarının soğutma sistemlerine yönelik detaylı performans analizi yapılmıştır.

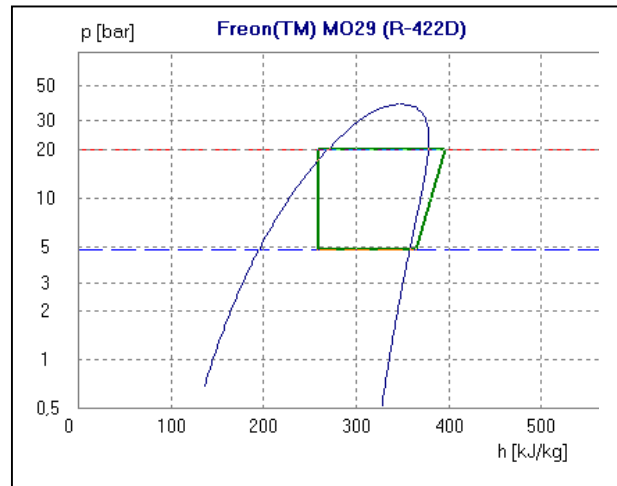
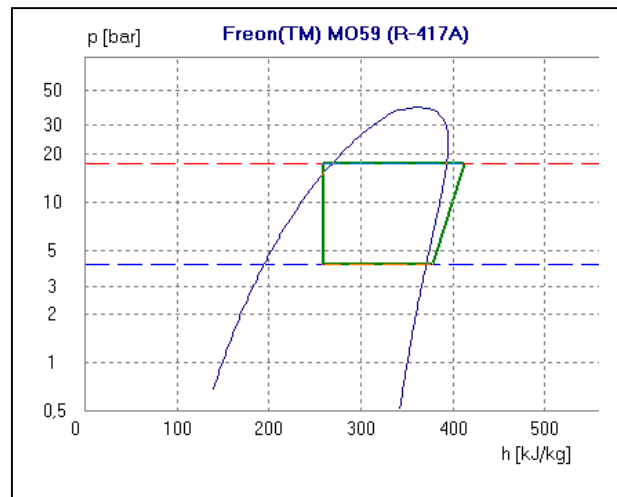
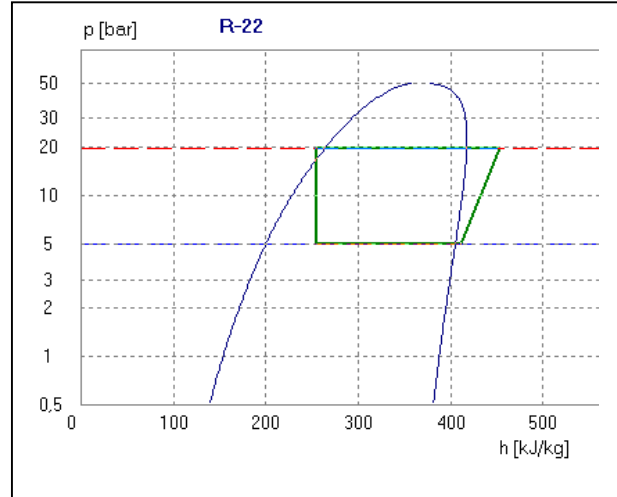
## 2. DEĞERLENDİRİLEN SOĞUTUCU AKIŞKANLARIN ÖZELLİKLERİ (PROPERTIES OF EVALUATED COOLANT FLUIDS)

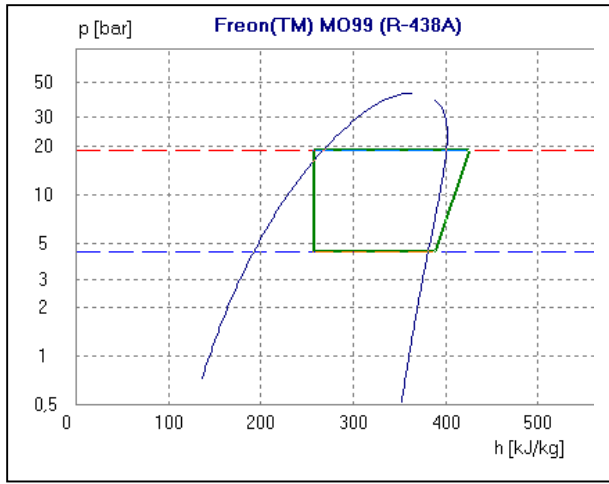
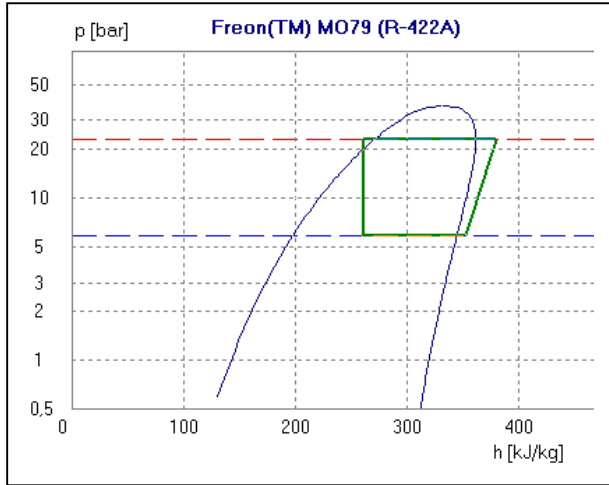
Soğutucu akışkanda aranan özellikler, uygulama ve çalışma şartlarının durumuna göre değişir. Soğutucu akışkanın çalışma durumuna ve şartlara göre bazı özellikleri daha önemli olur ve bu durumda diğer özellikler göz ardı edilebilir. Bir soğutucu akışkanda olması gereken özelliklerin hepsinin birden yerine getirebilen bir soğutucu akışkan yoktur. Çevreye en az zarar veren ve verimi en yüksek olan akışkanlar kullanılmalıdır. Farklı araştırmacılar, CFC (kloroflorokarbon) ve HCFC (hidrokloroflorokarbon) soğutucu akışkanlara uygun alternatif olarak birkaç HFC (hidroflorokarbon) ve HC (hidrokarbon) soğutucu akışkanı önermiştir. CFC ve HCFC soğutucularına kıyasla sıfır ODP'ye kısmen yüksek GWP'ye sahip bazı HFC (R417A, R422A, R422D, R438A) soğutucu akışkanların özellikleri Çizelge 1'de gösterilmektedir [10, 11].

R22 soğutucu akışkanın GWP değeri alternatifi olan akışkanlardan daha düşüktür. Ancak ODP değerlerinin sıfır olması sebebiyle orta vadede R22 ile çalışan sistemlerde kullanılmasının uygun olacağı düşünülebilir. İçerdiği klor atomları sebebiyle R22, ozon tabakasının yok olmasına yol açmaktadır. Bu yüzden R22 ile çalışan sistemleri, uzun vade de ozon yok etme potansiyeli (ODP) değeri sıfır olan düşük küresel ısınma potansiyeline (GWP) sahip soğutucu akışkanlarla değiştirilmelidirler. Yüksek GWP, yüksek çevresel etki demektir. Sonuç olarak düşük GWP soğutucularının benimsenmesi toplam çevresel etkilerin azaltılması açısından etkili bir çözüm olmadığına varılmıştır.

F-Gaz terimiyle, hidroflorokarbon (HFC) kastedilmekte olup endüstriyel soğutma ve iklimlendirme sistemleri uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. R22'ye alternatif olarak incelediğimiz dört soğutucu akışkan bu gruptandır. HFC gazları, CFC ve HCFC'lerin yerini alan, ozon tabakasına zararlı olmayan, düşük toksit değerlere sahip ve çoğu yanıcı olmayan maddeleri içermektedir. Bununla beraber, küresel ısınma potansiyelleri (GWP) bağlı olarak yüksektir.

R22 soğutucu akışkanının ekserji verimi daha iyi performans göstermiştir. Ancak bu soğutucu akışkanın yüksek ODP tüketme potansiyelinin bulunması önemli bir problem oluşturmaktadır. Bu nedenle, bu akışkana alternatif olarak seçilen dört akışkan temelli bir değerlendirme yapılmıştır.



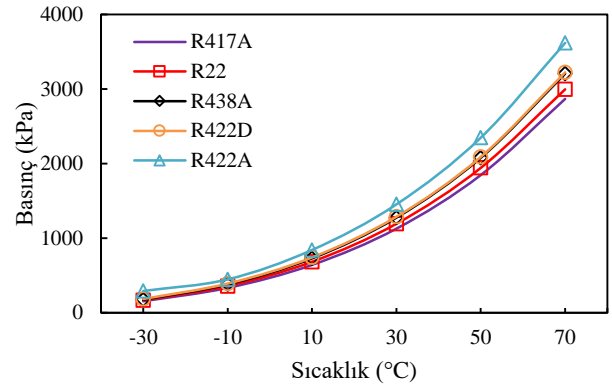


**Şekil 1.** R22, R417A, R422A, R422D ve R438A soğutucu akışkanlara ait ln p-h diyagramları (ln p-h diagrams of R22, R417A, R422A, R422D and R438A refrigerants)

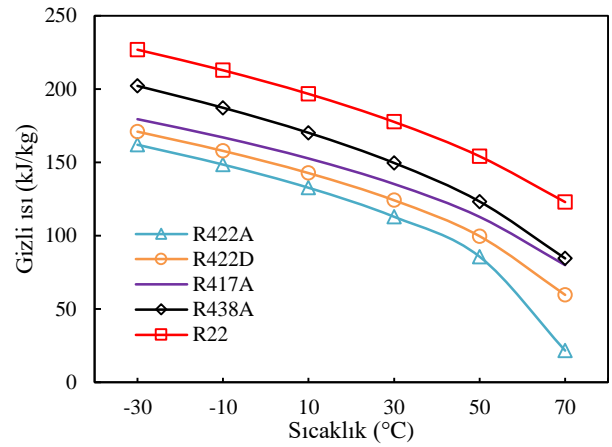
Şekil 1’de bu çalışmada incelenen beş farklı soğutucu gazı ait ln p-h diyagramları (0 °C evaporasyon ve 50 °C yoğuşma sıcaklığı için) ve ele alınan çevrimler görülmektedir.

Şekil 2’de bu çalışmada araştırılan beş farklı soğutucu gazın -30°C ile 70°C sıcaklık aralığı için basıncının değişimi görülmektedir. Doyma basınçlarına dikkat edildiğinde, gazların termodinamik özelliklerinin birbirine yakın oldukları anlaşılabilir. Düşük sıcaklık değerlerinde (-10°C’den düşük olan) doyma basınçları neredeyse aynıdır. Sistemin düşük basınç değerlerinde çalışması kompresör ömrünün daha uzun olmasına sebep olur.

Şekil 3’de analiz edilecek beş soğutucu akışkanın gizli ısının sıcaklığa göre değişimi görülmektedir. Sıcaklık artışıyla gizli ısının azaldığı anlaşılmaktadır. Evaporasyon gizli ısısı yüksek olmalıdır. Evaporasyon gizli ısısı ne kadar yüksek olursa sistemde o oranda soğutucu akışkan kullanılacaktır. Gizli ısının yüksek olması istenen bir sonuçtur çünkü daha büyük gizli ısı değeri, soğutma kapasitesinin artmasına yol açar.



**Şekil 2.** Çalışmada incelenen soğutucu akışkanlar için sıcaklığa karşı doyma basıncının değişimi (Change of saturation pressure to temperature for refrigerants examined in the study)



**Şekil 3.** Soğutucu akışkanlar için gizli ısının sıcaklıkla değişimi (The variation of latent heat with temperature for the refrigerants)

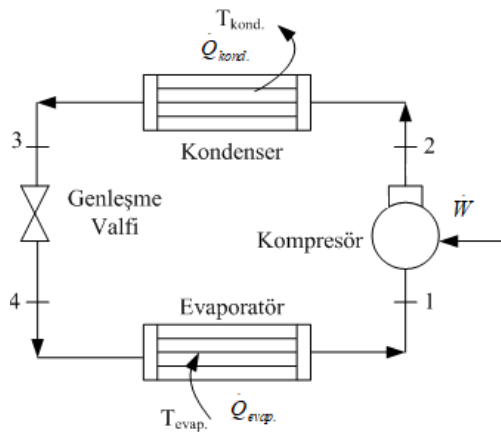
### 3. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Yapılan bu çalışmada, R22’ye alternatif olabilecek R417A, R422A, R422D ve R438A akışkanları incelenmiştir. CFC gazların tüketiminin yasaklanması ile birlikte gelen süreçte ozon tabakasına zarar veren diğer bir gaz grubu olan HCFC gazların da kullanımı önce sınırlandırılmış ardından tamamen yasaklanmıştır. Bu gazlardan en çok kullanılanı R-22 gazıdır. Bu gaz, klimalardan soğuk hava depolarına kadar birçok sistemde kullanılmaktadır. R-22 gazının alternatifi olarak çeşitli gazlar kullanılmıştır.

Bunlardan en sık kullanılanları R404A, R407c ve R410A gazlarıdır. Ancak bu gazların mevcut sistemlere entegre edilmesinde önemli bir problem ortaya çıkmaktadır. R-22 yerine bu gazlardan herhangi birinin sisteme alınabilmesi için sistem boru hatlarında ve ekipmanlarında değişiklikler yapmak gerekmektedir. Bu durum, uygulamada önemli güçlükler çıkarır. Bu problemi ortadan kaldırabilmek amacıyla dört yeni alternatif HFC grubu gaz piyasaya sürülmüştür. Bunlar; R417A, R422A, R422D ve R438A gazlarıdır. Bu

gazların ön önemli avantajı; sistem boyutlandırmasında herhangi bir değişikliğe gerek kalmaması ve sadece kurutucu-filtre değişimi ile sisteme uyum sağlayabilmesidir [9, 12-14].

Bu çalışmada incelenen soğutma sistemi Çizelge 3'deki tasarım parametreleri kullanılarak Chemours Refrigrant Expert programı ile simüle edilmiştir. Chemours Refrigrant Expert programı, yenileme veya yeni sistem tasarımı için farklı çalışma koşullarında ve sistem düzeneklerinde hızlı ve kolay soğutucu seçimi sağlar [15]. Buhar sıkıştırımlı soğutma çevriminin şematik gösterimi ve sisteme ait çevrim noktaları Şekil 4'te verilmiştir.



**Şekil 4.** İdeal buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimi (Ideal vapor compression refrigeration cycle)

Çalışmada tek kademeli, teorik buhar sıkıştırımlı mekanik soğutma çevrimi incelenmiştir. Termodinamik ve çevresel analiz R22, R417A, R422A, R422D ve R438A soğutucu akışkanları için yapılmıştır. Sistemi oluşturan temel elemanlar kompresör, kondenser, genleşme valfi ve evaporatördür. Sistemin çözümlenmesinde bazı kabuller yapılmıştır; sistemin sürekli rejim şartlarında çalıştığı, soğutma sistemi elemanları ile borulardaki, ısı ve basınç kayıplarının ihmal edildiği, evaporatör ve kondenser fanlarının enerji tüketiminin ihmal edildiği varsayılmıştır. Çevrim elemanlarında sürekli rejim çalışma şartları geçerlidir[16]. Ayrıca soğutma sisteminin teorik analizinde kullanılan değerler Çizelge 2'de belirtilmektedir.

**Çizelge 2.** Analiz İçin Kabuller (Assumptions for Analysis)

Soğutma Kapasitesi, $\dot{Q}_e$ (kW)	5
Evaporasyon Sıcaklığı, $T_{evap}$ (°C)	0, -8, -25, -31
Kondenser Sıcaklığı, $T_{kond}$ (°C)	50
Aşırı Kızdırma, (°C)	8
Aşırı Soğutma (°C)	6
Kompresör Mekanik Verimi (%)	85
Kompresör Elektrik Verimi (%)	98

### 3.1. Enerji Analizi (Energy Analysis)

Sistemin performans analizi termodinamiğin birinci ve ikinci kanununa dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. Soğutma sistemine ait birinci kanun analizinde, kondenser, evaporatör ve kompresör kapasiteleri, Şekil 4'deki çevrim noktaları göz önüne alınarak, sırasıyla aşağıdaki eşitlikler aracılığıyla hesaplanmıştır.

Kompresör kapasitesi aşağıdaki şekilde bulunabilir.

$$\dot{W}_{komp.} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (1)$$

Kompresöre uygulanan elektrik gücü ise kompresör gücünün, elektrik ve mekanik verimlere bölünmesi ile bulunmaktadır.

$$\dot{W}_{komp,el} = \frac{\dot{W}_{komp}}{\eta_{el} \times \eta_{mek}} \quad (2)$$

Kondenserde, soğutucu akışkandan çevreye olan birim zamandaki ısı geçişi şu şekilde bulunabilir.

$$\dot{Q}_{kond.} = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (3)$$

Soğutulan ortamdan birim zamanda çekilen ısı şu şekilde bulunabilir.

$$\dot{Q}_{evap.} = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (4)$$

Soğutma çevriminin etkinlik katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{evap.}}{\dot{W}_{komp,el}} \quad (5)$$

### 3.2. Ekserji Analizi (Exergy Analysis)

Termodinamiğin birinci kanunu enerjinin korunumu ile ilgilidir ve sistem performansını belirlemede yetersiz kalmaktadır. İkinci kanun analizi ise enerjinin kullanılabilirliği ile ilgilidir ve gerçek sistem performansını belirlemek için oldukça önemlidir.

Akış halindeki bir sistemde, kinetik ve potansiyel enerjilerin ihmal edilmesi durumunda birim kütle için ekserji, aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır.

$$\Psi = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (6)$$

Her bir nokta soğutucu akışkan kütleli debi miktarı ile çarpıldığında eşitlik aşağıdaki hali almaktadır.

$$\dot{E}x = \dot{m}[(h - h_0) - T_0(s - s_0)] \quad (7)$$

Bu eşitlikte ölü hal şartları olarak referans sıcaklık  $T_0$ , 25 °C ve  $P_0$ , 1 atm olarak alınmıştır.

İncelenen sisteme ait ikinci kanun analizi için kondenser, evaporatör, kompresör ve genleşme valfindeki ekserji yıkımları sırasıyla aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanabilir [9].

$$\dot{E} x_{Yık.,kond.} = \dot{E} x_2 - \dot{E} x_3 - \dot{Q}_{kond} \left(1 - \frac{T_0}{T_{kond}}\right) \quad (8)$$

$$\dot{E} x_{Yık.,evap.} = \dot{E} x_4 - \dot{E} x_1 + \dot{Q}_{evap} \left(1 - \frac{T_0}{T_{evap}}\right) \quad (9)$$

$$\dot{E} x_{Yık.,komp.} = \dot{E} x_1 - \dot{E} x_2 + \dot{W}_{komp.el} \quad (10)$$

$$\dot{E} x_{Yık.,GV.} = \dot{E} x_3 - \dot{E} x_4 \quad (11)$$

Toplam yıkım,

$$\begin{aligned} \dot{E} x_{Yık.,Toplam} = & \dot{E} x_{Yık.,kond.} + \dot{E} x_{Yık.,evap.} \\ & + \dot{E} x_{Yık.,komp.} + \dot{E} x_{Yık.,GV} \end{aligned} \quad (12)$$

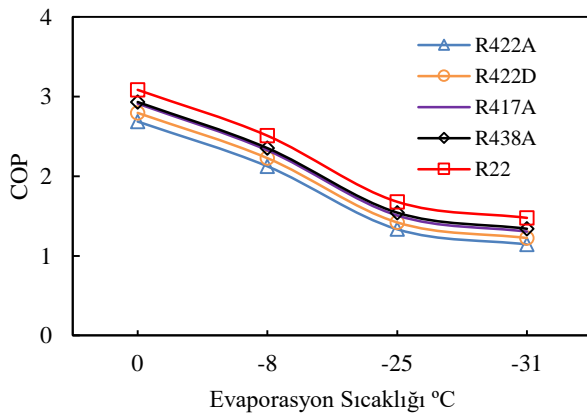
Sistemin ekserji verimi ise aşağıdaki eşitlik ile bulunmuştur.

$$\eta_{Ex} = \frac{\dot{E} x_4 - \dot{E} x_1}{\dot{W}_{komp.el}} \quad (13)$$

#### 4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Yapılan çalışmada ticari soğutma sistemlerinde, R22 akışkanına alternatif olarak piyasaya sürülen R417A, R422A, R422D ve R438A akışkanlarının performans analizi, termodinamiğin birinci ve ikinci kanununa göre yapılmıştır. Analizler sonucu elde edilen değerler grafikler halinde sunulmuştur.

Şekil 5’de analiz edilen akışkanların COP değerlerindeki değişim farklı evaporasyon sıcaklığına göre karşılaştırmalı olarak görülmektedir. Yapılan analizlerde yoğuşma sıcaklığı sabit (50°C) tutulmuştur. COP değerlerine bakıldığında zaman R22 akışkanının yüksek bir değere sahip olduğu, onu takiben R438A, R417A, R422D ve R422A akışkanlarının olduğu görülmektedir.

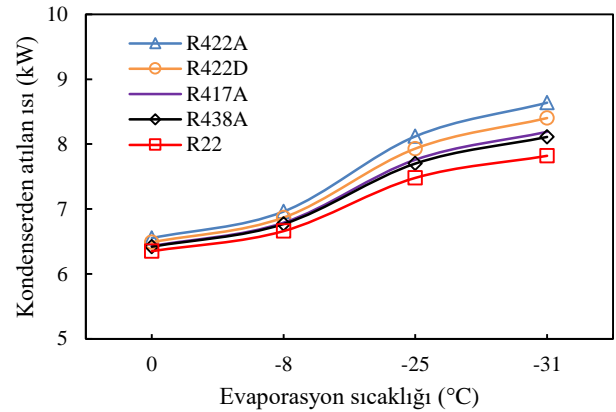


Şekil 5. Akışkanlara ait COP değerleri (COP values of refrigerants)

R22 akışkanında COP değerleri 1.4-3.1 arasında, R438A akışkanında COP değerleri 1.4-3 arasında, R417A’da

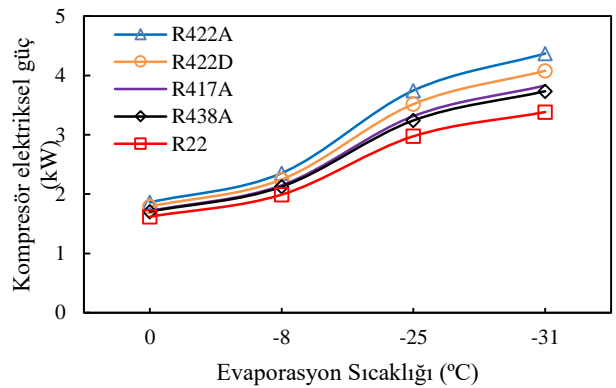
COP, 1.3-2.9, R422A akışkanında 1.2-2.7 arasında değişirken, R422D akışkanında ise COP, 1.2 ile 2.8 arasında değişim olmaktadır. R22’nin COP değerlerinin, tüm uygulama aralıkları için incelenen alternatif akışkan COP değerlerinden daha fazla olduğu görülmektedir. Bu açıdan değerlendirildiğinde, R422A soğutucu akışkanının COP değerlerine bakıldığında R22 için en kötü yenileme ve değişim akışkanı olduğu söylenebilir.

Şekil 6’te kondenser yüklerinin incelenen beş akışkan için evaporasyon sıcaklıklarına göre değişimi verilmiştir. Yapılan analizlerde yoğuşma sıcaklığı sabit (50°C) tutulmuştur. Şekilden görüldüğü gibi R22, R417A ve R438A gazları için kondenser yükleri büyük benzerlik göstermektedir. Düşük evaporasyon sıcaklıklarında kondenser yükleri daha fazla olmakta ve evaporasyon sıcaklığı yükseldikçe kondenser yükleri azalmaktadır. Bunun nedeni, düşük evaporatör sıcaklıklarında kompresör için daha fazla güç çekilmesidir.



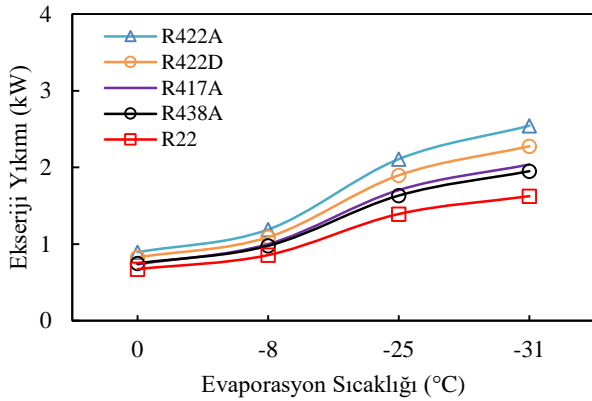
Şekil 6. Sistemin farklı akışkanlara göre kondenser yükleri (Condenser load of system by different refrigerants)

Şekil 7’de sistemin kompresör elektriksel gücü verilmiştir. Yapılan analizlerde yoğuşma sıcaklığı sabit (50°C) tutulmuştur. Şekil 5 ve 6 beraber değerlendirildiğinde, R22 akışkanı için daha az kompresör gücü gerektiği ve kondenser yükünün az olduğu görülmektedir. Bu akışkan baz alındığında, R22 akışkanına en yakın performansın R438A’da daha sonra sırası ile R417A, R422D ve R422A akışkanlarında olduğu gözlemlenmiştir.



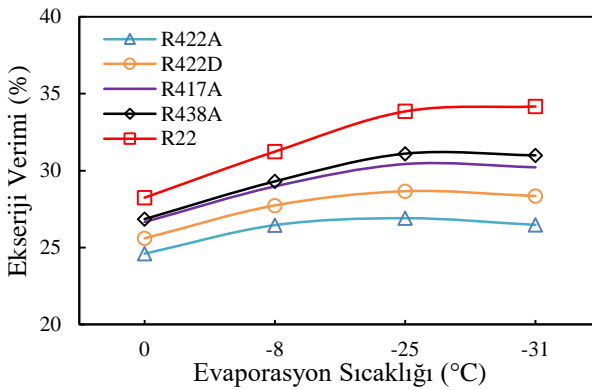
Şekil 7. Sistemlere ait kompresör elektriksel güçleri (Electrical power of the compressor of the systems)





**Şekil 8.** Sistemlere ait ekserji yıkımları (Exergy destructions of systems)

Şekil 8’de evaporasyon sıcaklıklarının ekserji yıkımı üzerindeki etkisi görülmektedir. Yapılan analizlerde yoğunlaşma sıcaklığı sabit (50°C) tutulmuştur. Evaporasyon sıcaklıklarındaki artış ile ekserji yıkımının tüm soğutucu akışkanlar için arttığı görülmektedir. Şekil 7’de görüldüğü üzere en düşük ekserji yıkımı R22 akışkanında tespit edilmiştir. Ardından R438A, R417A, R422D ve R422A akışkanları gelmektedir. R22 akışkanında en düşük ekserji yıkımı 0.671 kW, R417A için 0.737 kW, R422A için 0.896 kW, R422D için 0.828 kW ve R438A akışkanında ise 0.75 kW olarak hesaplanırken, evaporasyon sıcaklıklarının düşmesiyle birlikte her bir sistem için ekserji yıkımları da artmaktadır.



**Şekil 9.** Sistemlerin ekserji verimleri (Exergy efficiencies of systems)

Sistemin gerçek performansını belirleyen ekserji verimleri ise Şekil 9’de görülmektedir. Yapılan analizlerde yoğunlaşma sıcaklığı sabit (50 °C) tutulmuştur. R22 akışkanını için ekserji verimi %28-34 arasında değişirken, R417A için %26-30 arasında, R438A için %26-31 arasında, R422A için %24-27 arasında, R422D için ise %25-28 arasında değiştiği gözlemlenmiştir.

Kompresör işi arttıkça ekserji verimi düşmektedir. Ayrıca COP değeri yüksek olan soğutucu akışkanın ekserji verimliliği de yüksek olmaktadır. R22’nin COP değerleri diğer soğutucu akışkanlara göre yüksektir,

kompresör işi de diğer soğutucu akışkanlara göre düşük çıkmaktadır.

Seçilen soğutucu akışkanların ikinci yasa verimlerinin -25 °C’ye kadar artarken, -31 °C’de azaldığı görülmüştür. Bunun nedeni ise, -31 °C’de kompresörün yaptığı iş tüketimi artmaktadır. Bu durum ekserji yıkımında artışa, ekserji veriminde ise azalmaya neden olmaktadır.

## 5. ÖNERİLER (SUGGESTIONS)

Yapılan çalışmanın sonucunda elde edilen birinci ve ikinci kanun analizlerine göre birtakım öneriler tespit edilmiştir.

Soğutucu akışkan olarak R22 kullanan buhar sıkıştırma soğutma sisteminin performans katsayısı (COP) referans kabul edilerek R422A, R422D, R417A ve R438A kullanılan sistemin COP değerleri karşılaştırılmıştır. R22 kullanılarak elde edilen COP değerlerine en yakın sonuç veren soğutucu akışkanlarının sırasıyla R438A, R417A, R422D ve R422A olduğu görülmüştür. Düşük COP değerine sahip akışkanlar daha fazla enerji tüketecek ve bu da çevre üzerinde olumsuz etki yaratacaktır.

Çalışmanın sonucunda R22 soğutucu akışkanının diğer alternatif akışkanlardan daha fazla ekserji verimliliğine sahip olduğu görülmüştür.

Enerji ve ekserji analizi, değerlendirilen alternatif akışkanların her birinin, R22 için potansiyel bir yenileme akışkanı olduğunu, ancak R22’ye göre en cazip olanların R417A ve R438A olduğunu göstermektedir.

Yüksek kompresör gücü gerektiren alternatif soğutucu akışkan R422A, düşük kompresör gücü gerektiren alternatif akışkan ise R22’den sonra sırası ile R438A, R417A ve R422D’dir.

Performans açısından sırasıyla R422A, R422D, R417A ve R438A gazlarının iyi bir alternatif olamamasının en büyük nedenlerinden biri de düşük sıcaklıklarda harcadığı fazla güçtür.

Bu analizlerin sonucunda performans olarak akışkanları karşılaştırdığımızda R422A, R422D, R438A ve R417A akışkanları arasında R22 gazına alternatif olabilecek en iyi akışkanın sırasıyla R438A, R417A, R422D ve R422A olduğu tespit edilmiştir.

R22 soğutucu akışkanının ODP potansiyeli olması ve artık hiçbir yeni sistemde kullanılmıyor olması sebebiyle ODP potansiyeli olmayan ve R22 akışkanına direkt alternatif görünen R438A, R417A, R422D ve R422A akışkanlarının özellikle ticari ve büyük sistemlerde kullanılması uygundur.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Çalışmamız Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimi (No: [2019.21.02.983](#)) tarafından desteklenmiştir.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Llopis R., Torrella E., Cabello R. and Sanchez D., “HCFC-22 replacement with drop-in and retrofit HFC refrigerants in a two-stage refrigeration plant for low temperature”, *Int. J. Refrig.*, 35: 810-816, (2012).
- [2] Yang Z. and Wu X., “Retrofits and options for the alternatives to HCFC-22”, *Energy*, 59: 1-21, (2013).
- [3] Aprea C., Maiorino A. and Mastrullo R., “Exergy analysis of a cooling system: Experimental investigation on the consequences of the retrofit of R22 with R422D”, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 9: 71-79, (2014).
- [4] Oruç V. and Devcioğlu A. G., “Buhar sıkıştırılmalı bir soğutma sisteminde R22 yerine N20 ve R444B soğutucu akışkanlarını kullanmanın termodinamik performans etkisi”, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31:4, 859-869, (2016).
- [5] Rocca, V. and Panno, G., “Experimental performance evaluation of a compression refrigeration plant when replacing R22 with alternative refrigerants”, *Appl. Energy*, 88: 2809-2815, (2011).
- [6] Allgood, C.C. and Lawson, C. C., “Performance of R-438A in R22 refrigeration and air conditioning systems,” *Int. Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue*, Indiana, 12-15, (2010).
- [7] Elgendy, E. and Schmidt, J., “Rating Charts of R-22 Alternatives Flow through Adiabatic Capillary Tubes, World Academy of Science”, *Engineering and Technology International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 7:8, (2013).
- [8] Rocca, A., L., Rocca V., L., Messineo, A. and Panno, D., “Use of HFC Fluids as Suitable Replacements in Low-Temperature Refrigeration Plants”, *ARN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9:1, (2014).
- [9] Ergün, A., Gürel, A. E. and Ceylan, İ., “Ticari Soğutma Sistemlerinde R22 Akışkanının Alternatifi Olarak R438a ve R417a Akışkanlarının Performansının İncelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C*, 5:1, (2018).
- [10] <http://www.thermo.us> (*Thermodynamics&Transport Properties Calculation Platform*)
- [11] [http://www.linde-gas.com/en/products\\_and\\_supply/refrigerants/hfc\\_refrigerants/index.html](http://www.linde-gas.com/en/products_and_supply/refrigerants/hfc_refrigerants/index.html)
- [12] Seara, J. F., Uhia, F.J., Diz, R. and Dopazo, J.A., “Vapour condensation of R22 retrofit substitutes R417A, R422A and R422D on CuNi turbo C tubes”, *International Journal Of Refrigeration*, 33:148-157, (2010).
- [13] [http://www.bock.de/media/files/PDF/Produktinformation/n/96151\\_Alternative-refrigerants\\_R22\\_Gb.pdf](http://www.bock.de/media/files/PDF/Produktinformation/n/96151_Alternative-refrigerants_R22_Gb.pdf)
- [14] [http://www.lindegaz.com.tr/en/products\\_and\\_supply/refrigerants/hcfc\\_refrigerants/r22/index.html](http://www.lindegaz.com.tr/en/products_and_supply/refrigerants/hcfc_refrigerants/r22/index.html)
- [15] [https://www.chemours.com/Refrigerants/en\\_US/products/DUPREX/DUPREX.html](https://www.chemours.com/Refrigerants/en_US/products/DUPREX/DUPREX.html)
- [16] Devcioğlu A.G. ve Oruç V., “Soğuk Oda Cihazlarında R404a Yerine R442a Soğutucu Akışkanının Kullanılmasının Teorik Olarak İncelenmesi”, *Soğutma Dünyası*, 75:62-68, (2016)



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Patient specific cardiovascular disease modelling based on the computational fluid dynamics simulations: segmentation and hemodynamic model of a thoracic artery

*Hesaplamaalı akışkanlar dinamiği simülasyonlarına dayalı hastaya özel kardiyovasküler hastalık modellemesi: torasik arterin segmentasyonu ve hemodinamik modeli*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Levent AYDIN<sup>1</sup>, Serdar KUCUK<sup>2</sup>, Ozgur CAKIR<sup>3</sup>

*ORCID<sup>1</sup>:* 0000-0003-2926-2824

*ORCID<sup>2</sup>:* xxxx-xxxx-xxxx-xxxx

*ORCID<sup>3</sup>:* xxxx-xxxx-xxxx-xxxx

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Aydin L., Kucuk S. ve Cakir O., "Patient specific cardiovascular disease modelling based on the computational fluid dynamics simulations: segmentation and hemodynamic model of a thoracic artery", *Journal of Polytechnic*, 23(4): 1213-1218, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.616293

# Patient Specific Cardiovascular Disease Modelling Based on The Computational Fluid Dynamics Simulations: Segmentation and Hemodynamic Model of a Thoracic Artery

## Highlights

- ❖ A patient specific thoracic artery model is segmented based on the MRI images,
- ❖ A thoracic aneurysm disease model is simulated to assess blood flow changes and stress during the circulation.

## Graphical Abstract

In this study, a patient specific thoracic artery model is first segmented based on the MRI images and then a thoracic aneurysm disease model is simulated to assess blood flow changes, for maximum flow condition, and generated stress during the circulation.

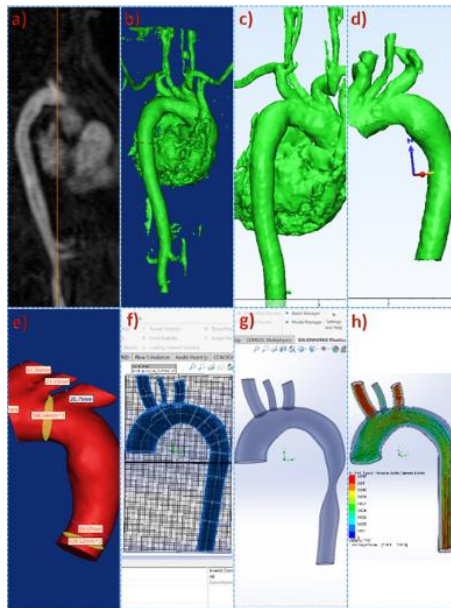


Figure. A

## Aim

The aim of this study is to obtain a patient specific thoracic artery model and perform fluid dynamic simulations based on the predefined disease conditions.

## Design & Methodology

MIMICS software was utilized to segment the artery model. Subsequently, target artery model was imported into SolidWorks to perform simulation scenarios based on the aneurysm progression.

## Originality

Patient specific thoracic artery segmentation is presented step by step. Finally, the STL artery model file was utilized in simulations with predefined conditions to observe effects of aneurysms in advance.

## Findings

Blood flow velocity values were increased during the systole up to 0.2m/s and decreased during the diastole down to 0.02m/s on each region of the vessel. Maximum 0.0002MPa vonMises stress generated in more progressed aneurysm disease model

## Conclusion

Patient specific thoracic artery segmentation and disease model simulation are presented. Progression of a vascular disease may be simulated in advance by utilizing this segmented 3D model.

## Declaration of Ethical Standards

Ethical permission was received by the Ethics and Research Committee of Kocaeli University (Reference Number: KU GOKAEK 2019/204).

# Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği Simülasyonlarına Dayalı Hastaya Özel Kardiyovasküler Hastalık Modellemesi: Torasik Arterin Segmentasyonu ve Hemodinamik Modeli

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Levent AYDIN<sup>1\*</sup>, Serdar KUCUK<sup>2</sup>, Ozgur CAKIR<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Gedik Meslek Yüksek Okulu, Biyomedikal Cihaz Teknolojileri Bölümü, İstanbul Gedik Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Müh. Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye

<sup>3</sup>Tıp Fakültesi, Radyoloji Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 06.09.2019 ; Kabul/Accepted : 07.12.2019)

## ÖZ

Günümüzde kardiyovasküler hastalıklar, çoğunlukla koroner arter hastalıkları önde gelen ölüm nedenleri arasında bulunmaktadır. Bir arterdeki mevcut akış dinamiği, kardiyovasküler bir rahatsızlığın önceden teşhis edilebilmesinde büyük önem taşımaktadır. Bununla birlikte, hemodinamik parametreler, doğrudan ölçülemediği için, gerçekçi fizyolojik simülasyonlar elde edilmesinde beyin ve kalp damar cerrahisi alanlarında hesaplmalı yöntemler oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışmada, hastaya özgü bir torasik arter modelinin, MRI görüntüleri temelli segmentasyonu gerçekleştirilerek, bu model üzerinde önceden tanımlanmış koşullar altında kan akışı değişikliklerini değerlendirmek üzere bir torasik anevrizma hastalığı simüle edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Hastalık modeli, hesaplmalı akışkanlar mekaniği, kardiyovasküler hastalık, torasik arter, anevrizma.

# Patient Specific Cardiovascular Disease Modelling Based on the Computational Fluid Dynamics Simulations: Segmentation and Hemodynamic Model of a Thoracic Artery

## ABSTRACT

Nowadays cardiovascular diseases (CVDs), mostly coronary artery diseases become a leading cause of death. Flow dynamics of a vessel is important to diagnose a CVD in advance. However, hemodynamic parameters may not be measured directly. Hence, computational methods are increasingly being used in the fields of neurosurgery and cardiovascular surgery to obtain realistic physiological simulations. In this study, a patient specific thoracic artery model is first segmented based on the MRI images and then a thoracic aneurysm disease model is simulated to assess blood flow changes under the predefined conditions.

**Keywords:** Disease model, computational fluid dynamics, cardiovascular disease, thoracic artery, aneurysm.

## 1. INTRODUCTION

Nowadays cardiovascular diseases (CVDs), mostly coronary artery diseases, hearth attack and stroke, become a leading cause of death. More than 17 million people died in 2016 according to a study of the World Health Organization (WHO) although most of the diseases can be prevented [1]. Moreover, CVDs cause almost 6 million deaths in the European Union (EU) countries [2]. American Heart Association Council (AHA) has also reported that an average of 1 death occurs every 38 seconds in America [3]. CVDs such as Coronary heart disease, Cerebrovascular disease, Peripheral

arterial disease, Rheumatic heart disease, Congenital heart disease and Deep vein thrombosis and pulmonary embolism, are a group of disorders of the hearth and blood vessels that mainly caused by a blood flow blockage or a hemodynamic condition like high blood pressure in a weak spot of a vessel. Therefore, knowledge of the vessel physiology and pathology, blood flow mechanics and hemodynamic behaviors, are of great importance to diagnose or treat the CVDs in advance [4].

An artery is composed of several tissue layers namely: i) Tunica intima, the innermost layer of an artery, ii) Tunica media, enclosing surface of the intima and iii) Tunica externa or Tunica adventitia, the outermost layer of an artery, that naturally aligned, biomechanically elastic and strong enough to stand the required blood pressure during

\*Sorumlu Yazar (Corresponding author)  
e-posta : levent.aydin@gedik.edu.tr

circulation in body [5]. The intima layer is formed with endothelial cells that directly affect the vessel physiology owing to the interaction between the blood flow and endothelium. Changes in the flow may cause a vascular pathogenesis. The intima layer is surrounded with the media layer formed with smooth muscle cells (SMCs). Thickness of the media layer may vary according to the vessel type. The media layer is the thickest layer of an artery while it is thinner than the externa layer in veins. The elasticity of a vessel is also related to thickness ratio of both media and externa layers or vessel diameter. Therefore, more elastic behavior is expected in larger arteries with regards to pulsatile blood flow (Womersley flow) control. The externa layer is mostly comprised of collagen that guides to SMCs by means of micro fibers to achieve the required cellular alignment in a vessel structure. Furthermore, collagen layer protects the inner layers from the environmental risks in a body. Each tunica layer is supported with internal and external elastic membranes and elastic fibers.

Flow dynamics of a vessel is important for diagnosis or prognosis of a CVD [6]. Since blood directly interacts with endothelial layer during the circulation, a morphological change may be emerged by means of triggered chemical pathways owing to the deformation response of the endothelium against the generated shear forces (Wall Shear Stress - WSS) in a vessel. In this case, it may be vital to guide and determine the symptoms of an onset or a progression of CVDs [7,8]. Therefore, physiological responses of healthy and diseased vessels are compared with each other to achieve a meaningful difference in terms of flow conditions and shear stress distribution [9]. However, hemodynamic parameters may not be measured directly and even blood flow hemodynamics require detailed assumptions to create a realistic physiological model [9,10].

Recently, computational methods are increasingly being used in the fields of neurosurgery and cardiovascular surgery, atherosclerosis and aneurysm cases, to obtain realistic hemodynamic simulations [11,12]. Besides, these simulations may be utilized in surgical planning [13,14]. Thus, efficiency of the computational simulations is improved as well as patient's quality of life by means of the developed patient-specific disease models [15]. In this study, a patient specific thoracic artery model is first segmented based on the MRI images and then a thoracic aneurysm disease model is simulated to assess blood flow changes, for maximum flow condition, and generated stress during the circulation.

## 2. MATERIAL AND METHOD

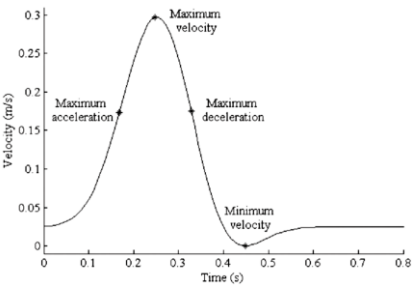
34-year-old patient (female) who has a Coarctation of the Aorta (CoA or CoAo), aortic narrowing, history was participated to this study during the raw image acquisition process. Medical scanning was performed at the Radiology Department, Faculty of Medicine Kocaeli University, using a 64-row multi-slice computed tomography system (Aquillion 64, Toshiba Medical

Systems, Tokyo, Japan). Ethical permission was received by the Ethics and Research Committee of Kocaeli University (Reference Number: KU GOKAEK 2019/204). Thoracic aorta model was obtained from the Picture Archiving and Communication System (PACS) server of the Radiology Department. System parameters were set to: 120kVp (photon energy spectrum), 80mA (tube current), 125mAs (time x milliamperes) with a collimation of 64 x 0.5mm and a rotation time of 0.5s in the raw data acquisition step. In addition, a contrast media (100mL) and a saline solution (40 mL) were injected with respectively at the same injection rate. Image reconstruction process was performed at: 7mm for section thickness, 0.3mm for overlapping steps and 700mm<sup>2</sup> for FoV (Field of View) with an automated exposure control (2.5mm overlap). Thus, the raw data acquisition process was completed.

MIMICS software (v19) was utilized in image segmentation step and a reference model of the aorta was automatically reconstructed by means of the default tools and functions of the software. Noise reducing filters such as binomial blur and mean tools were also used to reduce undesired noise from the region of interest on each two-dimensional (2D) slice. Segmentation process was performed using the Thresholding tool at optimized value for target soft tissue (144 - Hounsfield Unit, HU as lower threshold, and 446 HU as higher threshold for this study). These parameters were ideal to obtain exact contour of the target model in a maximum allowable noisy form for this case [22]. Segmentation step was completed after each image section was masked and highlighted by a different color. Subsequently, three-dimensional (3D) calculation function was used at high quality to reconstruct the 3D processable raw model. The surface geometry of the model was manually cleared via 3-Matic software (v11, Materialise) according to the raw image geometries in MIMICS. Polygon Area Mark tool under the Mark - Area Mark menu was used to select each noisy surface and marked surfaces were deleted. The gaps on deleted surfaces were determined as Bad Contours and then fixed respectively using the Fill Hole Freeform tool under the Fix menu. The Fill Hole Freeform process was performed at High triangulation quality and formed in Tangent shape to achieve desired detail on processed surfaces. Finally, 3D reconstructed model was saved as Standard Tessellation Language (STL) file (although STL is a common file extension, it is not possible to perform simulation analysis to target model in all cases). Therefore, thoracic aorta model was created by means of SolidWorks (Dassault Systemes, v2016) according to the obtained manual measurements in MIMICS. After manual modelling, flow simulation tool was utilized to obtain blood flow simulation during the systole and diastole phases (0-0.8s). Finally, an aneurysm condition was simulated on the same aorta model to obtain blood flow properties using the predefined parameters as listed in Table 1.

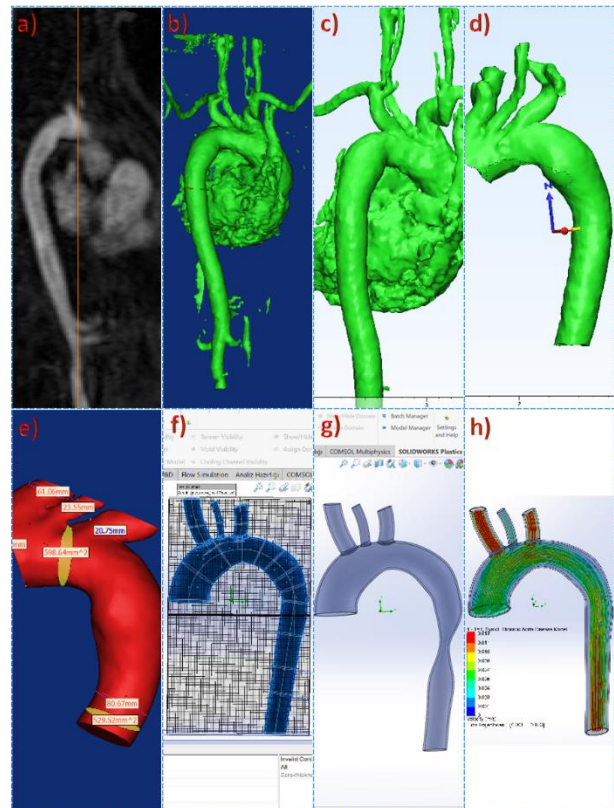


**Table 1.** Flow simulation parameters

Properties	Group	Parameter	Value	Ref.			
Thermodynamic parameters	Pressure		15998.6Pa <sup>a</sup>	[16]			
			10665.7Pa <sup>a</sup>				
	Temperature	T=0s (S)	0.025m/s <sup>c</sup>	-			
		T=0.1s (S)	0.05m/s <sup>c</sup>				
		T=0.2s (S)	0.2m/s <sup>c</sup>				
		T=0.3s (S)	0.275m/s <sup>c</sup>				
		T=0.4s (D)	0.024m/s <sup>c</sup>				
		T=0.5s (D)	0.012m/s <sup>c</sup>				
		T=0.6s (D)	0.026m/s <sup>c</sup>				
		T=0.7s (D)	0.025m/s <sup>c</sup>				
T=0.8s (D)	0.025m/s <sup>c</sup>						
Velocity parameters (for each direction, Systole, S and Diastole, D)							
Initial Conditions, SolidWorks				[17]			
		Turbulence Intensity	2% <sup>d</sup>	-			
		Turbulence Length	99m <sup>d</sup>	-			
		Density	1060kg/m <sup>3e</sup>	[18]			
		Dynamic Viscosity	0.0035Pas <sup>e</sup>	[18]			
		User Defined Material Properties, Solidworks	Item Properties	Specific Heat	3617	[19]	
				Thermal conductivity	W/(mK) <sup>f</sup>	[20]	
				Thickness	Each vessel	1.5mm	-
				Length	Descending A.	137.25mm <sup>g</sup>	-
		Vessel Parameters, Solidworks	Diameter (these values were the endpoints of each region)	Ascending A.	39.21mm <sup>g</sup>	-	
Descending A.	20.25mm <sup>g</sup>			-			
Brachio Cephalic T.	Brachio Cephalic T.		14mm <sup>g</sup>	-			
	L. Carotid		7mm <sup>g</sup>	-			
	L. Subclavian		11.5mm <sup>g</sup>	-			
	Ascending A.		0.00323989 kg/s <sup>h</sup>	[21]			
	Descending A.		0.000862575 kg/s <sup>h</sup>	[21]			
Mass Flow Rate, T=0s (S) (this value was recalculated for each condition of the pulsatile waveform)	Brachio Cephalic T.		0.000409955 kg/s <sup>h</sup>	[21]			
	L. Carotid		0.000104145 kg/s <sup>h</sup>	[21]			
	L. Subclavian		0.000278515 kg/s <sup>h</sup>	[21]			
	Descending A.	Diameter	down to 10mm	-			
Aneurysm Disease Model, Solidworks	Descending A.	Diameter	down to 20mm	-			
		Diameter	down to 10mm	-			

<sup>a</sup>Pressure was determined according to Systole and Diastole conditions (120-80 mmHg in terms of Pa).  
<sup>b</sup>Body temperature (in terms of K).  
<sup>c</sup>Velocity was determined according to Systole and Diastole conditions during a pulsatile waveform (in terms of m/s).  
<sup>d, e, f</sup> Default values.  
<sup>g</sup> Manually measured in MIMICS.  
<sup>h</sup> Calculated using the Mass Flow's equation ( $m = \rho \times V \times A$  where  $\rho$ : Density of the flowing liquid or gas, in kg/m<sup>3</sup>, V: Flow speed, in m/s, A: Flow area, in m<sup>2</sup> and m: Mass flow rate, in kg/s).

3D modelling and flow simulation of the reference thoracic aorta model, including the aneurysm condition, are illustrated step by step in Figure 1.



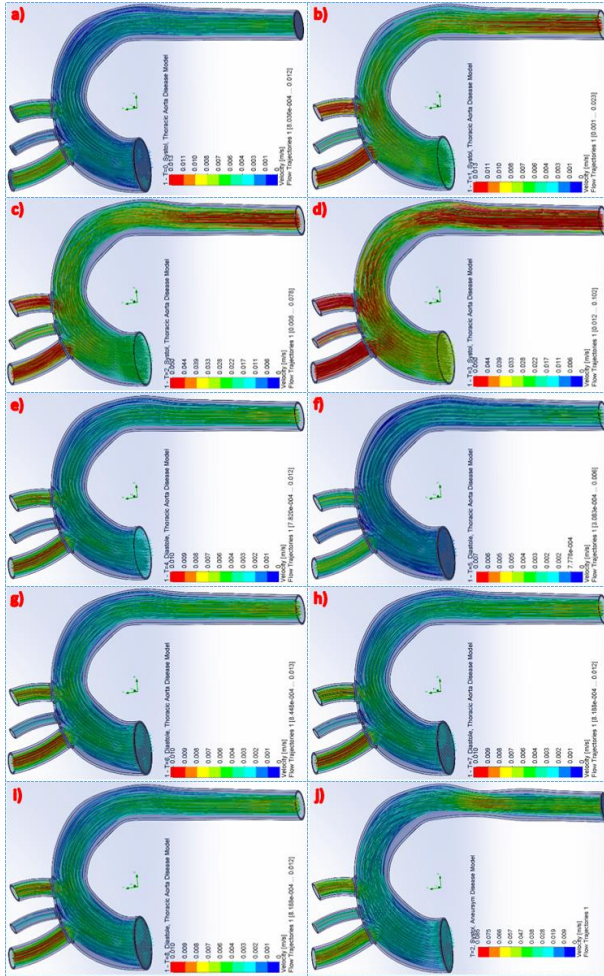
**Figure 1.** Step by step 3D modelling and flow simulation of the patient specific thoracic aorta and aneurysm disease model. a) An image of the 3D raw model, based on non-filtered DICOM images in Sectra workspace, a 3D DICOM viewer of the default system software that does not allow 3D model exporting or processing, b) 3D reconstruction of the raw images in a noisy form via MIMICS, c) Manual noise cleaning in 3-Matic, d) Manual surface reconstruction and fixing the geometrical errors of 3D raw model in 3-Matic, e) Manual vessel diameter measurements in MIMICS, f) 3D modelling of the thoracic artery in SolidWorks based on the manual measurements in MIMICS, g) Modelling the aneurysm disease scenario (ADS) in SolidWorks and h) Flow simulation analysis of the thoracic aorta model, including aneurysm condition, during the each phases of the pulsatile blood flow.

### 3. RESULT AND DISCUSSION

According to the results, blood flow velocity values were obtained as desired on each thoracic aorta model, increased during the systole and decreased during the diastole on each region of the vessel. Besides, the velocity values in aneurysm disease model were also increased with regards to the geometrical narrowing. Blood flow velocities of each vessel model are illustrated in Figure 2.

Finite element analysis (FEA) results of a more progressed aneurysm disease model, based on the flow simulation (blood pressure) analysis and vessel

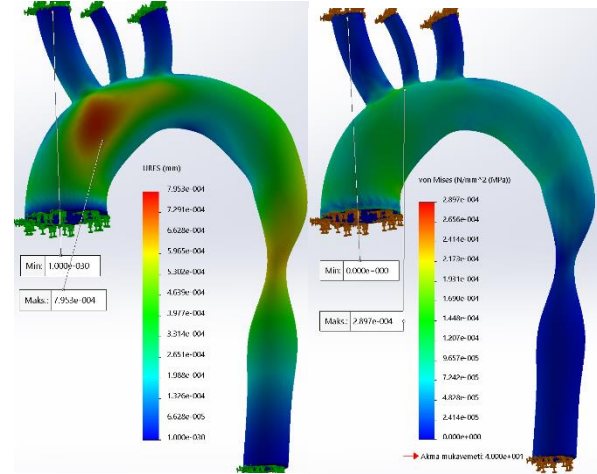
parameters that stated in Table 1, are illustrated in Figure 3 (T=0.2s systole condition only and vessel diameter was decreased down to 10mm, 25mm default).



**Figure 2.** Blood flow velocities of each thoracic aorta model (pressure values were set to optimal values according to each systole and diastole conditions). a) T=0s systole (velocity: Red - 0.013 m/s and Blue - 0 m/s), b) T=0.1s systole (velocity: Red - 0.013 m/s and Blue - 0 m/s), c) T=0.2s systole (velocity: Red - 0.05 m/s and Blue - 0 m/s), d) T=0.3s systole (velocity: Red - 0.05 m/s and Blue - 0 m/s), e) T=0.4s diastole (velocity: Red - 0.01 m/s and Blue - 0 m/s), f) T=0.5s diastole (velocity: Red - 0.007 m/s and Blue - 0 m/s), g) T=0.6s diastole (velocity: Red - 0.01 m/s and Blue - 0 m/s), h) T=0.7s diastole (velocity: Red - 0.01 m/s and Blue - 0 m/s), i) T=0.8s diastole (velocity: Red - 0.01 m/s and Blue - 0 m/s) and j) T=0.2s systole, aneurysm disease model, vessel diameter was decreased down to 20 mm (25mm default, T = time, velocity: Red - 0.085 m/s and Blue - 0 m/s). [Note that velocity parameters of Table 1 belong to Ascending Aorta regions (obtained from literature) and distribution of blood flow velocities (newly calculated) are illustrated in Figure 2]

Blood flow velocities were obtained as a) 0.05m/s (T=0s), b) 0.01m/s (T=0.1s), c) 0.039m/s (T=0.2s), d) 0.044m/s (T=0.3s), e) 0.005m/s (T=0.4s), f) 0.002m/s

(T=0.5s), g) 0.006m/s (T=0.6s), h) 0.006m/s (T=0.7s), i) 0.0065m/s (T=0.8s) and j) 0.07m/s (T=0.2s) at ADS regions. On the other hand, a vonMises stress at 2.89MPa was generated with a material displacement of 0.007mm on the arch of aorta model (vessel diameter was decreased down to 10 mm at ADS region) at Systole phase (T=0.2s).



**Figure 3.** Blood flow velocity based FEA results (T=0.2s systole condition only and vessel diameter was decreased down to 10mm). a) Material displacement values under the applied fluid dynamics and b) Generated vonMises stress against the blood flow.

**6. CONCLUSION**

Although computational fluid dynamics with the liquid-material interaction may help to obtain physiological information and biological response under the specified conditions that may not be measured directly, simulations require more precise definitions to achieve more realistic results. Since medical imaging technologies may allow to export target anatomical model in a STL file extension and although STL is a common file extension, it is not possible to perform a dynamic simulation analysis to target model in all cases. Therefore, the target model may require to be modeled manually or a 3rd party software such as Comsol, Abaqus or Fluent may be utilized to overcome the lack of STL file support especially in dynamic analysis [23,24]. On the other hand, researchers may perform static analysis on an STL file by means of a tool such as Power Surfacing or may apply directly to the generated mesh surfaces of the model in SolidWorks [25]. In addition, FEA of a blood vessel may require to define biomechanical properties of each vessel tissue layer separately. Thus, more accurate shear rates, regarding to the blood flow, may be obtained [26]. Furthermore, some parameters such as gravity or temperature may also be involved.

According to results of simulation, blood flow velocity is affected by ADS regarding to the decrease on the vessel diameter (Normal:25 mm, ADS: 20 mm). The velocities are almost doubled for Systole phase (T=0.2s) at ADS regions (Normal: 0.039m/s, ADS: 0.07m/s). Material

displacements are mostly observed at the arch of aorta and ADS regions due to the curvature changes on laminar blood flow path. Although blood flow velocities may vary regarding to the vessel geometry or predefined parameters such as blood and flow conditions, similarities of the flow velocity are confirmed from the previous studies [27]. In addition, Reynolds number (Re), a ratio of the inertial forces to viscous forces, can be calculated to determine the blood flow type (Laminar or Turbulent) for each pulsatile blood flow phase by using determined blood flow velocities at ADS regions. High Re up to 4000 indicates that inertial forces are dominant while low Re up to 2300 indicates viscous forces are significant. As Re may vary during the pulsatile blood flow, it is important to calculate the WSS affected by turbulent flow, according to natural geometry of the vessel or an implanted stent, to predict biomechanical stress on the vessel walls [28]. It should be noticed that vessel walls are assumed as rigid and blood is assumed as fully Newtonian to simplify calculations as well as removing branched vessel geometries [29-31]. However, it may not give the real accurate results since these conditions are accepted as ideal.

Disease modeling may be guide to obtain physiological responses against a patient specific progression scenario or predict symptoms of a CVD. Thus, development of a disease, such as a development stage or a rupture of an aneurysm or even a hypertension, may be simulated to calculate the damage [32]. Furthermore, simulation analysis may be useful for surgical planning and even preventive management as well as it may be utilized in drug research responses or even aging effects (European Commission supported projects, Research and Innovation in the field of ICT for Health, Wellbeing & Ageing Well: Cardioproof, EurValve, SmartTool) [33].

#### DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS

Ethical permission was received by the Ethics and Research Committee of Kocaeli University (Reference Number: KU GOKAEK 2019/204).

#### REFERENCES

- [1] [who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](http://who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds)), "WHO, Fact Sheets", (08.12.2019).
- [2] [ehnheart.org/cvd-statistics.html](http://ehnheart.org/cvd-statistics.html), "European Cardiovascular Disease Statistics, CVD Statistics", (08.12.2019).
- [3] [heart.org/-/media/data-import/downloadables/heart-disease-and-stroke-statistics-2018---at-a-glance-ucm\\_498848.pdf](http://heart.org/-/media/data-import/downloadables/heart-disease-and-stroke-statistics-2018---at-a-glance-ucm_498848.pdf), "American Heart Association, Heart Disease And Stroke Statistics", (08.12.2019).
- [4] Mohammed Y., "Three dimensional finite-element modeling of blood flow in elastic vessels: effects of arterial geometry and elasticity on aneurysm growth and rupture", *Master thesis*, Ryerson University, Toronto, Canada, (2010).
- [5] Canstein C. et al., "3D MR flow analysis in realistic rapid-prototyping model systems of the thoracic aorta: comparison with in vivo data and computational fluid dynamics in identical vessel geometries", *Magnetic Resonance in Medicine: An Official Journal of the International Society for Magnetic Resonance in Medicine*, 59(3): 535-546, (2008).
- [6] Van Pelt R., Nguyen H., Ter Haar Romeny B., Vilanova A., "Automated segmentation of blood-flow regions in large thoracic arteries using 3D-cine PC-MRI measurements", *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 7(2): 217-224, (2012).
- [7] Howe G., "Multiphysics simulation of a coronary artery", *Master thesis*, Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo, (2013).
- [8] Secomb T.W., "Hemodynamics," *Comprehensive Physiology*, 6(2): 975-1003, (2011).
- [9] Zarandi M.M., Mongrain R., Bertrand O.F., "Non-newtonian hemodynamics and shear stress distribution in three dimensional model of healthy and stented coronary artery bifurcation", *Comsol Conference*, Boston, 1-5, (2010).
- [10] Tado R., Deoghare A. B., Pandey K. M., "Computational Study of Blood Flow Analysis for Coronary Artery Disease", *International Journal of Biomedical and Biological Engineering*, 12(2): 35-39, (2018).
- [11] Ohhara Y. et al., "Investigation of blood flow in the external carotid artery and its branches with a new 0D peripheral model", *Biomedical Engineering Online*, 15(1): 16, (2016).
- [12] Takizawa K. et al., "Patient-specific computer modeling of blood flow in cerebral arteries with aneurysm and stent", *Computational Mechanics*, 50(6): 675-686, (2012).
- [13] Fishman E.K., Kuszyk B.S., Heath D.G., Cabral B., "Surgical planning for liver resection", *Computer*, 29(1): 64-72, (1996).
- [14] Taylor C.A., Hughes T.J.R., Zarins C.K., "Finite element modeling of blood flow in arteries", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 158(1-2): 155-196, (1998).
- [15] Bai-Nan X. et al., "Hemodynamics model of fluid–solid interaction in internal carotid artery aneurysms", *Neurosurgical Review*, 34(1): 39-47, 2011.
- [16] [heart.org/en/health-topics/high-blood-pressure/understanding-blood-pressure-readings](http://heart.org/en/health-topics/high-blood-pressure/understanding-blood-pressure-readings), "Heart, Understanding Blood Pressure Readings, Healthy and unhealthy blood pressure ranges", (08.12.2019).
- [17] Lain S., Caballero A. D., "Simulation of unsteady blood flow dynamics in the thoracic aorta", *Ingeniería e Investigación*, 37(3): 92-101, (2017).
- [18] Wain A.J.R. et al., "Blood flow through sutured and coupled microvascular anastomoses: a comparative computational study", *Journal Of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery*, 67(7): 951-959, (2014).
- [19] [itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/heat-capacity](http://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/heat-capacity), "It Is Foundation, Tissue Properties", (08.12.2019).
- [20] [itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/thermal-conductivity](http://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/thermal-conductivity), "It Is Foundation, Tissue Properties", (08.12.2019).

- [21] Prieto E.S., “Computational fluid dynamics indicators to improve cardiovascular pathologies”, *Doctoral thesis*, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, Spain, (2016).
- [22] Aydin L. et al., “Surgical Planning And Additive Manufacturing Of An Anatomical Model: A Case Study Of A Spine Surgery”, *Medical Robotics - New Achievements*, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.89950, (2019).
- [23] Liu X., et al., “Three-dimensional hemodynamics analysis of the circle of Willis in the patient-specific nonintegral arterial structures”, *Biomechanics And Modeling In Mechanobiology*, 15(6): 1439-1456, (2016).
- [24] Randles A., Frakes D., Leopold J., Jane A., “Computational fluid dynamics and additive manufacturing to diagnose and treat cardiovascular disease”, *Trends In Biotechnology*, 35(11): 1049-1061, (2017).
- [25] Aydin L. et al., “Development And Biomechanical Validation Of Medical Insoles To Prevent Foot Ulcers On Diabetic Patients By Means Of Thermoplastic Elastomers And Additive Manufacturing Technologies”, *Medical Technologies Congress (TIPTEKNO)*, IEEE, 1-4, (2019).
- [26] Zaucha M. et al., “Biaxial biomechanical properties of self-assembly tissue-engineered blood vessels”, *Journal Of The Royal Society Interface*, 8(55): 244-256, (2010).
- [27] Deep D., “A study of blood flow in normal and dilated aorta”, *PhD. Thesis*, Purdue University, Indiana, (2014).
- [28] Caballero A.D., Lain S. A., “Review On Computational Fluid Dynamics Modelling In Human Thoracic Aorta”, *Cardiovascular Engineering And Technology*, 4(2): 103-130, (2013).
- [29] Hyman J., Knapp R., Scovel J., “High order finite volume approximations of differential operators on nonuniform grids”, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 60(1-4): 112-138, (1992).
- [30] Nerem R., “Vascular fluid mechanics, the arterial wall, and atherosclerosis”, *Journal Of Biomechanical Engineering*, 114(3): 274-282, (1992).
- [31] Nataf P., Lansac E., “Dilation of the thoracic aorta: medical and surgical management”, *Heart*, 92(9): 1345-1352, (2006).
- [32] Fung G. et al., “On stent-graft models in thoracic aortic endovascular repair: a computational investigation of the hemodynamic factors”, *Computers In Biology And Medicine*, 38(4): 484-489, (2008).
- [33] European Commission, “Research And Innovation In Digital Solutions For Health, Wellbeing And Ageing - An Overview”, *Digital Single Market - Technical Report*, 1-94, (2019).





POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



**Güç kalitesi bozulmalarının hilbert-huang dönüşümü, genetik algoritma ve yapay zeka/makine öğrenmesi yöntemleri ile sınıflandırılması**

*Classification of power quality disturbances with hilbert-huang transform, genetic algorithm and artificial intelligence/machine learning methods*

*Yazar(lar) (Author(s)): Seçkin KARASU<sup>1</sup>, Zehra SARAÇ<sup>2</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-5277-5252*

*ORCID<sup>2</sup>: 0000-0003-3330-5196*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Karasu S. ve Saraç Z., “Güç kalitesi bozulmalarının hilbert-huang dönüşümü, genetik algoritma ve yapay zeka/makine öğrenmesi yöntemleri ile sınıflandırılması”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1219-1229, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.508773

# Güç Kalitesi Bozulmalarının Hilbert-Huang Dönüşümü, Genetik Algoritma Ve Yapay Zeka/Makine Öğrenmesi Yöntemleri İle Sınıflandırılması

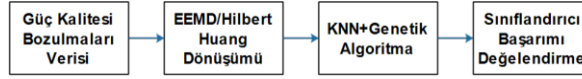
## Classification of Power Quality Disturbances with Hilbert-Huang Transform, Genetic Algorithm and Artificial Intelligence/Machine Learning Methods

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Güç Kalitesi (GK) bozulma sinyalleri için Grupsal Ampirik Kip Ayrışımı ve Hilbert Huang (HH) dönüşümü (HD) ile öznelikler çıkartılmaktadır. / For Power Quality (PQ) disturbances signals, features are extracted by Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) and Hilbert Huang transform (HT).
- ❖ Genetik Algoritma (GA) ve K en yakın komşu sınıflandırma (KNN) yaklaşımı ile en uygun öznelikler belirlenmektedir. / The most suitable features are determined by Genetic Algorithm (GA) and K Nearest Neighbour (KNN) classification approach.
- ❖ Oluşturulan model için GK bozulmaları yüksek başarımla sınıflandırılmaktadır. / PQ disturbances are classified with high performance for the created model.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

HH Dönüşümü, GA ve KNN sınıflandırma yöntemleri ile PQ bozulmaları sınıflandırılmaktadır. / PQ disturbances are classified by HH transform, GA and KNN methods.



Şekil. GK bozulmalarını sınıflandırma / Figure. Classification of PQ disturbances

### Amaç (Aim)

EEMD + HD + GA + KNN yöntemleri kullanılarak tekli ve çoklu GK bozulmalarının yüksek başarımla sınıflandırılması amaçlanmıştır. / It is aimed to classify single and multiple PQ disturbances with high performance rate by using EEMD + HT + GA + KNN methods.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

EEMD ve HD yöntemleri ile öznelikler belirlenmektedir. GA + KNN yöntemi ile başarımla yüksek tutacak öznelikler seçilmektedir. / Features are extracted by EEMD and HT methods. Features that will keep the performance high are selected with GA + KNN method.

### Özgünlük (Originality)

Hibrit sınıflandırıcı ile yüksek başarımla sağlayan GK bozulmalarını sınıflandıran yeni bir model oluşturulmaktadır. / A novel model is created that classifies high performance PQ disturbances with the hybrid classifier.

### Bulgular (Findings)

GA + KNN yöntemi kullanılarak EEMD ve HD yöntemleri ile elde edilen özneliklerden en uygun olanları seçilmektedir. / The most suitable features that extracted with EEMD and HT methods are selected by using GA + KNN method.

### Sonuç (Conclusion)

EEMD + HD + GA + KNN yöntemleri kullanılarak GK bozulmalarının sınıflandırılması yüksek başarımla sağlanmaktadır. / Classification of PQ disturbances is achieved with high performance by using the EEMD + HT + GA + KNN methods.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.



# Güç Kalitesi Bozulmalarının Hilbert-Huang Dönüşümü, Genetik Algoritma ve Yapay Zeka/Makine Öğrenmesi Yöntemleri İle Sınıflandırılması

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Seçkin KARASU<sup>1\*</sup>, Zehra SARAÇ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

<sup>2</sup>İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

(Geliş/Received : 05.01.2019 ; Kabul/Accepted : 23.03.2019)

## ÖZ

Bu çalışmada Güç Kalitesi (GK) Bozulmalarını sınıflandırmak için Hilbert-Huang Dönüşümü yöntemi ve istatistiksel özellikler ile öznelikler elde edilmektedir. Elde edilen özneliklerden uygun olanları Genetik Algoritma (GA) ve k-En Yakın Komşu (KNN) sınıflandırma yaklaşımı ile seçilmektedir. Yapay Zeka ve Makine Öğrenmesi yöntemlerine dayalı modeller oluşturulmakta ve deneysel düzenekten alınan veriler kullanılarak test işlemi yapılmaktadır. Gürültülü durumlar matematiksel eşitlikler kullanılarak üretilmektedir. Bunun yanında deneysel düzenekten elde edilen Güç Kalitesi Bozulma verisi de bu çalışmada kullanılmaktadır. Sinyallere öncelikle Ampirik Kip Ayırışımı (EMD) yöntemi uygulanmaktadır. Daha sonra Hilbert dönüşümü (HT) neticesinde istatistiksel özellikler ile gerekli öznelikler çıkartılmaktadır. Aynı işlem Grupsal Ampirik Kip Ayırışımı (EEMD) yöntemi için tekrarlanmaktadır. Çıkartılan özneliklerden gerekli olanlarının seçilebilmesi için GA + KNN sarmalama yaklaşımı kullanılmaktadır. Çok katmanlı algılayıcı (MLP) ve KNN yaklaşımları ile GK Bozulmalarını sınıflandıran modeller oluşturulmaktadır. 9 adet tekli, 9 adet çoklu bozulma türü için oluşturulan EEMD + HT + GA + KNN sınıflandırma modelinin başarımları sentetik veriler için %99.15, deneysel veriler için % 99.02 olarak elde edilmektedir. Literatürdeki çalışmalar ile kıyaslandığında elde edilen EEMD + HT + GA + KNN yönteminin, 9 adet çoklu GK bozulmasını ayırt edebilme özelliğine sahip olduğu ve %99.12'lik genel başarımlar oranı ile en iyi başarımlar veren yöntem olduğu sonuçlarına varılmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Güç kalitesi, Hilbert-Huang dönüşümü, ampirik mod ayrıştırması, grupsal ampirik mod ayrıştırması, genetik algoritma.

## Classification of Power Quality Disturbances with Hilbert-Huang Transform, Genetic Algorithm and Artificial Intelligence/Machine Learning Methods

### ABSTRACT

In this study, Hilbert-Huang Transform method and statistical features are obtained to classify Power Quality (PQ) Disturbances. The appropriate features are selected by the Genetic Algorithm (GA) and k-Nearest Neighbor (KNN) classification approach. Models based on Artificial Intelligence and Machine Learning methods are formed and test process is performed by using data from experimental setup. Noisy situations are produced using mathematical equations. In addition, PQ Disturbances data from the experimental setup is also used in this study. Firstly, Empirical Mode Decomposition (EMD) method is applied to the signals. Then, by applying Hilbert transformation (HT), statistical features are extracted. The same procedure is repeated for Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD). GA + KNN wrapper approach is used to select necessary features from feature subset. PQ Disturbances models are created based on Multilayer Perceptron (MLP) and KNN methods. The performance of EEMD + HT + GA + KNN classification model for 9 single and 9 multiple types of disturbances is 99.15% for synthetic data and 99.02% for experimental data. Compared to the literature, EEMD + HT + GA + KNN method has the ability to distinguish 9 multiple PQ disturbances. The overall performance gives the best performance with a rate of 99.12%.

**Keywords:** Power quality disturbances, Hilbert-Huang transform, empirical mode decomposition mod, ensemble empirical mode decomposition, genetik algoritma.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Güç kalitesi, standartlar ile belirlenmiş gerilim akım ve faz değerlerinde elektrik gücünün elektrik şebekesindeki varlığı olarak tanımlanmaktadır [1]. Elektrik şebekesinin

elektriksel dalga formlarının temsili, bir insan kalbinin elektrik fonksiyonuna ve sağlık durumuna ilişkin bilgiler sunan elektrokardiyogramın (EKG) temsil edilmesiyle karşılaştırılabilir [1-2]. Aynı şekilde, bir güç şebekesinden elde edilen sinyallerin değerlendirilmesi bir elektrik mühendisine elektrik sistemindeki olası arızaları tahmin ve teşhis edebilme yeteneği vermektedir.

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : seckin.karasu@beun.edu.tr

Ancak gün geçtikçe elektrik şebekelerinin karmaşık bir yapı alması, harmonik içeren yüklerin, doğrusal olmayan yüklerin sayısının artması çok çeşitli bozulma tipinin oluşmasına ve bu amaçla insan müdahalesi olmadan güç kalitesi bozulmalarının sınıflandırılması ihtiyacının doğmasına sebep olmaktadır [3]. Güç kalitesi bozulmalarının tanınması problemi bir örüntü tanıma problemi olarak ele alınmaktadır. Bu sebeple, sinyal işleme yöntemi ile özniteliklerin belirlenmesi, yararlı öznitelik grubunun belirlenmesi ve sınıflandırma adımları ile tanıma modelleri oluşturulmaktadır.

Literatürde bu konuda oldukça fazla çalışma yapılmaktadır. Bunlardan mevcut yaklaşım olan Varyasyonel Kip Ayırışımı (VMD), Ağırlıklı Online Ardışıl-Aşırı Öğrenme Makinası yöntemleri ile 7 tekli, 9 ikili bozulma ürünü [4]'de sınıflandırılmaktadır. Nöron Ağacı, Yüksek Dereceden İstatistikler yöntemleri ile de sınıflandırma yapılmaktadır [5]. [6]'da ise KL İraksama ve Destek Vektör Makinası yöntemi ile sınıflandırma işlemi yapılmaktadır. Ayrık Dalgacık Dönüşümü (DWT), Yapar Arı Koloni (ABC) ve Olasılıksal Sinir Ağları (PNN) yöntemleri ile sınıflandırma yöntemi ise [7]'de önerilmektedir. Korelasyonlu Öznitelik Seçme (CFS), Karşılıklı Bilgiye dayalı Öznitelik Seçme (MIFS) ve SVM yöntemleri de kullanılmaktadır [8]. [9]'da WT, Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Aşırı Öğrenme Makinası (ELM) tabanlı PQ sınıflandırma modeli oluşturulmuştur. Her iki olay için sınıflandırma oranı % 99.00 olmasına rağmen, sekiz tek olay için performans oranı % 97.25'dir. Genel performans % 97.60'dır.

Sinyal işleme yöntemlerinden Hilbert Dönüşümü ve Hilbert-Huang Dönüşümü ile oluşturulan modellerden Ampirik Kip Ayırışımı (EMD), Hilbert Dönüşümü (HT) ve Destek Vektör Makinası (SVM) yöntemleri ile 10 farklı bozulma türünü sınıflandırmaktadırlar [10]. Gerilim düşmesi, gerilim yükselmesi, harmonikli durumlar, gerilimde salınımlı durumlar için İteratif Hilbert Huang dönüşümü ile Güç kalitesi bozulmalarını da [11]'de incelemektedirler. Bu [11]'deki sinyaller üzerinde ayırt edici özellikler barındırdıklarını göstermiş olmalarına rağmen, sınıflandırma yöntemi ile bir model oluşturamamışlardır. [12]'de gerilim düşmesi için EMD ve Hilbert Huang (HH) dönüşümü uygulayarak bir simülasyon çalışması yapmaktadırlar. İlgili çalışmada EMD sonucunda oluşan İçkin Kip Fonksiyonları (IMF)'lerin HH dönüşümü ile bu sinyaller üzerinde ayırt edici özellikler sergilediğini göstermişlerdir ancak sınıflandırma işlemi yapmamışlardır. [13]'de HH Dönüşümü ve Uygunluk Vektör Makinası yöntemi ile 7 çeşit güç kalitesi bozulma verisi için sınıflandırma işlemi yapmaktadırlar. Ayrıca belirtilen çalışmada KNN ve SVM yöntemlerini de test etmişler ve önerdikleri yöntemin diğer yöntemlere göre yüksek olduğunu; %94.57'lik bir başarımla sergilediğini göstermişlerdir. [14]'te Ortogonal Hilbert Huang (OHH) dönüşümü ile gerilimde salınımlı durumları incelenmektedir. EMD ile önce IMF leri elde edip sonra bunu OHH dönüşümünde kullanmaktadırlar. HHT'ye göre OHH ile gerilimde salınımlı durum sinyallerinin tespitinin daha sağlıklı

yapıldığı gösterilmektedir. [15]'de geliştirilmiş HH Dönüşümü ile güç kalitesi bozulmaları üzerinde analiz yapılmaktadır ve sentetik veriler üzerinde çalışmaktadırlar. Maskeleyme işlemi ile EMD üzerinde elde edilen IMF'ler geliştirilmiş HH dönüşümüne uygulanmaktadır. Belirtilen çalışmada sınıflandırma işlemi yapılmamış olmasına rağmen güç kalitesi bozulmalarının teşhisinde HH'ın kullanılabileceğini ifade etmektedirler.

Bu çalışmada ise GK bozulma sinyallerinin sınıflandırılması için HH dönüşümü ile öznitelikler çıkartılmakta, GA + KNN yaklaşımı ile özniteliklerden en uygun olanları seçilmektedir. IMF'lerin elde edilmesi aşamasında EMD ve Grupsal Ampirik Kip Ayırışımı (EEMD) yaklaşımları uygulanmakta ve Hilbert Analizi yapılmaktadır. Yapay zeka yöntemlerinden Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) ve Makine Öğrenmesi yöntemlerinden k-En Yakın Komşu (KNN) sınıflandırma yöntemi ile modeller oluşturulmaktadır. Sentetik veriler ve deneysel düzenekten alınan veriler kullanılarak sınıflandırma başarımları ölçülmektedir. Farklı gürültülü durumlarda ve tekli, çoklu bozulmalar için de başarımlar değerlendirilmiştir yapılmaktadır. Buna göre 9 adet tekli, 9 adet çoklu bozulma türü için oluşturulan EEMD + HT + GA + KNN sınıflandırma modelinin başarımlarını sentetik veriler için %99.15, deneysel veriler için % 99.02 olmakta ve genel başarımlar ise %99.12 olarak elde edilmektedir. Bu yöntemin literatürdeki diğer yöntemlere göre çok farklı çoklu bozulma türlerini sınıflandırma özelliği içerdiği ve deneysel veriler için sınıflandırma başarımlarının yüksek olduğu görülmektedir.

Çalışmada kullanılan yöntemler II. bölümde açıklanmakta ve III. bölümde çalışmada kullanılan yöntemin genel akışı verilmektedir. IV. bölümde sonuçlar irdelenmektedir.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

### 2.1 Hilbert Dönüşümü (Hilbert Transform)

Orijinal bir sinyal  $x(t)$  için Hilbert dönüşümü,  $-\infty < t < \infty$  aralığında tanımlanan gerçek değerli  $\hat{x}(t)$  ile denklem (1)'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\hat{x}(t) = H\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{\pi(t - \tau)} dt \quad (1)$$

Bu eşitlikte  $H\{\cdot\}$  Hilbert dönüşümünü,  $\tau$  kaydırma operatörüne karşılık gelmektedir. Bir sinyalin Hilbert dönüşümü, orijinal sinyalden  $90^\circ$  faz kaydırılmış bir ortogonal sinyal üretmektedir [16, 17].  $x(t)$  sinyali için analitik form Picibono tarafından tanımlanmak ve bu ifade denklem (2)'deki gibi verilmektedir [18].

$$z_x(t) = x(t) + j\hat{x}(t) \quad (2)$$

Analitik form kullanılarak Anlık Zarf (AZ)  $a_x(t)$ , Anlık Faz (AF1)  $\Phi_x(t)$  ve Anlık Frekans (AF2)  $f_x(t)$  denklem (3)-(5) ile ifade edilmektedir.

$$a_x(t) = |z_x(t)| = \sqrt{x(t)^2 + \hat{x}(t)^2} \quad (3)$$

$$\Phi_x(t) = \arctan\left(\frac{\hat{x}(t)}{x(t)}\right) \quad (4)$$

$$f_x(t) = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{d\Phi_x(t)}{dt} \bmod(2\pi) \right] \quad (5)$$

## 2.2 Hilbert-Huang Dönüşümü (Hilbert-Huang Transform)

Hilbert-Huang dönüşümü (HHD), Huang vd. tarafından Ampirik Mod Ayırıştırması (EMD) ve Hilbert Spektral Analizinin (HSA) birleştirilmesi ile ortaya çıkartılan bir yöntemdir [19]. EMD yöntemi, doğrusal olmayan ve durağan süreçlerden elde edilen verileri Hilbert Dönüşümü aracılığı ile anlamlı anlık frekans sağlayan basit salınımlı fonksiyona indirgemek için kullanılmaktadır. HHD, iki aşamadan oluşan bir analiz yöntemidir. İlk olarak EMD ile bir sinyalin, her biri frekans modülasyonu içeren birer işaret olan İMF çıkartılmaktadır. Sinyal boyutuna göre elde edilen her bir İMF'den HHD ile zaman-frekans alanında anlık frekans ve genlik değerleri elde edilmektedir [19].

## 2.3 Ampirik Kip Ayırışımı (Empirical Mode Decomposition)

EMD algoritması ile orijinal  $X(t)$  sinyali denklem (6)'daki gibi ifade edilmektedir [19].

$$X(t) = \sum_{i=1}^n C_i(t) + R_n(t) \quad (6)$$

Burada  $\{C_i(t)\}$  serisi İçkin Kip Fonksiyonlarını (Intrinsic Mode Functions-IMF),  $\{R_n(t)\}$  residü ifadesini tanımlamaktadır.

EMD algoritması ile IMF ve residü ifadesi aşağıdaki gibi bulunmaktadır.

**Adım 1:** Öncelikle  $X(t)$ 'nin lokal ekstremleri tanımlanır ve yerel maksimum ve yerel minimum olmak üzere iki kısma ayrılır.

**Adım 2:** Bir kübik eğri çizgi ile üst eğri  $X_{üst}(t)$  ve alt eğri  $X_{alt}(t)$  tüm lokal noktalar kendi arasında birleştirilerek oluşturulmaktadır.

**Adım 3:** Üst ve alt eğri ortalaması alınarak ortalama eğrisi  $M(t)$  elde edilmektedir.

**Adım 4:** Mevcut  $X(t)$  sinyalinden  $M(t)$  sinyali çıkartılarak IMF adayı olan  $H(t)$  bulunmaktadır.

**Adım 5:**  $H(t)$  IMF olma koşulu kontrol edilir. Üst ve alt eğrilerin ortalaması '0' ise ve ekstrem sayıları ile sıfır-geçiş sayısı en fazla 1 farklı ise IMF koşulu sağlanmaktadır. Bu şart sağlanmaz ise Adım 1'e geri dönülerek şart sağlanıncaya kadar işlemler tekrarlanır.

## 2.4 Grupsal Ampirik Kip Ayırışımı (Ensemble Empirical Mode Decomposition)

Geleneksel EMD'de ortaya çıkan mod karıştırma probleminin üstesinden gelebilmek için 2009 yılında Wu ve Huang, Grupsal Ampirik Kip Ayırışımı (EEMD) olarak adlandırılan yeni bir yaklaşım önermişlerdir [20]. Mod karıştırma fenomenini çözüldükten sonra, EEMD durağan olmayan sinyal ayrışmasında iyi bir performansa sahip olduğu gösterilmektedir [20].

## 2.5 Genetik Algoritma (Genetic Algorithm)

John Holland yaptığı çalışmada, evrimsel sürecin bir benzerinin, Genetik Algoritmalar (GA) ile matematiksel problemleri ve mühendislik optimizasyon problemlerini çözmek için nasıl uygulanabileceğini göstermektedir [21]. GA'da bilgi taşıyan en küçük birim olarak kabul edilen genin, birden fazlasının bir araya gelmesi ile kromozomlar oluşmaktadır. Birden fazla kromozomun bir araya gelmesi ile popülasyon meydana gelmektedir. GA ile jenerasyon boyunca, popülasyonda bulunan olası çözümleri içerebilecek olan kromozomlar çaprazlama, mutasyon ve başarılı gen seçimi olmak üzere üç işlem uygulanarak tespit edilmektedir. Bir jenerasyondan diğer jenerasyona geçerken, popülasyon bireyleri (kromozomları) birbirleri ile farklı kromozom parçalarını değiştirerek yeni bireyler oluşturmaktadır. Yeni bireyler probleme özgü belirlenmiş olan bir uygunluk fonksiyonu ile değerlendirmeye tabi tutulmaktadır. Seçme mekanizması gelecek jenerasyona en uygun olabilecek olan bireylerin aktarılmasını sağlamaktadır. GA'da ayrıca mutasyon işlemi, mevcut problemi çözebilecek genetik çeşitlilik sunmaktadır [21].

## 2.6 Sınıflandırma Yöntemleri (Classification - Methods)

### 2.6.1 Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Networks)

Yapay Zeka yöntemlerinden çok katmanlı algılayıcılar, insan beyninin öğrenme yeteneğinin makinelerle aktarılması ile, farklı karmaşık ve gerçek dünya problemlerini çözdürmek amacıyla kullanılmaktadır [22].

### 2.6.2 K-En Yakın Komşu Sınıflandırma (K-Nearest Neighbor Classification)

Makine öğrenmesi yöntemlerinden K-En Yakın Komşu Sınıflandırma (KNN) yöntemi, en temel ve basit sınıflandırma yöntemlerinden biridir. Verilerin dağılımı hakkında çok az veya hiç bilginin olmadığı durumlarda bir sınıflandırma çalışması için ilk tercihlerden biri olmaktadır [23]. Fix ve Hodges tarafından 1951 yılında, örüntü tanıma için daha sonra KNN olarak adlandırılacak parametrik olmayan bir yaklaşım tanıtılmıştır [23]. KNN, olasılık yoğunluklarının güvenilir parametrik tahminlerinin bilinmediği veya belirlenmesinin zor olduğu durumlarda diskriminant analizi yapma ihtiyacından geliştirilmiştir. Bu yöntemde örnek veri kümesinde bulunan bir veri noktasının, k adet en yakın komşu veri noktasına bakılması ile hangi sınıfa dahil olduğu belirlenmektedir. [22]'de veriler arasındaki uzaklık Euclidian, Manhattan, Minkowski vb. uzaklıklarıyla hesaplanmaktadır.

## 2.7 Modelin Test Edilmesi ve Başarım Ölçütü (Model Testing and Performance Metric)

Oluşturulan modelin eğitim ve test aşaması k-çapraz doğrulama yöntemi ile yapılmaktadır. Bu yöntemde veri k parçaya ayrılmaktadır. k-1 parça için model eğitimi yapılır ardından kalan 1 parça için test işlemi yapılmaktadır. Başarım değeri hesaplanmaktadır. Ardından daha önce test aşamasında kullanılan kısım eğitim kısmına eklenmektedir. Yeni k-1 parça için model

eğitimi yapılır ve daha önce kullanılmamış olan 1 parça test aşamasında kullanılmaktadır. Bu adım k parça için tekrarlanarak ortalama başarımların değeri hesaplanmaktadır [22].

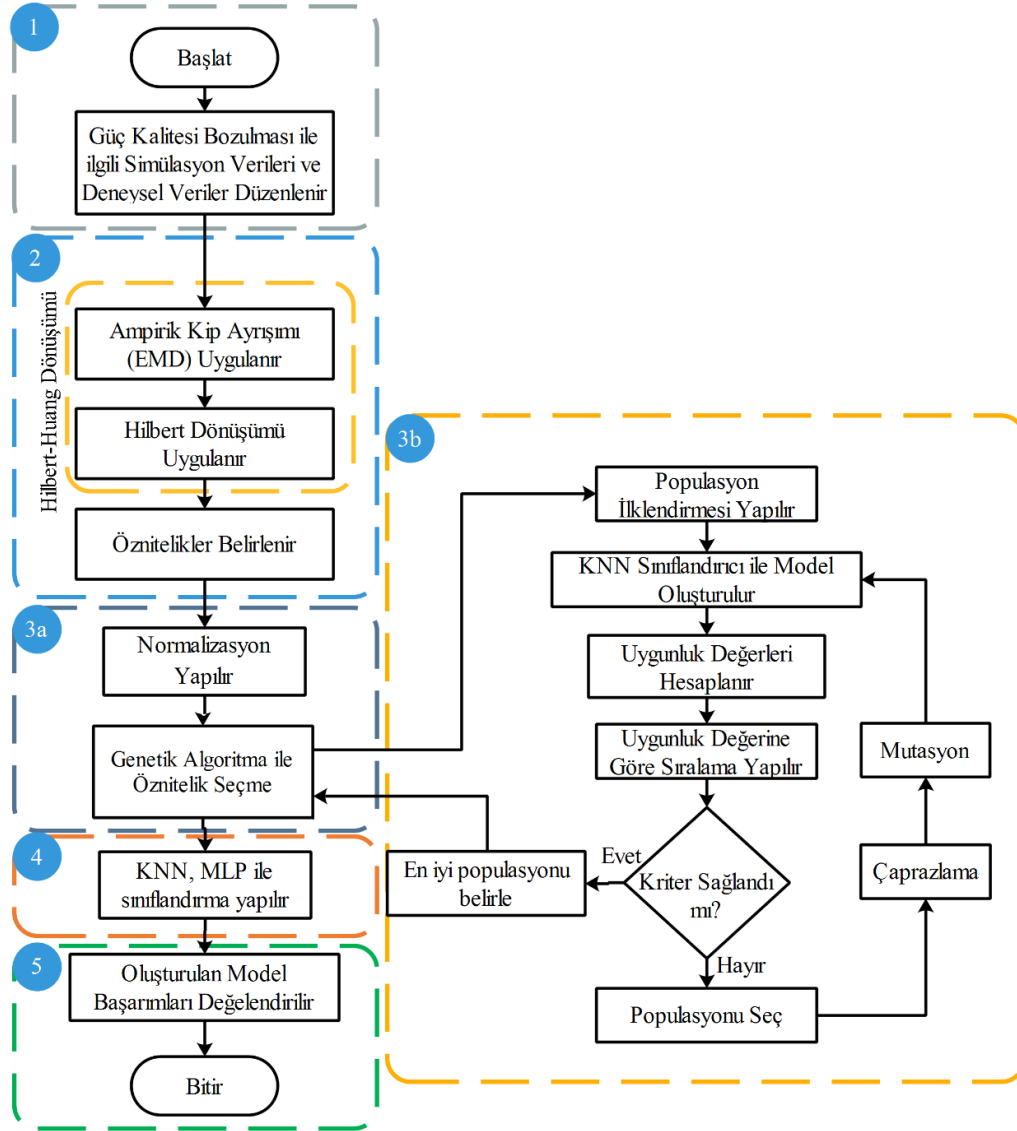
### 3. ÖNERİLEN YÖNTEMİN TEMEL YAPISI (FRAMEWORK OF THE PROPOSED METHOD)

Bu çalışmada sinyal işleme yöntemlerinden HH dönüşümü ile Güç Kalitesi Bozulmalarını temsil eden öznelikler grubu oluşturulmaktadır. Bu aşamada hem

**Adım 1.** Rastgele parametrelere bağlı matematiksel modelleme ile üretilen veriler ve deneysel düzenekten alınan Güç Kalitesi Bozulma (GKB) verisi bu aşamada kullanım için hazırlanmaktadır.

**Adım 2.** GKB üzerinde Ampirik Kip Ayrışımı (EMD) ve Hilbert Dönüşümü (HT) uygulanmaktadır. Ayrıca EEMD-HT yönteminin de etkisi incelenmektedir. İstatistiksel özellikler ile sinyallerin ayırt edici öznelikleri belirlenmektedir.

**Adım 3a.** Normalizasyon işlemi ile özneliklerin belirli bir küme aralığından değer alması sağlanmaktadır.



**Şekil 1.** Güç kalitesi bozulmalarının sınıflandırılmasında kullanılan yöntemin akış diyagramı (Flow chart of the proposed method used in classification of power quality disturbances)

EMD-HT ve EEMD-HT yöntemleri ile öznelikler elde edilmektedir. GA + KNN yaklaşımı ile öznelik sayısı en az olacak ancak sınıflandırma başarımları yüksek modeller oluşturulmaktadır. MLP ve KNN yöntemleri ile model çeşitliliği sağlanmaktadır. Önerilen yöntemin temel yapısı Şekil 1'deki gibi verilmektedir.

Genetik Algoritma ve KNN yöntemleri ile en uygun öznelikler belirlenmektedir.

**Adım 3b.** Genetik Algoritma ve KNN yöntemlerinin bir araya getirildiği sarmalama (Wrapper) yaklaşımı, öznelikler arasında sınıflandırıcı başarımlarını yüksek tutanların belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. KNN başarımlarının yüksek ve seçilen öznelik sayısının

az olması gibi uygunluk kriterleri Genetik Algoritma ile göz önünde bulundurulmaktadır.

**Adım 4.** Seçilen öznelikler kullanılarak KNN ve MLP modelleri oluşturulmaktadır.

**Adım 5.** Oluşturulan modellerin performansları değerlendirilmektedir.

### 3.1 Sentetik Veriseti (Synthetic Dataset)

Çalışmada, 18 farklı Güç Kalitesi Bozulma durumu için sentetik veriye dayalı [24-27] olarak veri oluşturulmaktadır. Her bir sınıf için Tablo 1'deki gibi etiket değerleri verilmektedir. 3 farklı gürültü seviyesi içeren (40 dB, 30 dB, 20 dB) 150'şer adet toplamda 2700 veri oluşturulmaktadır. Sinyaller oluşturulurken bilgi kaybını önlemek için Nyquist örnekleme teoremine göre örnekleme frekansı 16 kHz olarak seçilmekte ve her bir sinyal 10 periyot içerecek şekilde toplamda 3200 veri noktası oluşturulmaktadır.

### 3.2 Deneysel Veriseti (Experimental Dataset)

Güç Kalitesi Bozulmalarının sınıflandırılması ile ilgili

**Çizelge 1.** PQ Bozulmaları için sınıf etiketleri (Class labels for PQ disturbances)

Etiket	Sinyal Çeşidi
S1	Sinüsoidal Sinyal
S2	Gerilim Düşmesi
S3	Gerilim Yükselmesi
S4	Gerilim Kesintisi
S5	Gerilim Titreşimi
S6	Geçici Salımlı Durum
S7	Harmonikli Durum
S8	Gerilimde Çentik
S9	Gerilimde Ani Yükseliş
S10	Harmonikli Gerilim Düşmesi
S11	Harmonikli Gerilim Yükselmesi
S12	Harmonikli Gerilim Kesintisi
S13	Harmonikli Geçici Salımlı Durum
S14	Harmonikli Gerilimde Çentik
S15	Geçici Salımlı Durumlu Gerilim Düşmesi
S16	Geçici Salımlı Durumlu Gerilim Yükselmesi
S17	Harmonikli, Gerilim Salımlı Gerilim Düşmesi
S18	Harmonikli, Gerilim Salımlı Gerilim Yükselmesi

literatürdeki yapılan çalışmalar incelendiğinde, model oluşturma aşamasında gerçek veri kullanımının sentetik veri kullanımına kıyasla düşük olduğu görülmektedir [28-29].

Bunun nedenlerinden biri gerçek veriye ulaşmanın önünde güvenlik açısından bir engelin olmasıdır. Bir diğer neden ise verilerin dengesiz örnek sayıları içermesi nedeniyle sentetik veriye dayalı gürbüz model oluşturmaya daha cazip olmasıdır. Dezavantajlı durumu ortadan kaldırmak için bu alanda çalışanlar Güç Kalitesi Bozulmalarını elektriksel ekipmanlar kullanarak laboratuvar ortamında oluşturmaktadırlar. Literatürde Güç Kalitesi Bozulma durumlarının laboratuvar ortamında kurulan deneysel düzenek ile elde edilmesi üzerine çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bozulma durumları, pratik bir dağıtım sisteminde olduğu gibi doğrusal ve

doğrusal olmayan yüklerin anahtarlanması sonucunda laboratuvar ortamında üretilmektedir. Örnek bir çalışma, ayarlanabilir güç kaynağı, gerilim/akım sensörü (LV-25P/LA-55P), veri toplama ünitesi (NI-cDAQ) ile gerilimde düşme, yükselme, gerilimde çentik gibi sinyallerin üretilmesi ve ölçülen sinyallerin MATLAB ortamına aktarılması ile yapılmaktadır [30].

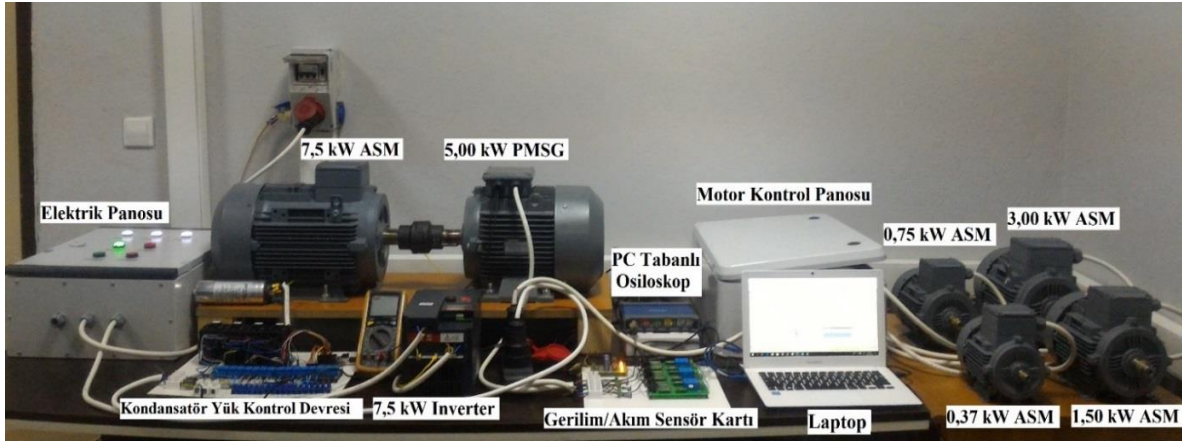
National Instruments ürünü olan USV-6008 veri toplama cihazı ve bir fonksiyon jeneratörü ile normal sinüs, gerilimde düşme, yükselme ve kesinti gibi sinyallerin üretilmesi [32]'de yapılmaktadır. Doğrusal ve doğrusal olmayan yüklerin kullanılarak gerilimde düşme/yükselme durumlarını incelemek için rüzgar enerji sistemi, güneş enerji sistemi ve bunların bir arada kullanıldığı dağıtım sistemi için bir deney düzeneği [33]'te kullanılmaktadır. [34]'te Fluke 6100A marka sinyal kaynağı, veri toplama kartı ve bir PC kullanılarak gerilimde düşme, fliker, harmonik, kesinti, ve ikili bozulmalardan harmonikli gerilimde düşme ve harmonikli gerilimde yükselme durumları incelenmektedir. Omik yükler, ayarlanabilir alternatif akım oto transformatör ile Güç Kalitesi bozulma sinyalleri oluşturulmakta ve bu sinyaller gerilim/akım sensör kartı, veri toplama kartı (DAQ) ile Labview ortamına aktarılmaktadır [35]. Bir başka çalışmada kapasitör bankası, farklı tipte motorlar, transformatör bankası, motor başlatıcısı, ayarlanabilir motor sürücü gibi çok çeşitli deney düzeneği içermekte ve veri toplama ünitesi toplanan veriler PC'ye aktarılmaktadır [36].

Bu çalışmada, literatürdeki çalışmalar dikkate alınarak, çok çeşitli bozulma olay verilerini deneysel ortamda üretebilmek için Şekil 3.2'deki gibi bir düzenek dikkate alınmaktadır.

Literatürdeki çalışmalara kıyasla, bu projede yüksek örnekleme frekansında çalışabilen PC tabanlı osiloskop kullanılmaktadır. Çeşitli yükler, elektrik panoları röle kartları ile kontrolcü kartları ve PC ile kontrol edilebilmektedir. Bu sayede deney düzeneği ile farklı etkilere sahip anahtarlama işlemlerinin yakın zaman diliminde gerçekleştirilmesi sağlanarak çok çeşitli bozulma sinyalleri oluşturulabilmektedir. Bu çalışmada Tablo 1'deki her bir durum için 50'şer adet olmak üzere toplamda 900 veri toplanmaktadır.

### 3.3 Özneliklerin Çıkartılması (Feature Extraction)

Bu aşamada EMD-HT ve EEMD-HT yöntemlerinden istatistiksel ve enerji tabanlı eşitlikler yardımı ile öznelikler oluşturulmaktadır. Ortalama Karekök, Toplam harmonik bozulma, enerji, entropi, aritmetik ortalama, geometrik ortalama, harmonik ortalama, standart sapma, çarpıklık, basıklık, en büyük ve en küçük değer gibi çeşitli öznelikler elde edilmektedir. Tablo 2'de öznelikler ve eşitlikleri verilmektedir. EMD ve EEMD yöntemlerinden her birinden ayrı ayrı elde edilen



Şekil 2. Projede kullanılan deney düzeneğinin gösterilmesi (Demonstration of the experimental setup used in the project)

5 adet IMF'ye HT uygulandığında sırasıyla anlık zarf dizisi  $a_x(n) = \{a_x(\text{IMF}_1), a_x(\text{IMF}_2), a_x(\text{IMF}_3), a_x(\text{IMF}_4), a_x(\text{IMF}_5)\}$ , anlık faz dizisi  $\Phi_x = \{\Phi_x(\text{IMF}_1), \Phi_x(\text{IMF}_2), \Phi_x(\text{IMF}_3), \Phi_x(\text{IMF}_4), \Phi_x(\text{IMF}_5)\}$  ve anlık frekans dizisi  $f_x = \{f_x(\text{IMF}_1), f_x(\text{IMF}_2), f_x(\text{IMF}_3), f_x(\text{IMF}_4), f_x(\text{IMF}_5)\}$  olacak şekilde elde edilmektedir. Bu işlem sonucunda bir Güç Kalitesi Bozulma verisi toplamda 15 farklı dizi ile

temsil edilmektedir. Toplam dizi  $F(n) = \{a_x(n), \Phi_x(n), f_x(n)\}$  olarak ifade edilmektedir. Tablo 2'deki 12 adet öznelik, çıkartılan bu 15 diziye uygulanarak toplamda 180 adet öznelik oluşturulmaktadır. Bu sayede boyut indirgeme işlemi yapılmaktadır. Ancak bu özneliklerden model karmaşıklığını azaltmak ve başarıyı yüksek bir sınıflandırıcı modeli oluşturmak için GA + KNN tabanlı öznelik seçme yaklaşımı da uygulanmaktadır.

Çizelge 2. Öznelikler ve eşitlikleri (Features and equations)

No	Öznelik	Eşitlikler
1	Rms	$Rms = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (F(n))^2}$
2	Thd	$Thd = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^N (F_{rms}(n))^2}{F_{temel}}}$
3	Enerji	$Eng = \sum_{n=1}^N (F(n))^2$
4	Entropi	$Ent = \sum_{n=1}^N  F(n)  \log  F(n) $
5	En büyük	$Eb = \max \{F(n)\}$
6	En küçük	$Ek = \min \{F(n)\}$
7	Aritmetik Ortalama	$Aort = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N  F(n) $
8	Geometrik Ortalama	$Gort = \sqrt[N]{\prod_{n=1}^N  F(n) }$
9	Harmonik Ortalama	$Hort = \frac{N}{\sum_{n=1}^N \frac{1}{ F(n) }}$
10	Std. Sapma	$Std = \sqrt{( F(n)  - Aort)^2}$
11	Çarpıklık	$\zeta_{car} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left( \frac{ F(n)  - Aort}{Std} \right)^3$
12	Basıklık	$Bas = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left( \frac{ F(n)  - Aort}{Std} \right)^4$

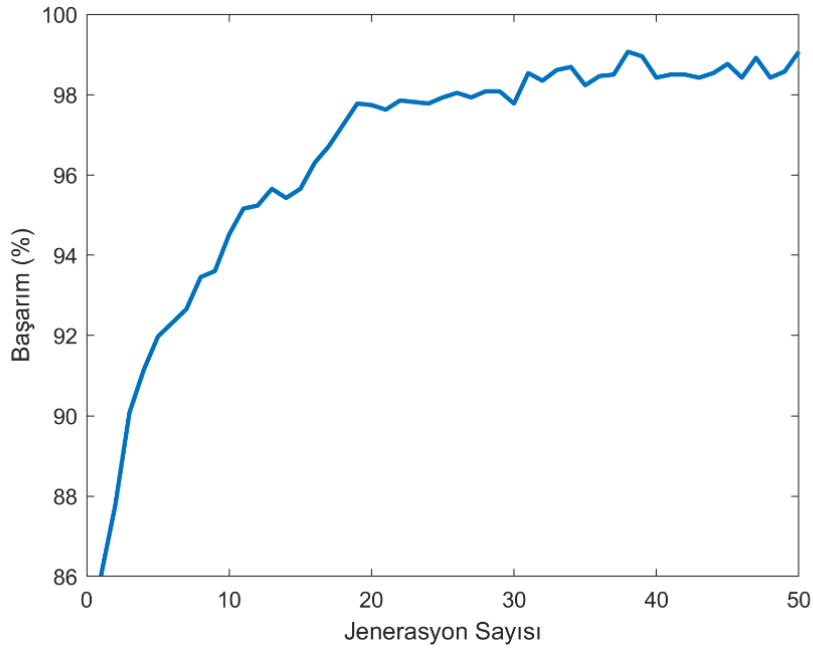
GA + KNN yöntemi sonucunda EMD + HT için toplamda 10 adet öznelik seçilmektedir. Bunlar sırasıyla IMF1 genlik dizisinin entropi değeri, maksimum değeri, çarpıklık değeri, basıklık değeri, IMF1 faz dizisinin entropi değeri, maksimum değeri, çarpıklık değeri, IMF1 frekans dizisinin RMS değeri, en küçük değeri, geometrik ortalama değeri olmaktadır. Algoritmanın seçim aşamasında jenerasyon boyunca başarımlar ve öznelik değişimleri Şekil 3-4'de verilmektedir.

GA + KNN yöntemi sonucunda EEMD + HT için toplamda 9 adet öznelik seçilmektedir. Bunlar ise sırasıyla IMF1 genlik dizisinin entropi değeri, standart sapma değeri, basıklık değeri, IMF1 faz dizisinin entropi değeri, minimum değeri, geometrik ortalama değeri, IMF1 frekans dizisinin RMS değeri, en büyük değeri, geometrik ortalama değeri olmaktadır. Algoritmanın seçim aşamasında jenerasyon boyunca başarımlar ve öznelik değişimleri Şekil 5-6'da verilmektedir.

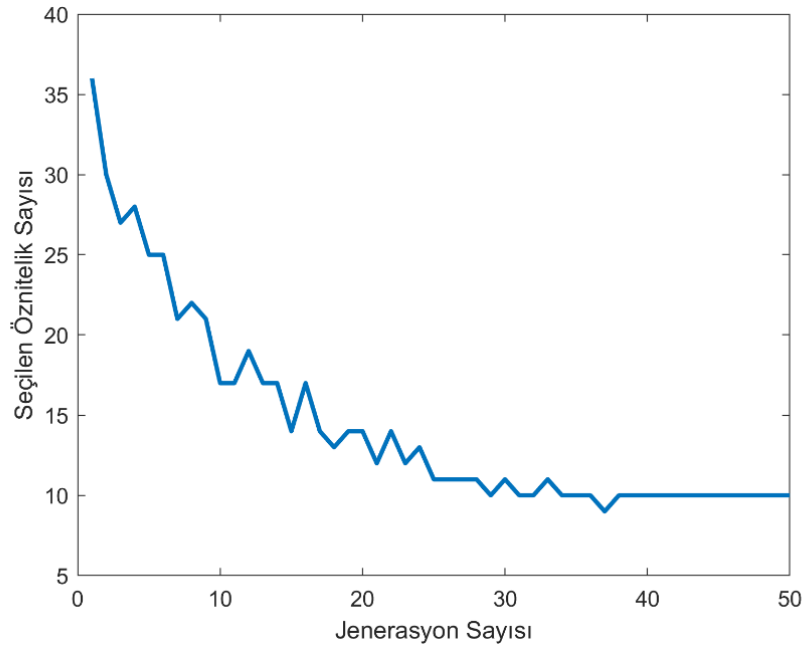
### 3.4 Kullanılan yöntemler için başarımların Kıyaslanması (Comparison of Performances for Applied Methods)

EMD-HT ve EEMD-HT tabanlı çıkartılan öznelikler yardımı ile oluşturulan modellerin başarımları kıyaslanmaktadır. Modeller için hem sentetik hem de gerçek veriler kullanılmaktadır. Sentetik veriler için 40 dB, 30 dB, 20 dB gürültülü durumlardaki ayrı ayrı başarımların ne olduğu incelenmektedir. Sınıflandırma aşamasında KNN ve MLP yaklaşımlarının da başarımlar üzerindeki etkisi incelenmektedir. KNN modeli için k sayısı 1, 3, 5, 7, 9 için denenmektedir. k=1 için en iyi model sonucu bulunmaktadır. MLP için gizli katman nöron sayısı 3 ile 50 arasında değişmektedir. Gizli





**Şekil 3.** EMD + HT öz nitelikleri için, GA + KNN yaklaşımında her bir jenerasyondaki en iyi çözüm için başarımın değişimi (Change of performance for the best solution in each generation in the GA + KNN approach for EMD + HT features)



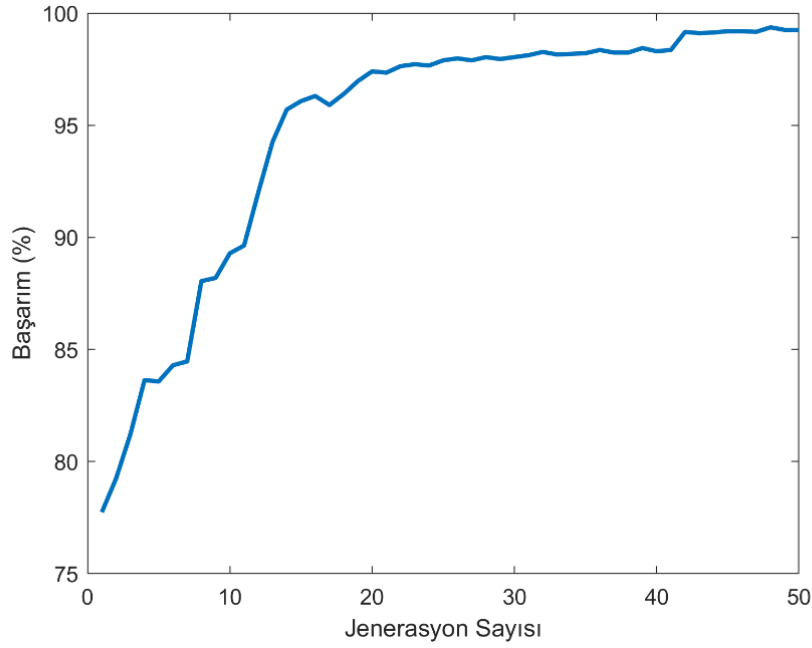
**Şekil 4.** EMD + HT öz nitelikleri için, GA + KNN yaklaşımında her bir jenerasyondaki en iyi çözümün içerdiği (The best solution in each generation is included for the EMD + HT features in the GA + KNN approach.)

katman nöron sayısı 40 için en iyi sonuç elde edilmektedir. Tablo 3'te çalışma boyunca oluşturulan modellerin başarımları verilmektedir. EEMD-HT tabanlı yöntem ile ayırt edici öz niteliklerin elde edilerek başarımları yüksek model elde edilmektedir.

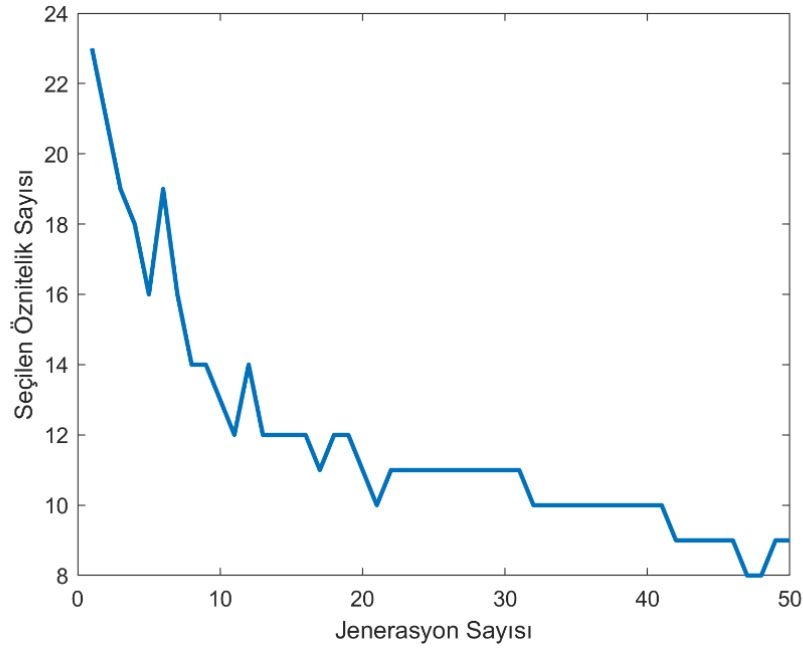
Tablo 4'ten görülebileceği gibi EEMD HT + GA + KNN yöntemi S1, S3, S5, S6, S7, S8, S9, S10, S11, S13, S14, S15, S16, S18 olmak üzere 14 adet sinyal tipi için %99 üzerinde bir sınıflandırma başarımına sahiptir. S2, S4,

S12, S17 sınıfları %98-%99 arasında sınıflandırılmaktadır. Birbirleri ile en çok karışan sınıflar Gerilim Düşmesi ve Gerilim Kesintisi arasında olmaktadır.

Tablo 5'te bu çalışmada elde edilen EEMD + HT + GA + KNN modeline dayalı PQ sınıflandırma modelinin, literatürdeki diğer yöntemler ile karşılaştırılması yapılmaktadır. Deneysel verinin kullanılmadığı [4-8],[10] çalışmalarına göre elde edilen başarımların



**Şekil 5.** EEMD + HT öznitelikleri için, GA + KNN yaklaşımında her bir jenerasyondaki en iyi çözüm için başarımın değişimi (Change of performance for the best solution in each generation in the GA + KNN approach for EMD + HT features)



**Şekil 6.** EEMD + HT öznitelikleri için, GA + KNN yaklaşımında her bir jenerasyondaki en iyi çözümün içerdiği (The best solution in each generation is included for the EMD + HT features in the GA + KNN approach.)

tekli ve çoklu bozulma türleri içi yüksek olduğu görülmektedir. Deneysel verilerin kullanıldığı [31-33],[37] çalışmalarına kıyasla oluşturulan modelin çok çeşitli bozulma türlerini sınıflandırma özelliğine sahip olduğu söylenebilir. Özellikle üçlü bozulmaların %99.03 (S17 ve S18 sınıflarının başarım oranlarının ortalama değeri) oranı ile sınıflandırıldığı Tablo 4'ten çıkartılmaktadır.

#### 4. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada, %25'i deneysel düzenekten alınan, her bir sınıftan 200 adet olmak üzere 18 adet sınıf içeren 3600 adetlik veri için EMD-HT ve EEMD-HT tabanlı sinyal işleme yöntemleri ile istatistiksel öznitelikler elde edilmektedir. Özniteliklerden sınıflandırma başarımını yüksek tutabilecek olanları GA + KNN yöntemi ile seçilmektedir. MLP ve KNN yöntemleri ile sınıflandırma yapılmaktadır. EEMD yöntemi ile elde edilen model

**Çizelge 3.** Kullanılan yöntemlerin birbirleri ile kıyaslanması (Comparison of used features)

Yöntemler	Sentetik Veri			Deneysel Veri	Genel Başarım
	40 dB	30 dB	20 dB		
EMD + HT + GA + KNN	99,55	99,19	98,00	98,75	98,87
EMD + HT + GA + MLP	99,35	99,27	97,28	98,50	98,60
EEMD + HT + GA + KNN	99,50	99,35	98,60	99,02	99,12
EEMD + HT + GA + MLP	99,42	99,27	96,74	98,35	98,44

**Çizelge 4.** Önerilen yöntemin sınıflara ve veri tipine göre başarımlar (Performance of the proposed method according to classes and data type)

Etiket	Sinyal Çeşidi	Sentetik Veri			Deneysel Veri	Ortalama
		40 dB	30 dB	20 dB		
S1	Sinüsoidal Sinyal	99,75	97,50	99,25	99,50	99,00
S2	Gerilim Düşmesi	99,50	99,00	97,50	98,00	98,50
S3	Gerilim Yükselmesi	99,75	99,55	99,25	99,00	99,39
S4	Gerilim Kesintisi	99,00	98,25	97,80	98,50	98,39
S5	Gerilim Titreşimi	99,50	99,60	98,75	99,35	99,30
S6	Geçici Salınlı Durum	99,60	99,75	98,75	99,50	99,40
S7	Harmonikli Durum	99,35	99,25	98,50	99,15	99,06
S8	Gerilimde Çentik	99,50	99,90	98,25	99,00	99,16
S9	Gerilimde Ani Yükseliş	99,50	99,90	99,15	98,80	99,34
S10	Harmonikli Gerilim Düşmesi	99,75	99,90	98,10	99,75	99,38
S11	Harmonikli Gerilim Yükselmesi	99,00	99,80	98,60	99,50	99,23
S12	Harmonikli Gerilim Kesintisi	99,25	99,00	98,50	99,00	98,94
S13	Harmonikli Geçici Salınlı Durum	99,75	99,80	98,50	98,75	99,20
S14	Harmonikli Gerilimde Çentik	99,75	99,90	99,00	98,70	99,34
S15	Geçici Salınlı Durumlu Gerilim Düşmesi	99,50	99,44	99,10	99,25	99,32
S16	Geçici Salınlı Durumlu Gerilim Yükselmesi	99,60	99,25	98,50	99,00	99,09
S17	Harmonikli, Gerilim Salınlı Gerilim Düşmesi	99,40	99,25	98,50	98,75	98,98
S18	Harmonikli, Gerilim Salınlı Gerilim Yükselmesi	99,50	99,20	98,75	98,85	99,08
Ortalama Genel Başarım:		99,50	99,35	98,60	99,02	99,12

**Çizelge 5.** Önerilen yöntemin literatürdeki çalışmalar ile kıyaslanması (Comparison of the proposed method with the studies in the literature)

No	Yöntemler	Tekli Sınıf No.	Tekli Sınıflar İçin Model Performansı (%)	Çoklu Sınıf No.	Çoklu Sınıflar İçin Model Performansı (%)	Deneysel Veri için Model Performans	Tüm Model Performansı
[4]	VMD+WOSLM	7	96.57	9	-	-	98.12
[5]	NT+HOS	4	99.79	16	97.43	-	97.80
[6]	KLD+SVM	6	-	5	-	-	94.02
[8]	CFS+MIFS+SVM	5	99.83	2	99.16	-	98.40
[10]	EMD+HT+SVM	10	95.33	-	-	-	95.33
[31]	ADMN-OSLA	6	84,92	-	-	84.92	84.92
[32]	WT+MLP	7	89.13	2	86.00	88.84	88.84
[33]	LS-SVM	6	95.16	-	-	98.33	96.21
[37]	ST+DT	6	96.66	7	97.09	96.90	98.80
<b>Bu Çalışma</b>	<b>EEMD + HT + GA + KNN</b>	<b>9</b>	<b>99.06</b>	<b>9</b>	<b>99.17</b>	<b>99.02</b>	<b>99.12</b>

başarım değerleri EMD yöntemine göre olanlardan daha iyi olduğu görülmektedir. Ayrıca KNN yöntemi ile elde edilen başarımların değeri MLP ile elde edilenlerden yüksek olduğu görülmektedir. EEMD + HT + GA + KNN sınıflandırma modelinin başarımlarını sentetik veriler için %99,15, deneysel veriler için % 99,02 olarak elde

edilmektedir. Oluşturulan deney düzeneğinden elde edilen Güç Kalitesi Bozulma verileri için model başarımları, sentetik verilerden elde edilenlere yakın çıkmaktadır. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak bu model ile 18 farklı sınıfın %99,12 gibi yüksek bir oranla sınıflandırılması sağlanmaktadır.

**TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)**

Bu çalışma Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi tarafından desteklenmiştir (BAP Projesi No: 2017-75737790-03). Yazarlar Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi'ne desteklerinden dolayı teşekkür ederler.

**ETİK STANDARTLARIN BEYANI  
(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)**

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Abdoos, A. A., Mianaei, P. K., & Ghadikolaei, M. R. (2016). Combined VMD-SVM based feature selection method for classification of power quality events. *Applied Soft Computing*, 38: 637-646.
- [2] Ribeiro, P. F., Duque, C. A., Ribeiro, P. M., & Cerqueira, A. S. (2013). Power systems signal processing for smart grids. *John Wiley & Sons*.
- [3] Lee, Ian WC, and Pradipta K. Dash. "S-transform-based intelligent system for classification of power quality disturbance signals." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 50(4): 800-805, 2003.
- [4] Sahani, M., & Dash, P. K. (2018). Variational Mode Decomposition and Weighted Online Sequential Extreme Learning Machine for Power Quality Event Patterns Recognition. *Neurocomputing*.
- [5] Ribeiro, E. G., Mendes, T. M., Dias, G. L., Faria, E. R., Viana, F. M., Barbosa, B. H., & Ferreira, D. D. Real-time system for automatic detection and classification of single and multiple power quality disturbances. *Measurement*, 128: 276-283, 2018.
- [6] Kapoor, R., Gupta, R., Jha, S., & Kumar, R. Boosting performance of power quality event identification with KL Divergence measure and standard deviation. *Measurement*, 126: 134-142, 2018..
- [7] Khokhar, S., Zin, A. A. M., Memon, A. P., & Mokhtar, A. S. A new optimal feature selection algorithm for classification of power quality disturbances using discrete wavelet transform and probabilistic neural network. *Measurement*, 95: 246-259, 2017.
- [8] Moravej, Z., Banihashemi, S. A., & Velayati, M. H. Power quality events classification and recognition using a novel support vector algorithm. *Energy Conversion And Management*, 50(12): 3071-3077, 2009.
- [9] Ahila, R., Sadasivam, V., & Manimala, K. An integrated PSO for parameter determination and feature selection of ELM and its application in classification of power system disturbances. *Applied Soft Computing*, 32, 23-37, 2015.
- [10] Babu, N. R., & Mohan, B. J., Fault classification in power systems using EMD and SVM. *Ain Shams Engineering Journal*, 8(2): 103-111, 2017.
- [11] Drummond, C. F., & Sutanto, D., Classification of power quality disturbances using the iterative Hilbert Huang transform, 2010.
- [12] Yang, L., Yu, J., & Lai, Y. Disturbance source identification of voltage sags based on Hilbert-Huang transform. In *Power and Energy Engineering Conference Asia-Pacific*, 1-4, 2010.
- [13] Hafiz, F., Chowdhury, A. H., & Shahnaz, C., An approach for classification of power quality disturbances based on Hilbert Huang transform and Relevance vector machine. *7th International Conference In Electrical & Computer Engineering*, 201-204, 2012.
- [14] Önal, Y., & Turhal, Ü. Ç. The orthogonal Hilbert-Huang transform application in voltage flicker analysis. *Fourth International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, 700-704, 2013.
- [15] Senroy, N., Suryanarayanan, S., & Ribeiro, P. F., An improved Hilbert–Huang method for analysis of time-varying waveforms in power quality. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(4): 1843-1850, 2007.
- [16] Manjula, M., Mishra, S., & Sarma, A. V. R. S., Empirical mode decomposition with Hilbert transform for classification of voltage sag causes using probabilistic neural network. *International Journal Of Electrical Power & Energy Systems*, 44(1): 597-603, 2013.
- [17] Ktonas, P. Y., & Papp, N., Instantaneous envelope and phase extraction from real signals: theory, implementation, and an application to EEG analysis. *Signal Processing*, 2(4): 373-385, 1980.
- [18] Picinbono, B. On instantaneous amplitude and phase of signals. *IEEE Transactions On Signal Processing*, 45(3): 552-560, 1997.
- [19] Huang, et al. "The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis." *Proc. R. Soc. Lond. A* 454: 903–995, 1998.
- [20] Wu, Z., & Huang, N. E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method. *Advances in adaptive data analysis*, 1(01): 1-41, 2009.
- [21] Holland, J. H., *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT Press., 1992.
- [22] P. N. Tan, V. Kumar, and M. Steinbach, "Introduction to Data Mining", *Pearson*, 2005.
- [23] Fix E, Hodges JL, Jr., Discriminatory analysis, nonparametric discrimination. USAF School of Aviation Medicine, Randolph Field, Tex., Project 21-49-004, *Rept. 4*, Contract AF41(128)-31, February 1951.
- [24] Karasu, S., & Saraç, Z., Investigation of power quality disturbances by using 2D discrete orthonormal S-transform, machine learning and multi-objective evolutionary algorithms. *Swarm And Evolutionary Computation*, 2018.
- [25] Karasu, S., & Saraç, Z. Classification of Power Quality Disturbances with 2D Discrete Wavelet Transform and Bagged Decision Trees Method. *Journal Of Polytechnic-Politeknik Dergisi*, 21(4): 849-855, 2018.
- [26] Karasu, S., & Saraç, Z., Classification of power quality events signals with pattern recognition methods by using Hilbert transform and genetic algorithms. In *2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference*, 1-4, 2018.
- [27] Karasu, S., & Saraç, Z. Classification of power quality disturbances with S-transform and artificial neural

- networks method. In *Signal Processing and Communications Applications Conference*, 1-4, 2017.
- [28] Mahela, Om Prakash, Abdul Gafoor Shaik, and Neeraj Gupta. "A critical review of detection and classification of power quality events." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41: 95-505, 2015.
- [29] Saini, M. K., & Kapoor, R. Classification of power quality events—a review. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 43(1): 11-19, 2012.
- [30] Kumar, R., Singh, B., Shahani, D. T., Chandra, A., & Al-Haddad, K. Recognition of power-quality disturbances using S-transform-based ANN classifier and rule-based decision tree. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(2): 1249-1258, 2015.
- [31] Wang, M., Zhou, H., Yang, S., Jin, L., & Jiao, L., Robust compressive features based power quality events classification with Analog-Digital Mixing Network (ADMN). *Neurocomputing*, 171: 685-692, 2016.
- [32] Sebastian, P., & DŚa, P. A., Implementation of a Power Quality signal classification system using wavelet based energy distribution and neural network. *International Conference In Power and Advanced Control Engineering (ICPACE)* 157-161,2015.
- [33] Ray, P. K., Mohanty, S. R., & Kishor, N. Classification of power quality disturbances due to environmental characteristics in distributed generation system. *IEEE Transactions on sustainable energy*, 4(2): 302-313, 2013.
- [34] He, S., Li, K., & Zhang, M.,A real-time power quality disturbances classification using hybrid method based on S-transform and dynamics. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 62(9): 2465-2475, 2013.
- [35] Khadse, C. B., Chaudhari, M. A., & Borghate, V. B. Conjugate gradient back-propagation based artificial neural network for real time power quality assessment. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 82: 197-206, 2016.
- [36] Camarena-Martinez, D., Valtierra-Rodriguez, M., Perez-Ramirez, C. A., Amezcua-Sanchez, J. P., de Jesus Romero-Troncoso, R., & Garcia-Perez, A., Novel downsampling empirical mode decomposition approach for power quality analysis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(4): 2369-2378, 2016.
- [37] Biswal, M., & Dash, P. K., Detection and characterization of multiple power quality disturbances with a fast S-transform and decision tree based classifier. *Digital Signal Processing*, 23(4): 1071-1083, 2013



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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

# Experimental investigation of passive water cooling in solar heating thermoelectric generator

*Güneş enerjili termoelektrik jeneratörde pasif su soğutmanın deneysel incelenmesi*

*Yazar(lar) (Author(s)): Engin ÖZBAŞ*

*ORCID: 0000-0003-4922-7890*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Özbaş E., “Experimental investigation of passive water cooling in solar heating thermoelectric generator”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1231-1236, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.613095



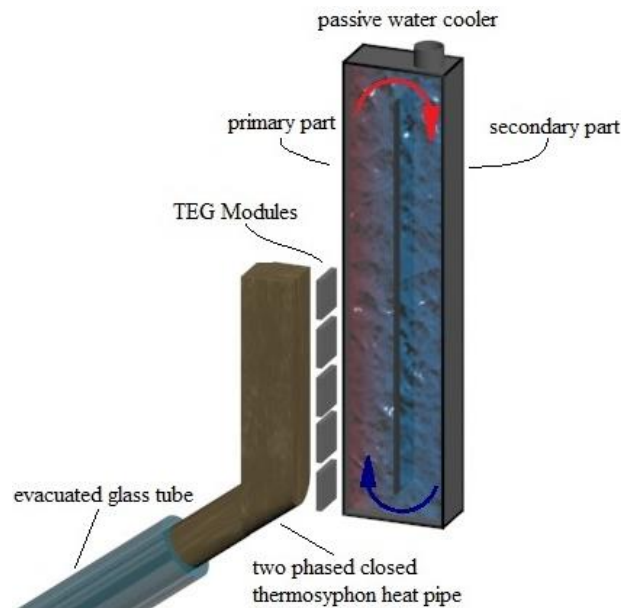
# Experimental Investigation of Passive Water Cooling in Solar Heating Thermoelectric Generator

## Highlights

- ❖ The heat pipe was investigated by solar power under three different conditions as non-reflector, semi-reflector and full-reflector.
- ❖ A Small capacity passive water cooler was used for 5 pieces thermoelectric generators (TEGs).

## Graphical Abstract

The heating required for the thermoelectric generator (TEG) system was provided by a solar powered two-phase closed thermosiphon (TPCT) type heat pipe, and the cooling was provided by a two-section passive water cooler.



**Figure.** Passive water cooling for thermoelectric generators

## Aim

Investigation of the effectiveness of a small capacity two-parts passive water cooler.

## Design & Methodology

The system was designed, manufactured and experimentally investigated.

## Originality

The efficiency of the two-parts passive water cooler was experimentally studied and calculated with the necessary measurements.

## Findings

For non-reflector, semi-reflector and full-reflector, the highest open circuit voltage values in total are 4.38V, 7.53V and 8.20V, respectively.

## Conclusion

For TEG's cold side, instead of a big, impractical passive cooler (water/air), with using a small, practical and simple passive water cooler could be provided an effective cooling without consuming additional energy.

## Declaration of Ethical Standards

The author of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Güneş Enerjili Termoelektrik Jeneratörde Pasif Su Soğutmanın Deneysel İncelenmesi

*Araştırma Makalesi/Research Article*

**Engin ÖZBAŞ\***

Yeşilyurt Demir Çelik Vocational School, Ondokuz Mayıs University, 55330 Samsun, Turkey

(Received : 29.08.2019 ; Accepted : 18.12.2019)

## ÖZ

Bu çalışmada, güneş enerjisinden elektrik üretmek için bir termoelektrik jeneratör (TEG) sistemi tasarlanmıştır. TEG'in sıcak yüzeyini ısıtmak için güneş enerjili iki fazlı kapalı termosifon (TPCT) tipi ısı borusu kullanılmış ve soğuk tarafı soğutmak için 1200 cc kapasiteli pasif su soğutmalı bir sistem tasarlanmış ve üretilmiştir. Soğutma sistemi, verimli bir soğutma sağlamak için doğal bir su sirkülasyonu sağlayan birincil ve ikincil bölümler olarak iki kısma sahiptir. Literatürdeki çalışmaların çoğunda tek bir TEG kullanılırken, bu çalışmada daha fazla elektrik üretmek için basit, kolay ve ucuz bir tasarım elde etmek amacıyla 5 TEG kullanılmıştır. Sadece pasif su soğutmanın etkisi değil, aynı zamanda reflektör kullanmanın sistem verimliliği üzerindeki etkisi deneysel olarak test edilmiştir. Sistem, reflektör olmayan, yarı reflektör ve tam reflektör olmak üzere üç farklı koşulda güneş enerjisi ile çalıştırılmıştır. Elektriksel ve termal veriler bir bilgisayara kaydedilir ve karşılaştırma ve hesaplamalar için 08:00-15:00 saatleri arasında elde edilen veriler kullanılmıştır. Sadece maksimum açık devre voltajına ulaşılan TEG-1 için, maksimum çıkış gücü, elektriksel verim ve Seebeck katsayısı hesaplamaları yapılmıştır. Sonuçlar, küçük kapasiteli pasif su soğutmalı bir ısı borusu kullanıldığında, elektrik üretmek için 5 adet TEG için gerekli sıcaklık farkına ulaşılabileceğini göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Güneş enerjisi, iki fazlı kapalı termosifon, termoelektrik jeneratör, pasif soğutucu.

# Experimental Investigation of Passive Water Cooling in Solar Heating Thermoelectric Generator

## ABSTRACT

In this study, a thermoelectric generator (TEG) system is designed to produce electricity from solar energy. Solar powered two-phase closed thermosiphon (TPCT) type heat pipe is used to heat the hot surface of the TEG, and a 1200 cc capacity passive water-cooled system is designed and manufactured to cool the cold side. The cooling system has two sections as primary and secondary sections which provide a natural water circulation to achieve an efficient cooling. A single TEG is used in most studies in the literature while 5 TEGs are used in this study to obtain a simple, easy and cheap design to generate more electricity. Not only the effect of passive water cooling, but also the effect of using a reflector on the system efficiency is tested experimentally. The system is operated by solar power under three different conditions as non-reflector, semi-reflector and full-reflector. Electrical and thermal data are recorded in a computer and data obtained from 08:00 to 15:00 is used for comparison and calculations. Maximum output power, electrical efficiency and Seebeck coefficient calculations are made for only TEG-1 in which the maximum open-circuit voltage is reached. Results showed that using a heat pipe with a small capacity passive water-cooling, the temperature difference for five TEGs can be reached to generate electricity.

**Keywords:** Solar energy, Two-phase closed thermosiphon, thermoelectric generator, passive cooling.

## 1. INTRODUCTION

Energy is one of the most important topics of this age. Although there are many sources of energy used by the human being throughout history, some of these energy sources are renewable energy sources. One of the renewable energy sources is solar energy. Solar energy is the largest and most widely used renewable energy source. It has applications such as water heating, photovoltaic electricity generation, energy production [1]. There are intensive studies and applications on electricity generation from solar energy. Solar photovoltaics and solar thermal applications are two main approaches to electrical power generation [2], [3].

Thermoelectric (TE) energy converters are very popular for producing electricity directly from solar energy. Thermoelectric generators (TEGs) are quiet, reliable and environmentally friendly solid-state electronic devices having no mechanically moving parts. TEG can convert heat energy to electricity. Defined by Seebeck effect in 1821, TEG produces electricity with temperature difference between two surfaces [4]. Any kind of heat including waste heat from automobile exhaust, geothermal and solar energy etc. can be used to heat the hot side of TEG [5], [6], [7], [8].

TEG using solar energy as the heat source can be called solar thermoelectric generator (STEG). The basic idea is to use solar energy as a heat source on the hot surface of the TEG. Three different methods can be used for this purpose. The first is the use of heat obtained by

\*Sorumlu yazar (Corresponding Author)  
e-posta : engin.ozbas@omu.edu.tr

concentrating the solar flux with classical (parabolic) and optical (fresnel) methods. The second method is using the TEG as a heat exchanger in a combined heat and power (CHP) system. The third method is using waste heat from the fluid used for cooling photovoltaic (PV) panels [9].

TEG generates electricity from the heat flow from the hot side to the cold side of TEG. Therefore a temperature difference must be established between the two surfaces [10], [11]. Solar heat can be fed to the hot side of the TEG directly or indirectly. Direct solar heating includes lens (fresnel) or mirror (parabolic dish or trough) [11], [12], [13], [14], [15], [16]. Heat pipe systems placed in vacuum glass tubes, and systems utilizing waste heat obtained from PV are the most popular indirect solar heating methods [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23].

While most of the studies focus on solar-powered heating, cooling the TEG is also a very critical subject of study. Sajid et al. classified the cooling mechanisms as passive air cooling, fan cooled, passive water cooling, forced water cooling and heat pipe cooling [24]. There are not so many studies in literature on passive water cooling in solar energy thermoelectric generator. Chávez-Urbiola et al. used passive water coolers to cool four different systems consisted of PV, TEG and concentrator [25]. Singh et al. designed a solar pond that the heat at the bottom of the pond was carried by a heat pipe and the top layer of the pond was used as a passive water cooler [26]. Deasy et al. designed a passive liquid thermosiphon cooling system which was a reservoir of water with a maximum capacity of 10 liters. They used the cooler for a thermoelectric generator and simulated the experimental results by calculation [27].

It is stated that the active cooling of TEG is a problem because mechanical devices such as pumps and fans consume power and the increase of the coolant reduces the gain. Passive air cooling can provide air resistance and reduces the efficiency, so passive water cooling is a good choice [26]. In this study, TEG and solar energy was considered together for an electric generator design. Hot side of TEG was heated by a solar-powered two-phase closed thermosiphon (TPCT) heat pipe. A passive water cooler was preferred for cooling the cold side of TEG. Unlike other studies in the literature, a small, practical and simple cooler design was used instead of a large and bulky cooler. On the other hand, while one TEG module was used in most studies, in this study, five TEG modules are connected to a single solar heater and a single passive water cooler at the same time. In order to see the efficiency of the designed cooler, the system has been compared in three different concentrators as non-reflector, semi-reflector and full-reflector.

## 2. EXPERIMENTAL SETUP

In this study, solar-powered two-phase closed thermosiphon (TPCT) heat pipe is used as the heater. TPCT evaporates the working fluid in its evaporation region and moves it to the condenser region where the working fluid condenses and returns back to the

evaporation region by gravity [22], [23]. In this study, a TPCT type heat pipe is designed as 1800mm for the evaporation region and 190mm for the condenser region from iron material. One-third of the evaporation region is filled with distilled water. The heat pipe in this experiment is put into a solar collector tube which traps the heat concentrated onto heat pipe. Solar collector tube used in the system is 1800mm in length with 37mm inner diameter. Surface areas of the collector tube for non-reflector, semi-reflector and full-reflector are 0.1045m<sup>2</sup>, 0.1567m<sup>2</sup> and 0.2090 m<sup>2</sup> respectively.

Condenser of heat pipe is designed as to heat five TEG modules, and all surfaces except the surface used for heating TEG modules are insulated against heat loss. Passive water cooler is preferred for cooling the surface of TEG. Cooler is manufactured from the same iron profile material as the condenser of TPCT, and dimensions of the condenser and cooler are given in Fig.1.

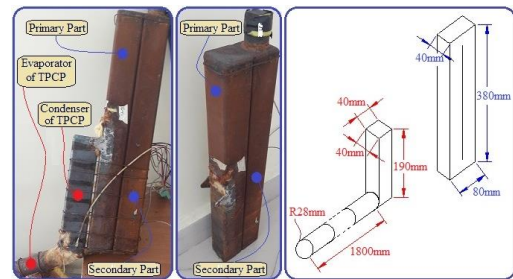


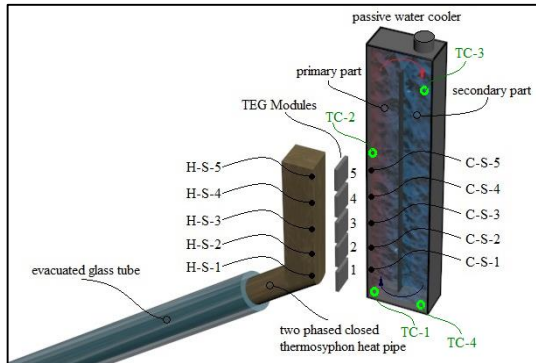
Figure 1. Heater and cooler parts with dimensions

Cooler is comprised of primary and secondary parts with 1.2lt capacity. Primary and secondary parts are internally separated and cooling water in both parts does not mix each other. Because of the separator the water heated in primary part moves upward and passes to the secondary section where it cools down and moves back downward. Therefore a natural circulation is accomplished inside a closed primary and secondary volume of the cooler which is filled up with water. Five TEG modules are installed between the solar powered heat pipe and the passive water-cooled system (Fig.2). Hot-side and cold-side temperature measurements and open circuit voltage measurements are performed for each TEG module.

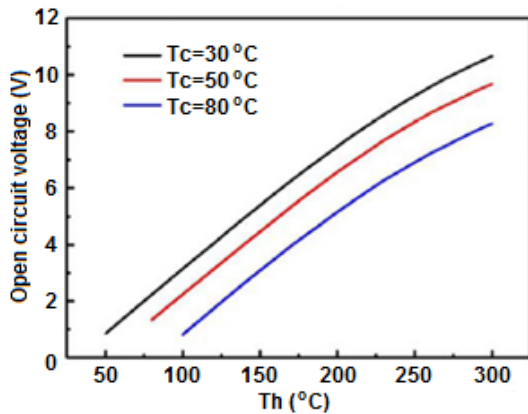
Table 1. Snapshot specification for TEG1-1263-4.3 [30]

Hot side temperature (°C)	300
Cold side temperature (°C)	30
Open circuit voltage (V <sub>oc</sub> )	10.7
Matched load resistance (Ω)	5.4
Matched load output voltage (V)	5.3
Matched load output current (A)	1.0
Matched load output power (W)	5.2
Heat flow across the module (W)	≈115
Heat flow density (W/cm <sup>2</sup> )	≈13

TEG1-1263-4.3 type module is used as thermoelectric generator. Table 1 gives the snapshot specifications of the module which is  $30\pm 5\text{mm} \times 30\pm 5\text{mm}$  in size. Open circuit voltage graphs of the module according to hot side and cold side temperature values are given in Fig.3.



**Figure 2.** Location of TEG modules and temperature measurement points

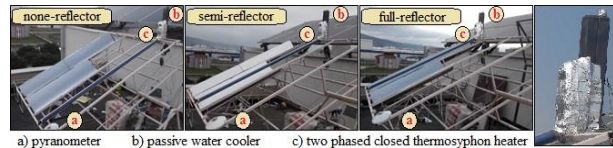


**Figure 3.** Open circuit voltage chart for TEG1-1263-4.3 versus temperature [30]

All temperature measurements are conducted by K-type thermocouples placed at appropriate locations. DeltaOhm LP PYRA 02 pyranometer is used for measuring incident solar radiation. All experimental data (temperatures, open circuit voltages and solar radiation) is recorded in real time with one second intervals by ORDEL UDL100 universal Data Logger with 0.2% accuracy.

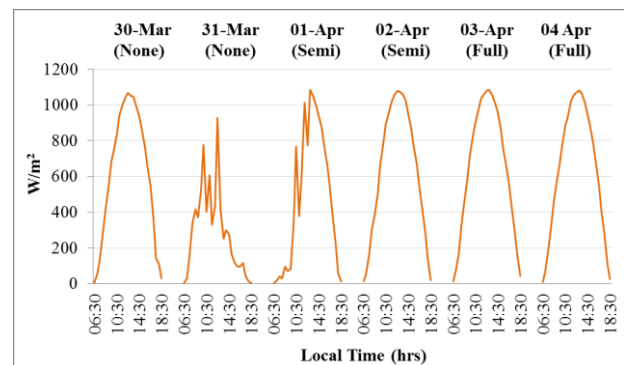
### 3. EXPERIMENTAL RESULTS

Fig.4 shows the experimental setup. The experiments were carried out in the northern coast of Turkey, city of Samsun with latitude of  $41^{\circ}14'N$ . Collector angle is set to  $26^{\circ}$  which is optimum for summer conditions of the experimental site. To determine the effect of passive water cooler on the experimental setup, tests are conducted for three different conditions as non-reflector, semi-reflector and full-reflector.



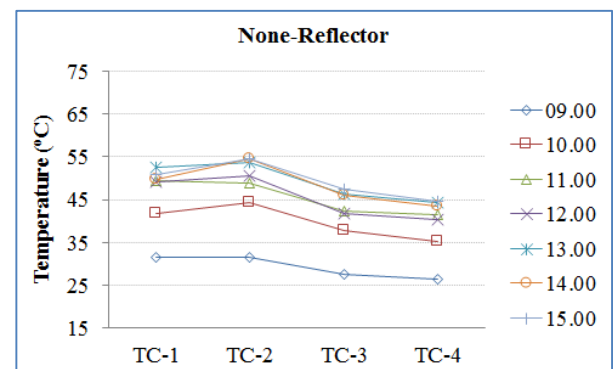
**Figure 4.** Experimental setup

Fig.5 shows the solar radiation distribution for non-reflector, semi-reflector and full-reflector taken for six subsequent days. To evaluate the results, data recorded at 30th of March, 2nd of April and 3rd of April are chosen for non-reflector, semi-reflector and full-reflector respectively.



**Figure 5.** Distribution of solar radiation

Data recorded from 08.00 to 15.00 are chosen for the evaluation. Solar radiation is measured by pyranometer. Primary and secondary parts of the cooler containing and circulating 1200 cc water is equipped with temperature measurement at four different points (TC1, TC2, TC3 and TC4), which are shown in Figure 2. From the Figures 6, 7 and 8 which show the temperature variations in these points, it can be understood that the water is circulating in the cooler.



**Figure6.** Temperature distribution of passive water cooler for non-reflector system

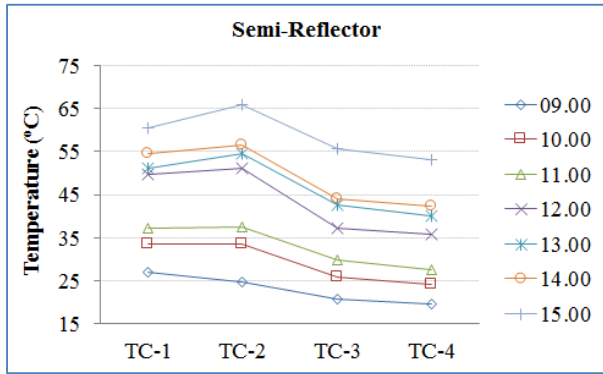


Figure 7. Temperature distribution of passive water cooler for semi-reflector system

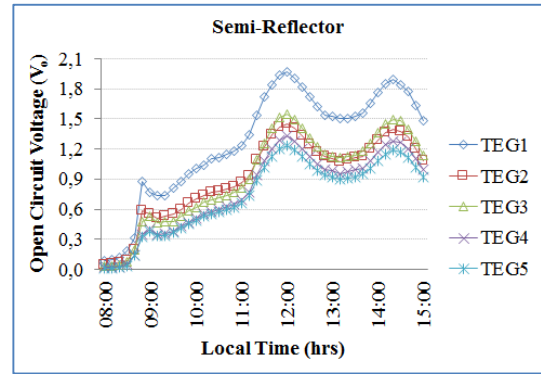


Figure 10. Open circuit voltage distribution produced by TEGs for semi-reflector system

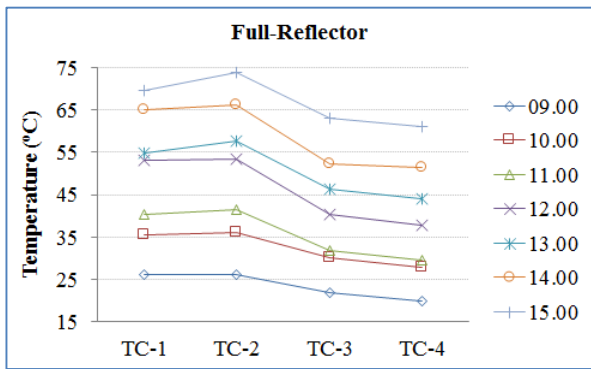


Figure 8. Temperature distribution of passive water cooler for full-reflector system

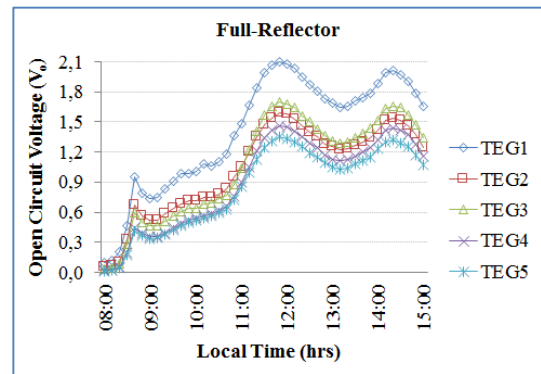


Figure 11. Open circuit voltage distribution produced by TEGs for full-reflector system

Figures 9, 10 and 11 show the variation of generated open voltage based on the reflector use. Full reflector version produced the maximum open circuit voltage value. TEG1 module which is the nearest module to the heat pipe reached the maximum open circuit voltage and the other TEGs came next according to their distance to the heat pipe.

Figure 12 shows the total amount of open circuit voltage generated at none, semi and full reflector systems. Open circuit voltage which is a maximum of 4.38V for non-reflector is 7.53V for semi-reflector and 8.20V for the full-reflector.

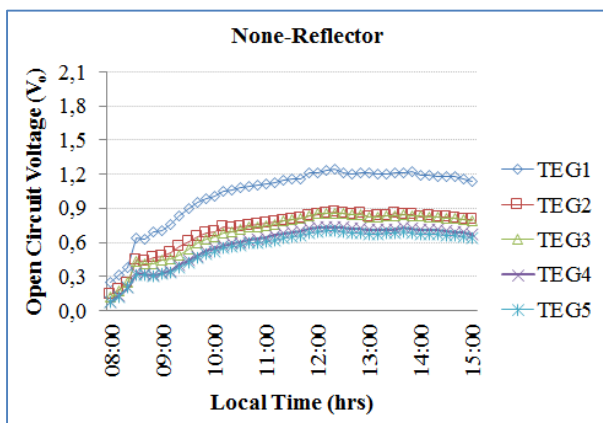


Figure 9. Open circuit voltage distribution produced by TEGs for none-reflector system

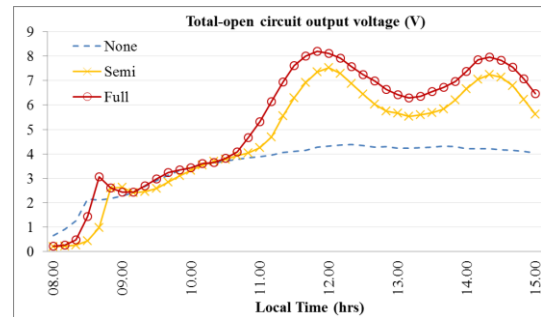


Figure 12. Distribution of total open circuit voltage produced by TEGs

To utilize the collected data, Seebeck coefficient ( $\alpha_{TEG}$ ), maximum power ( $P_{max}$ ) and electrical efficiency ( $\eta_e$ ) can be calculated. Effective Seebeck coefficient, maximum power output obtained at the matched load of the module could be calculated by using equations below [22], [23]:

$$\alpha_{TEG} = \frac{V_{OC}}{T_{HS} - T_{CS}} \quad (1)$$



where  $\alpha_{TEG}$  is the Seebeck coefficient and  $V_{oc}$  is the open circuit voltage of used TE module. In this condition maximum power output is:

$$P_{max} = \frac{V_{OC}^2}{4R} \quad (2)$$

where  $R$  is internal resistance ( $5.4 \Omega$ ) of the used TE module. By using obtained and calculated values electrical efficiency can be computed by:

$$\eta_e = \frac{P_{max}}{I_{st}} \times 100 \quad (3)$$

According to the calculations made for TEG-1, Seebeck coefficient ( $\alpha_{TEG}$ ), maximum power ( $P_{max}$ ), electrical efficiency ( $\eta_e$ ) and temperature difference ( $\Delta T$ ) distribution for non, semi and full reflector are shown in Figure 13, 14 and 15.

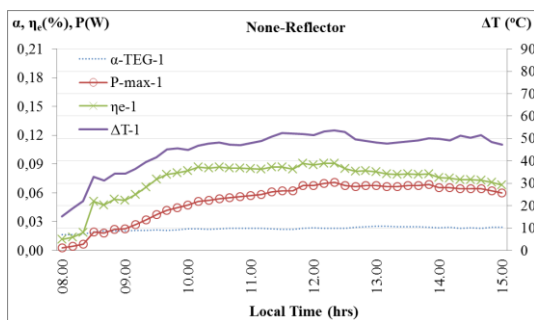


Figure 13. Distribution of the calculated values for non-reflector system (TEG1)

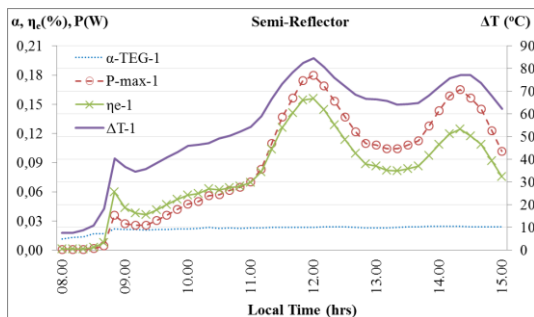


Figure 14. Distribution of the calculated values for semi-reflector system (TEG1)

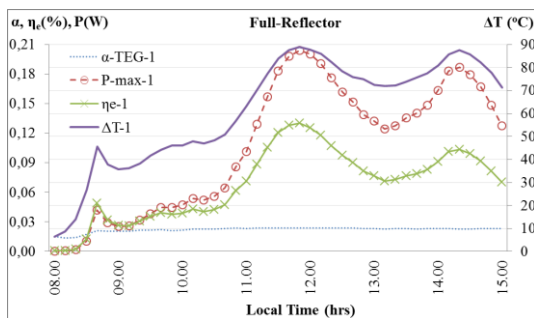


Figure 15. Distribution of the calculated values for full-reflector system (TEG1)

Figure 16 shows the electrical efficiency ( $\eta_e$ ) distribution of TEG-1 module at different reflector conditions. The

highest efficiency values obtained for non-reflector, semi-reflector and full-reflector are 0.090, 0.156 and 0.130 respectively.

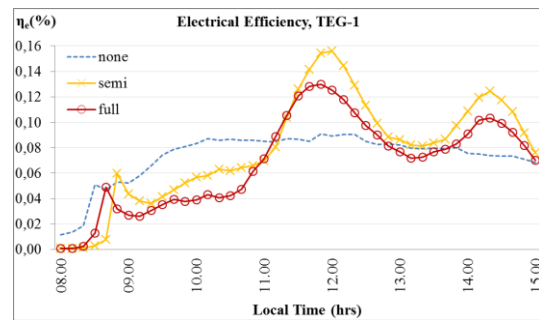


Figure 16. Distribution of electrical efficiency ( $\eta_e$ ) (TEG1)

#### 4. CONCLUSION

In this study, a small, practical and simple passive water cooling system is used for cooling a thermoelectric generator (TEG), which generates electricity by the temperature difference between the surfaces. Five TEGs are used in the system and their hot sides are heated by solar-powered two-phase closed thermosiphon (TPCT) tipi heat pipe. A 1200 cc passive water cooler with primary and secondary sections is used to cool the hot side of the TEGs by natural circulation. System is operated as non-reflector, semi-reflector and full-reflector, and the temperature values on passive water cooler and heat pipe are recorded along with open circuit voltage values. The results below are obtained by calculations based on the data gathered from the tests of non-reflector, semi-reflector and full-reflector:

- The highest temperatures for the passive water cooler are  $54.5^\circ\text{C}$ ,  $66.0^\circ\text{C}$  and  $73.9^\circ\text{C}$ ,
- The highest temperatures reached at the condenser part of TPCT type condenser are  $102.3^\circ\text{C}$ ,  $137.3^\circ\text{C}$  and  $156.0^\circ\text{C}$ ,
- The highest temperature difference between the hot-side and cold-side are  $53.5^\circ\text{C}$ ,  $84.6^\circ\text{C}$  and  $88.9^\circ\text{C}$ ,
- The highest open circuit voltage values in total are  $4.38\text{V}$ ,  $7.53\text{V}$  and  $8.20\text{V}$ ,
- Maximum power values for the first Thermoelectric Module (TEG-1) in the experiment are  $0.071\text{W}$ ,  $0.179\text{W}$  and  $0.204\text{W}$ , and their efficiency values are  $0.090$ ,  $0.156$  and  $0.130$ .

The results of this study showed that instead of a big, impractical passive cooler (water/air), a small, practical and simple passive water cooler can provide an effective cooling without consuming additional energy. Besides, instead of using a single TEG, multiple TEGs are used to generate more electricity. Comparison of non-reflector, semi-reflector and full-reflector systems revealed that full-reflector gives the highest open circuit voltage, and semi-reflector gives the best efficiency.



**DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS**

The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

**REFERENCES**

- [1] Jian L., Tianjun L., Bihong L. "Performance analysis and load matching of a photovoltaic–thermoelectric hybrid system", *Energy Conversion and Management*, 105: 891–899, (2015).
- [2] Tian Y., Zhao C.Y. "A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications", *Applied Energy*, 104: 538–553, (2013).
- [3] Mills D., "Advances in solar thermal electricity technology", *Solar Energy*, 76: 19-31, (2004).
- [4] Pandey A.K., Tyagi V.V., Selvaraj J.A/L., Rahim N.A., Tyagi S.K. "Recent advances in solar photovoltaic systems for emerging trends and advanced applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53: 859-884, (2016).
- [5] He W., Zhang G., Zhang X., Ji J., Li G., Zhao X. "Recent development and application of thermoelectric generator and cooler", *Applied Energy*, 143: 1-25, (2015).
- [6] Jarman J.T., Khalil E.E., Khalaf E. "Energy analyses of thermoelectric renewable energy sources". *Open J. Energy Efficiency*, 2: 143-153, (2013).
- [7] Angeline A.A., Jayakumar J., Asirvatham L.G., Marshal J.J., Wongwises S. "Power generation enhancement with hybrid thermoelectric generator using biomass waste heat energy", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 85: 1–12, (2017).
- [8] Gao H.B., Huang G.H., Li H.J., Qu Z.G., Zhang Y.J. "Development of stove-powered thermoelectric generators: a review", *Applied Thermal Engineering*, 96: 297-310, (2016).
- [9] Orr B., Akbarzadeh A., Mochizuki M., Singh R. "A review of car waste heat recovery systems utilising thermoelectric generators and heat pipes", *Applied Thermal Engineering*, 101: 490-495, (2016).
- [10] Suman S., Khan M.K., Pathak M. "Performance enhancement of solar collectors – A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49: 192–210, (2015).
- [11] Champier D. "Thermoelectric generators: A review of applications", *Energy Conversion and Management*, 140: 167–181, (2017).
- [12] Sun D., Shen L., Yao Y., Chen H., Jin S., He H. "The real-time study of solar thermoelectric generator", *Applied Thermal Engineering*, 119: 347-359, (2017).
- [13] Baranowski L.L., Snyder G.F., Toberer E.S. "Concentrated solar thermoelectric generators", *Energy & Environmental Science*, 5: 9055-9067, (2012).
- [14] Lertsatitthanakorn C., Jamradloedluk J., Rungsiyopas M. "Electricity generation from a solar parabolic concentrator coupled to a thermoelectric module", *Energy Procedia*, 52: 150-158, (2014).
- [15] Date A., Date A., Dixon C., Akbarzadeh A. "Theoretical and experimental study on heat pipe cooled thermoelectric generators with water heating using concentrated solar thermal energy", *Solar Energy*, 105: 656-668, (2014).
- [16] Date A., Date A., Dixon C., Singh R., Akbarzadeh A. "Theoretical and experimental estimation of limiting input heat flux for thermoelectric power generators with passive cooling", *Solar Energy*, 111: 201-217, (2015).
- [17] Chávez-Urbiola E.A., Vorobiev Y.V. "Investigation of solar hybrid electric/thermal system with radiation concentrator and thermoelectric generator", *International Journal of Photoenergy*, 1-7, (2013).
- [18] Sundarraj P., Taylor R.A., Banerjee D., Maity D., Roy S.S. "Experimental and theoretical analysis of a hybrid solar thermoelectric generator with forced convection cooling", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50: 1-11, (2017).
- [19] Bjørk R., Nielsen K.K. "The performance of a combined solar photovoltaic (PV) and thermoelectric generator (TEG) system", *Solar Energy*, 120: 187-194, (2015).
- [20] Makki A., Omer S., Su Y., Sabir H. "Numerical investigation of heat pipe-based photovoltaic–thermoelectric generator (HP-PV/TEG) hybrid system", *Energy Conversion and Management*, 112: 274-287, (2016).
- [21] He W., Su Y., Riffat S.B., Hou JX., Ji J. "Parametrical analysis of the design and performance of a solar heat pipe thermoelectric generator unit", *Applied Energy*, 88: 5083-5089, (2011).
- [22] Li G., Zhang G., He W., Ji J., Lv S., Chen X., Chen H. "Performance analysis on a solar concentrating thermoelectric generator using the micro-channel heat pipe array", *Energy Conversion and Management*, 112: 191-198, (2016).
- [23] Zhang M., Miao L., Kang Y.P., Tanemura S., Fisher C.A.J., Xu G., Li C.X., Fan G.Z. "Efficient, low-cost solar thermoelectric cogenerators comprising evacuated tubular solar collectors and thermoelectric modules", *Applied Energy*, 109: 51-59, (2013).
- [24] Özdemir A.E., Köysal Y., Özbaş E., Atalay T. "The experimental design of solar heating thermoelectric generator with wind cooling chimney", *Energy Conversion and Management*, 98: 127-133, (2015).
- [25] Atalay T., Köysal Y., Özdemir A.E., Özbaş E. "Evaluation of energy efficiency of thermoelectric generator with two-phase thermo-syphon heat pipes and nano-particle fluids", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 5 (1): 5-12, (2018).
- [26] Sajid M., Hassan I., Rahman A. "An overview of cooling of thermoelectric devices", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78: 15-22, (2017).
- [27] Chávez-Urbiola E.A., Vorobiev Y.V., Bulat L.P. "Solar hybrid systems with thermoelectric generators", *Solar Energy*, 86: 369-378, (2012).
- [28] Singh R., Tundee S., Akbarzadeh A. "Electric power generation from solar pond using combined thermosyphon and thermoelectric modules", *Solar Energy*, 85: 371-378, (2011).
- [29] Deasy M.J., Baudin N., O'Shaughnessy S.M., Robinson A.J. "Simulation-driven design of a passive liquid cooling system for a thermoelectric generator", *Applied Energy*, 205: 499-510, (2017).
- [30] TECTEG, <https://thermoelectric-generator.com/wp-content/uploads/2014/04/SpecTEG1-1263-4.3Thermoelectric-generator1.pdf>



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Yarı katı kalıplama yöntemi ile üretilen farklı miktarlarda SiC takviyeli A356 matrisli kompozit malzemelerin aşınma performansının incelenmesi

*Investigation of wear performance of different amount SiC reinforcements A356 matrix composite materials produced by semi-solid process method*

*Yazar(lar) (Author(s)):* İjlal ŞİMŞEK<sup>1</sup>, Doğan ŞİMŞEK<sup>2</sup>, Dursun ÖZYÜREK<sup>3</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-6542-8567

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0001-8339-9704

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0002-8326-9982

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Şimşek İ., Şimşek D. ve Özyürek D., “Yarı katı kalıplama yöntemi ile üretilen farklı miktarlarda SiC takviyeli A356 matrisli kompozit malzemelerin aşınma performansının incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1237-1243, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.642506

# Yarı Katı Kalıplama Yöntemi İle Üretilen Farklı Miktarlarda SiC Takviyeli A356 Matrisli Kompozit Malzemelerin Aşınma Performansının İncelenmesi

## Investigation of Wear Performance of Different Amount SiC Reinforcements A356 Matrix Composite Materials Produced by Semi-Solid Process Method

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Alüminyum matrisli kompozitlerde küresel yapıli mikroyapının aşınma davranışlarına etkisi / The effect on wear behavior of spherical microstructure in aluminum matrix composites
- ❖ Yarı katı kalıplama yöntemiyle üretilen AMK malzemelerde SiC miktarının küresellik oranı ve aşınma davranışlarına etkisi / The effect on the sphericity ratio and wear behavior of the amount SiC in AMC materials produced by the semi-solid molding method(SSM)

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Yarı katı kalıplama yöntemiyle üretilen A356 matrisli AMK malzemelerde SiC miktarının artması küresellik oranı azalırken aşınma direncinde artış olduğu görülmüştür. / In AMC materials with A356 matrix produced by the SSM method, it was observed that the increase in the amount of SiC decreased while the sphericity ratio increased, while the wear resistance increased.



Şekil. Üretim sürecinin şematik gösterimi / **Figure.** Schematic illustration of production process

### Amaç (Aim)

Yarı katı kalıplama üretim yöntemiyle üretilen AMK malzemelerde SiC miktarının sertlik ve aşınma davranışlarına etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. / It was aimed to determine the effect of SiC amount on hardness and wear behavior in AMC materials produced by SSM production method.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

A356 alaşımına farklı miktarlarda SiC ilave edilerek yarı katı kalıplama yöntemiyle 550 °C kalıp sıcaklığı 600 °C fırın sıcaklığında 20 kN kuvvet ile preslenmiştir. / Different amounts of SiC were added to the A356 alloy, and it was pressed under force of 20 kN by the SSM method at mold temperature of 550 ° C and furnace temperature of 600 ° C.

### Özgünlük (Originality)

Yapılan çalışmada yarı katı kalıplama yöntemiyle küresel formda mikroyapıya sahip SiC takviyeli AMK malzemelerin aşınma davranışları belirlenmiştir. / In this study, the was determined the effect to wear behavior of SiC reinforced AMC materials spherical microstructure produced by SSM method.

### Bulgular (Findings)

Yarı katı kalıplama yöntemiyle küresel formda mikroyapıya sahip kompozit malzemeler üretilmiştir. SiC miktarının artmasıyla küresellik oranı azalırken sertlik ve aşınma direncinin arttığı görülmüştür. / Composite materials with a spherical microstructure were produced using the SSM method. It was seen that while the sphericity ratio decreased with the increase of SiC amount, hardness and wear resistance increased.

### Sonuç (Conclusion)

Yapılan çalışmada yarı katı kalıplama yöntemiyle küresel formli mikroyapı elde edilmiştir. Matris içerisinde ilave edilen SiC miktarı arttıkça küresellik oranı azalırken sertlik ve aşınma direncinde artma elde edilmiştir. / In the study, a spherical shaped microstructure was obtained by semi-solid molding method. As the amount of SiC added in the matrix increased, the sphericity ratio decreased and the hardness and wear resistance increased.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Yarı Katı Kalıplama Yöntemi ile Üretilen Farklı Miktarlarda SiC Takviyeli A356 Matrisli Kompozit Malzemelerin Aşınma Performansının İncelenmesi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

İjlal ŞİMŞEK<sup>1\*</sup>, Doğan ŞİMŞEK<sup>2</sup>, Dursun ÖZYÜREK<sup>3</sup>

<sup>1</sup>TOBB Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Karabük Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Kara Aastubay Meslek Yüksek Okulu, Otomotiv Teknolojisi Bölümü, Milli Savunma Üniversitesi, Türkiye

<sup>3</sup>Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Karabük Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 04.11.2019 ; Kabul/Accepted : 20.12.2019)

## ÖZ

Bu çalışmada, farklı miktarlarda SiC ilave edilerek yarı katı kalıplama yöntemi ile üretilen Al A356 matrisli kompozit malzemelerin aşınma davranışları incelenmiştir. Al A356 matrise, ağırlıkça 4 farklı oranda (%5, 10, 15 ve 20) SiC ilave edilmiştir. Titreşimli tip değirmende bilyesiz olarak (30 dakika) karıştırılan tozlar, soğuk preslenerek (800 MPa) ham numuneler üretilmiştir. Üretilen ham numuneler 550 °C kalıp sıcaklığı ve 600 °C fırın sıcaklığında 30 dakika ortam atmosferinde bekletilmiş ve 100 MPa basınç ile 1 dakika preslenmiştir. Üretilen numuneler mikroyapı, sertlik ve küresellik oranı ile karakterize edilmiştir. Aşınma testleri standart pin on-disk aşınma test cihazında 0,2 ms<sup>-1</sup> kayma hızı, iki farklı yük (30 ve 60 N) ve dört farklı aşınma mesafesi (500, 1000, 1500 ve 2000 m) kullanılarak yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, kompozit malzeme içerisinde artan SiC miktarı ile sertlik artarken, küresellik oranları ise azalmaktadır. Aşınma testleri sonucunda en yüksek ağırlık kaybı %5 SiC içeren numunelerde elde edilirken, en düşük ağırlık kaybı ise %20 SiC ilave kompozit malzemelerde elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** A356-SiC kompozit, aşınma, sürtünme katsayısı, yarı katı kalıplama.

## Investigation of Wear Performance of Different Amount SiC Reinforcements A356 Matrix Composite Materials Produced by Semi-Solid Process Method

### ABSTRACT

In this study, the wear performance of A356 matrix composite materials produced by different amount SiC reinforcement semi-solid moulding method was investigated. In the A356 matrix, was added four different amounts (5%, 10, 15 and 20) SiC. Composite powders mixed without ball (30 minutes) in the vibrating type mill were cold pressed (800 MPa) and green compacts were produced. The produced green compacts, in 550 °C mold temperature and in 600 °C furnace temperature, 100 MPa pressing force was pressed for 1 minute. Produced samples were characterized with microstructure, hardness and sphericity ratio. The wear tests were performed using a pin on-disk type wear testing device with 0.2 ms<sup>-1</sup> sliding speed, under two different loads (30 and 60 N) and at four different sliding distances (500 m, 1000, 1500 and 2000). As a result of the studies, the hardness increases with increasing amount of SiC in the composite material, while the sphericity rates decrease. As a result of the wear tests, while the highest weight loss, 5% SiC was obtained, the lowest weight loss was obtained in 20% SiC additional composite materials.

**Keywords:** A356-SiC composite, wear, friction coefficient, semi-solid moulding.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Metal matrisli kompozitler (MMK) düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, yüksek sertlik iyi yorulma direnci, yüksek sıcaklıklarda boyutsal kararlılık iyi aşınma direnci gibi özellikleri nedeniyle yeni nesil mühendislik malzemeleri olarak kabul edilirler [1]. Bu özellikleri nedeniyle otomotiv, havacılık ve savunma sanayi gibi endüstrinin birçok alanında yaygın olarak kullanılmaktadırlar [2].

Alüminyum gibi nispeten yumuşak matrise yaygın olarak SiC (Silisyum Karbür), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Alüminyum Oksit) gibi sert parçacıklar ilave edilerek, malzemenin maruz kaldığı yüke karşı oldukça dirençli hale getirilebilmektedir. Bu nedenle alüminyum matrisli kompozit (AMK) malzemeler, alüminyum ve alaşımlarına göre mükemmel mekanik ve tribolojik özellikler sergilerler. Bu özellikleri nedeniyle, otomotiv sektörü başta olmak üzere havacılık ve savunma sanayi gibi birçok endüstride kullanılmaktadır. Otomotiv endüstrisinde içten yanmalı motorlarda pistonlar, biyel kolları, silindir gömlekleri ve fren diskleri gibi parçalar AMK malzemeler ile üretilmektedir [3,4].

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : ijalispir@karabuk.edu.tr

Alüminyum alaşımları içerisinde, Al-Si alaşımları (Al A356) yüksek döküm kabiliyeti ve iyi mekanik özellikleri nedeniyle (pistonlar, biyel kolları, silindir gömlekleri ve fren diskleri) yaygın olarak kullanılmaktadır [5]. Özellikle içten yanmalı motorlarda pistonlar, yüksek hızlarda çalışırken yüksek sıcaklık, yüksek basınç ve ağır aşınma koşullarında çalıştığından motorun anahtar parçasıdır. [6]. Özellikle hidrokarbon (HC) emisyonunu azaltmak için, piston tepesinin ince olması ve ağırlığının ise minimum olması gerekmektedir. Tüm bu ağır koşulların yerine getirilmesi için, piston malzemelerinin yüksek mukavemete, yüksek tokluğa ve iyi aşınma direncine sahip olması ve hafif olması istenmektedir [7]. Bu nedenle yapılan birçok çalışmada AMK (Alüminyum Matrisli Kompozit) malzemelerin iyi aşınma direnci sağladığı belirtilmektedir [8-10]. Bunun yanı sıra bu alaşımların mekanik özellikleri ve aşınma direnci, dentritik yapı, gözeneklilik, iğnemi şekilde homojen dağılmayan Si parçaları gibi kusurlar nedeniyle kullanımı sınırlı kalmaktadır [11,12]. Bu kusurların giderilmesi için, ısıl işlem ve karıştırma katılaştırma gibi bazı yöntemler geliştirilmiştir [13]. Bunların yanı sıra, yarı katı kalıplama yöntemi, diğer üretim yöntemlerine nazaran daha az mikro segregasyon ve katılama daralması, düşük şekillendirme sıcaklıkları, daha az gözeneklilik gibi birçok avantaj sunmaktadır. Bu yöntemin kullanılmasının başka bir avantajı ise mikroyapısal üstünlükleridir [14,15]. Bilindiği gibi klasik döküm yöntemi ile üretilen malzemeler dentritik yapıya sahiptirler. Katılama sırasında dentritik kolları arasında oluşan mikro gözenekler malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca dentritik kollarının üst kısımlarında oluşan gerilme yığılması malzemenin özelliklerini etkilemektedir [16,17]. Yarı katı kalıplama yöntemi ile daha küresel yapı malzemelerin üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Aztekin vd. [18] yarı katı kalıplama yöntemi kullanarak ürettikleri Al A356/SiC kompozit malzemelerin mikroyapısında dentritik yapının tamamen küresel şekilli yapıya dönüştüğünü, artan SiC miktarı ile küresellik oranının azaldığını ve üretilen kompozit malzemelerin sertliğinin arttığı belirtmişlerdir.

Bu çalışmada otomotiv endüstrisinde parça üretimi için kullanılan yarı katı üretim yöntemi ile farklı miktarlarda SiC ilave edilerek, Al (Al A356)/SiC takviyeli kompozit malzeme üretilmesi amaçlanmıştır. Küresel tanecik yapısına sahip Al/SiC kompozit malzemelerin üretilmesi ve farklı miktarlarda SiC ilavesinin üretilen kompozit malzemenin mikroyapı, küresellik oranı, sertlik ve aşınma performansına etkisinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Deneyel çalışmalarda matris malzemesi olarak Al-Si alaşımı (Al A356) kullanılmıştır. Kullanılan Al A356 alaşımı CMS Jant ve Makine Sanayi'nden külçe halinde temin edilmiştir. Külçeler Kütahya Dumlupınar

Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü bünyesinde bulunan toz metalürjisi laboratuvarlarındaki bulunan gaz atomizasyon ünitesinde argon altında atomize edilerek toz haline getirilmiştir. Toz üretimi sırasında nozullardan geçen gaz basıncı 32 atmosferdir. Üretilen tozların ortalama toz boyutu  $\leq 50 \mu\text{m}$  civarındadır. Deneyel çalışmalarda kullanılan Al A356 alaşımının kimyasal bileşimi Çizelge 1'de verilmiştir.

**Çizelge 1.** Deneyel çalışmalarda kullanılan Al A356 alaşımının kimyasal bileşimi (Chemical composition of Al A356 alloy used in experimental studies)

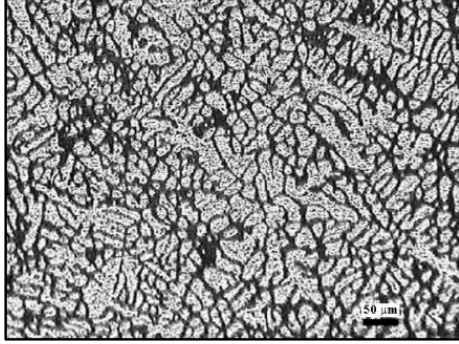
Element	Si	Mg	Ti	Fe	Mn	Cu	Pb	Al
%Oranı	6,5	0,4	0,2	0,15	0,03	0,03	0,03	Kalan

Matris içerisine dört farklı miktarda % ağırlık olarak (%5, 10, 15 ve 20) SiC ilave edilmiştir. Takviye malzemesi olarak kullanılan SiC parçacıklarına ıslatmayı güçlendirici herhangi bir hazırlık işlemi yapılmamıştır. Kompozit tozların hazırlanmasında titreşimli tip değirmen kullanılmıştır. Hassas terazide tartılarak hazırlanan tozlar soğuk iş takım çeliği öğütme hücresinde bilyasız olarak 30 dakika karıştırılmıştır. Tozların öğütme hücresine koyulması ve öğütme hücresinden alınması havasız ortam kabini içerisinde argon atmosferinde yapılmıştır. Hazırlanan kompozit tozlar  $\varnothing 12 \times 35$  mm boyutlarında 800 MPa [14,18] basınçla soğuk preslenmiştir. Preslenen numuneler yarı katı kalıplama ünitesinde grafit kalıp kullanılarak 550 °C kalıp sıcaklığı ve 600 °C fırın sıcaklığında 30 dakika bekletilmiş ve sonrasında 100 MPa basınç ile 1 dakika preslenmiştir. Bu sıcaklıklar A356 alaşımlarının yarı katı bölgesinin 577 °C ile 610 °C arasında olduğu göz önüne alınarak belirlenmiştir. Kalıp içerisinde presleme süresi ve basıncı daha önce yapılan bir çalışmada maksimum küresellik oranının elde edildiği çalışma parametrelerine göre belirlenmiştir [14]. Üretilen kompozit malzemeler, mikroyapı incelemeleri için standart metalografik işlemler uygulanarak hazırlanan numuneler, 2 ml HF, 3 ml HCl, 20 ml HNO<sub>3</sub>, 175 ml H<sub>2</sub>O (Keller's) solüsyonu kullanılarak 30 saniye süreyle dağlanmış. Dağlanan numunelerden mikroyapı incelemelerinde MEIJI ML 7100 marka optik mikroskop kullanılmıştır. Küresellik oranı ölçümü, MSQ PLUS 6.5 metalografik ölçüm ve analiz programında ASTM E112 standartlarına göre yapılmıştır. Sertlik ölçümleri, AFFRI VRSD251 markalı sertlik cihazında HV2.5 yük olarak 10 saniye süre ile ölçülmüştür. Her bir numuneden 5 noktadan sertlik ölçülerek ortalaması hesaplanmıştır. Aşınma testleri ASTM: G99-05 standardına göre standart pin on-disk tipi aşınma test cihazında 2 ms<sup>-1</sup> kayma hızı, iki farklı yük (30 N ve 60 N) yük ve 4 farklı (500, 1000, 1500 ve 2000 m) aşınma mesafesi kullanılarak yapılmıştır. Aşınma testleri sonrası aşınmış yüzeyler taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. SEM incelemelerinde JEOL JSM-6060 marka SEM cihazı kullanılmıştır.



## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

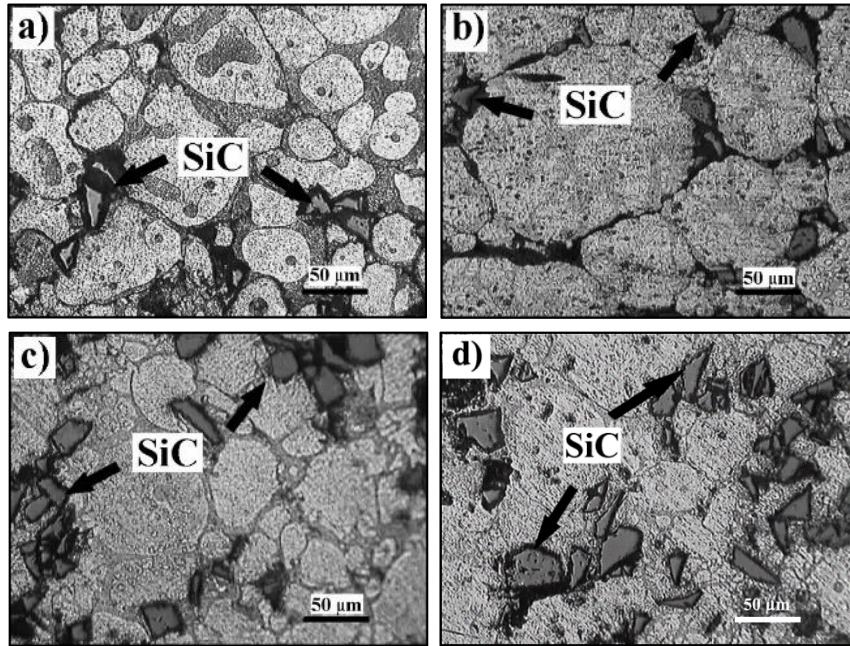
Başlangıç malzemesi olarak kullanılan külçe Al A356 (Al-Si) alaşımından alınan optik mikroskop görüntüsü Şekil 1’de verilmiştir.



**Şekil 1.** Başlangıç malzemesi olarak kullanılan Al A356 alaşımı optik mikroskop görüntüsü (Optical microscope image of Al A356 alloy used as starting material)

Şekil 1’de verilen başlangıç malzemesi olarak kullanılan Al A356 alaşımının optik mikroskop görüntüsü incelendiğinde, mikroyapının standart döküm yöntemi ile üretilen klasik dentritik bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Bir alaşımın sahip olduğu mikroyapısı doğrudan alaşımın mekanik özelliklerini etkilemektedir. Alaşımın yapısındaki dentritik kollar ve dentritik kollar arasındaki mesafe doğrudan mekanik özellikler ile ilişkilidir [19]. Farklı miktarlarda SiC ilave edilen ve yarı katı kalıplama yöntemi ile üretilen kompozit malzemelerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 2’de verilmiştir.

Şekil 2’de verilen farklı miktarlarda SiC ilave edilen ve yarı katı kalıplama yöntemi ile üretilen AMK malzemelerin optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde, oluşması beklenen küresel yapıli matris fazının elde edildiği net bir şekilde anlaşılmaktadır. Yarı katı kalıplama yöntemi ile dentritik yapının tamamen küresel yapıya dönüştüğü görülmektedir. Benzer sonuçlar daha önce yapılan bazı çalışmalarda da elde edilmiştir [18-20].



**Şekil 2.** Farklı miktarlarda SiC ilave edilen AMK malzemelerin optik mikroskop görüntüleri a) %5 SiC, b) %10 SiC, c) %15 SiC ve d) %20 SiC (Optical microscope images of AMK materials with different amounts of SiC added a) 5% SiC, b) 10% SiC, c) 15% SiC ve d) 20% SiC)

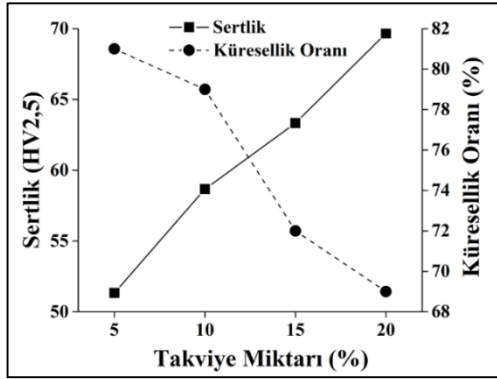
Matrise ilave edilen SiC’lerin tane sınırlarında ve Al tanelerini çevreleyen Al-Si ötekliğine konumlandığı anlaşılmaktadır. Bununla birlikte matrise ilave edilen SiC miktarının artması ile matris tanelerinin küreselliklerinde değişme olduğu da görülmektedir. Farklı miktarlarda SiC ilave edilerek yarı katı kalıplama yöntemi ile üretilen AMK malzemelerin sertlik ve küresellik oranı sonuçları Şekil 3’de verilmiştir.

Şekil 3’de verilen farklı miktarlarda SiC ilave edilen AMK kompozit malzemelerin sertlik sonuçları incelendiğinde, artan SiC miktarı ile sertliğin arttığı

anlaşılmaktadır. En düşük sertlik %5 SiC ilave edilen AMK malzemede 54 HV elde edilirken, en yüksek sertlik %20 SiC ilave edilen AMK malzemede 73 HV olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar karışım kanunu ile (matris içerisinde artan sert parçacıkların miktarına bağlı artış) açıklanabilir [21]. Şekil 2’de verilen mikroyapı resimlerinde de görüldüğü gibi tane sınırlarına konumlanan SiC parçacıklarının tane büyümesini engellemesinden dolayı sertliğin artmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte matris içerisinde artan sert karbür (SiC) parçacıkları matrisin plastik deformasyona

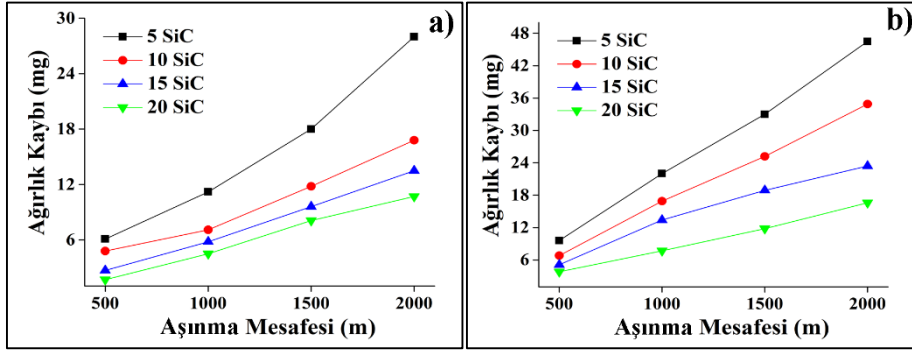


karşı direncini artırarak üretilen kompozit malzemenin sertliğinin artmasına katkı sağlamaktadır [22]. Daha önce yapılan çalışmalarda da artan SiC miktarı ile sertliğin arttığı rapor edilmiştir [2,14].



**Şekil 3.** Farklı miktarlarda SiC ilave edilerek yarı katı kalıplama yöntemi ile üretilen AMK malzemelerin sertlik ve küresellik oranı (Hardness and sphericity ratio of AMK materials produced by semi-solid molding by adding different amounts of SiC)

Ayrıca yine Şekil 3'de verilen küresellik oranı sonuçları incelendiğinde, matris içerisinde SiC miktarı arttıkça küresellik oranı azalmaktadır. En yüksek küresellik oranı %5 SiC ilave edilen AMK malzemede %81, en düşük küresellik oranı %20 SiC ilave edilen AMK malzemede %69 olarak elde edilmiştir. Küresellik oranındaki azalmanın nedeni, yarı katı kalıplama yöntemi ile AMK üretiminde, takviye miktarı arttıkça viskozitenin artmasından kaynaklanmaktadır [18]. Ayrıca Özyürek vd. [14] yaptıkları bir çalışmada, matris içerisinde artan SiC miktarının ve artan kalıplama sıcaklığının küresellik oranını azalttığını belirtmişlerdir. Bunun nedenini ise, yarı katı kalıplama yönteminde sıvı katı faz dengesinin önemli bir parametre olması ve artan sıcaklık ile sıvı fazında artmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Farklı miktarlarda SiC ilave edilerek yarı katı kalıplama yöntemi ile üretilen AMK malzemelerin farklı yük altında aşınma kaybı sonuçları, Şekil 4'de verilmiştir.

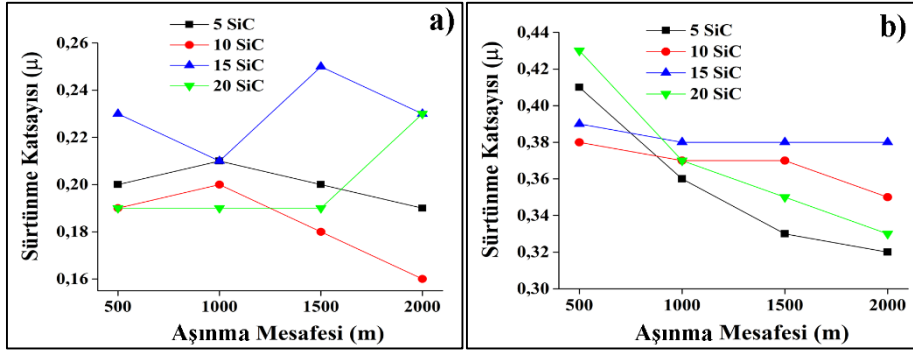


**Şekil 4.** Farklı miktarlarda SiC ilave edilen AMK malzemelerin aşınma kaybı sonuçları a) 30 N, b) 60 N (Weight losses of AMK materials with different amounts of SiC added a) 30 N, b) 60 N)

Şekil 4'de verilen farklı miktarlarda SiC ilave edilerek yarı katı kalıplama yöntemi ile üretilen AMK malzemelerin aşınma kaybı sonuçları incelendiğinde, matris içerisinde SiC miktarının arttıkça aşınma kaybının azaldığı görülmektedir. Bütün yüklerde (30 N ve 60 N) en yüksek aşınma kaybı %5 SiC ilave edilen AMK kompozit malzemede elde edilirken, en düşük aşınma kaybı %20 SiC ilave edilen kompozit malzemede elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar beklenen bir durumdur. Sertliği yüksek olan AMK malzemeden aşınma kaybının düşük olması beklenmektedir [14]. Aşınma kaybı sonuçları, Şekil 3'de verilen sertlik sonuçları ile karşılaştırıldığında, sonuçlar birbirini desteklemektedir. Ayrıca bütün AMK malzemelerde aşınma mesafesi arttıkça aşınma kaybı da artmaktadır. Artan aşınma mesafesi ile sürekli deformasyona uğrayan AMK malzemenin aşınma yüzeyinde kopan mikro/makro parçacıklar aşınma kaybını arttırmaktadır. Daha önce

yapılan çalışmalarda benzer sonuçlar elde edilmiştir [23,24]. Farklı miktarlarda SiC ilave edilerek yarı katı kalıplama yöntemi ile üretilen AMK malzemelerin aşınma katsayıları Şekil 5'te verilmiştir.

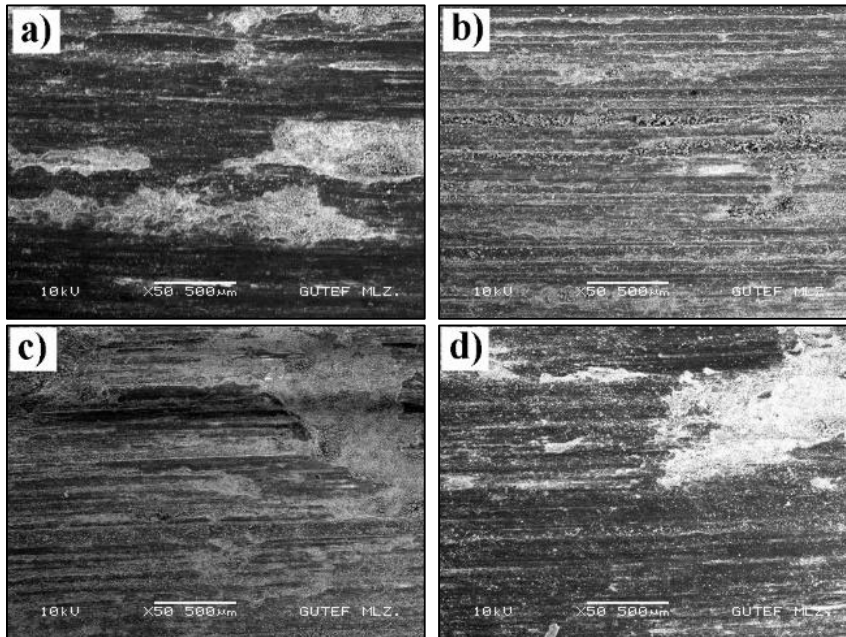
Şekil 5'te verilen yarı katı kalıplama yöntemi ile farklı miktarlarda SiC ilave edilerek üretilen AMK malzemelerin aşınma katsayıları incelendiğinde, 30 N yük altında yapılan aşınma testlerinde (Şekil 5.a) en yüksek aşınma katsayısı %15 SiC ilave edilen AMK malzemede elde edilmiştir. Bu malzemede 1000 m aşınma mesafesine kadar aşınma katsayısının azaldığı, 1500 m aşınma mesafesinde tekrardan arttığı görülmektedir. Bununla birlikte %20 SiC ilave edilen AMK malzemenin, 1500 m aşınma mesafesine kadar aşınma katsayısında herhangi bir değişiklik görülmezken artan aşınma mesafesi (2000



Şekil 5. Farklı miktarlarda SiC ilave edilen AMK malzemelerin sürtünme katsayıları a) 30 N, b) 60 N (Friction coefficients of AMK materials with different amounts of SiC added a) 30 N, b) 60 N)

m) ile sürtünme katsayısında ani bir artış olduğu görülmektedir. Bu artışın nedeni, kuru kayma sırasında numuneden kopan mikro talaşların yüzeye tekrar saplanarak yüzey pürüzlülüğünü arttırmasıdır [25]. Bununla birlikte Yıldırım vd., [26] yaptıkları bir çalışmada sürtünme katsayılarında ani artışların olduğunu, bunun nedenin ise aşınma esnasında kopan mikro talaşların yüzeye tekrardan saplanarak kaymayı zorlaştırmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Ayrıca sürtünme esnasında malzemeye uygulanan basınç ve sürtünmeden kaynaklanan ısı etkisi ile yüzeyde oluşan oksit tabakasının kırılması ani sürtünme katsayısı artışlarına neden olmaktadır. 60 N yük altında yapılan aşınma testleri sonuçlarında (Şekil 5.b) artan kayma mesafesi ile sürtünme katsayılarının azaldığı görülmektedir. Sürtünme katsayılarının azalmasının nedeni, yüzeyde oluşan oksit tabasıdır. Aşınma sırasında yüzeyde oluşan oksit bileşenleri katı yağlayıcı görevi

görmektedir. Bu nedenle sürtünme katsayıları azalmaktadır [27]. Ayrıca, her iki yükte de (30 N ve 60 N) AMK malzemelerin sürtünme katsayılarında belirli bir düzen olmadığı görülmektedir. Sertliği yüksek olan AMK malzemeden daha düşük sürtünme katsayısı beklenmektedir. Sertlik, metal ve alaşımlarının aşınma direncini etkileyen önemli bir parametredir. Bu bilinen metalürjik bir kuraldır. Şekil 4'de verilen ağırlık kaybı sonuçları bu metalürjik kurala uyumlu iken sürtünme katsayılarının bu kurala uyumlu olmadığı görülmektedir. Bu nedenle sürtünme katsayılarının belirlenmesinde sürtünmeden kaynaklanan sıcaklığın, sertlikten daha önemli bir parametre olduğu düşünülmektedir. Yarı katı kalıplama yöntemi ile farklı miktarlarda SiC ilave edilerek üretilen AMK malzemelerin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Farklı miktarlarda SiC ilave edilen AMK malzemelerin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri a) %5 SiC, b) %10 SiC, c) %15 SiC ve d) %20 SiC (Worn surface SEM images of AMK materials with different amounts of SiC added a) 5% SiC, b) 10% SiC, c) 15% SiC ve d) 20% SiC)

Şekil 6'da verilen yarı katı kalıplama yöntemi ile farklı miktarlarda SiC ilave edilerek üretilen AMK

malzemelerin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri incelendiğinde, yüzeyde oluşan deformasyon izleri ve

kısmen dökülmelerin olduğu net bir şekilde görülmektedir. Bunun nedeni ise, kayma sırasında numune yüzeyinde ve/veya yüzeyin hemen altında yorulma sonucu çatlakların oluşması ve testin ilerleyen aşamalarında bu çatlak çevresinden kopan parçacıklardır [26]. Ayrıca yüzeyde oluşan oksit tabakaları (beyaz bölgeler) ve yüzeye batan mikro talaşlar (Şekil 6.b) açık bir şekilde görülmektedir. Yüzeyde oluşan oksit tabakaları sürtünme katsayısının azalmasına önemli katkı sağlamaktadır [27]. Elde edilen aşınma yüzeyi SEM görüntüleri, Şekil 5.b'de verilen sürtünme katsayısı sonuçlarını desteklemektedir. En yüksek sürtünme katsayısının elde edildiği %15 SiC ilave edilen AMK malzemenin aşınma yüzeyinde dökülmeler net bir şekilde görülmektedir. Benzer şekilde en düşük sürtünme katsayısının elde edildiği %5 SiC ilave edilen AMK malzemenin aşınma yüzeyinde görülen oksit tabakası (beyaz bölgeler) bu durumu açık bir şekilde desteklemektedir. Özyürek vd. [14], tarafından yapılan benzer çalışmada aşınma esnasında ağır plastik deformasyon ve yüzeyde oluşan ısı etkisi ile oksitlenme eğiliminin arttığını belirtmişlerdir. Aşınma yüzeyi SEM görüntülerinde abrasif aşınma mekanizmasının baskın aşınma mekanizması olduğu görülmektedir.

## 6. SONUÇ (CONCLUSION)

Yarı katı kalıplama yöntemi ile farklı miktarlarda SiC ilave edilerek üretilen AMK malzemelerin aşınma performansının incelendiği bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

- Matris malzemesi olarak kullanılan Al-Si (Al A356) alaşımının yarı katı kalıplama yöntemi ile denritik yapının yüksek oranda (%80) küresel taneli yapıya dönüştüğü görülmüştür.
- Matrise ilave edilen SiC tanelerinin yapıda homojen bir şekilde dağıldığı, özellikle tane sınırlarında konumlandığı görülmüştür.
- AMK malzemelerde artan takviye miktarı ile sertliğin arttığı, en yüksek sertliğin %20 SiC ilave edilen AMK malzemede 73 HV olduğu belirlenmiştir.
- Küresellik oranı sonuçlarında matris içerisinde artan SiC takviyesi ile azaldığı, en yüksek küresellik oranının %5 SiC ilave edilen AMK malzemede %80 olduğu belirlenmiştir.
- Aşınma testleri sonucunda matris içerisinde ilave edilen SiC ile ağırlık kaybının azaldığı, en düşük ağırlık kaybının bütün yükler altında %20 SiC ilave edilen AMK malzemede %5 SiC ilave edilen kompozit malzemeye göre %46 oranında bir iyileşme elde edilmiştir.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Ghandvar H., Farahany S., and Idris M. H., "Effect of wettability enhancement of SiC particles on impact toughness and dry sliding wear behavior of compocasted A356/20SiCp composites", *Tribology Transactions*, 61(1): 88-99, (2018).
- [2] Yagci T., Ertugrul O. and Onel K., "Effect of heat treatment on the wear behavior of AlSi5Mg alloy matrix composites reinforced with SiCp particles", *International Journal of Scientific and Technological Research*, 4(4): 61-73, (2018).
- [3] Hirata Y., Suzue N., Matsunaga N., and Sameshima S., "Particle size effect of starting SiC on processing, microstructures and mechanical properties of liquid phase-sintered SiC", *Journal of the European Ceramic Society*, 30(9): 1945-1954, (2010).
- [4] Hamid A. A., Ghosh P. K., Jain S. C. and Ray S., "The influence of porosity and particles content on dry sliding wear of cast in situ Al (Ti)-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (TiO<sub>2</sub>) composite", *Wear*, 265(1-2): 14-26, (2008).
- [5] Akbari M., Shojaeefard M. H., Asadi P., and Khalkhali A., "Wear performance of A356 matrix composites reinforced with different types of reinforcing particles", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(9): 4297-4310, (2017).
- [6] Wu S. and Li J., "Application of ceramic short fiber reinforced Al alloy matrix composite on piston for internal combustion engines", *China Foundry*, 7: 408-412, (2010).
- [7] Tash M., and Mahmoud E., "Development of in-Situ Al-Si/CuAl<sub>2</sub> metal matrix composites: microstructure, hardness, and wear behavior", *Materials*, 9(6): 442-257, 2016.
- [8] Simsek I., Yildirim M., Ozyurek D., and Simsek, D., "Investigation of wear behaviors of SiO<sub>2</sub> reinforced aluminium composites produced by pressureless infiltration method", *Journal of Polytechnic*, 22(1): 81-85, (2019).
- [9] Şimşek İ., "Mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilen farklı miktarlarda ZrO<sub>2</sub> takviyeli Al-2Gr matrisli kompozit malzemelerin aşınma performanslarının incelenmesi", *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 6(3): 594-605, (2019).
- [10] Vijeesh V., and Prabhu K.N., "Review of microstructure evolution in hypereutectic Al-Si alloys and its effect on wear properties", *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 67(1): 1-18, (2014).
- [11] Shamsipour M., Pahlevani Z., Shabani M. O., and Mazahery A., "Optimization of the EMS process parameters in compocasting of high-wear-resistant Al-nano-TiC composites", *Applied Physics A*, 122(4): 457-465, (2016).

- [12] Akbari M., Aliha M. R. M., Keshavarz S. M. E., and Bonyadi A., "Effect of tool parameters on mechanical properties, temperature, and force generation during FSW", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 233(6): 1033-1043, (2019).
- [13] Tutunchilar S., Givi M. B., Haghpanahi M., and Asadi P., "Eutectic Al-Si piston alloy surface transformed to modified hypereutectic alloy via FSP", *Materials Science and Engineering: A*, 534: 557-567, (2012).
- [14] Özyürek D., Yıldırım M., and Çiftçi İ., "The tribological properties of A356-SiCp metal-matrix composites fabricated by thixomoulding technique", *Science and Engineering of Composite Materials*, 19(4): 351-356, (2012).
- [15] Atkinson H. V., "Alloys for semi-solid processing", *In Solid State Phenomena, Trans Tech Publications*, 192: 16-27, (2013).
- [16] Zhang Q. Q., Cao Z. Y., Zhang Y. F., Su G. H., and Liu Y. B., "Effect of compression ratio on the microstructure evolution of semisolid AZ91D alloy", *Journal of Materials Processing Technology*, 184(1-3): 195-200, 2007.
- [17] Seo P. K., Kim D. U., and Kang C. G., "The effect of the gate shape on the microstructural characteristic of the grain size of Al-Si alloy in the semi-solid die casting process", *Materials Science and Engineering: A*, 445: 20-30, (2007).
- [18] Aztekin H., Özyürek D., and Çetinkaya K., "Production of hypo-eutectic Al-Si alloy based metal matrix composite with thixomoulding processing", *High Temperature Materials and Processes*, 29(3): 169-178, (2010).
- [19] Şimşek İ., Şimşek D., Özyürek D., "Yarı-katı işlem yöntemi ile üretilen Al-SiC kompozit malzemelerin aşınma davranışlarının incelenmesi", *3rd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies*, Ankara/Turkey, 4(1): 545-548, (2019).
- [20] Alhawari K. S., Omar M. Z., Ghazali M. J., Salleh M. S., and Mohammed M. N., "Microstructural evolution during semi solid processing of Al-Si-Cu alloy with different Mg contents", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27(7): 1483-1497, (2017).
- [21] Abdizadeh H., Ashuri M., Moghadam P.T. and Nouribahadory A.R.H., "Improvement in physical and mechanical properties of aluminum/zircon composites fabricated by powder metallurgy method", *Materials and Design*, 32: (2011), 4417-4423,
- [22] Bharath, V., Nagaral, M. and Auradi, V.A.S. "Preparation of 6061Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MMC's by stir casting and evaluation of mechanical and wear properties", *Procedia Materials Science*, 6: 1658-1667, (2014).
- [23] Özyürek, D., Tekeli, S., "An investigation on wear resistance of SiCp-reinforced aluminium composites produced by mechanical alloying method", *Science and Engineering of Composite Materials*, 17(1): 31-38 (2010)
- [24] Özyürek D., Kalyon A., Yıldırım M., Tunçay T. and Çiftçi İ., "Experimental investigation and prediction of wear properties of Al/SiC metal matrix composites produced by thixomoulding method using Artificial Neural Networks", *Materials & Design*, 63: 270-277, (2014)
- [25] Simsek I., "The effect of B<sub>4</sub>C amount on wear behaviors of Al-Graphite/B<sub>4</sub>C hybrid composites produced by mechanical alloying", *Journal of Boron*, 4(2): 100-106, (2019).
- [26] Yıldırım M., Şimşek İ., Özyürek D., "Yaşlandırılmış AA7075 alaşımında solüsyona alma sıcaklığının aşınma performansına etkisinin incelenmesi", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(1): 233-239, (2018).
- [27] Çam S., Demir V., Özyürek D., "Wear behaviour of A356/TiAl<sub>3</sub> in situ composites produced by mechanical alloying", *Metals*, 6: 34-42, (2016)



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Soğuk haddehane montaj sürecinin verimliliğinin artırılması

## *Increase in efficiency of cold rolling mill erection process*

Yazar(lar) (Author(s)): Hatice ÇETİN<sup>1</sup>, Erol ARCAKLIOĞLU<sup>2</sup>, Rukiye ÇETİN<sup>3</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-7886-0073

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0001-8073-5207

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0003-2205-714X

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Çetin H., Arcaklıoğlu E. ve Çetin R., “Soğuk haddehane montaj sürecinin verimliliğinin artırılması”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1245-1253, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.647597

# Soğuk Haddehane Montajının Verimliliğinin Artırılması

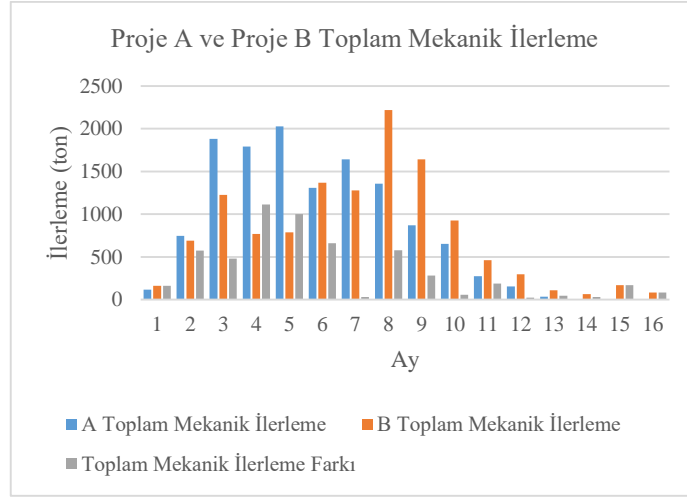
## Increase in Efficiency of Cold Rolling Mill Erection Process

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Soğuk Haddehane montaj süreci, proje yönetimi üzerinden incelendi. / Examination of cold rolling mill complex erection process is compared over the project management
- ❖ Soğuk haddehane tesis projesi için en elverişli montaj süresi hesaplandı. / The optimum total assembly time of cold Rolling mill complex project was calculated.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Proje süreci üç kalem üzerinden incelendi. Bunlar sırasıyla mekanik, borulama ve elektrik ilerlemesidir. İki benzer projenin mekanik ilerleme düzeyleri karşılaştırılmıştır. / Project process is evaluated under three items. These are mechanical, piping, and electrical progress. Two similar projects are compared in terms of mechanical progress.



**Şekil.** Proje A ve Proje B 'deki toplam mekanik işlerindeki ilerleme / **Figure.** Total progress in mechanical works of Project A and Project B

### Amaç (Aim)

Soğuk haddehane projesinin uygulanması sırasında ortaya çıkabilecek tüm risk ve sorunlara rağmen, hedeflenen sürenin proje yönetim esaslarına uygunluğu ve optimum süresinin hesaplanması amaçlanmıştır. / Despite all the risks and problems that may occur during the implementation of the cold rolling mill project, it is aimed to calculate compliance of the targeted period with the project management principles and the optimum time.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Birimlere ait ilerlemelerin karşılaştırma tabloları ve PERT yöntemiyle optimum süre belirlendi. / The optimum time was determined using the PERT method and the comparison tables of the progress of the units.

### Özgünlük (Originality)

Soğuk haddehane proje yönetimi ile ilgili literatürde zaman analizlerini içeren başka bir çalışma bulunmamaktadır. / There are no other study in the literature on cold rolling mill project management that includes time analysis.

### Bulgular (Findings)

Bir soğuk haddehane projesinin beklenen süre içerisinde tamamlanma olasılığı düşük olduğu gözlemlendi. / It was observed that a cold rolling mill project is unlikely to be completed within the expected time

### Sonuç (Conclusion)

Çelik sektörünün artan talebi göz önüne alındığında, bu çalışma montaj şirketlerine hizmet edecektir. / Given the increasing demand of the steel sector, the study will serve to assembly companies.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.



# Soğuk Haddehane Montaj Sürecinin Verimliliğinin Artırılması

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Hatice ÇETİN<sup>1\*</sup>, Erol ARCAKLIOĞLU<sup>1</sup>, Rukiye ÇETİN<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 19.11.2019 ; Kabul/Accepted : 12.12.2019)

## ÖZ

1930'lu yıllarda Türkiye'de demir çelik sektörünün altyapısı atılmış, 1937 yılında Karabük Demir çelik yassı ürün talebini karşılamak için kurulmuştur. Çelik sektörü özellikle 2001 yılından sonra, hızlı bir büyüme ivmesi kazanmıştır. Yassı ve yapısal çelik üretim tesislerine artan yatırımlarla, farklı iş sahaları ortaya çıkmıştır. Bunlardan birisi de soğuk haddehane kurulum süreçleridir. Soğuk haddehane montajında süreç yönetimi üç ana bölümde mekanik, borulama ve elektrik olmak üzere çalışılmaktadır. Bu yüzden birimler arasında iletişimin ve koordinasyonun etkin bir şekilde sağlanması önemlidir. Bu sürecin doğru planlanması ve sistemlerin organizasyonu etkin bir şekilde sağlanması proje verimliliğini arttıracaktır. Bu yazıda iki benzer soğuk haddehane kompleks montajının incelenmesi, proje planlama süreci üzerinden karşılaştırılmıştır. Öncelikle, bu iki haddehanenin sistemleri tanımlanmış ve farklılıkları ile benzer yönleri tarif edilmiştir. Proje detayları karşılaştırılarak, karşılaşılan sorunlar ve bu sorunların muhtemel sebepleri tanımlanarak, proje yönetim tekniklerinden PERT analizi ile en uygun toplam montaj süresi belirlenmiştir. Sonrasında üretim hatlarını gerçekleştiren süreler ve çalışan eleman sayıları ile karşılaştırma yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Soğuk haddehane, montaj, PERT, proje yönetim, zaman analizi, adam-saat.

## Increase in Efficiency of Cold Rolling Mill Erection Process

### ABSTRACT

By 1930s, infrastructure of the iron and steel industry in Turkey has been shaped. KARDEMİR was established in 1937 to meet the demand for iron and steel flat demands. Particularly after 2001, the steel sector gained a rapid growth. With the increasing investments on flat and structural steel production facilities, various courses of businesses have emerged. One of them is processes of cold rolling mill erection which involves a relatively complex process. The process management is carried out in three main sections such as mechanical, piping and electrical works. Therefore, it is important to ensure effective communication and coordination between these departments. Proper planning of this process and efficient organization of systems may increase project efficiency. In this paper, examination of two similar cold rolling mill complex erection is compared over the project planning process. Initially, the encountered problems and the possible causes of these problems were identified by comparing the project details, and the most appropriate total assembly time was determined by using one of the project management techniques, in this case, the PERT Analysis. Then, erection progresses of the production lines were compared in terms of actual times and the number of employees.

**Keywords:** Cold rolling mill complex, erection progress, PERT, project management, time analysis, man-hour.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Demir-Çelik ürünleri, günlük hayatımızın hemen her alanında kullanılmaktadır. Otomobiller, bisikletler, bilgisayarlar ve kablolar bunlardan sadece birkaçıdır. Aynı zamanda, çelik hem tüketim malları hem de yatırım malları endüstrisinde ana girdi sayılmaktadır. Ayrıca, inşaat, otomotiv ve makine gibi birçok endüstride kullanılan bir ara malzemedir. Yani, çelik bazı üretim, endüstrinin önde gelen sektörlerinden biridir ve büyük ölçekli yatırımlar gerektirir [1].

Demir - çelik endüstrisi, ürünlerin etkin bir şekilde sunulması ve etkinliği, bankacılık ve finans kuruluşlarının karını artırma potansiyeline sahiptir. Demir, dayanıklı ve güvenilir, uzun ömürlü ve uygun fiyatlı, geri dönüştürülebilir ve çevre dostu özelliğinden

dolayı tüm ülkeler için vazgeçilmez bir üründür. Böylece diyebiliriz ki, yaygın kullanımı olan temel bir endüstriyel girdi olarak çelik, kalkınmanın itici gücü olmaya katkıda bulunur. Bu da demir çelik endüstrisi, ilgili ülkenin gelişmişlik seviyesini tanımladığını gösterir [2].

1928 yılında, savunma sanayinin ihtiyaçlarını karşılamak için Mekanik ve Kimya Endüstrisi Kurumu şirket kuruluşu tarafından Türkiye'de çelik üretimi başlamıştır. 1930'lara gelindiğinde Çelik Üretimi, sanayileşmenin yanı sıra ulusal ekonominin gelişmesinde de önemli bir rol oynamaktadır. İlerleyen yıllarda, demir çelik sektöründeki yatırımlarla çelik üretimi artmaya devam etti. 2001'den sonra çelik sektörü, özellikle yassı çelik ve yapısal çelik imalatlarında hızlı bir büyüme ivmesi kazandı ve yassı çelik üretimindeki yatırımlar arttı. Yatırımların sonucunda, slab üretim kapasitesi 2016 yılına kadar 18,4 milyon tona ulaştı. Yassı ürünlere

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta: haticetin19@gmail.com

yapılan yatırımlar, üretim tüketim oranının ulusal talebe karşılamamasından dolayı artarak devam etmektedir [3]. Sürekli demir-çelik tüketimi artan ve aynı zamanda üretim kapasitesi tüketim oranını karşılayan ülkelerin daha güçlü ekonomiye sahip olduğu kabul edilmektedir. Gelişmiş ülkelerde toplam demir çelik üretiminin yassı çelik üretim ve tüketim oranlarının, gelişmekte olan ülkelere göre daha yüksek olması, çelik tüketimi ile ülkelerin gelişmişlik düzeyleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir [1]. Çelik üretim tesisleri, ülke ekonomisine büyük ölçüde katkı sağlamaktadır. Aynı zamanda bu tesisler milyarlarca dolarlık bir yatırımlardır. Bu amaçla, ulusal kalkınma planı olarak yatırım ve üretim fırsatları kolaylaştırılmakta ve desteklenmektedir [4].

Demir-çelik malzemesinin üretiminde ve bakımında iyi bir verimlilik seviyesine ulaşmak, ilgili ülkelerin kalkınma planlarının lehine sonuçlanacağından tesislerin kurulumundan üretimlerine kadar olan tüm süreçlerde kaliteli çalışmak verimlilik için önemlidir. Yapılan yatırımların hedefe ulaşması için proje yönetimi önemli bir rol oynamaktadır ve son zamanlarda yatırım firmalarının sorunu haline gelmiştir. Çünkü, yatırım projelerinin zorlukları çoktur. Her proje kendi özelliklerine göre değerlendirilmelidir, çünkü her biri benzersizdir, tekrar edilmez ve çok sayıda belirsizlik daima resmin bir parçası olacaktır [5]. Yeni yatırımlar sonucu, demir-çelik üretim kapasitesini artırmak için yeni fabrikalar devreye girecektir. Söz konusu fabrikalar bir kurulum sürecinden geçecektir. Fabrika montaj süreçleri de aynı zorluklar ile karşı karşıya kalacaktır. Bu süreçte, başarılı bir yönetim planı yürütmek, zamandan, paradan tasarruf ve işgücünü azaltma açısından faydalar sağlayacaktır.

Montaj çalışmalarında proje yönetiminin temel amacı, kurulum projesinin uygulanması sırasında ortaya çıkabilecek tüm risk ve sorunlara rağmen, projenin belirlenen hedeflere uygun olarak yürütülmesini sağlamaktır. Yani, iyi bir planlama ve deneyimli kadro ile iyi bir uygulama esastır.

Projeler, zaman tahminlerine göre planlanmaktadır. Ancak söz konusu proje süreçlerinin zaman tahminleri çok detaya inmeden sadece tecrübelerle oluşturulmaktadır. Proje yönetim esasına göre ise zaman tahminleri ile çalışmak için çeşitli teknikler vardır. GANT diyagramları, CPM ve PERT yöntemleri söz konusu tekniklerden bazılarıdır [6].

Yatırım projelerinde ve inşaat projelerinde, proje yönetimine ilişkin çok sayıda çalışma vardır [7] - [8]. Fakat, fabrika kurulumu [9], [10] ile ilgili veya endüstriyel tesislerde ekipman montaj süreci yönetimi alanında daha az sayıda çalışma yapılmıştır [11]. Endüstri tesislerine yapılan büyük yatırım miktarları göz önüne alındığında, uygun bir planlama üretim verimliliğini artıracak, hem işveren firma hem de ilgili ülke / ülkeler zamandan, paradan ve iş gücünden yararlanacaktır. Bu nedenle, hem endüstriyel tesisin inşasında hem de ekipman montajında başarılı bir proje

yönetimi yapılması önemli faaliyetlerden biridir. Daha öncede bahsedildiği üzere fabrika montajında proje yönetimi ile ilgili pek fazla çalışma yapılmamıştır.

Fabrika montajı konusunda uzmanlaşmış şirketler mevcuttur. Genelde bu firmalar proje yönetimi için kendi yöntemlerini kullanırlar ve deneyim proje yönetiminin büyük bir kısmı kapsar. Kısa vadede, bu işleyiş verimli çözümler sunar. Yine de bazen düzenli raporlar ve/veya tamamlanmış işlerin dokümantasyonunu oluşturan süreç doğru bir şekilde işlemeyebilir. Bu süreçte firmanın, deneyimli personeli işten ayrıldığında güvenilirliğini kaybetme olasılığı vardır. Bu nedenle, fabrika montajında proje yönetimi için uygulama kılavuzu, şirketlerin sadece projeleri verimli bir şekilde yürütmelerini sağlamakla kalmayacak, aynı zamanda deneyimlediklerini kaybetme tehdidinde bulunmayacak şekilde aktaracaktır.

Öte yandan, bir montaj sürecini yönetmek, inşaat projelerini yönetmeye oldukça benzer, bu nedenle aynı proje planlama teknikleri montaj süreci için kolayca uyarlanabilir. Bu teknikler esas olarak projelerin planlanması ve kontrolünde kullanılır. Yani, projedeki faaliyetlerin süresini ve arkasındaki faaliyetleri belirlememize yardımcı olurlar. Montaj sırasında, bir problemle karşılaşıldığında zaman ve maliyet parametrelerinin gerçek zamanlı analizi yapıldığında, derhal müdahale etmek ve planı değiştirmek mümkün olacaktır [6].

Ne yazık ki, Türkiye'de proje yönetimi kültürü henüz tam olarak oluşturulmamıştır. İnşaat alanlarının proje yönetimi konusundaki yetersiz standartları, inşaat proje yönetimi alanının karşılaştığı en büyük zorluklardandır. [8].

## 2. SOĞUK HADDE (COLD MILL)

Haddeleme, malzemelerin dönen silindireler arasında geçmesi ve belirli bir boyut ve malzemenin kalitesi için belirli bir basınç uygulanması ile malzemenin ezilme işlemidir. Haddeleme işlemi sırasında malzemelerin genişliği uzunlukları ile birlikte artar. Deformasyon oranları nedeniyle bir kerede çok ince malzemeler üretmek mümkün değildir [12], [13].

Genel olarak, çelik üretimi sürekli döküm ve haddeleme işlemini içerir. Sürekli döküm makineleri, üretilen ürünün boyutuna göre üç ana gruba ayrılabilir: blum, kütük ve slab. Kütük, 160x160 mm kare kesite kadar döküm yapılabilen, uzun ürünlerdir. Blumun boyutları kütüğün boyutlarından daha büyüktür. Blum, 160-400 mm genişliğe ve 600 mm'ye kadar kalınlığa sahip uzun ürünlerdir. Slab, sac üretimi için üretilen ürünlerdir. Slab kalınlığı 130-300 mm, genişliği 750-2700 mm arasında değişmektedir [14].

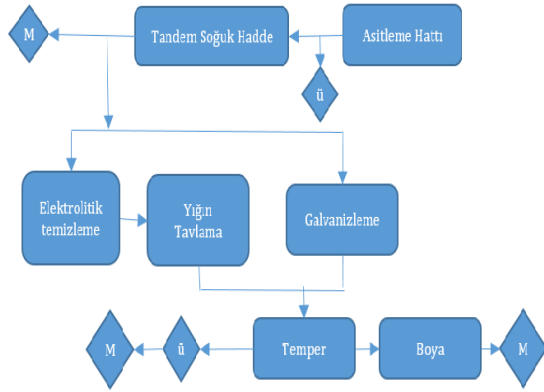
Haddeleme işlemi yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilir. Basitçe ifade etmek gerekirse, sıcak haddeleme işleminin sebebi malzemelerin içindeki çatlakları ve boşlukları ortadan kaldırmaktır. Kaba işleme sonrasındaki sıcak haddeleme işleminde malzemelerin daha ince taneli

yapılardan oluşmasını sağlar. Mukavemet ve sertlik gibi çeşitli özellikler bu sayede arttırılır. Daha yüksek mukavemet ve sertlik seviyelerine ve daha pürüzsüz yüzeylere sahip haddelenmiş ürünler elde etmek için ise soğuk haddeleme işlemi gerçekleştirilir.

Çelik soğuk haddeleme prosesleri yüzey işlemleri (çoğunlukla asitleme), soğuk haddeleme, ısıl işlem (tavlama) ve bitirme işlemlerinden oluşur.

### 2.1. Montaj yapılan hatlar (Mounted Lines and Their Functions)

Pazar talebine göre yassı çelik üretim yöntemleri seçilir ve ona göre tesis kurulumu yapılır. Şekil 1 gösterilen soğuk haddeleme tesisi ürün akış şeması, bu yöntemlerden biridir. Akış şemasında gösterildiği gibi, bazı hatlardan gelen ürünler doğrudan pazara sunulabilirken, nihai ürün farklı işlemlerden geçer. Bu hatlara ek olarak, yardımcı tesisler de vardır. Örneğin, asit rejenerasyon tesisi (ARP), su arıtma tesisi bunlardan birkaçıdır. Ayrıca kesme, dilme ve trapez sac üretimi vb. gibi bölümlerden oluşan çelik servis merkezleri de vardır.



Şekil 1. Soğuk Haddeleme ürün akış şeması (Cold Rolling mill flow chart)

### 2.2. Asitleme Hattı ve Tandem Soğuk Haddeleme (PL&TCM) (Pickling Line and Tandem Cold Mill)

Soğuk haddelemede, genellikle işlenmeden önce iş parçasına ısı uygulanmaz. Sadece yay çeliği, takım çeliği veya tavlama çeliği gibi bazı özel çelikler, asitleme ve haddeleme işleminden önce ısıl işleme tabi tutulabilir.

Sıcak haddelenmiş şerit önce tufallarından arındırılır (genellikle asitlenir), bazen de hem kumlanır hem de asitlenir), sonra soğuk haddelenir ve ısıl işleme tabi tutulur. Yani, asitleme işleminde, sıcak haddelenmiş çelik ruloların yüzeyinde oluşan tufal ve oksit tabakasını çıkarmak için kademeli olarak hidroklorik asit çok tanklı bir sistemde dolaşır. Kurutma işleminden önce, şerit tamamen temiz ve kuru bir şerit sağlamak için kullanılan bir durulama bölümünden geçer. Asitleme işleminden sonra şerit, Tandem Hadde hattı tarafından soğuk olarak haddelenir [15].

### 2.3. Elektrolitik Temizleme Hattı (ECL) (Electrolytic Cleaning Line)

ECL, şerit yüzeyindeki haddeleme emülsiyonunun ve geri kalan demir taneciklerin, soğuk haddeleme işleminden sonra temizlendiği bir işlemdir. Soğuk haddelenmiş şeritlerde yüksek akım yoğunluğu kullanılarak temizleme işlemi gerçekleştirilir. Bu işleme alkali temizleme denir. Böylece, tavlama işleminden önce temiz bir şerit yüzeyi elde edilir [16].

### 2.4. Yiğın Tavlama (BAF) (Batch Annealing Furnace)

Tavlama, bir malzemenin yüksek bir sıcaklıkta ısıtılması ve bir süre belirli bir sıcaklıkta tutulması işlemidir. Ardından, malzeme oda sıcaklığına ulaşana kadar yavaşça soğutulur. Bu işlemin amacı çeliğin kuvvetini arttırmaktır. Tavlama, toplu veya sürekli olarak gerçekleştirilebilir [17].

### 2.5. Temper Hadde (SPM – TM) (Skin Pass Mill – Temper Mill)

Temper haddeleme, mekanik özelliklerin ve sıcak haddelenmiş çelik saclar, soğuk haddelenmiş çelik saclar ve paslanmaz çelik plakalar gibi çelik malzemenin yüzey yapısının iyileştirilmesi için kullanılır. SPM işleminde, malzemenin kalınlığı% 1 ila 3 oranında azaltılır. Temper haddede ek olarak, germe düzeltme bölümüne (TLV) sahiptir. TLV, şerit uzunluğunun uzatılmasını, ayrıca levha yüzeyi kırışık olmadan tamamen düz olmasını sağlar. Temper hadde, pasivasyon ve yağlama gibi adımlar ile sonlandırılır.

### 2.6. Sürekli Galvaniz Hattı (HDGL) (Hot Dip Galvanizing Line)

Sürekli galvanizleme işlemi, çelik şeridin yüzeyini erimiş çinko ile kaplamaktır. HDGL, arıtma, tavlama, galvanizleme ve soğutma bölümlerinden oluşur. İşlem bölümü, soğuk haddelemeden kaynaklanan terazilerin ve haddeleme emülsiyonlarının temizlenmesini sağlarken, tavlama bölümü gerekli mekanik özellikleri elde etmeyi sağlar ve galvanizleme bölümü şeridi çinko ile kaplanmasını sağlar. Bir hava bıçağı sistemi ile uyumlu çalışan bir çift havalı sıyırma jetine sahiptir. Bu sistem kaplama kalınlığının tüm şerit boyunca aynı olmasını sağlamaya yarar. Devamında şerit soğutulmak adına Soğutma kulesine geçer. İsteğe bağlı olarak son adım temper hadde olacaktır. Karar müşteri isteğine bırakılmıştır [18].

### 2.7. Boya Hattı (CCL) (Color Coating Line)

Çeliklerin kaplanması, metal kesme ve katlama gibi çeşitli işlemlere maruz kaldığı için sürekli ve oldukça otomatik sitem içeren etkili bir yöntem gerektirir. Bu işlem için öncelikle tüm yüzey temizlenir ve işlenir. Örneğin, parçalar, çeşitli büyüklüklerde delikleri, yüzey kırışıklıkları, çeşitli yüzey hasarları olabilir. Böylece, boya kaplı metaller geleneksel boyalı metallere kıyasla daha dayanıklı ve korozyona karşı daha dirençli olur [19].

### 3. PROJE YÖNETİMİ (PROJECT MANAGEMENT)

Yıllardır insanlar kendi hayatlarını kolaylaştırmak ya da kariyerlerinde daha iyi bir noktada olmak adına aklımıza gelebilecek tüm alanlardaki karmaşık problemler için çözüm üretmeye çalışmaktadırlar. Bu araştırma gün geçtikçe rekabetin artması ve teknolojinin gelişmesiyle artarak devam etmektedir. Çünkü günümüz firmaları daha iyi kalitede daha az işçi ile işlerini yürütmek istemektedirler [20], [21]. Proje ve süreç yönetimlerine verilen önem de doğal olarak artmaktadır.

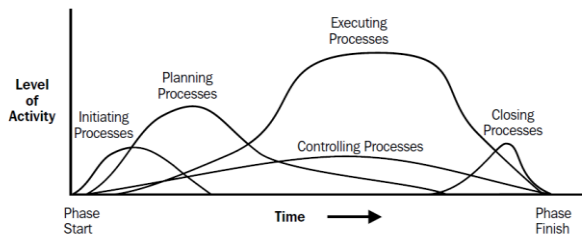
Projeler başlangıcı ve sonu olan süreçlerdir, yani geçicidirler. Projelerin amaçları vardır ve sonuçları ölçülebilir niteliktedir. Proje süreçlerinde çok sayıda belirsizlik vardır. Bu yüzden hedefe ulaşmak için plan yapılır. Proje amaçları ulaşılabilir olmalıdır. Genel olarak, proje yönetiminde hedeflerin içeriği zaman, maliyet, istenilen performansta ve teknolojik düzeyde çalışma, kaynakları verimli kullanma ve müşteri memnuniyetinden oluşmaktadır [22]- [23].

#### 3.1. Proje Yönetimi Süreçleri (Project Management Process)

Bir proje, birbiri arasında bağlantı bulunan birden çok işlemten meydana gelir. Yani yeni bir proje başlamadan önce plan yapmak gereklidir. Proje bütçesi, proje süresi, ürün kalitesi ve süreçlerde oluşabilecek her türlü risk tahminleri yapılır. İşlemler tamamlandıkça, orijinal plan ile kontrol edilir ve karşılaştırılır. Bütün bu işlemler Proje yönetimi süreçleridir ve aşağıda yer almaktadır [5]:

- Başlangıç
- Planlama
- Uygulama
- Kontrol
- Sonlandırma

Bütün süreçler birbirleri ile bağlıdır ve birbirlerini etkilerler (Şekil 2). Her faz diğerini etkileyebileceği ve ardışık fazı değiştiren başka bir giriş parametresi oluşturabileceği tekrarlayan bir işlemle birbirine bağlanır. Böylece birbirlerini etkiler.



Şekil 2. Proje yönetimi yaşam döngüsü [5] (Overlap of Process Group in a Phase)

### 4. PROJECT YÖNETİMİ TEKNİKLERİ (PROJECT MANAGEMENT TECHNIQUES)

Proje yönetimi teknikleri, proje planlama aşaması ile başlar ve kapanma aşaması ile sona erer. Planlama aşamaları için tüm aşamaları anlamak gerekir; projenin hazırlanması, analizi, seçimi, uygulanması, devreye

alınması ve değerlendirilmesi. Böylece proje yönetimi teknikleri yinelemeli bir işlemle sağlanmakta ve güvenilir bir şekilde uygulanmaktadır.

Günümüzün projelerinin büyüklüğü ve karmaşıklığı daha verimli planlama yöntemlerine ihtiyaç duymaktadır. Bu gereksinim, ağ diyagramlarının geliştirilmesine sebep oldu. Böylece proje programlama, proje yönetiminde kullanılan ağ diyagramlarına farklı bir boyut kazandırmış oldu. Proje planlama için geliştirilmiş en yaygın yöntemler: GANT veya çubuk grafik metodu, Program Değerlendirme ve Gözden Geçirme Tekniği (PERT), Kritik Yol Yöntemi (CPM) ya diğer adıyla Ok Diyagramı Yöntemi (ARD), Öncelikli Diyagram Yöntemi (PDM) ve Grafik Değerlendirme ve Gözden Geçirme Tekniği (GERT) 2 dir. Bu yöntemler, problemleri belirlemek, tanımlamak, kontrol etmek ve önlem almak için etkin yöntemler olarak bilinir. Ayrıca, projenin akış yapısını, olayların ve işlemlerin mantıksal ve zaman çizelgesi sırasını şematik olarak gösteren araçlardır [24], [25].

CPM ve PERT en bilinen ve en çok kullanılan ağ yöntemleridir. Projenin programlanması ve izlenmesi için geliştirilen ağ yöntemleri projeyi görsel olarak özetlemektedir. Bu iki yöntem aynı olmasına rağmen, CPM ve PERT uygulama aşamaları farklılık gösterir. PERT, belirsizliğin büyük bir sorun olduğu Ar-Ge projeleri için daha uygun olarak değerlendirilirken, CPM, zaman ve maliyetlerin tahmin edilebildiği bazı projelerde daha yararlıdır. Bununla birlikte, bu farklar son zamanlarda kademeli olarak azalmıştır veya hatta ortadan kalkmıştır [26].

CPM ve PERT, kritik ve kritik olmayan çalışmalarını gösterir, çünkü etkinlikler ve etkinlikler arasındaki ilişkileri gösterirler. Planlanan ve gerçekleştirilen her olayın ve etkinliğin sonuçlarını gösterirler. Böylece planlanan proje belirlenen sürede tamamlanır. Tüm bu olaylar, ağ şeması adı verilen bir şema ile gösterilir [25]. PERT dönemlerinde belirsizlikler dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Başka bir deyişle, projede oluşabilecek belirsizlikler dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, PERT yönteminde öncelikle faaliyet dönemleri elde edilmeli, bu dönemlerin proje başarısı üzerindeki etkileri analiz edilmeli, faaliyet dönemlerindeki belirsizlikler göz önünde bulundurulmalıdır. Faaliyet sürelerinin belirsizliği, benzer projeler ve deneyimli kişiler yardımı ile her bir faaliyetin üç olası zamanını tahmin ederek azaltılabilir. Bu nedenle, üç farklı zaman tahmini iyimser süre (a), kötümser süre (b) ve en olası süre (m), her bir değerlendirme ekibi tarafından her bir faaliyet için ayrı ayrı yapılır ve her bir faaliyetin ortalama beklenen süresi hesaplanır [25].

Beklenen süre ( $t_e$ ) aşağıdaki formülle (1) hesaplanabilir:

$$t_e = \frac{a + 4m + b}{6} \quad (1)$$

Projenin zamanında tamamlanma olasılığı, her bir aktivitenin standart sapma değerleri bilgisini gerektirir ve aşağıdaki formülle(2) hesaplanabilir:

$$\sigma_{te} = \frac{b - a}{6} \quad (2)$$

Standart sapmanın karesi olarak bilinen değer varyans ( $v$ ) hesaplanarak faaliyetlerin beklenen tamamlanma sürelerinin karşılaştırılması mümkündür. Standart sapma, sigma sapmalarının tipi belirlendiği sürece basit bir şekilde hesaplanabilir [27].

Bu hesaplamada  $v$ 'nin 1'den büyük olması, belirsizliğin yüksek olduğu anlamına gelir. Bu durumda, iyimser ve kötümser varsayımlar oldukça farklıdır.  $v$ , birden düşükse, belirsizlik değeri düşük demektir. Bu, iyimser ve kötümser varsayımların birbirine yakın olduğu anlamına gelir [25].

Toplam yolun standart sapmasının karekökü, her bir faaliyetin kare sapmasının karelerinin toplamıdır ve aşağıdaki formülde (3) ifade edilmiştir [24]:

$$\sigma_{total} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \dots} \quad (3)$$

$$= \sqrt{v_1 + v_2 + v_3 + \dots}$$

Standart sapmanın hesaplanması, her faaliyet ve ilgili kritik yol için bir güven aralığı tanımlamamızı sağlar [24].

Belirtilen tarihte projenin bitme olasılığı için aşağıdaki formülle (4) hesaplanır. Bulunan değer  $z$  standart dağılım değerini ifade eder ve normal standart dağılım tablosundan karşılık gelen değer projenin belirlenen tarihte tamamlanma olasılığıdır [25].

$$K = \frac{T_L - T_E}{\sigma_{total}} = P(z \leq K) \quad (4)$$

$K$  = kritik yoldaki faaliyetler,  $T_L$  = istenen projenin bitiş tarihi,  $T_E$  = kritik yoldaki hesaplanan süre,  $z$  = Standart normal dağılım.

## 5. METODOLOJİ (METHODOLOGY)

Faaliyetlerin sırası bir projenin verimliliği üzerinde önemli bir rol oynar. Faaliyetler organize edilmeden bile bir proje sayısız sorunla karşılaşabilir. Bazı projelerin planın gerisinde kalmasının sebebi faaliyet düzenlerinin olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu yüzden ağ diyagramlarının proje yönetimi üzerinde önemi büyüktür [27].

Etkin bir proje yönetmek için ekipman, insan, malzeme ve bütçe gibi tüm veriler uygun bir şekilde kullanılmalıdır. Buradan yola çıkılarak iki ayrı soğuk haddehane kompleksine ait projelerin verileri zaman ölçütü baz alınarak incelenmiştir (Çizelge 1). Montaj şirketinin iş kapsamını özetleyecek olursak;

Proje 3 ayrı iş departmanı altında oluşturulmuştur, (1) mekanik montaj işleri, (2) boru montaj işleri ve (3) elektrik montaj işleri. Mekanik işleri, çelik konstrüksiyon montajı, ekipman montajı ve refrakter işlerini kapsamaktadır. Borulama işleri, boru montajı ve

izolasyon işlerinden, elektrik işleri ise kablo tavası, kablolama, kablo bağlantıları, elektrik enstrümanları ve elektrik paneli montajından oluşmaktadır.

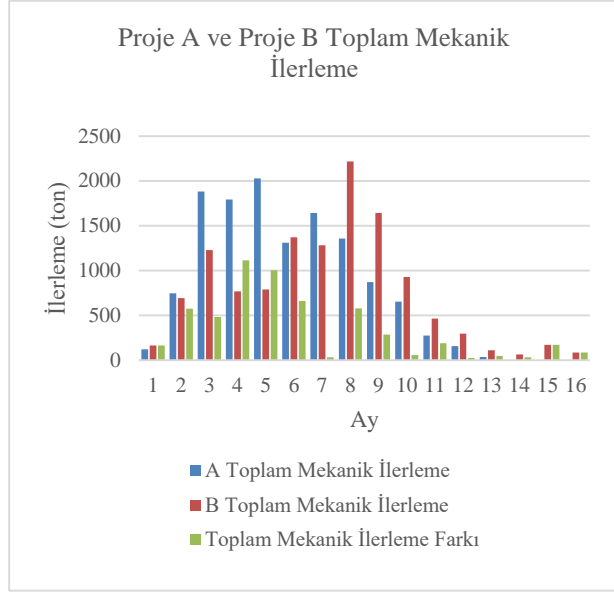
**Çizelge 1.** Proje A ve Proje B arasındaki farklılıklar ve benzerlikler (Differences and similarities between Project A and Project B)

	Proje A	Proje B
Bölge	Akdeniz	Marmara
Montaj Hatları	PL&TCM, CCL, ARP, HDGL, ECL, BAF, Yardımcı Tesisler, TM	PL&TCM, CCL, ARP, HDGL, ECL, BAF, Yardımcı Tesisler, TM
Süre	14 ay	16 ay
Maks. Çalışan Sayısı	1427	516
Min. Çalışan Sayısı	64	58
Şantiye Alanı [km <sup>2</sup> ]	122	80
Proje Kapsamı	-mekanik işler -borulama işleri -elektrik işleri -ayrıca, elektrik işleri kapsamında orta gerilim hatları	-mekanik işler -borulama işleri -elektrik işleri
Karşılaşılan Sorunlar	-Malzemelerin gecikmesi -Şantiye alanlarının teslimi	- Malzemelerin gecikmesi -Zemin etüdü yetersizliği -İmalat hataları

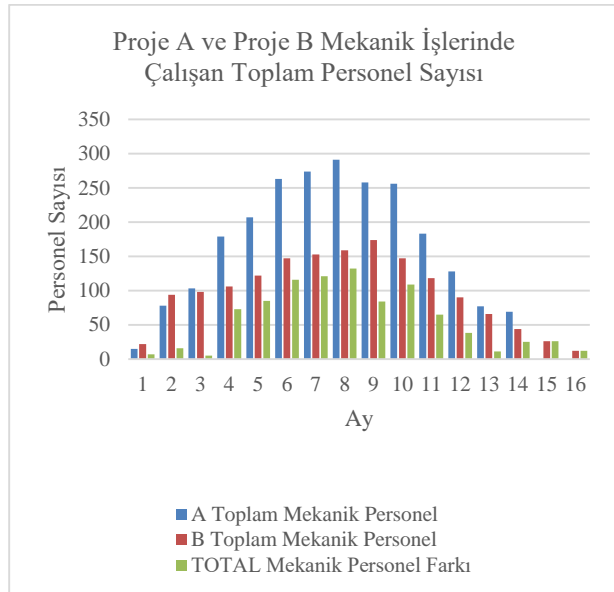
### 5.1. Proje Zaman Analizi (Project Time Analysis)

Projelerdeki soğuk haddehane kompleksinde yer alan altı ayrı tesis PL & TCM, ARP, BAF, ECL, HDGL, CCL ve Yardımcı Tesislerin hepsi benzer borulama, elektrik ve mekanik işlere sahip olmalarına rağmen, ekipman, çizimler ve elektrik tasarımı gibi teknolojik yapı farklılıklarına sahiptir. Ayrıca tüm hatlar farklı zamanlarda monte edilebilir, çünkü birbirlerine monte etme taahhütleri yoktur. Bu sebeple montaj firması, inşaat alanlarının işveren firma tarafından devredildiği hatlarda proje tarihlerini belirlemeye başlar. Yani, inşaat işlerinin tamamlanmasına göre montaj işleri aynı anda başlayabilir veya tüm hatlarda farklı zamanlarda başlayabilir. Bu iki projede de hatların başlama zamanları farklı olsa bile birbirlerine benzer iki proje olduğu için verileri kullanılabilir. Bu sebeple her bir departman ayrı ayrı incelenerek, her iki projenin verileri projelerin

tamamlanma süreleri ve projelerde kullanılan adam-saat verileri karşılaştırılmıştır. Örnek olarak Şekil 3. ve Şekil 4. de karşılaştırılmalı değerler bulunmaktadır.



Şekil 3. Proje A ve Proje B 'deki toplam mekanik işlerindeki ilerleme (Total progress in mechanical works of Project A and Project B)



Şekil 4. Proje A ve Proje B 'deki toplam mekanik işlerinde çalışan sayısı (Total number of personnel employed in mechanical works for Project A and Project B)

## 5.2. PERT Analizi (PERT Analysis)

Mekanik, borulama ve elektrik işlerindeki ilerlemelerin zaman analizi PERT metoduyla yani, iyimser, kötümser ve benzer senaryo süre tahminleri kullanılarak yapıldı. İyimser süre, işveren firmanın tedarik süreçlerinde oluşturduğu her şeyin plana göre gittiğini hesapladığı süredir. Proje A ve Proje B verilerinden yararlanarak hesaplanan süre benzer durumlar süresidir. Kötümser süre ise, her projedeki en kötü senaryolar dikkate alınarak oluşturulmuştur. Örneğin B projesinde, inşaat sorunları

ve ekipman üretim hataları gibi çeşitli sorunlar projeyi yavaşlatmış ve proje ilerlemesini etkilemiştir. Çözüm süreleri de yaklaşık beş aydır. Kötümser süre bütün olumsuz etkileri kapsamaktadır.

İyimser, kötümser ve benzer senaryo süreleri belirlendikten sonra, beklenen süre ( $t_e$ ) formüllere göre hesaplanır (Formül 1). Hesaplanan beklenen süreler (Çizelge 2) ile MS Project'te proje takvimi oluşturuldu ve her hattın bağlı olduğu yardımcı tesislerdeki (utility) işler kritik yol olarak hesaplandı. MS Project programında çalışma saatleri 8:00 – 12:30 ve 13:30 – 17:00 olarak belirlendi. Görevler arasındaki bağlantılar için bilinmesi gereken ilk özellik; elektrik, boru ve mekanik arasındaki bağlantılar neredeyse tüm hatlarda benzerdir. Ayrıca, mekanik işlerin tamamlanmasından sonra boru çalışmaları başlar ve boru tesisatı tamamlandığında elektrik işleri başlar. Departmanlardaki işler arasındaki bağlantılar yapıldıktan sonra işveren firmaya ait kıstaslar kilometre taşı olarak işaretlenir. Bunlar, hatların bulunduğu alandaki inşaat işlerinin tamamlanması ve teslimi, malzemelerin ve ilgili montaj çizimlerinin/detaylarının tedarik edilerek teslim edilmesidir. Söz konusu işlerin gecikmesi projenin ilerleme sürecini direkt etkileyecektir. Proje takvimi oluştururken, işveren firmanın her şeyi zamanında yaptığını varsayılmıştır.

Çizelge 2. Proje hatlarının zaman tablosu (PERT) (Time table of the project lines)

No	Görev	a	m	b	$t_e$	$\sigma_{t_e}$
1	<u>PL&amp;TCM</u>					
1.1	Mekanik	7.0	9.0	14.0	9.5	1.17
1.2	Borulama	7.0	9.5	14.0	9.8	1.17
1.3	Elektrik	7.0	8.0	14.0	8.8	1.17
2	<u>ARP</u>					
2.1	Mekanik	5.0	6.0	7.0	6.0	0.33
2.2	Borulama	4.0	5.0	5.7	4.9	0.28
2.3	Elektrik	4.0	4.0	7.0	4.5	0.50

Çizelge 2. (Devam) Proje hatlarının zaman tablosu (PERT) (Time table of the project lines)

No	Görev	a	m	b	$t_e$	$\sigma_{t_e}$
3	<u>HDGL</u>					
3.1	Mekanik	4.3	6.0	8.0	6.1	0.61



3.2	Borulama	4.3	7.5	9.0	7.2	0.78
3.3	Elektrik	4.3	6.0	10.0	6.4	0.94
4	<u>TM</u>					
4.1	Mekanik	3.0	4.0	5.0	4.0	0.33
4.2	Borulama	3.0	4.8	5.7	4.7	0.44
4.3	Elektrik	3.0	3.0	5.0	3.3	0.33
5	<u>BAF</u>					
5.1	Mekanik	2.5	3.0	4.0	3.1	0.25
5.2	Borulama	3.0	4.0	4.7	3.9	0.28
5.3	Elektrik	3.0	3.0	5.0	3.3	0.33
6	<u>CCL</u>					
6.1	Mekanik	4.0	6.0	7.0	5.8	0.50
6.2	Borulama	4.0	6.0	7.0	5.8	0.50
6.3	Elektrik	4.0	5.0	8.0	5.3	0.67
7	<u>ECL</u>					
7.1	Mekanik	3.0	4.0	5.0	4.0	0.33
7.2	Borulama	3.0	3.3	4.0	3.4	0.17
7.3	Elektrik	3.0	3.0	5.0	3.3	0.33
8	<u>Yardımcı Tesisler*</u>	7	11.5	14	11.167	1.17
8.1	Mekanik *	1.0	1.5	2.5	1.6	0.25
8.2	Borulama*	7.0	11.3	13.3	10.9	1.06
8.3	Elektrik*	4.0	4.0	8.0	4.7	0.67

\*Kritik Yol

MS Project programına göre Utility (yardımcı tesisler) montaj işleri kritik yoldur. Böylece Formül 2 ile kritik yolun toplam standart sapmasını ve varyansını hesaplayabiliriz:

$$\sigma_{utility} = \frac{b - a}{6} = \frac{14 - 7}{6} = 1.17 \quad (5)$$

$$v_{utility} = \sigma_{utility}^2 = 1.36 \quad (6)$$

Sonuçlara göre projenin tamamlanma olasılığı 11.167+1.36 ve 11.167-1.36 oranları arasında yüksektir [25].

## 6. SONUÇLAR (RESULTS)

Formül 4 ile aşağıdaki gibi hesaplanan 1.567 değeri z değerini ifade etmektedir. Bu değer in standart dağılım tablosunda karşılık gelen veriye göre projenin 13 ayda tamamlanma olasılığı %94,14 olarak bulunur (Formül 7).

$$K = \frac{13 - 11.167}{1.36} = 1.567 = P(z \leq K) \quad (7)$$

Yardımcı tesisler dışında hiç bir hattın birbiriyle bir bağlantısı yoktur. Bu bize bolluk zamanı olarak tanımladığımız süreleri verir. Bolluk zamanı bir işin bitirilme zamanını etkilemeyen süre olarak tanımlanabilir. Örneğin, BAF montaj işleri 4 aylık bir süreyi kapsar. Ama bütün proje 11 ayda tamamlanıyor. Bu da bize 7 aylık bir bolluk zamanı vermektedir. Yani, montaj başlama ve bitiş süreleri proje içinde farklılaşabilir. Aynı zamanda personel sayısı, projenin başlarında artarken proje sonuna doğru azalır. Bu yüzden analiz toplam çalışma saati ile yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan çalışma saatleri, 4857 sayılı iş kanununa dayanmaktadır ve montaj ilerlemesi, montajın tamamlanma miktarına göre belirlenmiştir.

İki projenin toplam verileri:

- A Projesinin toplam mekanik ilerlemesi 12,859.96 ton ve bu iş 495,300 adam-saat tarafından tamamlanırken, B Projesi'nde ise 12,261.20 ton mekanik montaj ilerlemesi 410,280 adam-saat olarak tamamlanmıştır. Mekanik ilerleme, sırasıyla A projesinde 0.026 ton / adam-saat, B projesinde 0.030 ton / adam-saat olarak hesaplandı.
- A Projesi'nin toplam boru hattı ilerlemesi 339.113,06 inç-m ile 93,247.06 m iken ve 681,720 adam-saat ile tamamlanırken, B Projesi'nde bu değer 91,962.86 m ile 243,908.81 inç-m ile ve 451,620 adam ile tamamlanmıştır. -saat. Boru ilerlemesi, sırasıyla A projesinde 0.54 inç-m / adam-saat veya 0.14 m / adam-saat, B projesinde 0,54 inç-m / adam-saat veya 0.20 m / adam-saat olarak hesaplandı.
- A projesinin toplam elektrik ilerlemesi 938,096.50 m kablo işi 538,720 adam-saat olarak tamamlanırken, B Projesi'nde 660,441.41 m kablo işi 197,080 adam-saat olarak tamamlanmıştır. Elektrik işlerindeki ilerleme sırasıyla A projesinde 1.74 m / adam-saat, B projesinde 3.35 m / adam-saat olarak hesaplandı.

Sonuç olarak;

1. Elektrik ve borulama işlerinin sayısı, işveren firmaların inşaat tasarım gereklilikleri nedeniyle Proje A ve Proje B'de değişmektedir.

- Bu farklılıklar proje tamamlanma sürelerini etkilemiştir.
2. B Projesi personeli daha önce A Projesinde çalışmıştır. Sonuçlara göre B Projesi daha verimli bir ilerlemenin yanı sıra daha verimli bir iş akışı sağlamıştır.
  3. Benzer iki proje göz önüne alındığında, işverenin son başvuru tarihlerine karşı hassas olduğu için A projesinde işin daha önce tamamlandığı görülmüştür. Böylece, kesintisiz izleme ve gecikme olmadan çözüm süreci yürütme, montaj süresini hızlandırmıştır.
  4. Öte yandan, Proje A'daki işveren firma, montaj firmasına proje takvimindeki tarihe ulaşabilmek için daha fazla insan gücüne ihtiyaç olduğunu belirtmiştir. Ancak, bu projenin verimliliğine istenildiği gibi katkıda bulunmamıştır. Örneğin, Proje A'da toplam mekanik ilerleme 1.74 m / adam-saat olarak hesaplanırken, Proje B'de sayı 3.35 m / adam-saate ulaştı. Böylece fazla çalışan sayısının verimlilik seviyesini artırmadığı görülmektedir.
  5. B Projesinde, gecikmelerle birlikte inşaat eksikliklerinin giderilmesi proje süresini uzatmıştır.
  6. Yetersiz toprak etüdü, Proje B'deki tüm çalışmaların ilerlemesini etkilemiştir. Bu, montaj süresinin de uzatıldığı anlamına gelir.
  7. B projesinin sürecine bakıldığında, çoğu durumda Proje A'dan daha verimli olduğu tespit edilmiştir. Yani, B Projesi ilerleme verileri gelecekteki uygulamalar için daha iyi bir örnek teşkil eder: mekanik ilerleme için 0.03 ton / adam-saat, boru ilerlemesi için 0.54 inç-m / adam-saat ve elektriksel ilerleme için 3.35 m / adam-saat. Böylece, tahmini 11 aylık süre için personel sayısı belirlenebilir. Bununla birlikte, bu sayı her ay için değişmektedir ve gelecekteki proje planlamalarında bu kıstas da dikkate alınmalıdır.
  8. Mekanik, boru tesisatı ve elektrik işleri için ekipman ve malzeme teminindeki gecikmeler montaj sürecini etkilemiştir.
  9. Ekipman ve boruların potansiyel üretim eksiklikleri için, işveren firma gerekli incelemeleri yapmalı ve problemleri en kısa sürede çözmelidir.
  10. Mekanik işlerdeki her gecikmenin boru tesisatı ve elektrik montaj ilerlemesi üzerinde doğrudan bir etkisi vardır. Benzer şekilde, boru montajındaki gecikmeler elektrik montajındaki ilerlemeyi etkiler.
  11. Borulama işlerinin devamında hem metre hem de inç birimler kullanmanın nedeni, bazen daha küçük çaplı boruların daha fazla yardım gerektirmesidir. Gelecekteki planlar için her iki ünitenin de kullanılması yararlı olacaktır.

12. İşveren firma inşaat programı oluştururken, montaj şirketi tarafından verimli bir süreç elde etmek için hatların bolluk zamanlarını göz önünde bulundurmaları gerekir.
13. Elektrik ve borulama işleri inşaat tasarım planlarına göre değişir, adam saat verileri daha iyi bir proje yönetimi elde etmelerini sağlayacaktır.
14. B projesinde daha verimli bir süreç yönetilmesine rağmen, personel yetersizliği nedeniyle, tamamlamada gecikmeler yaşanmaktadır. Örneğin, on iki bin ton mekanik iş montajı, 11 aylık proje süresince 0.03 ton / adam-saat ile hesaplandığında, personel sayısının 1,700'den fazla olduğu tahmin edilmektedir. Gerçek sayı Proje B'de 1,578 idi. Bu sayının her ay için toplam çalışan sayısı olduğunu unutmayın. Bu nedenle, doğru ekipmanın ve doğru personel sayısının belirlenmesi esastır.
15. Her iki durumda da bölüm şefleri tarafından sunulan düzenli raporlar, projedeki değişiklikler üzerinde anında değişiklik yapılmasını sağlar. Bu sayede gelecek projelerde de kullanılmak üzere dokümantasyon oluşturulur. Yani, bir montaj şirketi benzer projelere devam etse bile çalışan personeller değişebilir. Bu durumda söz konusu dokümantasyon bilgide süreklilik sağlayacaktır.

Her iki projede de birkaç sorunla karşılaşıldı. Bazı sorunlar aylık dilimleri kapsayan zaman kayıplarına neden oldu. Bir projenin planlandığı gibi ilerlemesini beklemek çok iyimser olur. Sorunlar açıkça analiz edilir, ayrıntılı olarak belgelenir ve projedeki sorunların meydana getirdiği sonuçlar ortaya çıkartıldığı takdirde, sadece olan projeye değil, bu gelecekteki projelere hizmet edecektir.

Bu sonuçların ışığında, bir montaj şirketi, belirtilen değerleri kullanarak bir soğuk haddeleme tesisinde karmaşık, daha verimli bir proje yürütebilir. Bu çalışmada belirtilen en iyi uygulamaları kullanmak planlama sürecine harcanan zamanı azaltacaktır. Çelik sektörünün artan talebi göz önüne alındığında da, söz konusu çalışma montaj şirketlerine hizmet edecektir.

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] DİSK Birleşik Metal İşçileri Sendikası, "**Demir Çelik Sektörü Raporu**" İstanbul, Türkiye, 2, (2003).
- [2] Sümer G., "Kreditörler Açısından Demir Çelik Sektör Değerlendirmesi" *İşletme Araştırmaları Dergisi*, 10(3): 426-451, (2018).

- [3] Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği, “*Türkiye Demir ve Demir Dışı Metaller Meclisi Raporu*”, Ankara, Türkiye, 2017/300, (2016).
- [4] Kalkınma Bakanlığı, “*Demir - Çelik Çalışma Grubu Raporu*”, Ankara, Türkiye, (2014).
- [5] Project Management Institute, “*A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK guide)*”. 2000th ed. Pennsylvania, USA, Project Management Institute, (2001).
- [6] DALYAN İ., “*Türk İnşaat Sektöründe Proje Yönetimi ve Bilgisayar Destekli Planlama ile Verimlilik Analizi*”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, (2010).
- [7] Dood J. and Langford D., “Construction management on one large project in London: A case study”, *Construction Management and Economics*, 8(4): 385-398, (1990).
- [8] Kumar A. and Ashok K., “Time / Cost Overrun in Construction of a Steel Plant in Asia: A Case Study” *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering* (IOSR-JMCE), 12(5):24-33, (2015).
- [9] Ping C, Qiang M. and Ning Wan J., “Project Management in the Chinese Construction Industry: Six-Case Study,” *Journal of Construction Engineering and Management*, 135(10):1016-1026, (2009).
- [10] Potts K., “Managing mega construction projects - learning from two case studies: London Underground’s Jubilee Line Extension and BAA’s Heathrow Terminal 5” *CIB World Building Congress 2007*, Cape Town, South Africa, 14-17 May, (2007).
- [11] Nascimento D, Sotelino E, Pires Santoloni Lara T, Caiado R. and Ivson P., “Constructability in Industrial Plant Construction: A BIM-Lean Approach Using the Digital Obeya Room Framework” *Journal of Civil Engineering and Management*, 23(8): 1100-1108, (2017).
- [12] Jacoby H.S., “Chemical Plant Construction” *Industrial & Engineering Chemistry*, 27( 9): 999-1004, (1935).
- [13] Edwards D.J. and Holt G.D., “Construction plant and equipment management research: thematic review” *Journal of Engineering Design and Technology*, 7(2): 186-206, (2009).
- [14] Gavas M., Yaşar M., Aydın M. and Altunpak Y., “*Üretim Yöntemleri ve İmalat Teknolojileri*”, Üçüncü baskı. Ankara Türkiye, Seçkin Yayıncılık, (2013).
- [15] Schey J.A., “*Introduction to Manufacturing Process*”, 2nd ed. New York, USA, McGraw-Hill, (1987).
- [16] Kapakjian S. and Schmid S.R., “*Manufacturing Engineering and Technology*”, 6th ed. 316-334, PEARSON, (2009).
- [17] SMS group GmbH Processing Lines and Furnace Technology, “*Strip Processing Lines*,” <https://www.sms-group.com/sms-group/downloads/> Erişim (14.01.2019)
- [18] Hassel A.W, Bruder K., Denoose V., Hennion A., Vanden Eynde X., Fiorucci M., Oberhoffer H., Baulig H., Gerdenitsch J. and Wolpers M. "New approaches in electrolytic cleaning of cold rolled steel sheet" Luxembourg, *European Union, Final Report*, (2011).
- [19] RAD-CON, "What is Bell Annealing?," [http://www.rad-con.com/strip\\_processors/HAS.html](http://www.rad-con.com/strip_processors/HAS.html) Erişim (14.01.2019)
- [20] Mishra N., “*Presentation on Electrical and automation system of Cold Roll Mill Plant of JSW*” [https://www.slideshare.net/neerajmishra56/presentation-on-electrical-and-automation-system-of-cgl-plant-crm2-jsw-kr?qid=21684b2e-7da1-4eee-ba75-6b57f393f407&v=&b=&from\\_search=1](https://www.slideshare.net/neerajmishra56/presentation-on-electrical-and-automation-system-of-cgl-plant-crm2-jsw-kr?qid=21684b2e-7da1-4eee-ba75-6b57f393f407&v=&b=&from_search=1) Erişim (14.01.2019)
- [21] Parate S,P., “*Study of Various Processes in CCL Plant at JSW Steel Coated Products Ltd.*”, MSc Thesis, Mumbai University Dr. V.N. Bedekar Institute of Management Studies, Thane, India, (2015-2017).
- [22] Harvard Business School Publishing Corporation., “*Harvard Business Review Dergisinden Seçmeler: Proje Yönetimi.*”, Harvard Business School Press, İstanbul Türkiye, MESS Yayınları, ( 2005).
- [23] Karadeniz Ö,C., “*PERT-CPM ile Proje Planlama, Değerlendirme ve Bir İşletme Uygulaması*”, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Ekonometri Anabilim Dalı, Yöneylem Araştırması Bilim Dalı, İstanbul, Türkiye, (2007).
- [24] Coşkun O., “*Proje Yönetim Teknikleri ve Uygulamalı İncelenmesi*”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği, İstanbul, Türkiye, (2012).
- [25] Kerzner H., “*Project Management: A System Approach to Planning, Scheduling and Controlling*”, 9th ed. Newyork, USA, John Wiley & Sons Inc, (2006).
- [26] Greene J. and Stellman A., “*Head First PMP*”, 3rd ed. İstanbul, Türkiye, Yakın Plan Yayınları, (2014).
- [27] Albayrak B., “*Proje Yönetimi ve Analizi*”, Birinci baskı, Ankara, Türkiye, Nobel Yayın Dağıtım Tic. Ltd. Şti. (2009).
- [28] Martino R.L., “*Proje İdaresi ve kontrolü: Kritik Yolun Bulunması*”. Birinci baskı. Ankara, Türkiye, Bayındırlık Bakanlığı, (1967).
- [29] Uğur L.O. and Baykan U.N., “Türk İnşaat Firmalarının Proje Planlama Uygulamaları Konusunda Bir Alan Çalışması” *New World Sciences Academy*. 3(3): 418-423, (2008).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Modeling of bio-oil production by pyrolysis of woody biomass: artificial neural network approach

*Odunsu biyokütlenin pirolizi ile biyoyağ üretiminin modellenmesi: yapay sinir ağı yaklaşımı*

*Yazarlar (Authors): Günay ÖZBAY<sup>1</sup>, Erkan Sami KOKTEN<sup>2</sup>*

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-7951-8421

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0003-3428-4534

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Özbay G and Kokten E. S., "Modeling of bio-oil production by pyrolysis of woody biomass: artificial neural network approach", *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1255-1264, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.659136

# Modeling of Bio-Oil Production by Pyrolysis of Woody Biomass: Artificial Neural Network Approach

## Highlights

- ❖ This paper is dedicated to developing an ANN model in order to model the pyrolysis liquid product
- ❖ Artificial neural networks (ANNs) have been widely used in the field of process simulation as a result of its ability to solve complex and multivariable problems.
- ❖ Pyrolysis is a thermal decomposition process converting biomass into char (solid), bio-oil (liquid), and gas products

## Graphical Abstract

This study is dedicated to developing a reliable artificial neural network (ANN) model to model the pyrolysis liquid product (bio-oil).



Figure. Comparison of the experimental data with the predicted results

## Aim

In this study, it is aimed to model the pyrolysis liquid product using the ANN method. Due to the different characteristics of different biomass types and pyrolysis methods, only slow and intermediate pyrolysis data from woody biomass were considered in order to attain more homogeneous features

## Design & Methodology

ANN model development procedures, materials, and bio-oil production conditions are described in Section 3. Developed ANN model.

## Originality

Artificial neural networks (ANNs) have been widely used in the field of process simulation as a result of its ability to solve complex and multivariable problems. By using the ANN method, it is possible to optimize the input parameters in order to increase the production of bio-oil.

## Findings

The relative impact results revealed that the most important parameter that affects the bio-oil yield was catalyst type (11.4%).

## Conclusion

It can be concluded that it is possible to reduce the number of the required pyrolysis experiments by the developed ANN model.

## Declaration of Ethical Standards

The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Modeling of Bio-Oil Production by Pyrolysis of Woody Biomass: Artificial Neural Network Approach

*Research Article / Araştırma Makalesi*

Günay ÖZBAY<sup>1\*</sup>, Erkan Sami KOKTEN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Aksaray University, Aksaray, Turkey

<sup>2</sup>Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Karabük University, Karabük, Turkey

(Geliş/Received : 13.12.2019 ; Kabul/Accepted : 23.12.2019)

## ABSTRACT

This study is dedicated to developing a reliable artificial neural network (ANN) model to model the pyrolysis liquid product (bio-oil). Some related parameters with the bio-oil yield such as the pyrolysis temperature, duration, catalyst type, catalyst ratio, particle size, proximate, and ultimate analysis of the biomass were tested. Due to the different characteristics of different biomass types and pyrolysis methods, only slow and intermediate pyrolysis data from woody biomass were used in modeling. The correlation coefficients (R) were 0.992, 0.933, and 0.951 for training, validation, and testing, respectively. In order to evaluate the predictability of the ANN model, the predicted results were compared with the experimental results that were not introduced before. The simulated data were in good agreement with the experimental results indicating the reliability of the developed model. The relative impact results revealed that the most important parameter that affects the bio-oil yield was catalyst type (11.4%).

**Keywords:** Artificial neural network, bio-oil, catalyst, modeling, pyrolysis.

## Odunsu Biyokütlenin Piroliz ile Biyoyağ Üretiminin Modellenmesi: Yapay Sinir Ağları Yaklaşımı

### ÖZ

Bu çalışma, piroliz sıvı ürününü (biyoyağ) modellemek için güvenilir bir yapay sinir ağı (YSA) modeli oluşturmak amacıyla yapılmıştır. Bu maksatla piroliz sıcaklığı, piroliz süresi, katalizör türü, katalizör oranı, biyokütle parçacık boyutu ve biyokütle kısmi ve kesin analizi gibi biyoyağ verimliliği ile ilgili parametreler test edilmiştir. Modellemede, farklı biyokütle tiplerinin ve piroliz yöntemlerinin neden olduğu farklı karakteristiklerden dolayı, yalnızca odunsu biyokütleden yavaş ve orta piroliz yöntemleri ile elde edilen sıvı ürün verimlilikleri dikkate alınmıştır. Sonuç olarak, korelasyon derecesini gösteren R değerleri eğitim, doğrulama ve test adımları için sırasıyla 0.992, 0.933 ve 0.951 bulunmuştur. YSA modelinin güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla tahminlenen değerler, daha önce modele tanıtılmamış yeni deneysel veriler ile kıyaslanmıştır. Buna göre, simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlar ile uyum içerisinde bulunduğu ve oluşturulan modelin güvenilir olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, girdi parametrelerinin çıktı üzerine etkileri incelendiğinde, biyoyağ verimliliğini etkileyen en önemli parametrenin katalizör türü (%11.4) olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Yapay sinir ağları, biyoyağ, katalizör, modelleme, piroliz.

### 1. INTRODUCTION

Every year, large quantities of wood waste are generated by wood-products industries. Recently, the conversion of biomass residues to value-added products has received considerable interest [1-3]. Pyrolysis is a thermal decomposition process converting biomass into char (solid), bio-oil (liquid), and gas products [4, 5]. The bio-oil produced from biomass pyrolysis can be used to produce fuels and chemical products [6-8]. The yield of bio-oil is affected by various factors, including pyrolysis conditions, properties of biomass, the addition of catalyst and pyrolysis method [9, 10]. The pyrolysis of biomass is a very complex process due to the multivariable factors that affect the yield of bio-oil. It is essential to simulate the pyrolysis process considering the high cost of large-scale experimental tests and time consuming of these

experiments. Artificial neural networks (ANNs) have been widely used in the field of process simulation as a result of its ability to solve complex and multivariable problems. By using the ANN method, it is possible to optimize the input parameters in order to increase the production of bio-oil which have the potential to produce fuels and chemicals.

This paper is dedicated to developing an ANN model in order to model the pyrolysis liquid product. The rest of this paper is organized as follows: A literature review and contribution to literature in the field is given in Section 2. Biomass and pyrolysis data selection from previous studies of literature, ANN model development procedures, materials, and bio-oil production conditions are described in Section 3. Developed ANN model, the relative impact of each input parameter, and accuracy testing of ANN with new pyrolysis runs are discussed in Section 4. Finally, the conclusions are shown in Section 5.

\* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : gunayozbay@aksaray.edu.tr



**2. LITERATURE REVIEW**

In this section, the studies on modeling of processes such as pyrolysis and gasification were reviewed in the recent literature. The main objectives of these type of researches vary in increasing or estimating the product (liquid, gas, and char) yields, determine the effects of input parameters, prediction of outputs such as heating value, hydrogen-rich gas, kinetic parameters, and thermal behaviors. In the literature, there are studies on process modeling using the ANN [11-13], support vector machine (SVM) [14, 15], response surface methodology (RSM) [16-18], and regression analysis [19] methods.

Recently, the ANN has received attention in the modeling of production methods mentioned above. In this way, it is possible to reduce the number of required experiments. The ANN method is also widely used to solve non-linear and complex problems [20, 21]. Puig-Arnavat and co-workers [22] used the ANN for modeling the biomass gasification process. They found that the

proposed ANN presented good performance to predict the process parameters.

In literature summary, we reviewed studies on modeling of different outputs (liquid, gas, and char yields, hydrogen-rich gas, heating value etc.) obtained from various feedstocks (wood and animal waste, agricultural residues, scrap tyres, plastic etc.). Table 1a and Table 1b present the literature contributions in this field. The use of wood waste [15, 23-26] and agricultural residues [16, 17, 27, 28] as feedstock are common in the literature due to its low market value and availability [29, 30].

The related variables with output can be used to reach more accurate results. Merdun and Sezgin [24] reported that the models in more homogeneous characteristics (single or a few biomass types) and more related inputs with output may result in better performances. Aydinli et al. [27] specified that in order to attain the more reliable models, the variables such as particle size and residence time as well as the ultimate analysis data can be

**Table 1a.** Literature summary: Characteristics of the studies on modeling of products from feedstock

Literature <sup>a</sup>	Feedstock (Data)				Process			Considered output			
	Wood waste	Agricultural residues	Animal waste	Other	Slow and intermediate pyrolysis	Fast pyrolysis	Other	Liquid	Gas	Char	Other
[16]		√			...	...		√			
[17]		√			...	...		√		√	
[27]		√			...	...		√	√	√	
[14]			√		√					√	
[15]	√	√				√		√	√	√	√ <sup>b</sup>
[30]	√	√					√ <sup>c</sup>		√ <sup>d</sup>		
[11]	√	√	√				√ <sup>e</sup>		√ <sup>f</sup>		
[28]		√				√					√ <sup>g</sup>
[23]	√	√			...	...		√			
[12]		√					√ <sup>h</sup>	√	√	√	
[24]	√	√			√	√		√	√	√	
[19]		√					√ <sup>i</sup>				√ <sup>b</sup>
[18]	√			√ <sup>j</sup>	...	...		√			
[22]	√						√ <sup>c</sup>		√ <sup>d</sup>		
[25]	√				...	...			√ <sup>k</sup>		
[13]	√	√	√	√ <sup>l</sup>	...	√					√ <sup>m</sup>
[26]	√	√			√					√	
[20]				√ <sup>n</sup>	...	...					√ <sup>o</sup>
This study	√				√			√			

a: The symbol “√” refers to a defined characteristic. Triple dot “...” means the pyrolysis method is unspecified  
 b: Heating value  
 c: Gasification  
 d: Gas composition  
 e: Digestion  
 f: Specific biogas production  
 g: Hydrogen-rich gas

h: Flash pyrolysis  
 i: Proximate & ultimate analysis  
 j: Scrap tyres & recycled plastic  
 k: Gas products  
 l: Pure & mixed pure components  
 m: Kinetic parameters  
 n: Refuse-derived fuel  
 o: Temperature dependent weight loss

considered as input parameters. The yields and

**Table 1b.** Literature summary: Modeling approaches of the studies

Literature <sup>a</sup>	Method				Inputs/Parameters													
	ANN	RSM	SVM	Other	Moisture	Ash content	Volatiles	Fixed carbon	Main components <sup>b</sup>	Elemental composition	Particle size	Catalyst type	Catalyst ratio	Heating rate	Temperature	Duration	Equivalence ratio	Other
[16]		√									√			√	√			√ <sup>c</sup>
[17]	√	√												√	√			
[27]	√				√	√	√	√	√						√			
[14]	√		√		√									√	√	√		√ <sup>d</sup>
[15]	√		√		√	√				√	√			√				√ <sup>e</sup>
[30]	√				√	√				√				√			√	
[11]	√													√	√			√ <sup>f</sup>
[28]	√											√	√	√				√ <sup>g</sup>
[23]				√ <sup>h</sup>	√	√	√	√		√								√ <sup>i</sup>
[12]	√										√			√				√ <sup>c</sup>
[24]	√				√	√	√ <sup>j</sup>	√		√				√	√			√ <sup>i</sup>
[19]				√ <sup>k</sup>	√	√	√			√								
[18]		√												√	√			√ <sup>l</sup>
[22]	√				√	√				√				√			√	√ <sup>m</sup>
[25]	√										√			√				√ <sup>n</sup>
[13]	√								√									
[26]				√ <sup>o</sup>	√				√									√ <sup>p</sup>
[20]	√													√	√			
This study	√				√	√	√	√		√	√	√	√	√	√	√		

a: The symbol “√” refers to a defined characteristic

b: Main components include cellulose, hemicellulose and lignin

c: Sweep gas flow rate

d: Sample mass

e: Fluidization number

f: Feedstock composition

g: Feedstock type

h: An approach to predict pyrolysis output based on the feedstock element characteristic

i: Heating value

j: Volatile organic carbon

k: Multiple regression analysis

l: Initial pressure

m: Steam to dry biomass ratio

n: Space velocity

o: A prediction model based on inputs

p: Extractives

composition of the products depend on the pyrolysis conditions, properties of biomass, and pyrolysis method. The parameters that affect the pyrolysis products are particle size, heating rate, pyrolysis temperature, holding time (duration), feedstock type, and the addition of catalyst [31-33]. The various types of catalysts are used in pyrolysis process to improve the quality of the pyrolysis liquid product [34-37]. Zhao and Li [38] examined the impact of catalyst (NaCl) additives on pyrolysis bio-oil. They reported that the quality of bio-oil was enhanced with the addition of the catalyst, because of its higher heating value and lower acidity.

There is still a need for research on process modeling using catalysts as an input parameter. In this study, it is aimed to model the pyrolysis liquid product using the ANN method. Due to the different characteristics of different biomass types and pyrolysis methods, only slow and intermediate pyrolysis data from woody biomass were considered in order to attain more homogeneous features. The pyrolysis temperature, duration, catalyst type, catalyst ratio, particle size, proximate and ultimate analysis of the biomass were used as the ANN model inputs, whilst the bio-oil yield was obtained as the output.

### 3. MATERIAL AND METHOD

Within the activity field of the present study, two related parts are included. In the first part, an ANN model was developed in order to predict the bio-oil yield. In this way, pyrolysis temperature, duration, catalyst type, catalyst ratio, particle size, proximate, and ultimate analysis of the biomass were considered as the model inputs, whilst the bio-oil yield was obtained as the output. In the second part, pyrolysis experiments that were not introduced before were carried out to create new data. Afterward, experimental results were compared with predicted values.

#### 3.1. Biomass and Pyrolysis Data Selection

In the current study, the data that were utilized to create the ANN models were selected from previous studies of literature on biomass pyrolysis. Table A1 (see appendix) summarizes the biomass type, particle size, catalyst type, catalyst ratio, temperature, and duration of the selected data. The data were all selected from slow and intermediate pyrolysis of woody biomass in order to attain the more homogeneous features.

The biomass characteristics that were used to develop the ANN models in the present study were moisture content, ash content, volatiles, fixed carbon, carbon content, oxygen content, hydrogen content, and particle size. The operating conditions of the pyrolysis runs included the temperature, duration, catalyst type, and catalyst ratio.

#### 3.2. ANN Development

Due to its ability to model complex linear and nonlinear input-output correlations, ANN method was used to predict the pyrolysis bio-oil yield [39]. As shown in Figure 1, the ANN architecture proposed in the current study is composed of one input layer, one hidden layer, and one output layer. Twelve input neurons represent twelve inputs including moisture content, ash content, volatiles, fixed carbon, carbon content, oxygen content, hydrogen content, particle size, catalyst type, catalyst ratio, temperature, and duration in the input layer of the network. One output neuron in the output layer reflects the bio-oil yield which is the dependent parameter of the model. The number of hidden neurons and transfer functions were determined by trying 4-20 neurons and tan-sigmoidal (*tansig*), log-sigmoidal (*logsig*) and linear (*purelin*) transfer functions in order to attain the best neural network model.

The feedforward backpropagation neural network which tries to minimize the error between the experimental and predicted values was applied in the current ANN modeling. In the neural network model Levenberg-Marquardt (*trainlm*) algorithm was used as learning algorithm. The ANN model was developed using the editor in MATLAB® R2018b software. All the data were separated using *dividerand* function for training, validation, and testing as 70% (total of 119), 15% (total of 25), and 15% (total of 25), respectively. The data collected from the literature were used for training,

validation, and testing procedures. Another test was applied to check the accuracy of the developed model with data obtained from pyrolysis experiments. All the data (input and output) were normalized in the range of [0.1, 0.9] before the ANN model development. The normalized values were calculated according to Eq. (1);

$$v_n = 0.8 \times \left[ \frac{v - v_{\min}}{v_{\max} - v_{\min}} \right] + 0.1 \tag{1}$$

where  $v_n$  is the normalized value,  $v$  is the original value,  $v_{\max}$  and  $v_{\min}$  are the maximum and minimum values of  $v$ , respectively.

The errors of the ANN layers during the training, testing, and validation periods is expressed as mean squared error Eq. (2) and mean absolute percentage error Eq. (3);

$$MSE = \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \beta_i)^2 \right] \tag{2}$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\alpha_i - \beta_i|}{\alpha_i} \times 100 \tag{3}$$

where  $MSE$  is the mean squared error,  $MAPE$  is the mean absolute percentage error,  $\alpha_i$  is the experimental values, and  $\beta_i$  is the predicted values.

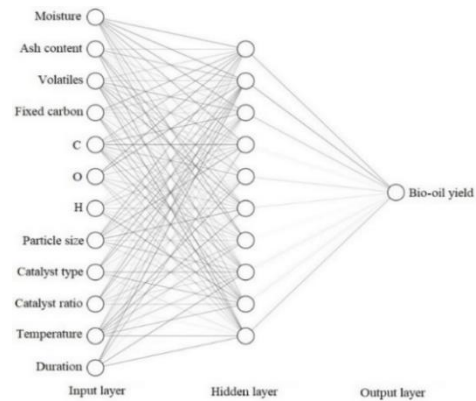


Figure 1. The developed ANN model to predict the pyrolysis bio-oil yield

#### 3.3. Relative Impact of Each Input Parameter

The ANN weight matrix and Garson’s equation were used in order to calculate the relative impact of the inputs on bio-oil yield [40]. The mentioned equation is shown in Eq. (4);

$$I_i = \frac{\sum_{j=1}^n \left( \frac{|W_{j,i}|}{\sum_{i=1}^n |W_{j,i}|} \right) \times |LW_{1,j}|}{\sum_{i=1}^{12} \left( \sum_{j=1}^n \left( \frac{|W_{j,i}|}{\sum_{i=1}^n |W_{j,i}|} \right) \times |LW_{1,j}| \right)} \tag{4}$$

where  $I_i$  is the relative impact of the  $i^{\text{th}}$  input on the output,  $n$  is the number of hidden neurons,  $W_{j,i}$  is the weight of inputs to hidden layers, and the  $LW_{1,j}$  is the weight of hidden neurons to the output layer.

### 3.4. Experimental Materials and Pyrolysis Process

In the present paper, scots pine (*Pinus sylvestris* L.) sawdust supplied from a commercial wood products company in Karabuk-Turkey was selected as a biomass feedstock. Biomass, having an average 1.22 mm particle size was air dried prior to pyrolysis process. Proximate and ultimate analysis of the biomass are shown in Table 2. The sodium hydroxide (NaOH) and potassium hydroxide (KOH) catalysts were selected in order to apply in catalytic pyrolysis experiments. The slow pyrolysis runs were carried out in a vacuum pyrolysis reactor, which had a stainless-steel cylinder. In an uncatalyzed pyrolysis experiment, the reactor was charged with the 2000 g of biomass. For NaOH and KOH catalytic runs, the reactor was charged with the 2000 g of biomass sample and 200 g (10 wt%) of catalyst. Then, the pyrolysis reactor was externally heated up to the final temperature of 500 °C. After the determined temperature was obtained, the system was maintained at this temperature for 60 min. The same procedure was applied in catalytic pyrolysis experiments. Finally, the pyrolysis reactor was cooled down to the room temperature. The bio-oil yield obtained from each pyrolysis run were determined based on Eq. (5);

$$bio\text{-oil\_yield}(\%) = \frac{bio\text{-oil\_obtained}(g)}{biomass\_feedstock(g)} \times 100 \quad (5)$$

## 4. RESULTS AND DISCUSSION

### 4.1. Artificial Neural Network Modeling

In the present study, the optimal number of hidden neurons and the transfer function were obtained by trying to minimize the MSE. As shown in Figure 2, the minimum MSE is 0.00058 with ten hidden neurons and *logsig* transfer function at the hidden layer.

The parameters of the developed ANN are shown in Table 3. The feedforward backpropagation neural network composed of one input layer, one hidden layer, and one output layer was applied in the ANN modeling.

the hidden layer and a *purelin* transfer function at the output layer was considered as learning algorithm. The number of neurons in the input, hidden, and output layers were 12, 10 and 1, respectively. The performance and the data division functions determined as MSE and *dividerand*. The data were divided as 70%, 15%, and 15% for training, testing, and validation procedures, respectively.

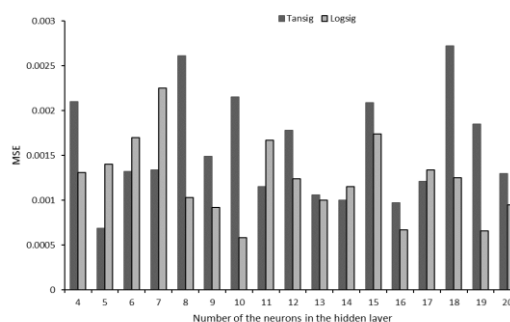


Figure 2. Plots of the MSE of ANN models for each transfer function in the hidden layer

The correlation coefficient (R), MSE, and MAPE were selected to evaluate network accuracy. The calculated performance evaluation parameters for training, validation, and testing are shown in Table 4. The R values that indicate the correlation degree are 0.992, 0.933, and 0.951 for training, validation, and testing, respectively. The R values close to one represent a strong relationship between the predicted and the intended outputs [44]. The MAPE values were also found to be 2.39%, 5.35%, and 3.70% for training, validation, and testing steps, respectively. The regression between the predicted results and the targets for training, validation, and testing procedures are presented in Figure 3. Figure 4 represents the experimental and predicted values of bio-oil yield. The evaluation parameters showed that the developed ANN model is satisfactory in order to predict the bio-oil yield, considering the inputs including pyrolysis temperature, duration, catalyst type, catalyst ratio, particle size, proximate, and ultimate analysis of the biomass. This result is supported by earlier work. Chen et al. [15] specified that the artificial intelligence models can accurately predict the bio-oil yield, considering the parameters including particle size, temperature, proximate, and ultimate analysis of the biomass.

Table 2. Chemical characteristics of biomass feedstock

Characteristics	Method	Value (wt%)
Proximate analysis (as received basis)		
Moisture	ASTM D 4442-92 [41]	8.44
Volatiles	ASTM E 897-88 [42]	78.16
Ash	ASTM D 1102-84 [43]	0.44
Fixed carbon	Calculated by difference	12.96
Ultimate analysis (as received basis)		
C		46.12
O	Calculated by difference	47.8
H		6.08

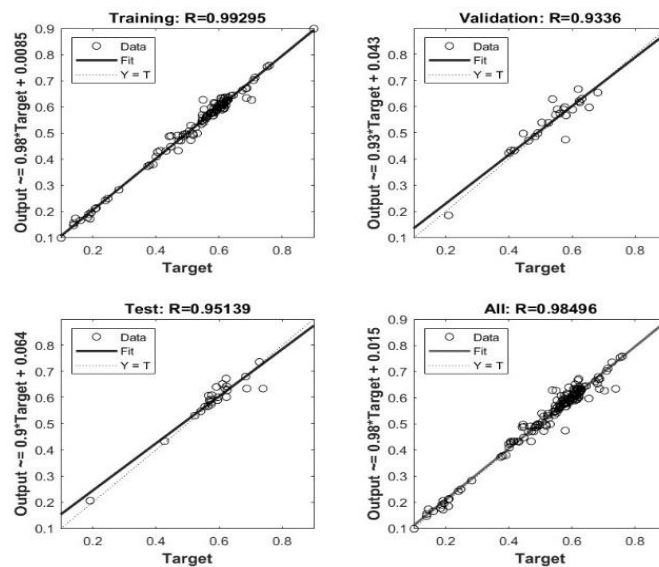
The *trainlm* algorithm with a *logsig* transfer function at

**Table 3.** The parameters of the ANN model used for the simulation of bio-oil yield

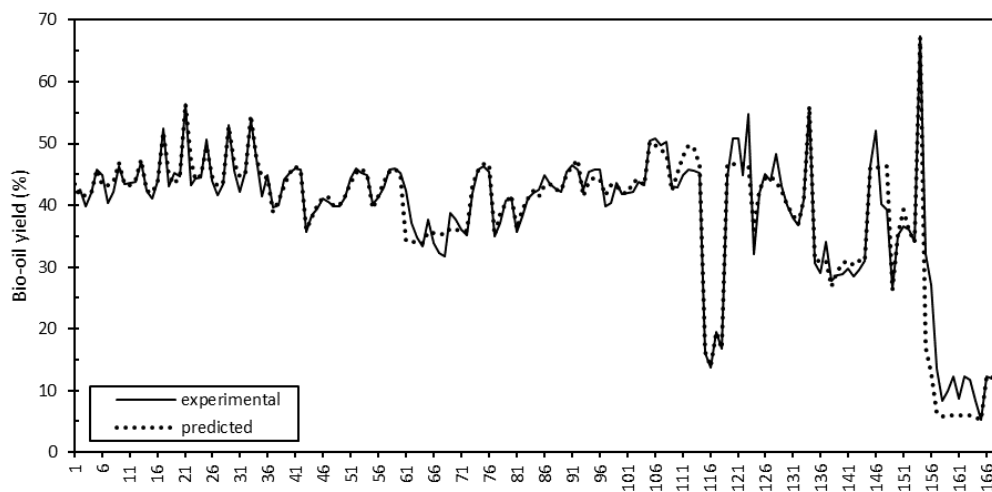
Network	Feedforward backpropagation
Number of input layer neurons	12
Number of hidden layers	1
Number of hidden layer neurons	10
Number of output layer neurons	1
Learning algorithm	<i>trainlm</i>
Hidden layer transfer function	<i>logsig</i>
Output layer transfer function	<i>purelin</i>
Performance function	MSE
Learning cycle	1000 Epochs
Validation checks	15
Data division function	<i>dividerand</i>
Data division	70:15:15

**Table 4.** Performance values of the developed ANN model

ANN	R	MSE	MAPE (%)
Training	0.992	0.0003	2.39
Validation	0.933	0.0013	5.35
Testing	0.951	0.0010	3.70



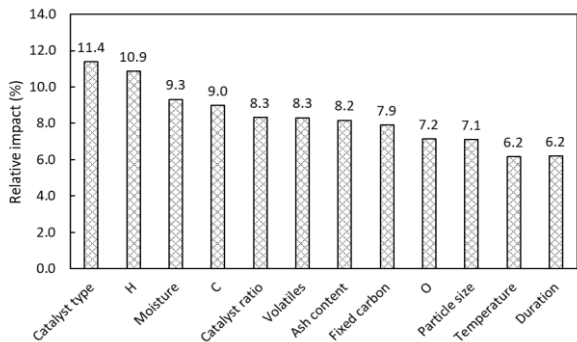
**Figure 3.** Comparison of the experimental data with the predicted results



**Figure 4.** Plots of experimental data and ANN predicted data

**4.2. Relative Impact**

The relative impact of the twelve input parameters determined using Eq. (3) is presented in Figure 5. All the selected parameters have a significant effect on pyrolysis bio-oil yield. The most important parameter that affects the bio-oil yield was found to be catalyst type (11.4%). The effect of the catalysts on bio-oil yield is attributed to decomposition reactions accelerating with the chemical additives [35, 45]. The next parameters that affect the bio-oil yield were the biomass characteristics (C, H, O, moisture, volatiles, ash content, fixed carbon) and the catalyst ratio (7.2%-10.9%). The impact of particle size, temperature, and duration were 7.1%, 6.2%, and 6.2%, respectively. The effect of particle size is generally attributed to uniformly heating of smaller particles [46]. The temperature and duration impacts are mainly the results of the decomposition of biomass bonds at the higher temperatures and the gasification/thermal cracking of the products in longer reaction time, respectively [32, 47, 48].



**Figure 5.** Relative impact (%) of each input parameters on bio-oil yield

**4.3. Testing the Accuracy of the Developed ANN Model**

To check the accuracy of the developed model, the final testing procedure is important. The results obtained from the pyrolysis runs were used for testing the ANN predictability. The bio-oil production conditions for temperature, duration, and biomass particle size were 500 °C, 60 min, and ~1.22 mm, respectively. Two different catalysts, NaOH and KOH, were also tested to evaluate the effects of catalysts on bio-oil yield. The pyrolysis experiments were performed in defined conditions to

create new data. Afterward, the new experimental results were compared with the predicted results (Table 5).

The result showed that the developed model is able to accurately predict the pyrolysis bio-oil yield. The ANN model predicted the bio-oil yield of 50.47% in pyrolysis conditions of temperature 500 °C, duration 60 min, uncatalyzed, particle size 1.22 mm, and biomass type of scots pine. During the experimental run, the bio-oil yield of 52.19% was obtained in the same pyrolysis conditions.

The bio-oil yields of 47.46% (NaOH) and 43.55% (KOH) were predicted in conditions of temperature 500 °C, duration 60 min, catalysts NaOH and KOH, catalyst ratio 10 wt%, particle size 1.22 mm, and biomass type of scots pine. During pyrolysis experiments, the bio-oil yields of 46.42% (NaOH) and 45.17% (KOH) were acquired in the same conditions. The simulated data are in good agreement with the experimental results (given in Table 5) indicating the reliability of the developed model in the prediction of the pyrolysis oil yield.

As shown in Table 5, catalysts led to a decrease in bio-oil yield. This result is supported by earlier works. Özbay [35] reported that the use of KOH as a catalyst caused a decrease in the liquid yield. Guedes et al. [32] stated that in spite of the lower oil yield, catalytic pyrolysis improves the quality of the final product.

**5. CONCLUSIONS**

This study is devoted to developing a reliable model which can be used for pyrolysis liquid product prediction. In this way, an ANN model was developed to predict the yield of bio-oil. The network architecture with ten hidden neurons and *logsig* transfer function at the hidden layer acquired the minimum MSE of 0.00058 and the highest R-value of 0.9849. The reliability of the model was tested with unseen data obtained from pyrolysis experiments. The results revealed that the prediction performance of the developed model for this unseen dataset was satisfactory. According to the relative impact results, the most important parameter that affects the bio-oil yield were catalyst type. The next parameters that affect the bio-oil yield were the biomass characteristics, catalyst ratio, particle size, temperature, and duration, respectively. It can be concluded that it is possible to reduce the number of the required pyrolysis experiments by the developed ANN model. And, the yield of bio-oil

**Table 5.** Experimental (unseen) and predicted results at different operating parameters (Moisture: 8.44%; ash content: 0.44%; volatiles: 78.16%; fixed carbon: 12.96%; C: 46.12%; O: 47.8%; H: 6.08%)

Method	Biomass Feedstock	Temperature (°C)	Duration (min)	Catalyst type	Catalyst ratio (wt%)	Particle size (mm)	Bio-oil yield (%)
ANN	Scots pine	500	60	None	-	1.22	50.47
Experimental	Scots pine	500	60	None	-	1.22	52.19
ANN	Scots pine	500	60	NaOH	10	1.22	47.46
Experimental	Scots pine	500	60	NaOH	10	1.22	46.42
ANN	Scots pine	500	60	KOH	10	1.22	43.55
Experimental	Scots pine	500	60	KOH	10	1.22	45.17



from the pyrolysis process can be predicted with minor deviation by a well-trained ANN model.

## ACKNOWLEDGEMENT

The support from TUBITAK (The Scientific and Technological Research Council of Turkey) [Project grant number: 1150453] for this research are gratefully acknowledged. This study was made as a part of the Ph.D. thesis by Erkan Sami KÖKTEN in the Institute of Graduate Programs, Karabük University, [Adviser: Assoc. Prof. Dr. Günay ÖZBAY].

## APPENDIX A

Table A1

**Table A1.** The literature of the collected data about slow and intermediate pyrolysis of woody biomass

Biomass	Biomass particle size (mm)	Catalyst type	Catalyst ratio (wt%)	Temperature	Duration (min)	Reference
Masson pine ( <i>Pinus massonia</i> L.)	0.149-0.841	Uncatalyzed	-	773 (K)	-	[64]
MCPB <sup>a</sup> , Scots pine ( <i>Pinus sylvestris</i> L.) and Oriental beech ( <i>Fagus orientalis</i> L.)	0.85-1.6	Uncatalyzed FeCl <sub>3</sub> Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	10	400-600 (°C)	60	[65]
Eucalyptus	0.85	Uncatalyzed	-	300-800 (°C)	30	[49]
Oil palm (Trunk)	1-2	Uncatalyzed	-	500 (°C)	60	[50]
Umbrella tree ( <i>Maesopsis eminii</i> L.)	<1	Uncatalyzed	-	500 (°C)	60	[51]
MCPB <sup>a</sup>	~1	Uncatalyzed AlCl <sub>3</sub> TiCl <sub>4</sub> FeCl <sub>3</sub> NaOH KOH Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	10	400-700 (°C)	60	[3]
Chinese fir	200-40 (meshes)	Uncatalyzed	-	500 (°C)	30	[52]
Moso bamboo ( <i>Phyllostachys edulis</i> L.)	0.25-0.38	Uncatalyzed	-	300-700 (°C)	10	[53]
Eucalyptus	<2	Uncatalyzed	-	350 (°C)	70	[54]
Giant leucaena	0.075-0.150	Uncatalyzed NiMo/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10-30	325-400 (°C)	0-60	[55]
Untreated and heat-treated ash wood ( <i>Fraxinus excelsior</i> L.)	<1	Uncatalyzed	-	350-600 (°C)	30	[56]
Fir wood ( <i>Abies bornmülleriana</i> Mattf.)	<1	Uncatalyzed	-	350-600 (°C)	30	[57]
Turkish pine ( <i>Pinus brutia</i> Ten.)	<1	Uncatalyzed KOH ZnCl <sub>2</sub> ZnO	5 10 15 20	350-600 (°C)	30	[35]
Pine wood (pellet)	15-45	Uncatalyzed	-	350-550 (°C)	15	[58]
Rubberwood and Malaysian wood pellets	~15 (Rubberwood) ~40 (Malaysianwood)	Uncatalyzed	-	500-800(°C)	20	[59]
Hornbeam ( <i>Carpinus betulus</i> L.)	<1	Uncatalyzed	-	400-600 (°C)	30	[60]
Eucalyptus	<10	Uncatalyzed	-	750 (°C)	30	[61]
Paulownia wood ( <i>P. tomentose</i> L.)	0.224-1.8	Uncatalyzed	-	623-873 (K)	30	[62]
White pine	~5.5	Uncatalyzed	-	520 (°C)	30	[63]

## Conflict of Interest

The authors declare that they have no conflict interest.

## DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS

The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

## REFERENCES

- [1] Boateng A. A., Mullen C. A., Goldberg N. M., Hicks K. B., Devine T. E., Lima I. M., and McMurtrey A. J. E., "Sustainable production of bioenergy and bio-char from the straw of high-biomass soybean lines via fast pyrolysis", *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 29(2): 175-183, (2010).
- [2] Branca C., Galgano A., Blasi C., Esposito M., and Di Blasi C., "H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-catalyzed pyrolysis of corncobs", *Energy & Fuels*, 25(1): 359-369, (2011).

- [3] Özbay G., Özçifçi A., and Karagöz S., "Catalytic pyrolysis of waste melamine coated chipboard", *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 32(1): 156-161, (2013).

- [4] Murata K., Liu, Y., Inaba M., and Takahara I., "Catalytic fast pyrolysis of jatropha wastes", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 94: 75-82, (2012).
- [5] Özbay G., Özçiğçi A., and Kokten E. S., "The pyrolysis characteristics of wood waste containing different types of varnishes", *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 40(5): 705-714, (2016).
- [6] Bennett N. M., Helle S. S., and Duff S. J., "Extraction and hydrolysis of levoglucosan from pyrolysis oil", *Bioresource technology*, 100(23): 6059-6063, (2009).
- [7] Bridgwater A. V., "Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading", *Biomass and bioenergy*, 38: 68-94, (2012).
- [8] Ikura M., Stanculescu M., and Hogan E., "Emulsification of pyrolysis derived bio-oil in diesel fuel", *Biomass and bioenergy*, 24(3): 221-232, (2003).
- [9] Kan T., Strezov V., and Evans, T. J., "Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57: 1126-1140, (2016).
- [10] Lenz V., and Ortwein A., "Smart Biomass Heat-heat from solid biofuels as an integral part of a future energy system based on renewables", *Chemical Engineering and Technology*, 40(2): 313-322, (2017).
- [11] Ghatak M. D., and Ghatak A., "Artificial neural network model to predict behavior of biogas production curve from mixed lignocellulosic co-substrates", *Fuel*, 232: 178-189, (2018).
- [12] Madhu P., Matheswaran M. M., and Periyannayagi G., "Optimization and characterization of bio-oil produced from cotton shell by flash pyrolysis using artificial neural network", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 39(23): 2173-2180, (2017).
- [13] Sunphorka S., Chalermssinsuwa B., and Piumsomboon, P., "Artificial neural network model for the prediction of kinetic parameters of biomass pyrolysis from its constituents", *Fuel*, 193: 142-158, (2017).
- [14] Cao H., Xin Y., and Yuan Q., "Prediction of biochar yield from cattle manure pyrolysis via least squares support vector machine intelligent approach", *Bioresource technology*, 202: 158-164, (2016).
- [15] Chen X., Zhang H., Song Y., and Xiao R., "Prediction of product distribution and bio-oil heating value of biomass fast pyrolysis", *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 130: 36-42, (2018).
- [16] Abnisa F., Daud W. W., and Sahu J. N., "Optimization and characterization studies on bio-oil production from palm shell by pyrolysis using response surface methodology", *Biomass and Bioenergy*, 35(8): 3604-3616, (2011).
- [17] Angin D., and Egrisogut Tiryaki A., "Application of response surface methodology and artificial neural network on pyrolysis of safflower seed press cake", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38(8): 1055-1061, (2016).
- [18] Pinto F., Paradela F., Gulyurtlu I., and Ramos A. M., "Prediction of liquid yields from the pyrolysis of waste mixtures using response surface methodology", *Fuel processing technology*, 116: 271-283, (2013).
- [19] Phichai K., Pragobpondee, P., Khumpart, T., and Hirunpraditkoon S., "Prediction heating values of lignocellulosics from biomass characteristics", *Int. J. Chem. Mol. Nucl. Mater. Metall. Eng.*, 7: 214-217, (2013).
- [20] Çepelioğullar Ö., Mutlu İ., Yaman S., and Haykiri-Acma H., "A study to predict pyrolytic behaviors of refuse-derived fuel (RDF): artificial neural network application", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 122: 84-94, (2016).
- [21] Mikulandrić R., Lončar D., Böhning D., Böhme R., and Beckmann M., "Artificial neural network modelling approach for a biomass gasification process in fixed bed gasifiers", *Energy conversion and management*, 87: 1210-1223, (2014).
- [22] Puig-Arnavat M., Hernández J. A., Bruno J. C., and Coronas A., "Artificial neural network models for biomass gasification in fluidized bed gasifiers", *Biomass and bioenergy*, 49: 279-289, (2013).
- [23] Lim C. H., Mohammed I. Y., Abakr Y. A., Kazi F. K., Yusup S., and Lam H. L., "Novel input-output prediction approach for biomass pyrolysis", *Journal of cleaner production*, 136: 51-61, (2016).
- [24] Merdun H., Sezgin I. V., "Modeling of pyrolysis product yields by artificial neural networks", *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 8(2): 1178-1188, (2018).
- [25] Sun Y., Liu L., Wang Q., Yang X., and Tu X., "Pyrolysis products from industrial waste biomass based on a neural network model", *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 120: 94-102, (2016).
- [26] Wang H., Wang X., Cui Y., Xue Z., and Ba Y., "Slow pyrolysis polygeneration of bamboo (*Phyllostachys pubescens*): Product yield prediction and biochar formation mechanism", *Bioresource technology*, 263: 444-449, (2018).
- [27] Aydinli B., Caglar A., Pekol S., and Karaci A., "The prediction of potential energy and matter production from biomass pyrolysis with artificial neural network", *Energy Exploration and Exploitation*, 35(6): 698-712, (2017).
- [28] Karaci A., Caglar A., Aydinli B., and Pekol S., "The pyrolysis process verification of hydrogen rich gas (H-rG) production by artificial neural network (ANN)", *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(8): 4570-4578, (2016).
- [29] Perez L. B., and Cortez L. A. B., "Potential for the use of pyrolytic tar from bagasse in industry", *Biomass and Bioenergy*, 12(5): 363-366, (1997).
- [30] George J., Arun P., and Muraleedharan C., "Assessment of producer gas composition in air gasification of biomass using artificial neural network model", *International Journal of Hydrogen Energy*, 43 (20): 9558-9568, (2018).
- [31] Akhtar J., and Amin N. S., "A review on operating parameters for optimum liquid oil yield in biomass pyrolysis", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (7): 5101-5109, (2012).
- [32] Guedes R. E., Luna A. S., and Torres A. R., "Operating parameters for bio-oil production in biomass pyrolysis: A review", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 129: 134-149, (2018).
- [33] Qiang L., Wen-Zhi L., and Xi-Feng Z., "Overview of fuel properties of biomass fast pyrolysis oils", *Energy Conversion and Management*, 50(5): 1376-1383, (2009-a).

- [34] Chen M. Q., Wang J., Zhang M. X., Chen M. G., Zhu X. F., Min F. F., and Tan Z. C., "Catalytic effects of eight inorganic additives on pyrolysis of pine wood sawdust by microwave heating", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 82 (1): 145-150, (2008).
- [35] Özbay G., "Catalytic pyrolysis of pine wood sawdust to produce bio-oil: effect of temperature and catalyst additives", *Journal of Wood Chemistry and technology*, 35(4): 302-313, (2015).
- [36] Goyal H. B., Seal D., and Saxena R. C., "Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: a review", *Renewable and sustainable energy reviews*, 12 (2): 504-517, (2008).
- [37] Qiang L., Wen-Zhi L., Dong Z., and Xi-Feng Z., "Analytical pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry (Py-GC/MS) of sawdust with Al/SBA-15 catalysts", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 84(2): 131-138, (2009-b).
- [38] Zhao N., and Li B. X., "The effect of sodium chloride on the pyrolysis of rice husk", *Applied energy*, 178: 346-352, (2016).
- [39] Öztemel E., "Yapay Sinir Ağları". *Papatya Press*, (in Turkish), İstanbul, (2006).
- [40] Garson G. D. "Interpreting neural-network connection weights", *AI expert*, 6(4): 46-51, (1991).
- [41] ASTM D 4442-92 (ASTM Standarts), "Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Base Materials", (2003).
- [42] ASTM E 897-88 (ASTM Standarts), "Standard test method for volatile matter in analysis sample refuse derived fuel", (2004).
- [43] ASTM D 1102-84 (ASTM Standarts), "Standard test method for ash in wood", (1983).
- [44] Bewick V., Cheek L., and Ball J., "Statistics review 7: Correlation and regression", *Critical care*, 7(6): 451., (2003).
- [45] Zhang H. Xiao R., Huang H., and Xiao G., "Comparison of non-catalytic and catalytic fast pyrolysis of corncob in a fluidized bed reactor", *Bioresource Technology*, 100(3): 1428-1434, (2009).
- [46] Haykiri-Acma H., "The role of particle size in the non-isothermal pyrolysis of hazelnut shell", *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 75 (2): 211-216, (2006).
- [47] Isahak W. N. R. W., Hisham M. W., Yarmo M. A., and Hin T. Y. Y., "A review on bio-oil production from biomass by using pyrolysis method", *Renewable and sustainable energy reviews*, 16 (8): 5910-5923, (2012).
- [48] Tsai W. T., Lee M. K., and Chang Y. M., "Fast pyrolysis of rice husk: Product yields and compositions", *Bioresource technology*, 98(1): 22-28, (2007).
- [49] Sulaiman W. R. W., and Lee E. S., "Pyrolysis of eucalyptus wood in a fluidized-bed reactor", *Research on Chemical Intermediates*, 38(8): 2025-2039, (2012).
- [50] Abnisa F., Arami-Niya A., Daud W. W., Sahu J. N., and Noor I. M., "Utilization of oil palm tree residues to produce bio-oil and bio-char via pyrolysis", *Energy conversion and management*, 76: 1073-1082, (2013).
- [51] Lee Y., Park J., Ryu C., Gang K. S., Yang W., Park Y. K., and Hyun S., "Comparison of biochar properties from biomass residues produced by slow pyrolysis at 500 °C", *Bioresource technology*, 148: 196-201, (2013).
- [52] Wu W., and Qiu K., "Vacuum co-pyrolysis of Chinese fir sawdust and waste printed circuit boards. Part I: Influence of mass ratio of reactants", *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 105: 252-261, (2014).
- [53] Chen D., Liu D., Zhang H., Chen Y., and Li Q., "Bamboo pyrolysis using TG-FTIR and a lab-scale reactor: Analysis of pyrolysis behavior, product properties, and carbon and energy yields", *Fuel*, 148: 79-86, (2015).
- [54] Doumer M. E., Arizaga G. G. C., da Silva D. A., Yamamoto C. I., Novotny E. H., Santos J. M., and Mangrich A. S., "Slow pyrolysis of different Brazilian waste biomasses as sources of soil conditioners and energy, and for environmental protection", *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 113: 434-443, (2015).
- [55] Klaigaew K., Wattanapaphawong P., Khuhaudomlap N., Hinchiranan N., Kuchontara P., Kangwansaichol K., and Reubroycharoen P., "Liquid phase pyrolysis of giant leucaena wood to bio-oil over NiMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst", *Energy Procedia*, 79: 492-499, (2015).
- [56] Özbay G., Kılıç Pekgözlü A., and Ozcifci A., "The effect of heat treatment on bio-oil properties obtained from pyrolysis of wood sawdust", *European journal of wood and wood products*, 73(4): 507-514, (2015).
- [57] Özbay G., "Pyrolysis of Firwood (*Abies bornmülleriana* Mattf.) Sawdust: Characterization of Bio-Oil and Bio-Char", *Drvna industrija*, 66(2): 105-114 (2015).
- [58] Gómez N., Rosas J. G., Cara J., Martínez O., Albuquerque J. A., and Sánchez M. E., "Slow pyrolysis of relevant biomasses in the Mediterranean basin. Part I. Effect of temperature on process performance on a pilot scale", *Journal of cleaner production*, 120: 181-190, (2016).
- [59] Halim S. A., and Swithenbank J., "Characterisation of Malaysian wood pellets and rubberwood using slow pyrolysis and microwave technology", *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 122: 64-75, (2016).
- [60] Morali U., Yavuzel N., and Şensöz S., "Pyrolysis of hornbeam (*Carpinus betulus* L.) sawdust: Characterization of bio-oil and bio-char", *Bioresource technology*, 221: 682-685, (2016).
- [61] Adrados A., Lopez-Urionabarrenechea A., Acha E., Solar J., Caballero B. M., and de Marco I., "Hydrogen rich reducing gases generation in the production of charcoal from woody biomass carbonization", *Energy Conversion and Management*, 148: 352-359, (2017).
- [62] Yorgun S. and Yıldız D., "Slow pyrolysis of paulownia wood: Effects of pyrolysis parameters on product yields and bio-oil characterization", *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 114: 68-78, (2015).
- [63] Wang Y., Kang K., Yao Z., Sun G., Qiu L., Zhao L., and Wang G., "Effects of different heating patterns on the decomposition behavior of white pine wood during slow pyrolysis", *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(5): 218-223., (2018).
- [64] Xu Y., Wang T., Ma L., Zhang Q., and Wang L., "Upgrading of liquid fuel from the vacuum pyrolysis of biomass over the Mo-Ni/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts", *Biomass and bioenergy*, 33(8): 1030-1036, (2009).
- [65] Özbay G., "Liquefaction of wood and wood-based composed materials sawdust by thermal and catalytic pyrolysis method", *PhD Dissertation, in Karabük University Graduate School of Natural and Applied Sciences*, (2012)



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Effects of stirring duration and casting temperature in ultrasonic assisted stir casting of Al A356 matrix composites

*Al A356 matris kompozitlerin ultrasonik destekli karıştırılmalı döküm ile üretiminde karıştırma süresi ve döküm sıcaklığının etkileri*

(Author(s)): Tugce Busra YUKSEL<sup>1</sup>, Ugur AYBARC<sup>2</sup>, Onur ERTUGRUL<sup>3</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-0112-3390

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-5646-351X

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0001-9017-9443

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Yuksel T., Aybarc U. and Ertugrul O., "Effects of stirring duration and casting temperature in ultrasonic assisted stir casting of Al A356 matrix composites", *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1265-1275, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.629473

# Effects of Stirring Duration and Casting Temperature in Ultrasonic Assisted Stir Casting of Al A356 Matrix Composites

## Highlights

- ❖ Aluminum matrix composites
- ❖ Ultrasonic vibration
- ❖ Mechanical stirring
- ❖ Casting temperature
- ❖ SiC particle

## Graphical Abstract

In the present study, two casting parameters as stirring duration and casting temperature were taken into consideration in order to determine the effect of stirring process on mechanical properties of aluminum matrix composites.

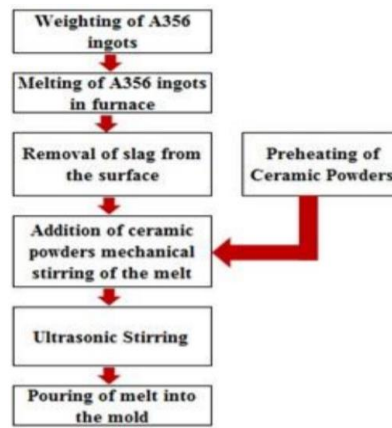


Figure. Casting process

## Aim

The aim of the present study is to determine the appropriate stirring process parameters and casting temperature for producing aluminum matrix composites with SiC particle reinforcement.

## Design & Methodology

Experimental process was taken into consideration in two groups as to determine the appropriate stirring process and to determine the appropriate casting temperature. At first step, to determine the optimum stirring parameters, composite samples were produced with different stirring conditions that included both mechanical stirring and ultrasonic vibration (with different durations as 3-1, 2-2 and 1-3 minutes, respectively). At the second step, to determine the optimum casting temperature, composite samples were produced with different casting temperatures as 700°C, 720°C and 740°C by applying the optimized stirring condition at first step.

## Originality

The novelty of this study is the need for optimization of the stirring process and the molten metal temperature in ultrasonic assisted stir casting of micron-sized SiC reinforced aluminum matrix composites.

## Findings

By the addition of SiC particles, the dendrite lengths have decreased. SiC particles showed the best modification effect with 1 minute mechanically and 3 minute ultrasonic vibration casting. It has been observed that the SiC particles act as nucleation sites in the molten metal and accelerate the nucleation rate of the dendrites. Additionally the casting temperature at 720°C is appropriate to obtain the highest quality index.

## Conclusion

As a conclusion, in order to produce advanced SiC particle reinforced aluminum metal matrix composites using ultrasonic assisted stir casting technique, 1 minute mechanical stirring and 3 minutes ultrasonic vibration and casting temperature at 720°C should be used.

## Declaration of Ethical Standards

The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Effects of Stirring Duration and Casting Temperature in Ultrasonic Assisted Stir Casting of Al A356 Matrix Composites

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Tugce Busra YUKSEL<sup>1</sup>, Ugur AYBARC<sup>1\*</sup>, Onur ERTUGRUL<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CMS Jant ve Makina Sanayi A.S., Izmir, Turkey

<sup>2</sup>Izmir Katip Celebi University, Materials Science and Engineering, Izmir, Turkey

(Geliş/Received : 04.10.2019 ; Kabul/Accepted : 05.01.2020)

## ABSTRACT

In the present study, two main parameters as stirring duration and casting temperature were taken into consideration in order to determine the effect of stirring process on mechanical properties of aluminum matrix composites. AlSi7Mg0.3 aluminum alloy and silicon carbide (SiC) particles were used as matrix and reinforcement materials to produce composite samples. Firstly, stirring processes were applied as the combination of mechanical stirring and ultrasonic vibration for the various time as 3-1, 2-2 and 1-3 minutes, respectively. To determine the effect of stirring process, tensile tests were applied to whole samples and Quality Indexes (QI) were calculated by using the results of tensile tests. According to the values of QI, the produced samples with the combination of 1 minute mechanical stirring and 3 minutes ultrasonic vibration showed the maximum mechanical properties. Afterwards, the determined stirring combination was chosen to specify the appropriate molten metal temperature. Three different casting temperatures were addressed as 700°C, 720°C and 740°C. According to mechanical tests results and calculations of QI and metallographic analysis, the maximum mechanical properties were obtained with aluminum composite reinforced with 1 wt. % SiC at 720°C molten metal temperature by applying 1 minute mechanical stirring and 3 minutes ultrasonic vibration.

**Keywords:** Aluminum matrix composites, ultrasonic vibration, mechanical stirring, casting temperature.

## Al A356 Matris Kompozitlerin Ultrasonik Destekli Karıştırmalı Döküm ile Üretiminde Karıştırma Süresi ve Döküm Sıcaklığının Etkileri

### ÖZ

Bu çalışmada, karıştırma işleminin kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin belirlenmesi için karıştırma süresi ve erimiş metal sıcaklığı gibi iki temel parametre göz önünde bulundurulmuştur. Kompozit numune üretiminde, AlSi7Mg0.3 alüminyum alaşımı matris malzemesi olarak silisyum karbür (SiC) parçacıkları ise takviye malzemesi olarak kullanılmıştır. İlk aşamada, mekanik karıştırma ve ultrasonik titreşimli karıştırma işlemleri çeşitli süreler için farklı kombinasyonlarda 3-1, 2-2 ve 1-3 dakika olarak uygulanmıştır. Karıştırma işleminin etkisini belirlemek için tüm numunelere çekme testleri uygulanmış ve çekme testi sonuçları kullanılarak Kalite İndeksleri (KI) hesaplanmıştır. Kalite İndeksi sonuçlarına göre, 1 dakikalık mekanik karıştırma ve 3 dakikalık ultrasonik titreşim kombinasyonu ile üretilen örnekler maksimum mekanik özellikleri göstermiştir. Daha sonra, tespit edilen karıştırma kombinasyonu uygun erimiş metal sıcaklığını belirtmek için seçildi. Üç farklı döküm sıcaklığı 700°C, 720°C ve 740°C olarak ele alınmıştır. Mekanik testler ve KI hesaplamaları ve metalografik inceleme sonuçlarına göre, maksimum mekanik özellikler 1 dakika mekanik karıştırma ve 3 dakika ultrasonik titreşim uygulanan 720°C döküm sıcaklığında ağırlıkça %1 SiC katkılı alüminyum kompozit ile elde edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Alüminyum matrisli kompozitler, ultrasonik titreşim, mekanik karıştırma, döküm sıcaklığı.

### 1. INTRODUCTION

Aluminum alloys are one of the most important material group used in the automotive industry due to their lightness, high corrosion resistance, easy formability, recyclability and high specific strength [1-3].

Particularly, in recent years, work has begun on decreasing vehicle weights, especially due to new regulations aimed at reducing environmental pollution,

and studies on products such as aluminum have gained momentum. Thus, engineers have begun to look for alternative materials such as metal matrix composites (MMCs) since they perform improved mechanical properties for instance high elastic modulus, improved strength, hardness, wear resistance and fatigue resistance, lower thermal expansion coefficient. In addition, MMCs have high shear and compression strength at elevated temperatures by the help of having metallic and ceramic material properties [4-6].

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



Particle reinforcement is the most common and inexpensive reinforcement type. At this point, the problem of the homogeneity of a composite material is encountered. The particle distribution in a matrix is a crucial for the performance of metal matrix composite (MMC) [7]. Several production methods such as Powder Metallurgy, Squeeze Casting, Spray Casting, Stir Casting, and Liquid Metal Infiltration have been used for many years [8, 9]. The most preferred method is liquid state due to economically, suitability and simplify processing, easy to work and handily applicable. Stir casting production method is the most common type that is mechanically mixing of molten metal matrix. The production method is simplest and low fabrication cost. Some conditions become crucial during the stir casting are; achieving of homogeneously dispersion reinforcement material, wetting between reinforcement and matrix material, chemically bond between materials, porosity of metal matrix composite and reaction of atmospheric condition between metal matrix composite components [10]. In last years new production technologies have been improved to fabrication of particle reinforced MMCs such as stir casting assisted with ultrasonic vibration [11, 12]. Later many modifications have been done by the researchers in various liquid state metallurgical methods and introduced the ultrasonic-assisted stir casting method for better wettability and dispersion of hard nanoparticles in the aluminum alloy matrix. On the other hand, there can be segregation thence gravity or density differences between matrix and reinforcement material, especially when there is nano-sized ceramic particles. Not only a uniform distribution of nano-size ceramic particles in metal matrix composites is obtained during the ultrasonic assisted casting process, but also molten metal purifies and grain refinement occurs [13,14,15].

Studies are investigated which is used ultrasonic stirring technique so ultrasonic stirring have lots of advantages such as; SiC, eutectic and intermetallic phases are properly modified [16], ultrasonic stirring is positively affected, mechanical properties (yield strength, tensile strength, SDAS, elongation) are increased [17]. M. Rahman et al. are applied stir casting for different percentages of SiC (0, 5, 10 and 20 wt. %) reinforcement material in aluminum metal matrix composites. Results of the study show that hardness, tensile test value and wear resistance increase with increasing SiC content. Also, nonhomogeneous dispersion and clustering are observed. The microstructural analysis showed that porosity decreases with increasing SiC content [18]. Sozhamannan and coworkers examined process conditions on reinforcement dispersion and mechanical properties. Aluminum metal matrix composites with reinforcement SiC were fabricated by stir casting process with different pouring temperature (at 700°C, 750°C, 800°C, 850°C, 900°C) and different holding time (10, 20, 30 min). The results observed are reinforcement particles are distributed uniformly in the matrix at 750°C and 800°C. Ultimate strength of MMC reduced with

increasing holding time. Effect of holding time is viscosity of liquid metal and reinforcement distribution [19]. S. Jia and L. Nastac are examined the effect of ultrasonic stirring on the mechanical properties and microstructure of A356 Alloy. It is observed reduction of SDAS (15-20%) via ultrasonic stirring so structure become modified. Besides mechanical properties are also increased. Another result is that degassing process is more effective than standard degassing process [16]. Based on these studies it can be well overcome homogenous distribution of micron and nano sized ceramic particles in melted matrix via mechanical stirring method combining of ultrasonic stir. Also wettability can increase between reinforcement and matrix.

As aforementioned, composite material, especially aluminum metal matrix composites, are taken great attention for last ten years. But it is not evidently that the producing parameters such as the stirring and casting temperature. Because of this, the aim and novelty of this research project is mainly the optimization of the casting parameters such as stirring process and the molten metal temperature for the producing of aluminum metal matrix composites with reinforced micron-sized SiC. Experimental process was taken into consideration in two groups as to determine the appropriate stirring process and to determine the appropriate casting temperature. At first step, to determine the optimum stirring parameters, composite samples were produced with different stirring conditions that included both mechanical stirring and ultrasonic vibration (with different duration times as 3-1, 2-2 and 1-3 minutes, respectively) were applied at 740°C. According to the results of first step, the optimum stirring process was determined as 1 minute mechanical stirring and 3 minutes ultrasonic vibration with the help of QI values. At the second step, to determine the optimum temperature, composite samples were produced with different casting temperature as 700°C, 720°C and 740°C by applying the determined stirring condition at first step. By using mechanical test results and calculation of QI value, the maximum result was obtained at 720°C. Conclusion of the present study, it could be said that to produce aluminum metal matrix composite with SiC particle reinforcement, 1 minute mechanical stirring and 3 minutes ultrasonic vibration and casting temperature at 720°C should be used.

## 2. MATERIAL and METHOD

### 2.1 Sample production

The hypoeutectic A356 alloy (Al7Si0.3Mg) was used as matrix material having the chemical composition given in Table 1. The ceramic reinforcement material was silicon carbide (SiC) in particulate form. The average particle size (APS) of the SiC powder is approximately 53 µm.

**Table 1.** Chemical composition of A356 alloy.

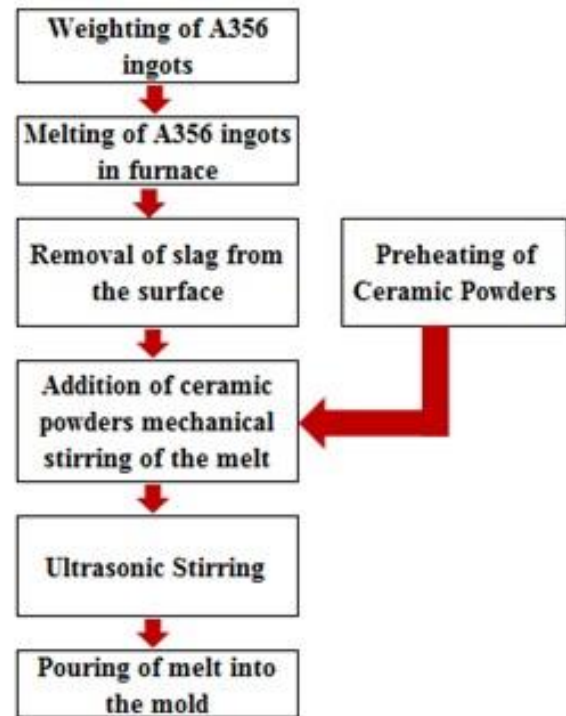
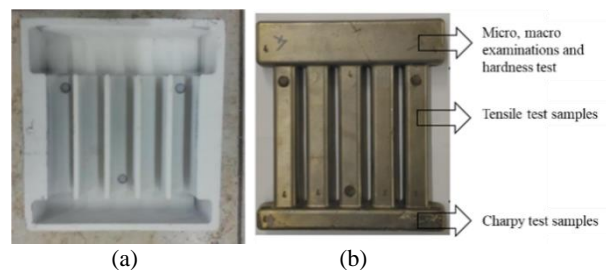
Element	Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn
wt. %	Rest	0.1	0.1	0.3	0.05	7.3	0.1	0.05

In the first experimental group; casting process including three different stirring times (2 mins mechanical stirring + 2 mins ultrasonic stirring; 3 mins mechanical stirring + 1 min ultrasonic stirring; 1 min mechanical stirring and 3 mins ultrasonic stirring) were done at 740°C casting temperature. In the second experimental group; two additional casting temperatures (700°C, 720°C, 740°C) were applied by using the casting process duration which was determined in the first experimental group in order to compare with 740°C casting temperature.

The casting process used to produce the composite samples was “ultrasonic assisted stir casting”, and the procedure is shown as a flow chart in Figure 1. A356 ingot of 4 kg was melted at 740°C in a graphite crucible in an electrical resistance furnace. Reinforcement powders were weighted as the amount would be 1 wt. %. In order to improve the wettability, SiC powders were preheated to 800°C for 2 h before the addition. Five cell melting mould was preheated to 320°C in another furnace. One crucible was taken out from the furnace then, slag on the surface was removed.

After vortex occurred with the help of mechanical stirring, preheated SiC powders (1 wt.%) were added into the melt. Mechanical stirring and ultrasonic vibration were applied by 2-2, 3-1 and 1-3 minutes, respectively, for each crucible. Mechanical stirring was applied by Optimum B20400 V model stirrer at 600 rpm which is shown in Fig. 2a, and the ultrasonic stirring was applied by Rtul model vibration machine which is capable of 3 kW of electric energy at a constant resonant frequency of 19.8 kHz as shown in Fig. 2b.

After stirring was finished, the molten metal was casted into the preheated mold, which is applicable for simulate the wheel geometry, and shown in the Figure 3. This step was repeated for each stirring process parameters. To compare the effects of SiC reinforcement, a reference A356 sample was also cast under the same conditions without any addition of reinforcement. Two casting process were carried (totally 5 + 5 = 10 samples) in order to have reproducible results.

**Figure 1.** Casting process**Figure 2.** (a) Mechanical stirring, (b) ultrasonic vibration**Figure 3.** a) Preheated mold, b) test samples

### 2.2 Mechanical and metallographic analysis

Tensile test samples were prepared according to the DIN EN ISO 6892-1 standard, and tensile tests were applied using Zwick brand Z100 model tensile test machine in order to evaluate the mechanical properties. Quality Index (QI) values of the samples are calculated using the Equation 1 by the help of the tensile test results [24-26].

$$QI = UTS + K * \log(\%elongation) \quad (1)$$

In this equation

QI ; quality index(MPa)

UTS ; ultimate tensile strength (MPa)

K ; constant (for A356 alloy is equivalent to 150 MPa)

Elongation ; (%)

Brinell hardness tests and Charpy Impact tests were applied to the samples using Innovates Nemesis 9000 and Instron Ceast 9050 model machines, respectively. For metallographic study, samples were firstly grinded, and polished with diamond solution, then etched by 3% HF solution for macro and by FeCl<sub>3</sub> solution for microstructure examinations, respectively. Nikon Epiphot 200 optical microscope and Clemex S2.0C software were used for microstructure analysis. Additionally, SEM studies were done with Jeol JSM-6060 scanning electron microscope equipped with EDX (Energy dispersive X-Ray Spectroscopy).

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

Experimental section consists of two group as follows;

- a First group; to determine the stirring parameters,
- b Second group; to determine the appropriate casting temperature

After first experimental group was concluded, second experimental group was carried out with the help of results of first experimental group. They are listed in Table 2. Additionally, Table 3 shows the chemical composition of all samples.

**Table 2** Given codes and explanations of the composite samples a) first b) second experimental groups

Sam. group no.	Sample code	Stirring type*	Casting temperature	Heat treatment condition	SiC content (wt. %)
1	2M2U-74-T6	2M + 2U	740°C	with ht.	1 %
2	2M2U-74	2M + 2U	740°C	without ht	1 %
3	3M1U-74-T6	3M + 1U	740°C	with ht.	1 %
4	3M1U-74	3M + 1U	740°C	without ht	1 %
5	1M3U-74-T6	1M + 3U	740°C	with ht.	1 %
6	1M3U-74	1M + 3U	740°C	without ht	1 %

(a)

Sam. group no.	Sample code	Stirring type*	Casting temperature	Heat treatment condition	SiC content (wt. %)
7	1M3U-70-T6	1M + 3U	700°C	with ht.	1 %
8	1M3U-70	1M + 3U	700°C	without ht	1 %
9	1M3U-72-T6	1M + 3U	720°C	with ht.	1 %
10	1M3U-72	1M + 3U	720°C	without ht	1 %
11	1M3U-74-T6	1M + 3U	720°C	with ht.	1 %
12	1M3U-74	1M + 3U	720°C	without ht	1 %
13	1M3U-Ref-T6	1M + 3U	740°C	with ht.	0 % (Ref.)
14	1M3U-Ref	1M + 3U	740°C	without ht	0 % (Ref.)

(b)

\*(M: mechanical stirring, U: ultrasonic stirring)

**Table 3** Chemical composition of all samples

Sam. Code	Heat Treat.	Si	Fe	Mg	Ti	Sr	Al%
2M2U-74-T6	with	6,57	0,89	0,26	0,11	0,004	rest
2M2U-74	without	6,61	0,87	0,26	0,11	0,004	rest
3M1U-74-T6	with	6,51	1,34	0,21	0,11	0,004	rest
3M1U-74	without	6,16	1,44	0,23	0,13	0,004	rest
1M3U-74-T6	with	6,76	0,62	0,26	0,12	0,003	rest
1M3U-74	without	6,44	0,79	0,28	0,13	0,003	rest
1M3U-70-T6	with	6,54	0,36	0,30	0,10	0,002	rest
1M3U-70	without	6,95	0,34	0,29	0,10	0,002	rest
1M3U-72-T6	with	6,67	0,41	0,29	0,11	0,003	rest
1M3U-72	without	6,46	0,40	0,29	0,11	0,003	rest
1M3U-74-T6	with	6,69	0,57	0,30	0,10	0,002	rest
1M3U-74	without	6,38	0,49	0,30	0,11	0,002	rest
1M3U-Ref-T6	with	6,48	0,59	0,29	0,11	0,003	rest
1M3U-Ref	without	6,57	0,59	0,29	0,11	0,003	rest

### 3.1 Mechanical test results

#### 3.1.1 Effect of stirring duration

Tensile test was carried out to evaluate the effects of both heat treatment and each stirring duration and the results are listed in Table 4.

Yield strength, ultimate tensile strength, elongation and hardness values of the composite samples with different stirring methods are shown in Figures 4-7, respectively. According to Figure 4, the sample encoded as 3M1U-74 shows the highest yield strength value among the others in without heat treatment state. Paralelly, the sample encoded as 3M1U-74-T6 shows the highest yield strength in with heat treatment state. Ultimate tensile strength values of the samples encoded as 2M2U-74 and 1M3U-74 are close each other in without heat treatment

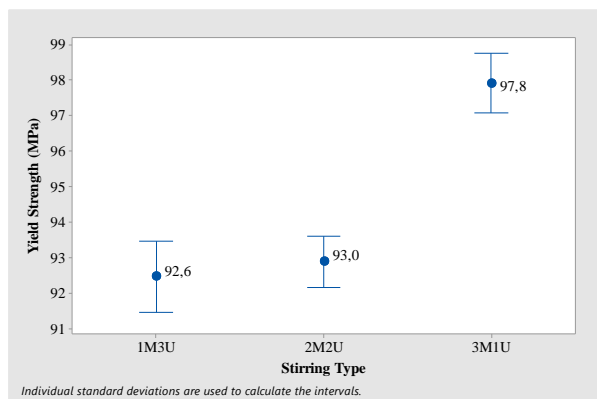
state as seen in Figure 5. The sample that is 3 minutes mechanical stirred and 1 minute ultrasonic stirred has the lowest ultimate tensile strength value in without heat treatment. However, ultimate tensile strength values of samples 2M2U-74 and 3M1U-74 are close each other in with heat treatment state which is higher than 1M3U-74 state.

**Table 4** Mechanical properties of A356 with different stirring durations

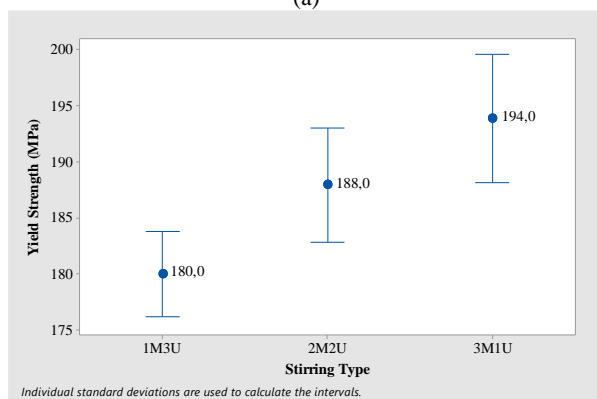
Sam. code	YS* (MPa)	UTS** (MPa)	Elong. (%)	Impact Energy (J)	QI (MPa)	Hardness (HB)
2M2 U-74-T6	188±3.7	232±2.8	1.2±0.1	10.3	242,2	93,7
2M2 U-74	93±0.5	173±5.2	3.0±0.5	11.7	244,8	63,8
3M1 U-74-T6	194±1.9	231±4.9	0.7±0.1	12.7	203,9	99,5
3M1 U-74	98±0.3	163±2.5	1.3±0.1	12.3	179,6	71,2
1M3 U-74-T6	180±2.7	223±1.9	1.6±0.3	13	252,0	92,4
1M3 U-74	92±0.7	171±4.2	3.7±0.6	13	255,3	63,5

\*Yield Strength

\*\*Ultimate Tensile Strength

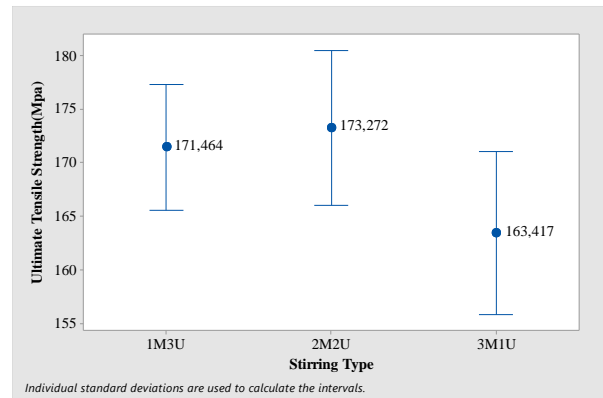


(a)

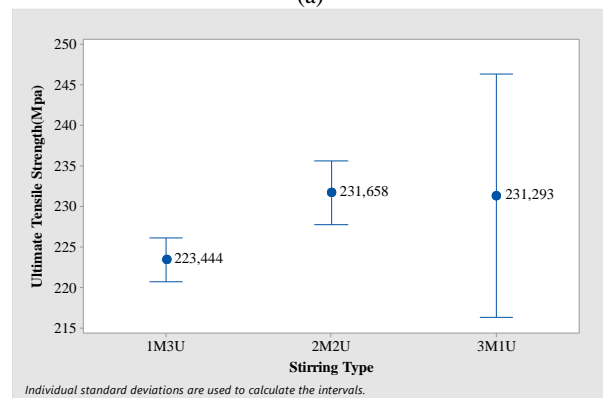


(b)

**Figure 4.** The yield strength values of A356/ 1% SiC composites with different stirring methods, (a) without heat treatment, (b) with heat treatment



(a)



(b)

**Figure 5.** The ultimate tensile strength values of A356/1% SiC composites with different stirring methods, (a) without heat treatment, (b) with heat treatment

According to the Figure 6, the sample 1M3U-74 has the highest elongation value in without heat treatment state. The sample 3M1U-74 has the lowest elongation value with heat treatment state. Parallely, the sample 1M3U-74 has the highest elongation values in both ways of heat treatment which is in contrast to yield and tensile strength values of these samples. The charpy impact test was applied for the samples of different stirring duration. Charpy impact results give the information about toughness properties of samples. According to Table 3, the sample encoded as 1M3U has the highest impact value in both ways of heat treatment with 13 J. But also, 3M1U samples have the impact energy of close value as 12.7 J.

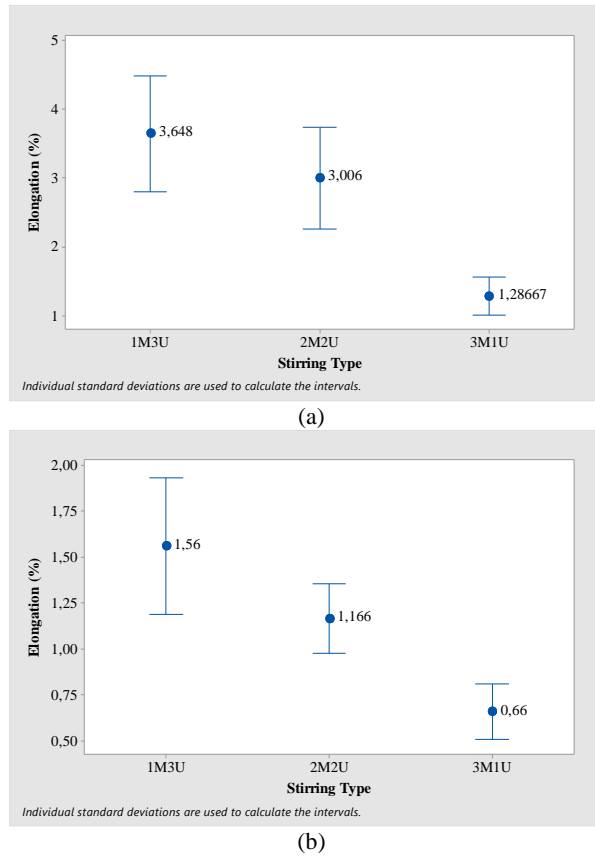
The hardness values are clearly seen from Figure 7 that the sample 3M1U-74 has the highest hardness value among of others at different stirring duration parameters in both non heat-treated and heat-treated state.

Silicon carbide particulates are ceramic materials that are harder than the aluminum matrix alloy. They block the dislocation motion and therefore an increase in strain hardening achieved.

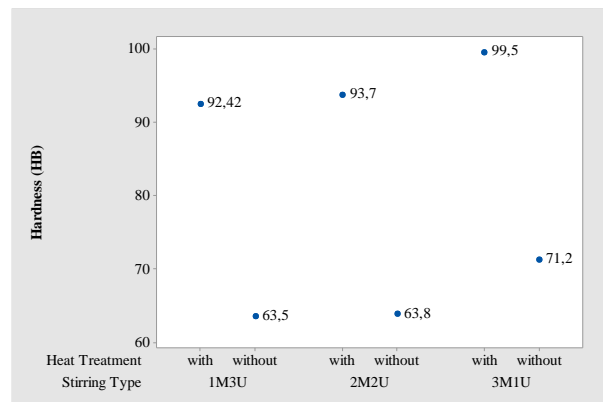
The aluminum matrix composites were solution heat treated according to T6 heat treatment requirements. Heat treatment also has effects on the hardness values of aluminum matrix composites. By precipitation heat treatment rise in hardness values compared the reference

sample was obtained. It was seen that appropriate heat treatment increases the hardness values.

heat treatment and different casting temperature and the results are listed in Table 5.



**Figure 6.** Elongation values of A356/1% SiC composites with different stirring methods, (a) without heat treatment, (b) with heat treatment



**Figure 7.** Hardness test results of A356/1% SiC composites with different stirring methods

### 3.1.2 Effect of casting temperature

According to first experimental results, 1 minute mechanically and 3 minute ultrasonic stirred material gives the highest quality index (QI) probably because of its highest elongation and toughness value. Therefore, 1M3U sample was chosen for this study. In this section, tensile test was carried out to evaluate the effects of both

**Table 5** Mechanical Properties of A356 Different Casting Temperature

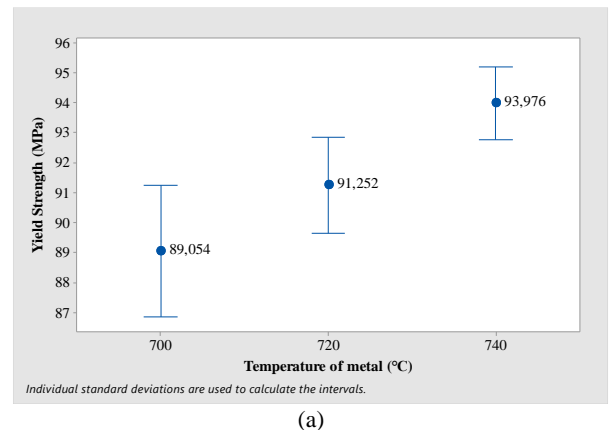
Sample code	YS* (MPa)	UTS** (MPa)	Elong (%)	IM** (J)	QI (MPa)	Hardness (HB)
1M3U - 70-T6	191±1.9	228±11.5	1.18±0.6	13.1	238, 8	94
1M3U - 70	89±1.6	151±11.4	2.25±0.7	14	203,8	63.1
1M3U - 72-T6	191±2.0	241±6.2	1.95±0.5	12.6	284,5	93.4
1M3U - 72	91±1.2	174±4.1	4.27±0.6	12.8	268,6	64.3
1M3U - 74-T6	196±2.3	238±6.1	1.52±0.5	11.7	265,3	97.3
1M3U - 74	95±1.8	172±3.0	3.87±0.5	6.3	260,2	62.1
1M3U-Ref-T6	194±0.4	232±2.9	1.27±0.3	3	247,6	93.9
1M3U-Ref	93±0.9	163±13.1	3.03±1.0	4.4	235,2	64.3

\*Yield Strength

\*\*Ultimate Tensile Strength

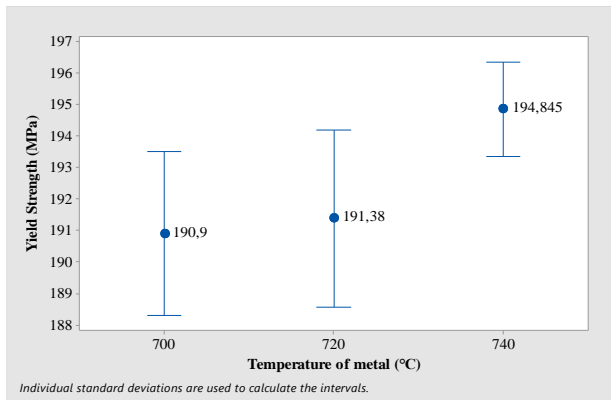
\*\*\* Impact Energy

Yield strength, ultimate tensile strength, elongation and hardness values of the composite samples with different casting temperatures are shown in Figures 8-11, respectively. According to Figure 8, the sample casted at 740°C shows the highest yield strength value among others in without heat treatment state. Paralelly, the sample casted at 740°C shows the highest yield strength value in with heat treatment state. According to Figure 9, the sample casted at 720°C shows the highest ultimate tensile strength value (240 MPa) in without heat-treated state which is very close to the value (238 MPa) belong to 740oC. Also the sample casted at 720°C shows the highest ultimate tensile strength value in with heat-treated state. Again, the sample casted at 720°C and 740°C are very close to each other in heat-treated state.



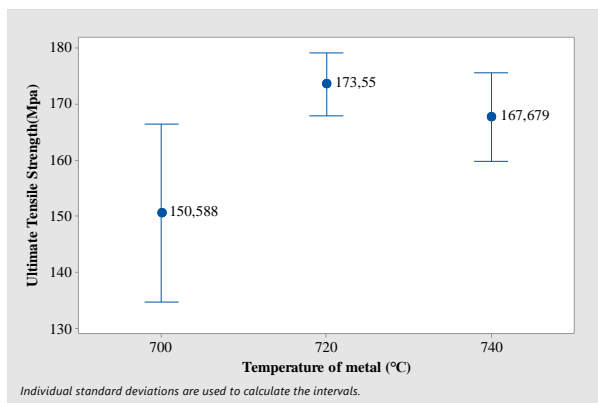
(a)



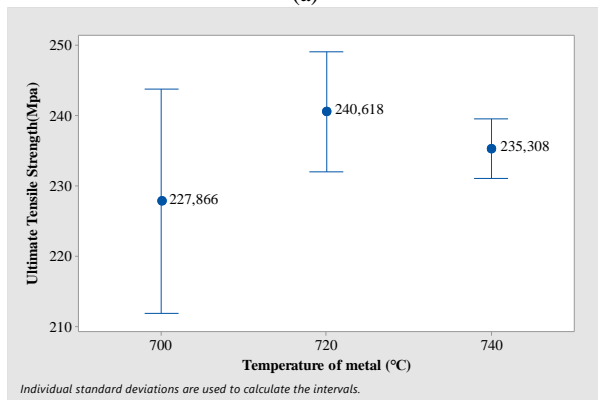


(b)

**Figure 8.** The Yield Strength values of A356/ 1% SiC composites and reference sample with different casting temperature, (a) without heat treatment, (b) with heat treatment



(a)

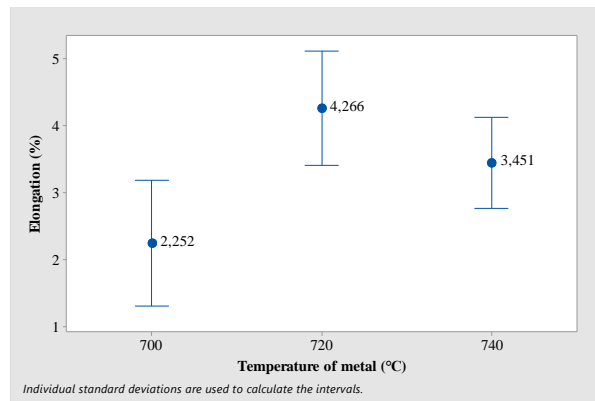


(b)

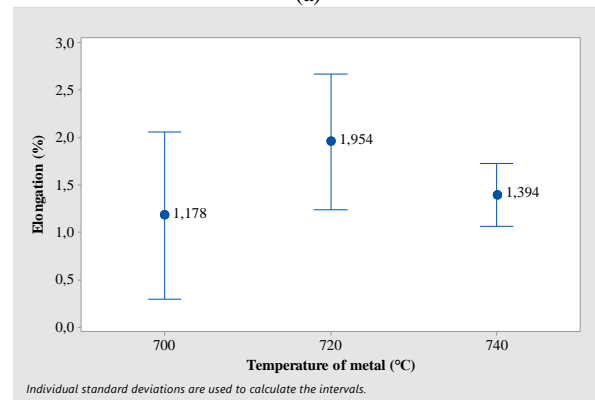
**Figure 9.** The ultimate tensile strength of A356/1% SiC composites and reference sample with different casting temperature, (a) without heat treatment, (b) with heat treatment

According to Figure 10, the sample casted at 720°C shows the highest elongation value in both with and without heat treatment state. It was observed that when the casting temperature decreases below 720°C the composite shows the lowest elongation value. The charpy impact test was applied for the samples of different casting temperature. According to Table 5, the sample casted at 700°C has the highest impact value in without

heat treatment with 14 J. In parallel, the sample casted at 700°C has the highest impact value in with heat treatment with 13.1 J. On the other hand, this value is close to the value belong to 720°C casting temperature (12.6 J). It was also observed that impact energy values increased with silicon carbide addition. According to Table 4, the material casted at 720°C gives the highest quality index (QI) probably because of its highest tensile strength, elongation and toughness value. Therefore, it can be said that 720°C is the optimum casting temperature.



(a)

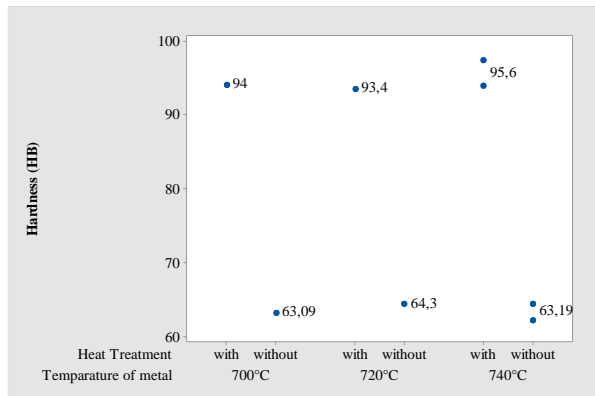


(b)

**Figure 10.** Elongation values of A356/1% SiC composites and reference sample with different casting temperature, (a) without heat treatment, (b) with heat treatment

The hardness values are clearly seen from Figure 11. Regarding to Figure 11, the sample casted at 740°C shows the highest hardness value (97.3 HB) among of others at different casting temperature parameters as heat-treated state. This value is also higher than the reference sample value (93.9 HB) which means hardness increases with SiC addition. Besides, hardness values are close in all samples in non-heat-treated state.



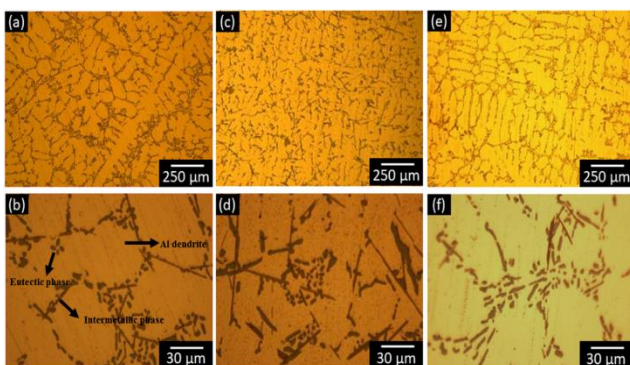


**Figure 11.** Hardness test results of SiC reinforced AMCs and reference sample with different casting temperature parameters

### 3.2 Microstructural study

#### 3.2.1 Metallographic examinations

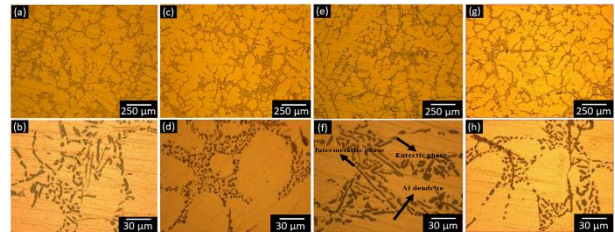
Metallographic examination was applied to the A356/1% SiC composites and reference sample with different stirring parameters and molten metal temperatures in heat-treated state. Figure 12 shows to effect of different durations on as-cast A356 heat treated samples. In these views dendritic arm spacing (DAS) is decreased with effect of heat treatment. Also intermetallic phases are decreased after heat treatment.



**Figure 12.** (a,b) 2minute mechanic 2 minutes ultrasonic stirred, (c,d) 3 minute mechanic 1 minute ultrasonic stirred, and (e,f) 1 minute mechanic 3 minute ultrasonic stirred at 740°C A356/ 1% SiC alloy with heat treatment.

Different molten metal temperature samples with constant stirring parameters according to the determined in the first experimental group were also investigated by using optical microscope. The images are given below: Figure 13 belongs to the SiC reinforced AMMCs casted at different temperatures. The particles are not shown clearly in the microstructures. In the second work package, the microstructure images taken as a result of experiments carried out with constant stirring parameters. As the temperature increases, the decrease in surface energy between the additive and the liquid metal results in a more homogeneous mixture. In

addition, as the temperature increases, the distance between the dendrite arms decreases, and less intermetallic phases are found in the heat treated samples. Based on the as-casted sample, the best microstructure is in the Figure 13(c) and (d).



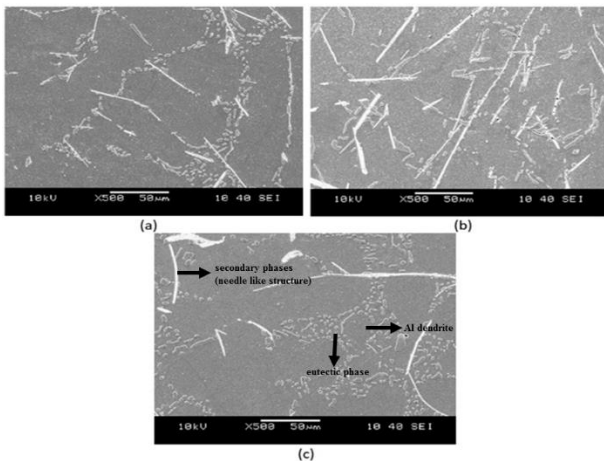
**Figure 13.** 1minute mechanic 3 minutes ultrasonic stirred at (a,b) 700°C, (c,d) 720°C, (e,f) 740°C A356/ 1% SiC alloy, and (g,h) reference sample with heat treatment.

#### 3.2.2 Scanning electron microscopy (SEM) study

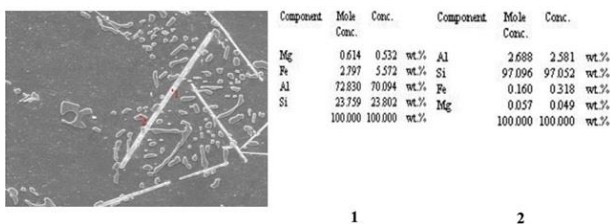
SEM examinations are done to the heat-treated composite samples in addition to the reference sample which was non additive A356 alloy. The SEM images of the composite samples casted at different duration are given in Figure 14. The secondary phases that are in needle like structure and porosities is observed in heat-treated samples. When we compare the samples, there is no big difference in microstructure between SiC additive and reference sample.

Especially, the coherence of interface of matrix and reinforcement material and the shape and size of the secondary phases in the matrix were important for this study. Not only smaller dendrites thought to be result in an increase in strength value, but also the interface also has an important role in this point.

According to SEM analyses, images were taken with secondary electrons provide information about surface morphology. When these images were examined, where the SiC additive were not homogeneously dispersed for images that taken at 150x and 500x. On the other hand, the distance between the aluminum dendrite arms increased linearly as the temperature increased. EDX analysis of the areas in the sample 2 minute mechanically stirred and 2 minute ultrasonic vibration are given in Figure 15. In the analyses from different regions, it is predicted that phases which are in the form of intermetallic phase and which are needle-shaped geometries are AlFeSi phases. Furthermore, it is predicted that these particles are SiC contribution as a result of analysis from the images of spherical particles according to the literature.

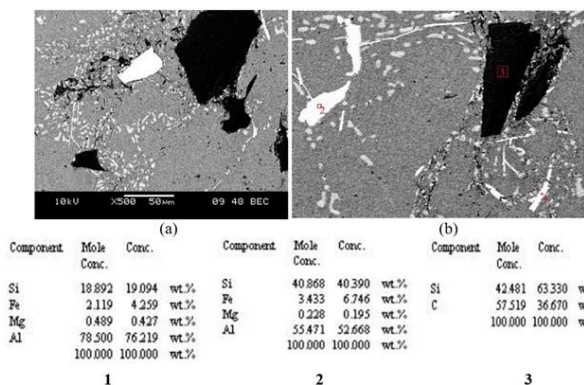


**Figure 14.** SEM images of (a) 2M2U-74-T6, (b) 2M2U-74-T6, and (c) 1M3Y-74-T6 samples.



**Figure 15.** EDX image of sample 2M2U-74-T6 and composition analyses of points 1 and 2.

The SEM images of the composite samples casted at different duration are given in Figure 16(a), and EDX analysis of the areas in the sample 2 minute mechanically stirred and 2 minute ultrasonic stirred are given in Figure 16(b).



**Figure 16.** (a) SEM images of 1 minute mechanic 3 minutes ultrasonic stirred at 700°C A356/SiC alloy with heat treatment, (b) EDS image of the sample casted at 720°C and chemical composition analyses 1, 2 and 3 areas

**4. CONCLUSIONS**

As aforementioned before, mechanic stirring and ultrasonic vibration were used to produce aluminum metal matrix composite with 1 wt% SiC reinforcement to determine the optimum stirring process parameter in

the first experimental group. After determined the stirring process parameter, optimum casting temperature was determined in the second experimental group. Obtained results in present study are given briefly as follows;

- The mechanical strength of A356 considerably increased by a combination of T6 heat treatment and adding micro SiC particles. The increase in strength was in expense of ductility.
- QI values were calculated with the help of tensile test results to determine the appropriate stirring process parameters. The maximum QI result was obtained by applying 1 minute mechanical stirring and 3 minutes ultrasonic vibration as 252 MPa and 255,3 MPa with and without heat treatment, respectively. UTS value increased and elongation decreased because of occurring of Mg<sub>2</sub>Si phase during the heat treatment process.
- By the addition of SiC particles, the dendrite lengths have decreased. SiC particles showed the best modification effect with 1 minute mechanically and 3 minute ultrasonic vibration casting. It has been observed that the SiC particles act as nucleation sites in the molten metal and accelerate the nucleation rate of the dendrites.
- In the second experimental group, as the temperature increases, the decrease in surface energy between the additive and the liquid metal results in a more homogeneous mixture. In addition, as the temperature increases, the space between the dendrite arms decreases, and less intermetallic phases are found in the heat treated samples.
- The best results on mechanical strength was obtained from the optimization of molten metal temperature; At 740°C has the best yield strength value. At 720°C has the best ultimate tensile strength value. At 720°C has the best impact value and QI. At 740°C has the best hardness value.
- According to SEM analyses, images were taken with secondary electrons provide information about surface morphology. When these images were examined, where the SiC additive were not homogeneously dispersed for images that taken at 150x and

500x. On the other hand, the distance between the aluminium dendrite arms increased linearly as the temperature increased. EDS analysis was performed with backscattered electron mode images, where elements with larger molecular weights are displayed brighter. In the analyses from different regions, it is predicted that phases which are in the form of intermetallic phase and which are needle-shaped geometries are AlFeSi phases. Furthermore, it is predicted that these particles are SiC contribution as a result of analysis from the images of spherical particles.

- The effect of heat treatment on references samples with and without SiC reinforcement addition; hardness increased by 3.49%, YS value increased by 1.02%, UTS by 2.59%, elongation value increased by 16.45%, impact energy value increased by 74.36%.

#### ACKNOWLEDGEMENT

The authors thank Caner Kalender for technical support. The authors acknowledge the financial support provided by 2209-B Programme of the TUBITAK (The Scientific and Technological Research Council of Turkey).

#### DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS

The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

#### REFERENCES

- [1] Derin S., Birol Y., Aybarc U., "Effect of strontium addition on microstructure and mechanical properties of AlSi7Mg0,3 alloy", *International Journal of Metalcasting*, 11(4): 688-695, (2016).
- [2] Dispınar D., Akhtar S., Nordmarka A., Di Sabatino M., Arnberg, L., "Degassing, hydrogen and porosity phenomena in A356", *Materials Science and Engineering A*, 527: 3719-3725, (2010).
- [3] Tsakiridis P.E., "Aluminum salt slag characterization and utilization – a review", *Journal of Hazardous Materials*, 217-218: 1-10, (2012).
- [4] Sajjadi S.A., Ezatpour H.R., Torabi Parizi M., "Comparison of microstructure and mechanical properties of A356 aluminum Alloy/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites fabricated by stir and compo-casting processes", *Materials and Design*, 34:106–111, (2012).
- [5] Khosravi H., Bakhshi H., Salahinejad E., "Effects of compocasting process parameters on microstructural characteristics and tensile properties of A356–SiCp composites", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24: 2482-2488, (2014).
- [6] Starke E. A., Staley J. T., "Application of modern aluminium alloys to aircraft", *Progress in Aerospace Sciences*, 32(2-3): 131-172, (1996).
- [7] Walczak M., Pieniak D., Zwierzchowski M., "The tribology characteristics of SiC particle reinforced aluminium composites", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 15: 116-123, (2015).
- [8] Prabu S.B., Karunamoorthy L., Kathiresan S., Mohan B., "Influence of stirring speed and stirring time on distribution of particles in cast metal matrix composite", *Journal of Materials Processing Technology*, 171: 268–273, (2006).
- [9] Vieira A. C., Sequeira P. D., Gomes J. R., Rocha L. A., "Dry sliding wear of Al alloy/SiCp functionally graded composites: influence of processing conditions", *Wear*, 267: 585-592, (2009).
- [10] Hashim J., Looney L., Hashmi M.S.J., "Metal matrix composites: production by the stir casting method", *Journal of Materials Processing Technology*, 92/93: 1–7, (1999).
- [11] Jia S., Nastac L., "The influence of ultrasonic stirring on the solidification microstructure and mechanical properties of A356 alloy", *Chemical and Materials Engineering*, 1-3:69-73, (2013).
- [12] Jia S., Zhang D., Xuan Y., Nastac L., "An experimental and modeling investigation of aluminum-based alloys and nanocomposites processed by ultrasonic cavitation processing", *Applied Acoustics*, 103 part:B: 226-231, (2016).
- [13] Li X., Yang Y., Cheng X., "Ultrasonic-assisted fabrication of metal matrix nanocomposites", *Journal of Materials Science*, 39: 3211-3212, (2004).
- [14] Wang X. J., Wang N. Z., Wang L. Y., Hu X. S., Wu K., Wang Y.Q., Huang Y.D., "Processing, microstructure and mechanical properties of micro-SiC particles reinforced magnesium matrix composites fabricated by stir casting assisted by ultrasonic treatment processing", *Materials and Design*, 57: 638–645, (2014).
- [15] Reddy A.P., Krishna P.V., Rao P.N., "Tribological behavior of Al6061-2SiC-xGr Hybrid Metal Matrix Nanocomposites Fabricated through Ultrasonically Assisted Stir Casting Technique", *Silicon*, 1-19, (2019).
- [16] Das A., Kotadia H.R., "Effect of high-intensity ultrasonic irradiation on the modification of solidification microstructure in a Si-rich hypoeutectic Al–Si alloy", *Materials Chemistry and Physics*, 125: 853–859, (2011).
- [17] Li Jun-wen, Momono T., Fu Y., Jia Z., Tayu Y., "Effect of ultrasonic stirring on temperature distribution and grain refinement in Al- 1.65%Si alloy melt", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 17: 691-697, (2007).
- [18] Raham H., Mamun Al Rashed H.M., "Characterization of silicon carbide reinforced aluminum matrix composites", *Procedia Engineering*, 90:103-109, (2014).
- [19] Sozhamannan G. G., Balasivanandha Prabu S., Venkatagalapathy V.S.K., "Effect of Processing Parameters on Metal Matrix Composites: Stir Casting Process", *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology (JSEMAT)*, 2: 11-15, (2012).

- [20] Singla M. Dwivedi D.D., Singh L., Chawla V., "Development of Aluminum Based Silicon Carbide Particulate Metal Matrix Composite", *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 8: 455-467, (2009).
- [21] Prabu S.B., Karunamoorthy L., Kathiresan S., Mohan B., "Influence of stirring speed and stirring time on distribution of particles in cast metal matrix composite", *Journal of Materials Processing Technology*, 171: 268–273, (2006).
- [22] Sujan D., Oo Z., Rahman M.E., Maleque M.A., Tan C.K., "Physio-mechanical Properties of Aluminum Metal Matrix Composites Reinforced with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiC", *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 6: 678-681, (2012).
- [23] Meena K.L., Manna A., Banwait S.S., Jaswanti Dr., "An Analysis of Mechanical Properties of the Developed Al/SiC-MMC's", *American Journal of Mechanical Engineering*, 1:14-19, (2013).
- [24] Tiryakioğlu M., Campbell J., "Quality Index for Aluminum Alloy Castings", *Transactions of American Foundry Society*, (paper no: 13-1525): 217- 222, (2013).
- [25] Khomamizadeh F., Ghasemi A., "Evaluation of Quality Index of A-356 Aluminum Alloy by Microstructural Analysis", *Scientia Iranica*, 11(4): 386–391, (2004).
- [26] Czekaj E., Zych J., Kwak Z., Garbacz-Klempka A., "Quality index of the AlSi7Mg0,3 aluminium casting alloy depending on the heat treatment parameters", *Archives of Foundry Engineering*, 16: 25-28, (2016).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Analyzing the environmental effects of conventional and condensing combi boilers using natural gas

*Yazar(lar) (Author(s)):* Halil İbrahim VARIYENLİ<sup>1</sup>, Ataollah KHANLARI<sup>2</sup>

*ORCID<sup>1</sup>:* 0000-0001-6313-1786

*ORCID<sup>2</sup>:* 0000-0001-9691-9799

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Variyenli H.İ. and Khanlari A., “Analyzing the environmental effects of conventional and condensing combi boilers using natural gas”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1277-1284, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.592313



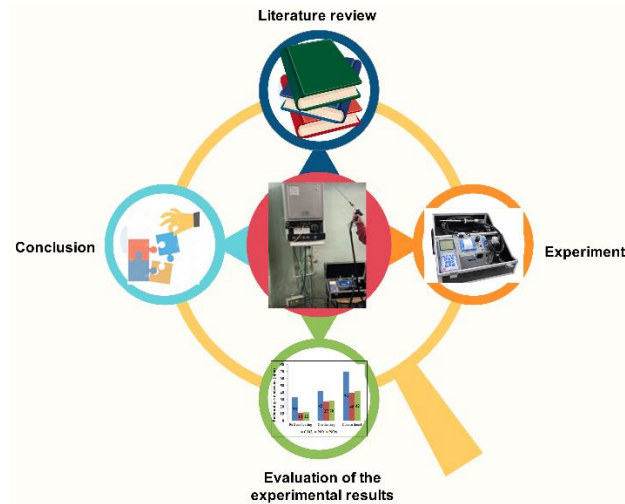
# Analyzing the Environmental Effects of Conventional and Condensing Combi Boilers Using Natural Gas

## Highlights

- ❖ Investigating the environmental effects of conventional and condensing combi boilers.
- ❖ Analyzing different type combi boilers using natural gas.
- ❖ The experimental results showed the positive effects of using condensing combi boiler.
- ❖  $CO_2$ ,  $NO$  and  $NO_x$  emissions significantly reduced by utilizing condensing type combi boiler.

## Graphical Abstract

In this study the effects of combi boiler type on pollutant gas emissions have been experimentally analyzed.



**Figure.** Main steps of the present work

## Aim

The main aim of this study is analyzing the effects of combi boiler type on pollutant gas emissions.

## Design & Methodology

In this work, three various combi boilers including conventional, condensing and full condensing type combi boilers have been experimentally tested to determine their environmental effects.

## Originality

There is no study in the literature which compares different combi boilers pollutant gas emissions.

## Findings

It can be stated that utilizing condensing and full condensing combi boilers can be reduced pollutant gas emissions in comparison to conventional type.

## Conclusion

This study showed that condensing and full condensing combi boilers can be more effective in comparison with conventional type, both in energy saving and environmentally friendly aspects.

## Declaration of Ethical Standards

The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.



# Analyzing the Environmental Effects of Conventional and Condensing Combi Boilers Using Natural Gas

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Halil İbrahim VARIYENLİ<sup>1</sup>, Ataollah KHANLARI<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Gazi University, Technology Faculty, Energy Systems Engineering, Teknikokullar, 06500, Ankara, Turkey

<sup>2</sup>University of Turkish Aeronautical Association, Mechanical Engineering, 06790, Ankara, Turkey

(Geliş/Received : 16.07.2019 ; Kabul/Accepted : 09.12.2019)

## ABSTRACT

Generally, space heating and hot water providing are done by combi boilers. Different types of combi boilers are available. In the recent years condensing combi boilers have been introduced that have high energy efficiency in comparison with conventional types. In the condensing type combi boilers, an additional heat exchanger is utilized to recover energy form flue gas. In this study the effects of combi boiler type on pollutant gas emissions have been experimentally analyzed. In this regard three different combi boiler including conventional, condensing and full condensing type combi boilers have been selected in the experiments. In addition, the experiments have been done in different temperatures to investigate the temperature effect. The obtained results showed that in all temperatures using condensing and full condensing combi boilers reduced CO<sub>2</sub>, NO and NO<sub>x</sub> gas emissions considerably. Also, by analyzing combi boilers emissions in different working temperatures, it can be said that in low temperatures CO<sub>2</sub> emission reduction in condensing combi is higher than its reduction in high temperatures in comparison with conventional one.

**Keywords:** Combi boiler, heat recovery, condensing, natural gas, pollutants gas emissions.

## 1. INTRODUCTION

Global energy demand increases day by day with increasing world population. Therefore, renewable and alternative energy resources and also efficient energy systems gain importance not only because of limited fossil resources, but also because of pollutant gas emissions. Approximately 40% of annual energy consumption is used in residential buildings and a major part of energy is used for space heating and hot water providing in buildings [1, 2]. Generally hot water and space heating in buildings are supplied by combi boilers. Different types of combi boilers are available. But in the recent years condensing combi boilers have been introduced which have high energy efficiency in comparison with conventional types.

Combi boilers and domestic heating systems have been investigated in different studies in various point of view [3,4]. In the literature different methods were used to enhance the thermal performance of energy systems like combi boilers. Some researcher used nanofluid to improve thermal efficiency of energy systems like combi boilers and heat pipes [5-8]. Also, some researchers used turbulator in the heat exchanger with the aim of increasing thermal efficiency [9]. In addition, some researchers investigated environmental effects of combi boilers. Vignali (2017) studied the environmental effects of two various combi boilers in 3 different climatic regions of Italy. The obtained results indicated that condensing combi boiler has 23% lower environmental impact in comparison with traditional one [10]. Haichao et al. (2013) investigated environmental impact of

combined district heating system. They developed a model to analyze the pollutant emissions of heating systems. Their results illustrated the potential of combined systems to reduce CO<sub>2</sub> emission [11]. Aste et al. (2013) investigated environmental and energy impact of domestic heating from 1999 to 2010 in Italy in terms of NO<sub>x</sub> emissions. They indicated that by using new boiler technologies energy saving and pollutant emissions reduction can be achieved [12]. In another study, Comaklı (2008) evaluated economic cost and energy efficiency of condensing and conventional combi boilers. They reported that condensing combi boiler could provide fuel saving by 8% in comparison with conventional type combi boiler [13]. Atmaca et al. (2015) studied transient behavior of two various combi boiler for providing hot water. Their findings indicated that condensing combi boiler have priority in terms of high efficiency and comfort [14]. Weiss et al. (2009) analyzed market diffusion and cost-benefit of condensing type combi boilers in the Netherlands and exhibited energy saving potential and gas emissions reduction by utilizing this type combi boilers [15]. Bălănescu & Homutescu (2018) experimentally investigated the performance of condensing boiler and stated that maximum fuel savings of 17.5% can be achieved in comparison with conventional boiler [16].

The main aim of this study is analyzing the effects of combi boiler type on pollutant gas emissions. In this regard three various combi boiler including conventional, condensing and full condensing type combi boilers have been selected in the experiments. Also, the experiments have been performed in different hot water outlet temperatures to investigate the temperature effect.

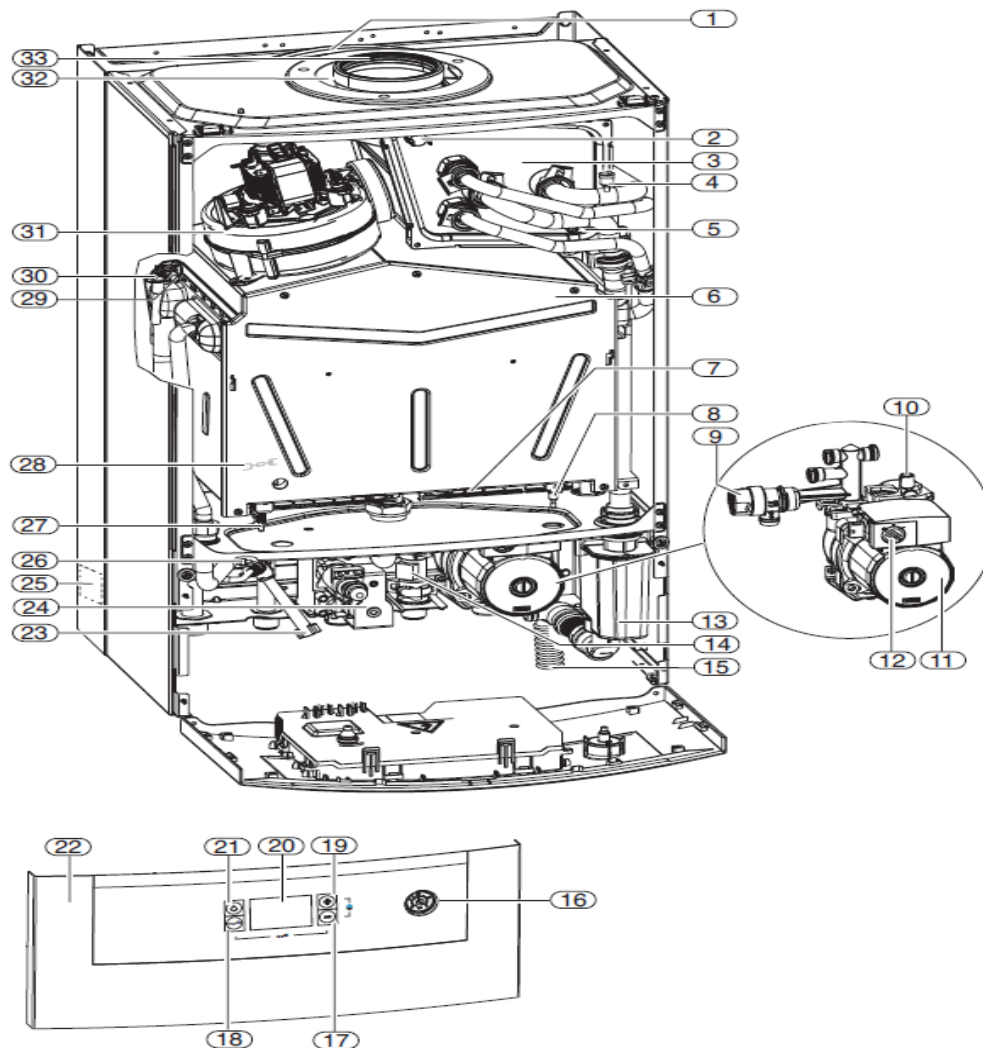
\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : ata\_khanlari@yahoo.com, akhanlari@thk.edu.tr

## 2. EXPERIMENTAL SETUP & PROCEDURE

This study investigates the effects of combi boiler type on pollutant gas emissions including CO<sub>2</sub>, NO and NO<sub>x</sub>. In this regard, three various combi boilers including; conventional combi boiler, condensing combi boiler and full condensing combi boiler produced by Buderus company have been used in the experiments. All of the selected combi boilers are used for space and water heating. To be able to compare the experimental results

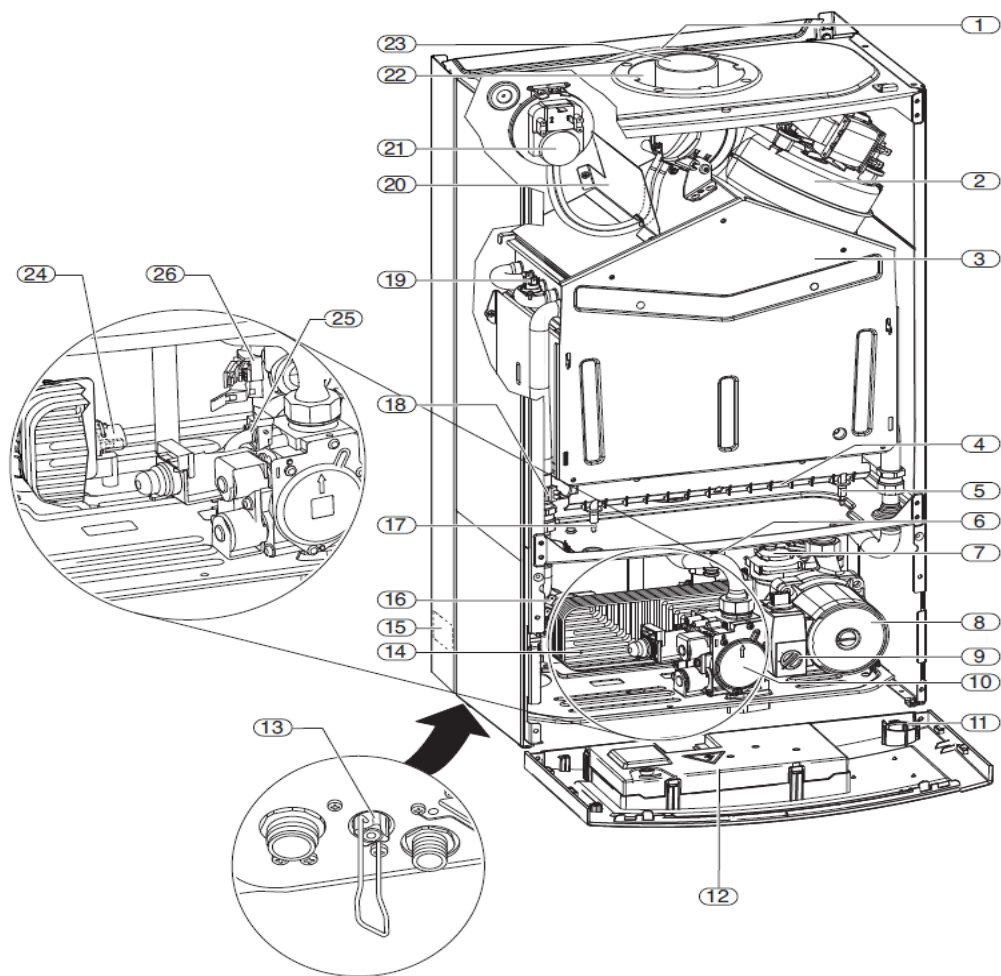
(Fig. 1) is a conventional type that generally is used for domestic heating and hot water providing. The second one (Fig. 2) is condensing combi boiler which recovers thermal energy from combustion gases. In conventional combi boilers combustion gases discharged from combi and a big part of energy is wasted. But in condensing type combi boilers a further heat exchanger is used to recover energy form combustion gases. The working principle of full condensing combi boiler (Fig. 3) is similar to



**Figure 1.** Conventional combi boiler components [17]; 1. Expansion vessel 2. Fan, 3. Combustion chamber, 4. Burner, 5. Ignition electrode, 6. Safety valve, 7. Inlet air vent, 8. Circulation pump, 9. Pump speed switch, 10. Gas armature, 11. Pressure gauge, 12. Control panel, 13. System filling device, 14. Plate heat exchanger, 15. Type label, 16. Pressure controller, 17. Detection electrode, 18. Water temperature sensor, 19. Safety thermostat, 20. Draught diverter, 21. Differential pressure switch, 22. Combustion air intake, 23. Exhaust gas outlet, 24. Temperature sensor, 25. Safety valve, 26. Flowmeter

all selected combi boilers have the same heating capacity (24 kW) and can run on natural gas and liquefied petroleum gas (LPG). The main components of used combi boilers are given in Fig. 1-3. The first combi boiler

condensing boiler working principle. Available latent and sensible heat in combustion gases recovered in full condensing combi boiler like condensing combi boiler. But, in full condensing combi boilers condensation occur

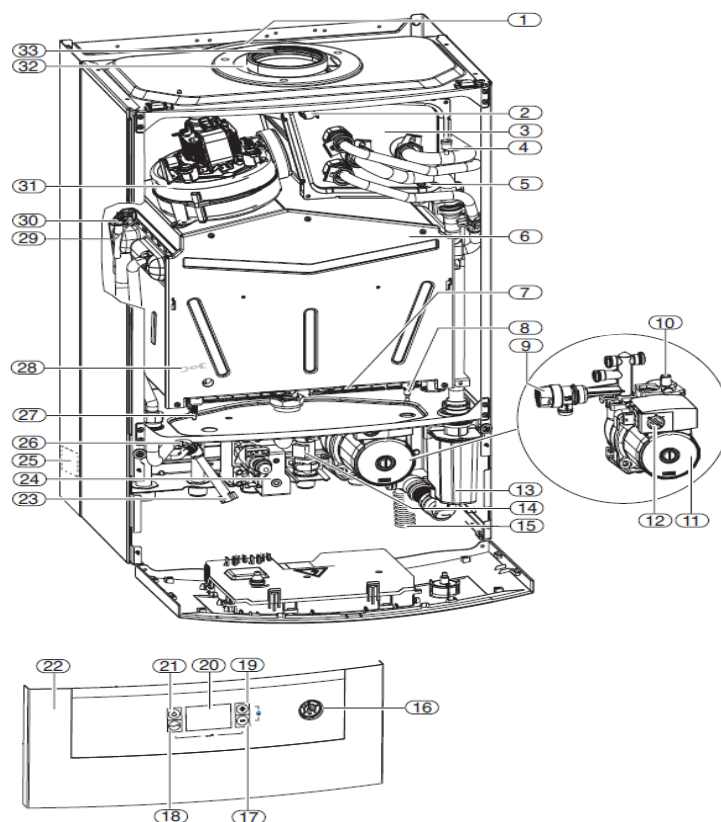


**Figure 2.** Condensing combi boiler [17]; 1. Expansion vessel, 2. Waste gas temperature controller, 3. Heat exchanger, 4. Manual air vent, 5. Condensate sensor, 6. Combustion chamber, 7. Burner, 8. Electrodes, 9. Safety valve, 10. Automatic air blower, 11. Circulation pump, 12. Pump speed variator, 13. Condensate trap, 14. Flowmeter, 15. Condensate discharge, 16. Pressure gauge, 17. Control key, 18. Mode, 19. Control key, 20. Display, 21. Stand-by mode, 22. Front panel, 23. System filling device, 24. Gas valve, 25. Control lid, 26. Temperature sensor, 27. Ignition electrode, 28. Combustion chamber, 29. Temperature sensor, 30. Temperature controller, 31. Fan, 32. Combustion air intake, 33. Waste gas duct

in the combustion chamber. This procedure leads to increase in combi boiler thermal performance.

To analyze combi boilers gas emission, ECOM J2KN emissions analyzer has been used and the amount of CO<sub>2</sub>, NO and NO<sub>x</sub> gases has been determined. ECOM J2KN emissions analyzer is shown in Fig. 4. Also, technical properties of ECOM J2KN gas analyzer are given in Table 1.

The experiments have been performed in 5 different hot water outlet temperature. In other words, when the temperature of the hot water outlet reached to the set temperature the data recorded. Hot water temperature was set to 40°C, 45°C, 50°C, 55°C and 60°C and each experiment repeated three time to obtain more reliable data. Fig. 5 shows gas emission analyzing in combi boiler using ECOM J2KN emissions analyzer.



**Figure 3.** Full condensing combi boiler [17]; 1. System filling device, 2. Temperature sensor, 3. Condensate drain, 4. Plate heat exchanger, 5. Waste gas temperature controller, 6. Gas pressure controller, 7. Maximum gas regulator, 8. Minimum gas regulator, 9. Expansion vessel, 10. Nitrogen filling valve, 11. Gas pipe, 12. Heating circuit outlet line, 13. Suction pipe, 14. Temperature sensor, 15. Inlet air vent, 16. Igniter, 17. Waste gas duct, 18. Combustion air intake, 19. Control lid, 20. Differential pressure switch, 21. Fan, 22. Waste gas backflow mixing unit, 23. Electrode Set, 24. Safety thermostat, 25. Heat block, 26. Condensate trap, 27. Control lid, 28. 3-way valve, 29. Type label, 30. Circulation pump, 31. Safety valve, 32. Flowmeter, 33. Filling and drain tap, 34. Control panel, 35. Pressure gauge



**Figure 4.** ECOM J2KN emissions analyzer

**Table 1.** Technical properties of ECOM J2KN gas analyzer

MEASUREMENT (KEY)	RANGE	ACCURACY	RESOLUTION
Oxygen (O)	0-21% vol.	± 2% Measured	0.1% vol.
Carbon Monoxide (C)	0-4,000 ppm	± 2% Measured	1 ppm
Carbon Monoxide (V)	0-40,000 ppm	± 2% Measured	1 ppm
Nitric Oxide (N)	0-4,000 ppm	± 2% Measured	1 ppm
Nitric Oxide (LN)	0-400 ppm	± 2% Measured	0.1 ppm
Nitrogen Dioxide (X)	0-500 ppm	± 2% Measured	1 ppm
Nitrogen Dioxide (X)	0-50 ppm	± 2% Measured	0.1 ppm
Sulfur Dioxide (S)	0-5,000 ppm	± 2% Measured	1 ppm
Combustibles (H)	0-6.00 % vol.	± 2% Measured	0.01% vol
Gas Temperature	32-1800 F	± 2% Measured	1 deg F
Ambient Temperature	0-250 F	± 2% Measured	1 deg F
Draft / Pressure	± 40" H <sub>2</sub> O	± 2% Measured	0.1% H <sub>2</sub> O
O <sub>2</sub> Correction	0-20% Oxygen		
Smoke Scale	0-9		
Carbon Dioxide CO <sub>2</sub>	0-CO <sub>2</sub> max of fuel	Calculated	
Efficiency	0-99.9%	Calculated	
Excess Air (Lambda)	1-infinity	Calculated	



**Figure 5.** Analyzing gas emissions in combi boiler by ECOM J2KN analyzer

### 3. RESULTS

In this section the experimental results are given and the effects of combi boiler type on pollutant gas emission are concluded. The effects of condensing type combi boiler on energy saving is obvious. But at the same time the environmental effect of combi boilers is important. Pollutant gas emissions like CO<sub>2</sub>, NO and NO<sub>x</sub> cause to global warming and acid rain. The main objective of these experiments is to clarify the amount of CO<sub>2</sub>, NO and NO<sub>x</sub> pollutant gases in the flue gas of different combi boilers. In addition, pollutant gas emissions for different hot water outlet temperatures have been analyzed. In other words, hot water outlet of the combi boiler has been adjusted in different temperature values and the amount of gas emissions related to each temperature has been measured.

Pollutant gas emissions for 40°C outlet hot water in different combi boilers is given in Fig. 6a. In the figure the amount CO<sub>2</sub>, NO and NO<sub>x</sub> gases in the flue gas are presented. As it can be seen in Fig. 6a full condensing combi boiler has the lowest amount of pollutant gas emissions and the conventional combi boiler has the highest amount of pollutant gas emissions. In addition, utilizing full condensing combi boiler led to reduction in CO<sub>2</sub>, NO and NO<sub>x</sub> emissions by 74%, 75% and 75% respectively in comparison to conventional combi boiler.

Flue gas temperature for 40°C outlet hot water in different combi boilers is given in Fig. 6b. Flue gas in the conventional combi boiler has the highest temperature value and in full condensing combi boiler has the lowest temperature value. In the condensing combi boiler, an extra heat exchanger was added to the system to recover the available latent and sensible heat in the flue gas. The result of recovering available heat in the flue gas led to reduction in the exit flue gas form the combi boiler. Full condensing combi boiler has the lower flue gas temperature in comparison to the condensing combi boiler because condensing phenomena occur in the combustion chamber. Simultaneous realization of

combustion processes and condensation in the combustion chamber cause to more reduction in flue gas temperature and increase in combi boiler thermal performance. Consequently, low energy needed to obtain the same heating performance by using condensing technology.

Fig. 7a shows pollutant gas emissions for 45°C outlet hot water in different combi boilers. The amount of CO<sub>2</sub>, NO and NO<sub>x</sub> emissions in the flue gas reduced in full condensing combi as 76%, 68.5% and 68.4%, respectively, in comparison to conventional combi boiler. Also, Fig. 7b shows flue gas temperature for 45°C outlet hot water for three combi boilers. As it can be seen flue gas temperature in full condensing boiler reduced as 46,5% in comparison with conventional combi boiler.

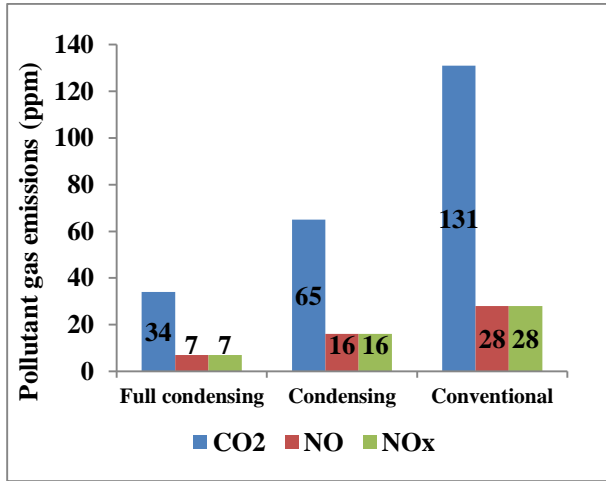
Pollutant gas emissions for 50°C outlet hot water in three various combi boilers is given in Fig. 8a. The same trend for pollutant gas emission is seen in 50°C. The amount of CO<sub>2</sub>, NO and NO<sub>x</sub> emissions in the flue gas decreased as 52.8%, 72.5% and 71.4%, respectively, in full condensing combi in comparison to conventional type boiler. Also, flue gas temperature for 50°C outlet hot water is given in Fig. 8b. Flue gas temperature in full condensing boiler reduced as 45% in comparison with conventional combi boiler.

In the Fig. 9a pollutant gas emissions for 55°C outlet hot water in three various combi boilers is presented. The amount of CO<sub>2</sub>, NO and NO<sub>x</sub> emissions in the flue gas decreased as 41.5%, 72.1% and 71.2%, respectively, in full condensing combi in comparison to conventional type boiler. Also, flue gas temperature reduced as 44% in comparison with conventional combi boiler (Fig. 9b).

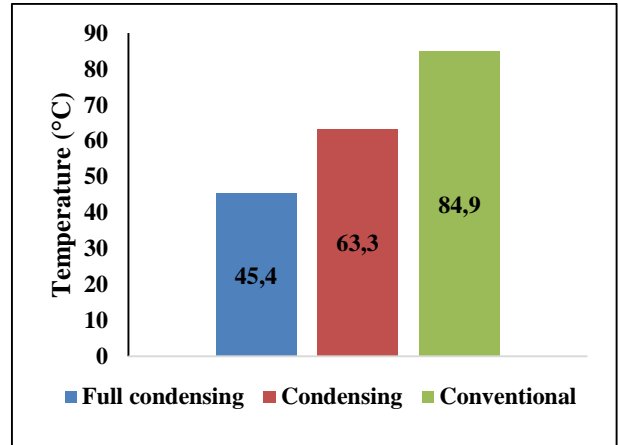
Finally, pollutant gas emissions for 60°C outlet hot water in three various combi boilers is presented in Fig. 10a. The amount of CO<sub>2</sub>, NO and NO<sub>x</sub> emissions in the flue gas decreased as 23.7%, 70.4% and 69.5%, respectively, in full condensing combi in comparison to conventional type boiler. Also, flue gas temperature for 60°C outlet hot water is shown in Fig. 10b. As it can be seen flue gas temperature reduced as 44.5% in comparison with conventional combi boiler.

In this study pollutant gas emissions of three various combi boilers have been analyzed in different hot water temperatures (40-60°C). Generally, it can be stated that utilizing condensing and full condensing combi boilers can be reduce pollutant gas emissions in comparison to conventional type. By analyzing these combi boilers' emissions in different working temperatures, it can be said that in low temperatures CO<sub>2</sub> emission reduction in condensing combi is higher than its reduction in high temperatures. The desired temperature of the domestic hot water supply is between 40-45°C and the combi boilers usually are used in this temperature range. Therefore, condensing and full condensing combi boilers can be more effective in comparison with conventional type, both in energy saving and environmentally friendly aspects.



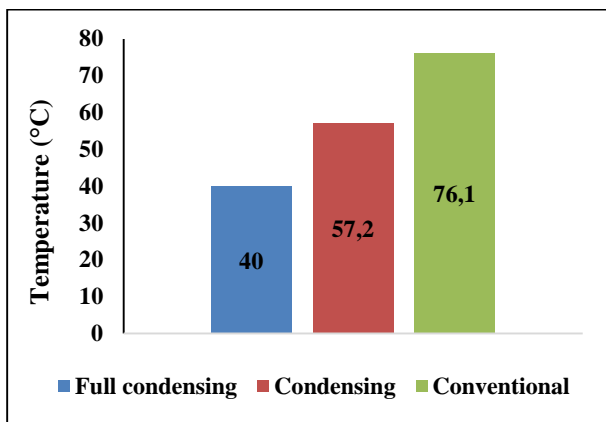


(a)



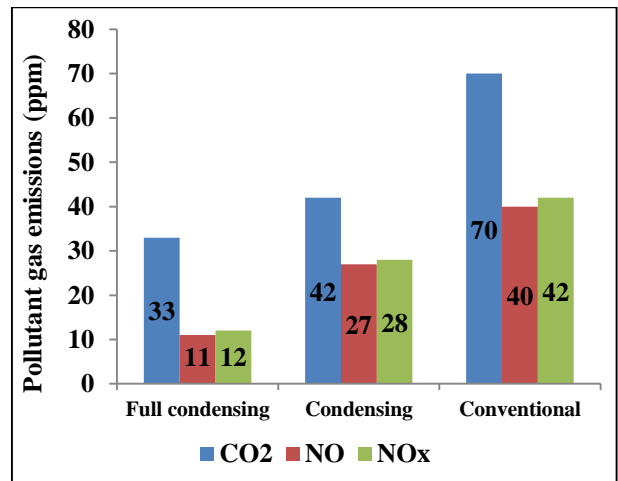
(b)

Figure 7. a) Pollutant gas emissions for 45°C outlet hot water, b) Flue gas temperature for 45°C outlet hot water.

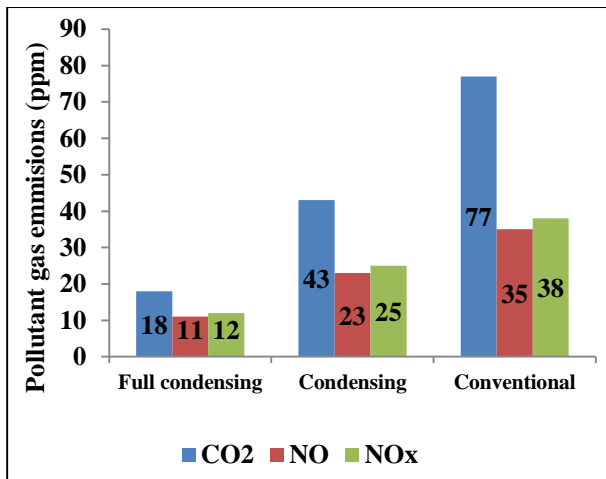


(b)

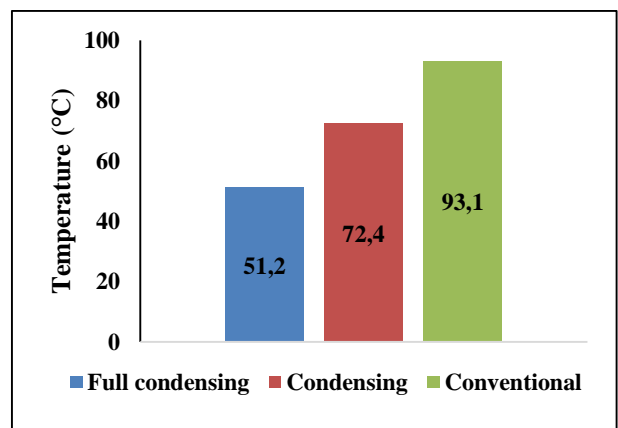
Figure 6. a) Pollutant gas emissions for 40°C outlet hot water, b) Flue gas temperature for 40°C outlet hot water.



(a)



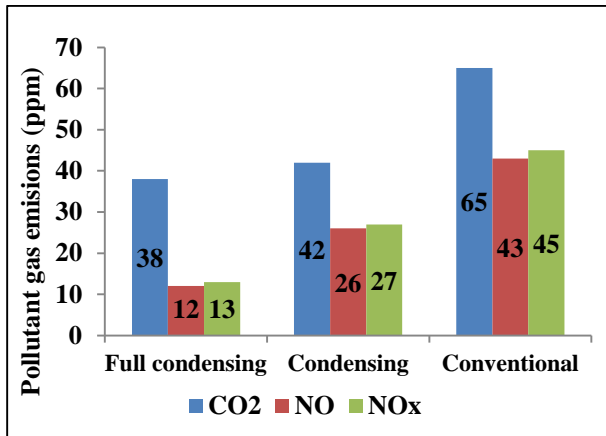
(a)



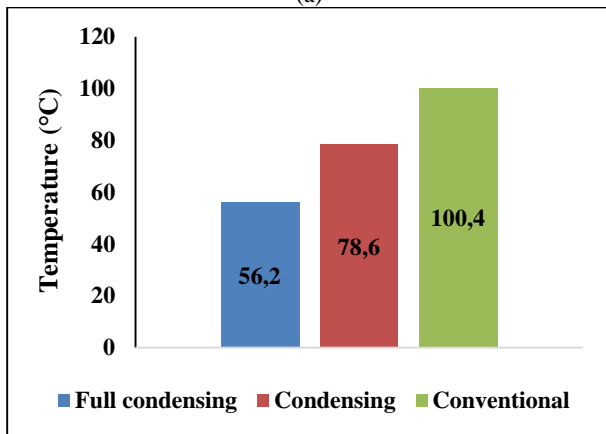
(b)

Figure 8. a) Pollutant gas emissions for 50°C outlet hot water, b) Flue gas temperature for 50°C outlet hot water.



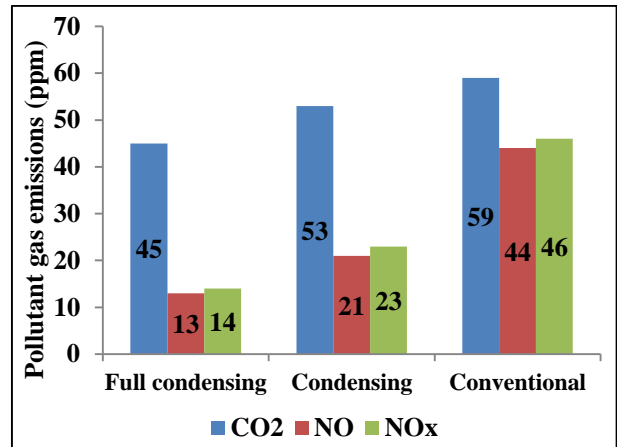


(a)

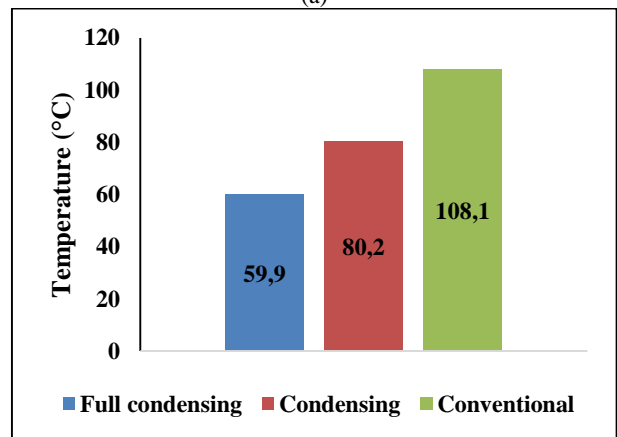


(b)

Figure 9. a) Pollutant gas emissions for 55°C outlet hot water, b) Flue gas temperature for 55°C outlet hot water.



(a)



(b)

Figure 10. a) Pollutant gas emission for 60°C outlet hot water, b) Flue gas temperature for 60°C outlet hot water.

#### 4. CONCLUSION

In the present study the effects of combi boiler type on pollutant gas emissions have been investigated. In this regard three different combi boiler including conventional, condensing and full condensing type combi boilers have been selected in the experiments. The measurements have been performed in different hot water outlet temperatures to show the effect of temperature. Generally, it can be stated that utilizing condensing and full condensing combi boilers can reduce pollutant gas emissions in comparison to conventional type. Also, by analyzing these combi boilers emissions in different working temperatures, it can be said that in low temperatures CO<sub>2</sub> emission reduction in condensing combi is higher than its reduction in high temperatures.

#### DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS

The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

#### REFERENCES

- [1] Afshari, F., Comakli, O., Karagoz, S. and Zavaragh, H.G., "A thermodynamic comparison between heat pump and refrigeration device using several refrigerants", *Energy and Buildings*, 168: 272-283, (2018).
- [2] Khanlari, A. and Ay, İ., "A numerical study on determination of the optimal hole diameter and pitch value for the unglazed transpired solar collectors", *Journal of Politeknik*, 22 (1): 163-168, (2019).
- [3] Lomas, K. J., Oliveira, S., Warren, P., Haines, V.J. and Chatterton, T., Beizaee, A., Prestwood, E., Gething, B., "Do domestic heating controls save energy? A review of the evidence", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93: 52-75, (2018).
- [4] Casanovas-Rubio, M. D. M. and Armengou, J., "Decision-making tool for the optimal selection of a domestic water-heating system considering economic, environmental and social criteria: Application to Barcelona (Spain)", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91: 741-753, (2018).

- [5] Sözen A., Öztürk, A., Özalp, M. and Çiftçi, E., “Influences of alumina and fly ash nanofluid usage on the performance of recuperator including heat pipe bundle”, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16: 5095-5100, (2019).
- [6] Gürü, M., Sözen, A., Karakaya, U. and Çiftçi, E., “Influences of bentonite-deionized water nanofluid utilization at different concentrations on heat pipe performance: An experimental study”, *Applied Thermal Engineering*, 148: 632-640, (2019).
- [7] Khanlari, A., Sözen, A. and Variyenli, H.İ., “Simulation and experimental analysis of heat transfer characteristics in the plate type heat exchangers using TiO<sub>2</sub>/water nanofluid”, *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 29: 1343-1362, (2019).
- [8] Khanlari, A., Sözen, A., Variyenli, H.İ. and Gürü, M., “Comparison between heat transfer characteristics of TiO<sub>2</sub>/deionized water and kaolin/deionized water nanofluids in the plate heat exchanger”, *Heat Transfer Research*, 50 (5): 435-450, (2019).
- [9] Afshari, F., Zavaragh, H.G. and Di Nicola, G., “Numerical analysis of ball-type turbulators in tube heat exchangers with computational fluid dynamic simulations”, *International journal of Environmental Science and Technology*, 16: 3771-3780, 2019.
- [10] Vignali, G., “Environmental assessment of domestic boilers: A comparison of condensing and traditional technology using life cycle assessment methodology”, *Journal of Cleaner Production*, 142: 2493-2508, (2017).
- [11] Haichao, W., Jiao, W., Lahdelma, R., Pinghua, R. and Shuhui, Z., “Atmospheric environmental impact assessment of a combined district heating system”, *Building and Environment*, 64: 200-212, (2013).
- [12] Aste, N., Adhikari, R.S., Compostella, J. and Del Pero, C., “Energy and environmental impact of domestic heating in Italy: Evaluation of national NO<sub>x</sub> emissions”, *Energy Policy*, 53: 353-360, (2013).
- [13] Comaklı, K., “Economic and environmental comparison of natural gas fired conventional and condensing combi boilers”, *Journal of the Energy Institute*, 81 (4): 242-246, (2008).
- [14] Atmaca, A.U., Erek, A. and Altay, H.M., “Investigation of transient behaviour of combi boiler type appliances for domestic hot water”, *Applied Thermal Engineering*, 82: 129-140, (2015).
- [15] Weiss, M., Dittmar, L., Junginger, M., Patel, M.K. and Blok, K., “Market diffusion, technological learning, and cost-benefit dynamics of condensing gas boilers in the Netherlands. *Energy Policy*, 37: 2962-2976, (2009).
- [16] Bălănescu, D.T. and Homutescu, V.M., “Experimental investigation on performance of a condensing boiler and economic evaluation in real operating conditions”, *Applied Thermal Engineering*, 143: 48-58, (2018).
- [17] [www.buderus.com](http://www.buderus.com)



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# PEO kaplamalara CeO<sub>2</sub> nanopartikül ilavesinin korozyon davranışına etkisi

## *The effect of CeO<sub>2</sub> nanoparticles addition to PEO coatings on corrosion behavior*

Yazar(lar) (Author(s)): Ahmet Melik YILMAZ<sup>1</sup>, Fatma SONGUR<sup>2</sup>, Ersin ARSLAN<sup>3</sup>, Burak DİKİCİ<sup>4</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-2939-3592

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-5730-0085

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0002-7071-9497

ORCID<sup>4</sup>: 0000-0002-7249-923X

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Yılmaz A. M., Songur F., Arslan E. ve Dikici B., "PEO kaplamalara CeO<sub>2</sub> nanopartikül ilavesinin korozyon davranışına etkisi", *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1285-1295, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.665497

# PEO Kaplamalara CeO<sub>2</sub> Nanopartikül İlavesinin Korozyon Davranışına Etkisi

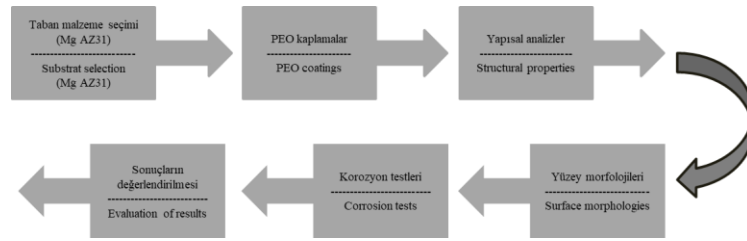
## The Effect of CeO<sub>2</sub> Nanoparticles Addition to PEO Coatings on Corrosion Behavior

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Mg AZ31 alaşımları üzerine nano CeO<sub>2</sub> ilaveli PEO kaplamalar büyütülmüştür. / Nano CeO<sub>2</sub> added PEO coatings were grown on Mg AZ31 alloys.
- ❖ Artan nano CeO<sub>2</sub> ilavesi ile birlikte kaplama kalınlığı değerinin düştüğü gözlenmiştir. / It has been observed that the coating thickness value decreases with increasing nano CeO<sub>2</sub> addition.
- ❖ Tüm kaplamaların korozyon oranlarının AZ31 Mg alaşımından daha yüksek olduğu belirlenmiştir. / It was found that the corrosion rates of the coatings were higher than AZ31 Mg alloy.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Değişken miktarlarda CeO<sub>2</sub> nanopartikül ihtiva eden elektrolitlerde Mg AZ31 alaşımları üzerine PEO kaplamalar büyütülmüştür. Kaplamaların yapısal özellikleri, yüzey morfolojileri ve korozyon özellikleri değerlendirilmiştir. / PEO coatings were grown on Mg AZ31 alloys in electrolytes containing variable amounts of CeO<sub>2</sub> nanoparticles. Structural properties, surface morphologies and corrosion properties of coatings were evaluated.



Şekil. Deney akış diyagramı /Figure. Flow chart of experiment

### Amaç (Aim)

PEO kaplamalara CeO<sub>2</sub> nanopartikül ilavesi ile Mg AZ31 alaşımlarının korozyon özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. / It was aimed to improve the corrosion properties of Mg AZ31 alloys by adding CeO<sub>2</sub> nanoparticles to PEO coatings.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Değişken miktarlarda CeO<sub>2</sub> nanopartikül içeren elektrolitlerde PEO kaplamalar büyütülmüş ve kaplamaların potansiyodinamik polarizasyon testleri yapılmıştır. / PEO coatings were grown on electrolytes containing variable amounts of CeO<sub>2</sub> nanoparticles and potentiodynamic polarization tests of the coatings were performed.

### Özgünlük (Originality)

Farklı miktarlarda nanopartikül ilavesinin PEO kaplamaların korozyon direnci üzerine etkisi araştırılmıştır. / The effect of adding different amounts of nanoparticles on the corrosion resistance of the PEO coatings has been investigated.

### Bulgular (Findings)

En iyi korozyon direnci 1g/l nano CeO<sub>2</sub> kullanılarak büyütülen kaplamada elde edilmiştir. / The best corrosion resistance was obtained in the coating grown using 1g/l nano CeO<sub>2</sub>.

### Sonuç (Conclusion)

Kaplamaların korozyon direncindeki değişim, nanopartikül ilave miktarının yapısal ve fiziksel özellikler üzerindeki etkisi ile ilişkilendirilmiştir. / The change in corrosion resistance of the coatings has been associated with the effect of the amount of nanoparticle addition on structural and physical properties.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# PEO Kaplamalara CeO<sub>2</sub> Nanopartikül İlavesinin Korozyon Davranışına Etkisi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Ahmet Melik YILMAZ, Fatma SONGUR\*, Ersin ARSLAN, Burak DİKİCİ**

Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Atatürk Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 26.12.2019 ; Kabul/Accepted : 06.01.2020)

## ÖZ

Endüstriyel bir yüzey modifikasyon işlemi olarak bilinen Plazma Elektrolitik Oksidasyon (PEO) yöntemi; Mg ve alaşımlarının korozyon ve aşınma özelliklerinin iyileştirilmesinde çoğunlukla tercih edilen bir kaplama tekniğidir. Bununla birlikte, PEO kaplama tabakasının sınırlı faz kompozisyonu ve gözenekli yapısı uzun vadede korozyondan koruma hedefini olumsuz yönde etkilemektedir. Oksit tabakasının büyümesi esnasında oluşan gözeneklerin mikro veya nano boyutlu partiküllerle doldurulması tekniği son yıllarda PEO işlemine yeni bir yaklaşım kazandırmıştır. Bu sayede partiküller yardımıyla kusurların kapatılabileceği ve üretilen kaplamaların kompozisyon aralığı ve işlevselliğinin artırılabilceği düşünülmektedir. Bu çalışma; magnezyum alaşımı üzerine büyütülen PEO kaplamalara partikül ilavesinin yüzey morfolojisine, mikro yapıya, faz kompozisyonuna ve korozyon davranışına nasıl etki edeceği araştırması üzerine odaklanmıştır. Bu amaç doğrultusunda çalışma MgAZ31 taban malzemesi üzerine PEO yöntemi ile nano boyutlu seryum oksit (CeO<sub>2</sub>) partikülleri içeren MgO/CeO<sub>2</sub> nanokompozit kaplamaların büyütülmesini hedeflemiştir. Farklı miktarlarda CeO<sub>2</sub> nano partikül içeren elektrolit içerisinde büyütülen kaplamaların yapısal özellikleri, yüzey morfolojisi, kaplama kalınlıkları ve korozyon davranışı partikülsüz PEO kaplaması ile karşılaştırılmıştır. Araştırma sonuçları nano partiküllerin PEO kaplamaların yoğun gözenekli yapısını tamamen doldurmadığını, kaplama büyüme hızını azalttığını ve CeO<sub>2</sub> nano partiküllerin yapı içerisinde inert olarak dâhil olduğunu gösterdi. Ayrıca partikül miktarına bağlı olarak MgO/CeO<sub>2</sub> nanokompozit kaplamaların korozyon direncinin partikülsüz MgO kaplamalara göre daha yüksek olduğu tespit edildi.

**Anahtar Kelimeler:** Mg AZ31, plazma elektrolitik oksidasyon, CeO<sub>2</sub>, korozyon.

## The Effect of CeO<sub>2</sub> Nanoparticles Addition to PEO Coatings on Corrosion Behavior

### ABSTRACT

Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) is a coating technique commonly chosen to improve the corrosion and wear properties of Mg and its alloys. Besides, the limited phase composition and porous structure of the PEO coating layer influence negatively the long-term objective of corrosion protection. In recent years, the technique filing the micro or nano-sized particles into porous oxide layer during coating process is a novel approach for PEO. This investigation focuses on how surface morphology, microstructure, phase composition and corrosion behavior of incorporation of particles into PEO coatings on AZ31 magnesium alloy. This study aims at growth MgO/CeO<sub>2</sub> nanocomposite coatings by using PEO technique in the electrolyte containing nano-sized cerium oxide (CeO<sub>2</sub>) particles on MgAZ31 substrate. The structural properties, surface morphology, coating thickness and corrosion behavior of the coatings grown in electrolyte containing different amounts of CeO<sub>2</sub> nanoparticles were compared with the particle-free PEO coating. The research results showed that the nanoparticles could not completely fill the dense porous structure of the PEO coatings, reduced the coating growth rate and that the CeO<sub>2</sub> nanoparticles are incorporated into the structure as inert. In addition, it is determined that the corrosion resistance of MgO/CeO<sub>2</sub> nanocomposite coatings is higher than MgO coatings without particle.

**Keywords:** Mg AZ31, plasma electrolytic oxidation, CeO<sub>2</sub>, corrosion.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Plazma Elektrolitik Oksidasyon (PEO) yöntemi; geleneksel anotlama işlemine benzer, hafif metal ve alaşımlarının (Al, Mg, Ti, Zr gibi) yüzeyleri üzerine koruyucu oksit tabakasının büyütülmesi esasına dayanan bir yüzey kaplama tekniğidir [1-7]. PEO kaplamalarının oluşum mekanizması, metal/elektrolit ara yüzeyinde elektro, termal ve plazma-kimyasal reaksiyonlarının gerçekleşmesi nedeniyle oldukça karmaşıktır [5]. PEO yöntemi ile büyütülen kaplamaların yüzey morfolojisi,

kompozisyonu ve mikroyapısal özellikleri elektriksel parametrelere ve elektrolitin kimyasal bileşimine bağlıdır. Elektriksel parametrelerin (Akım, Gerilim, Akım Modu, Frekans ve Görev Döngüsü) ve elektrolit kompozisyonun optimizasyonuna yönelik birçok çalışma yapılmakta ve bu sayede kaplamaların mikro yapısal özellikleri önemli ölçüde değiştirilebilmektedir. Bütün bunlara rağmen yine de yoğun gözenekli yüzey özellikleri, sınırlı kimyasal kompozisyonu ve yüksek enerji tüketimi, PEO kaplamalarının uygulama yelpazesini daraltmaktadır [8-11]. Son yıllarda yapılan çalışmaların birçoğu, gözenekli PEO kaplamalarının işlevselliğini artırmak amacıyla elektrolit içerisine

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : fsongur@atauni.edu.tr

partikül ilave edilmesine yönelmiştir. Literatürde elektrolit içerisinde partikül ilavesinin PEO prosesinin elektriksel davranışını etkilediği [12-15] partiküllerin özellikle voltaj çıkış hızını yavaşlattığı [14] ve son voltaj değerini düşürdüğü rapor edilmektedir [15]. Diğer taraftan partiküllerin PEO kaplama tabakası içerisine dâhil olma mekanizması da araştırmacıların ayrı bir tartışılma konusu olmuştur. PEO işlemi sırasında partiküllerin çoğunluğunun gözeneklerin içerisine biriktiği, gözeneklerin partiküllerin konuşlanma bölgeleri olduğu [13], ayrıca partiküllerin reaktif veya inert olarak kaplama içerisine dâhil olduğu birkaç araştırmacı tarafından ifade edilmektedir [16].

Oksit partikül ilaveli PEO kaplamaların yüzey morfolojisi, kalınlığı ve mikro yapısı üzerine yapılan bazı çalışmalarda oksit partiküllerin elektrolite eklenmesi ile kaplama yüzeyindeki gözeneklerin sayısının ve/veya boyutunun azaldığı iddia edilmiştir [13,17-23]. Bununla birlikte, bazılarında da partikül ilavesinin kaplama yüzeyini çok fazla etkilemediğini hatta gözenek sayısının arttığını ifade etmişlerdir [15,24]. Kaplama yoğunluğu ile ilgili yapılan araştırmalarda ise oksit partikül ilavesinin yoğunluğunu arttırdığı belirtilmiştir [15,16-18,19,24,25]. Diğer taraftan oksit partikül ilavesinin kalınlığa olan etkisi çok açık değil ve çelişkilidir. Yapılan bazı çalışmalarda, kullanılan partiküllerin kalınlık artışına doğrudan bir etkisi bulunmadığı ve partikülsüz büyütülen kaplamalarla aynı kaplama kalınlığı elde edildiği ifade edilirken [13,15,26] bazı araştırmalarda da partikülün kaplama kalınlığını bir miktar arttırdığı belirtilmiştir [21,25,27,28].

Magnezyum ve alaşımları üzerine büyütülen PEO kaplamaları modifiye etmek amacıyla çeşitli oksit partiküller kullanılmaktadır. Genellikle, bu oksit partiküller içerisinde düşük ergime noktasına sahip olanlar, yüksek ergime noktasına sahip olanlara göre daha kolay ve reaktif olarak kaplama içerisine dâhil olabilmektedirler. Örneğin literatürde; kil partikülleri (<1200 °C) AM50 Mg alaşımı üzerine büyütülen PEO kaplama içerisine tam reaktif olarak dâhil olduğu [20,29] bunun yansısı daha yüksek ergime noktasına sahip olan diğer oksit partiküllerin ise (ZrO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) genellikle inert olarak [13,15,17,21,22,24,26,30,31] veya Mg<sub>2</sub>Zr<sub>5</sub>O<sub>12</sub>, Mg<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub> ve MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> fazlarının oluşumu ile kısmen reaktif olarak dâhil oldukları belirtilmiştir [14,16,19,25,26,28,32,33,34]. Uygulanan elektriksel ve elektrolit koşulları, kaplama kompozisyonunun yanı sıra partiküllerin kaplama içerisine dâhil olma modunu da ifade edilmektedir. Kaplama şartlarına bağlı olarak, ZrO<sub>2</sub> partiküllerinin, hem inert [13,26] hem de kısmen reaktif olarak kaplama içerisine dâhil olabildiği iddia

edilmektedir [16,25,34]. Örneğin Mg<sub>2</sub>Zr<sub>5</sub>O<sub>12</sub> reaksiyon fazı sadece fosfat elektrolit içerisinde büyütülen kaplamalarda elde edilirken silikatlı elektrolitte gözlenmemiştir [16]. Buna karşın ZrO<sub>2</sub> partikülleri benzer silikatlı elektrolitte, Doğru Akım (DC) yerine Alternatif Akım (AC) modunda reaktif olarak kaplama içerisine dâhil olmuşlardır [34].

Bu çalışma, MgAZ31 alaşımlarının zayıf korozyon özelliklerinin iyileştirilmesine odaklanmıştır. Bu amaçla, Mg AZ31 taban malzemesi üzerine PEO yöntemi ile magnezyum oksit (MgO) ve nano boyutta seryum oksit (CeO<sub>2</sub>) partikülleri içeren MgO/CeO<sub>2</sub> nanokompozit kaplamalar büyütülmüştür. Farklı konsantrasyonda nanopartikül içeren elektrolitlerde büyütülen kaplamaların yapısal özellikleri XRD, yüzey morfolojisi ve elementel analizleri SEM-EDS, kaplama kalınlıkları ise EBAN 5006 eddy akımı kalınlık ölçüm cihazları ile belirlenmiştir. Ayrıca, Mg AZ31 alaşımlarının üzerine büyütülen MgO ve MgO/CeO<sub>2</sub> nanokompozit kaplamaların korozyon deneyleri %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde gerçekleştirilmiştir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

Taban malzeme olarak kimyasal kompozisyonu Çizelge 1’ de verilen boyutları 25x25x3 mm boyutlarında Mg AZ31 alaşımı seçilmiştir. Taban malzeme yüzeyi önce sırasıyla 180, 240, 400, 600, 800, 1200 mesh boyutunda SiC aşındırıcı kâğıtlar kullanılarak zımparalanmış daha sonra elmas süspansiyon ile parlatılarak Ra≈0,15 µm pürüzlülük değerine ulaşılmıştır. Taban malzemelerin pürüzlülük değerleri kaplama öncesi ve sonrası Mahr M2 marka profilometre ile ölçülmüştür.

Mg AZ31 taban malzeme üzerine MgO/CeO<sub>2</sub> nanokompozit kaplama işlemi Faraday Elektrik Elektronik San ve Tic. Ltd. Şti. tarafından dizayn edilen AC güç kaynağı ve paslanmaz çelik kaplama banyosu ikilisinden oluşan PEO sistem ile gerçekleştirilmiştir. Kaplama işlemi için bipolar akım modu seçilmiştir. Kaplama işleminde elektrolit kompozisyonunu oluşturmak için Sigma-Aldrich menşei sodyum fosfat (Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>), potasyum hidroksit (KOH) ve potasyum florür (KF) kimyasalları ve Nanografi Nano Technology menşei 8-28 nm boyutu aralığında CeO<sub>2</sub> nanopartikül kullanılmıştır. Çizelge 2’de her bir deney için kullanılan kimyasalların miktarları verilmiştir. Nano partikülsüz, 1 g/l CeO<sub>2</sub>, 2 g/l CeO<sub>2</sub> ve 4 g/l CeO nano partikül içeren deneyler sırasıyla MO, MC1, MC2, MC4 olarak kodlanmıştır. PEO kaplama şartları Çizelge 3’de verilmiştir.

**Çizelge 1.** Mg AZ31 taban malzemesinin kimyasal kompozisyonu (Chemical composition of Mg AZ31 substrate)

Element	Al	Zn	Fe	Cu	Si	Mn	Mg
% Ağırlık	3,069	1,133	0,019	0,001	0,131	0,486	Kalan



**Çizelge 2.** PEO işleminde kullanılan elektrolit kompozisyonları (Electrolyte compositions used in PEO process)

Miktar (g/L)				
Kaplamalar	Sodyum fosfat (Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	Potasyum hidroksit (KOH)	Potasyum florür (KF)	Seryum oksit (CeO <sub>2</sub> )
MO	4	1	1	0
MC1	4	1	1	1
MC2	4	1	1	2
MC4	4	1	1	4

**Çizelge 3.** PEO kaplama şartları (PEO coating conditions)

PEO Kaplama Parametreleri				
Frekans (Hz)	Pozitif Voltaj (V)	Negatif Voltaj (V)	Görev Döngüsü (%)	Zaman (dk)
1000	600	-150	10	10

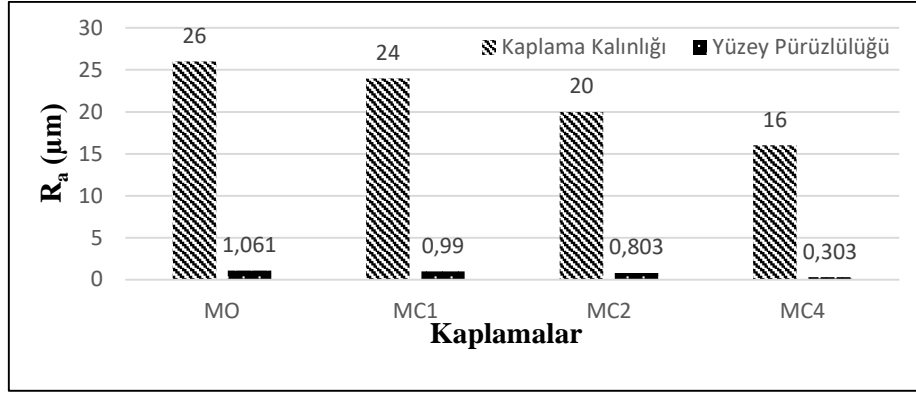
PEO kaplama işlemi öncesi parlatma işlemi gerçekleştirilen Mg AZ31 taban malzemeler ultrasonik olarak alkolle temizlenip kurutulduktan sonra PEO ünitesi banyosuna bağlandı. MO kaplamaları için potasyum hidroksit (KOH), potasyum florür (KF) ve sodyum fosfat (Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) kimyasallarından oluşan elektrolit, MC1, MC2 ve MC4 kaplamaları için ise MO kaplaması için kullanılan kimyasallara ilaveten litrede 1, 2 ve 4 gr CeO<sub>2</sub> nanopartikül içeren elektrolitler kullanıldı. PEO işlemi esas gereği anot olarak taban malzeme (Mg AZ31) katot olarak ise paslanmaz çelik banyo duvarları seçildi. MgO ve MgO/CeO<sub>2</sub> nanokompozit kaplamalar 600 V/ -150 V gerilim, 1000 Hz frekans, %10 görev döngüsü ve 10 dakika kaplama süresi parametrelerinde gerçekleştirildi. Proses süresince homojen dağılımın sağlanması amacıyla elektrolit bir karıştırıcı ile karıştırıldı. Banyo cidarlarından geçirilen soğuk su vasıtasıyla elektrolitin sıcaklığı ~25°C'de tutuldu. Kaplama işlemi sonrası numuneler saf su ve alkolle temizlenerek kurutuldu. Kaplama işlemi öncesi ve sonrası numunelerin yapısal analizleri Panalytical Empyrean X-Ray Difraktometresi ile yapıldı. XRD ölçümleri  $\lambda=1.5404 \text{ \AA}$  dalga boyunda, Cu-K $\alpha$  radyasyon kaynağı kullanılarak 10-90° tarama açısında, 2 derece/dk tarama hızında ve 0,1° tarama adımında gerçekleştirildi. XRD sonuçları JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) dosyaları kullanılarak mukayese edildi. PEO metodu ile büyütülen MgO ve MgO/CeO<sub>2</sub> nanokompozit kaplamaların yüzey topografyası Zeiss Gemini Sigma 300 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM-Scanning Electron Microscope) ile elementel analizler ise enerji dağılımlı spektroskopisi (EDS-Energy

Dispersive Spectroscopy) ile belirlendi. Ayrıca MgO ve MgO/CeO<sub>2</sub> nanokompozit kaplamaların kalınlıkları EBAN 5006 Paint Tester Equipment cihazıyla Non-Ferrous prob ile 5 farklı noktadan ölçüm alınarak tespit edildi. Mg AZ31 taban malzemesi, MgO ve nanokompozit MgO/CeO<sub>2</sub> kaplamaların korozyon deneyleri %3.5'lük NaCl çözeltisi içerisinde, Gamry PCI14/750 potansiyostat/galvanostat cihazı kullanılarak gerçekleştirildi. Polarizasyon ölçümleri Ag/AgCl (RE-referans elektrot), platin tel (CE-karşı elektrot) ve deney numunesi (WE-çalışma elektrotu) kullanılarak üç elektrot tekniğine göre yapıldı. Numune açık devre potansiyeline erişmesi için 30 dakika beklendi. Numuneler -0.3/2 V potansiyel aralığı içinde 1 mVs<sup>-1</sup>'lik tarama hızında potansiyodinamik polarizasyon ölçümlerine tabi tutuldu. Kaplamaların korozyon dirençleri, potansiyodinamik polarizasyon ölçümleri sonucu elde edilen Ekor ve Ikor değerleri karşılaştırılarak incelendi.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

#### 3.1. Kaplama Kalınlığı ve Yüzey Pürüzlülüğü (Coating Thickness and Surface Roughness)

Mg AZ31 taban malzemesi üzerine PEO yöntemiyle büyütülen MgO ve MgO/CeO<sub>2</sub> nanokompozit kaplamaların kaplama kalınlıkları ve yüzey pürüzlülükleri (Ra) grafiksel olarak Şekil 1'de verilmiştir.



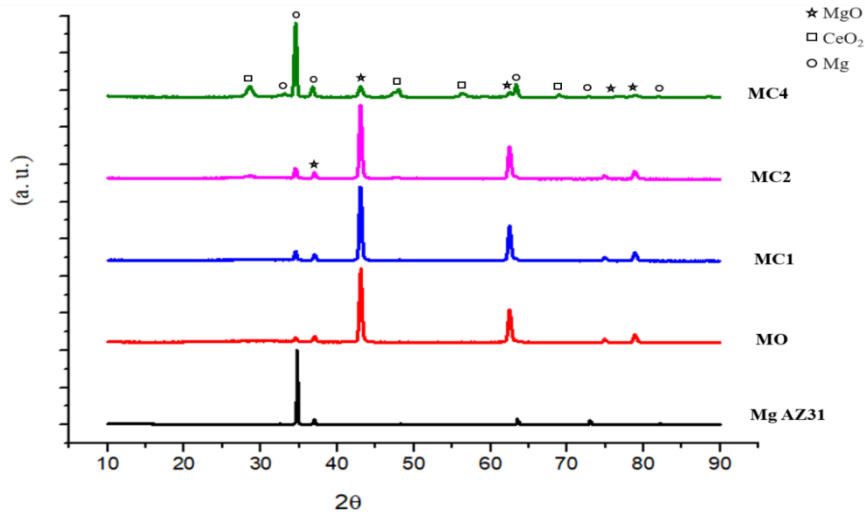
Şekil 1. Kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü (Coating thickness and surface roughness)

Şekil 1’de görüldüğü gibi Mg AZ31 taban malzemesi üzerine büyütülen MgO ve MgO/CeO<sub>2</sub> nanokompozit kaplamaların pürüzlülük değerleri CeO<sub>2</sub> nanopartikül miktarının artışı ile azalmıştır. En düşük pürüzlülük değeri Ra = 0,303 µm ile MC4 numunesinde (4 gr/l CeO<sub>2</sub> ilaveli elektrolit içerisinde büyütülen kaplama), en yüksek pürüzlülük değeri ise Ra = 1,061 µm ile MO numunesinde (partikülsüz MgO kaplama) elde edilmiştir. CeO<sub>2</sub> nanopartikül miktarındaki artışla birlikte pürüzlülük değerindeki azalma porlar içerisinde bu partiküllerin daha fazla dolması ile açıklanabilir. Bu durum özellikle Şekil 3 (d)’de verilen SEM görüntüsüyle doğrulanmakta ve literatürle de paralellik arz etmektedir [11]. Partikülsüz ve farklı miktarlarda nanopartikül içeren elektrolit içerisinde büyütülen MgO ve MgO/CeO<sub>2</sub> nanokompozit kaplamaların kalınlık değerleri incelendiğinde MO kaplaması için 26 µm ile en yüksek kaplama kalınlığı, MC4 (4 g/l CeO<sub>2</sub> ilaveli) kaplaması için ise 16 µm ile en düşük kaplama kalınlığı elde edilmiştir. Artan partikül miktarı ile kalınlıktaki azalma CeO<sub>2</sub> nanopartiküllerin PEO işlemi esnasında oluşan deşarj kanallarını etkilemesi ile açıklanabilir. Bu durum literatürle paralellik arz edip benzer şekilde açıklanmıştır [35].

### 3.2. XRD Analizi (XRD Analysis)

Mg AZ31 taban malzemesinin ve farklı miktarlarda CeO<sub>2</sub> nanopartikül içeren elektrolitler içerisinde PEO yöntemi kullanılarak büyütülen MgO ve MgO/CeO<sub>2</sub> nanokompozit kaplamaların XRD multi-plot spektraları Şekil 2’de verilmiştir. Mg AZ31 alaşımı taban

malzemesine ait XRD spektrumu incelendiğinde 2θ=20-90° saçılma aralığında magnezyumca zengin hegzagonal sıkı paket fazlardan oluştuğu tespit edilmiştir. Magnezyumu karakterize eden %100 yoğunluktaki (002) pik 2θ=34,385° de yansıma vermiştir. Bu pikin varlığına her bir kaplamaya ait XRD spektrumlarında rastlanmıştır. XRD analizlerinde Mg pikinin gözlenme nedeni, diğer araştırmacılarında ifade ettikleri gibi kaplamanın gözenekli yapısından kaynaklanmaktadır [32]. Partikül ilavesiz MO kaplamasına ait XRD spektrumu incelendiğinde MgO’yu karakterize eden 2θ=43,038°’de en yüksek yoğunlukta (200) ve 2θ=62,497° de ise ikinci yüksek yoğunlukta (220) pikler gözlenmiştir. Ayrıca taban malzemedan gelen düşük yoğunluktaki bir yansıma da belirlenmiştir. CeO<sub>2</sub> nanopartikül ilaveli MC1, MC2 ve MC4 kaplamalarına ait XRD spektrumu incelendiğinde ise MO kaplamasına benzer şekilde taban malzemeye ve MgO’ya ait pikler gözlenmiştir. Ayrıca 2θ = 28,550°’de en yüksek yoğunlukta ve 2θ =47,490° de ise ikinci yüksek yoğunlukta sırasıyla CeO<sub>2</sub>’ye ait (111) ve (220) yansımaları tespit edilmiştir. Diğer taraftan MC4 kaplamasında CeO<sub>2</sub>’yi karakterize eden piklerin yoğunluğu artarken bunun yanı sıra iki farklı yansıma açısında da yeni CeO<sub>2</sub> pikleri belirlenmiştir. MC4 kaplaması için CeO<sub>2</sub> piklerinin yoğunluklarındaki bu artış elektrolite ilave edilen nanopartikül miktarı ile ilişkilendirilmiştir [36]. Ayrıca herhangi bir Ce bileşiğine rastlanmaması CeO<sub>2</sub> nanopartikül ilavesinin yapı içerisinde inert olarak dâhil olduğunu göstermektedir.

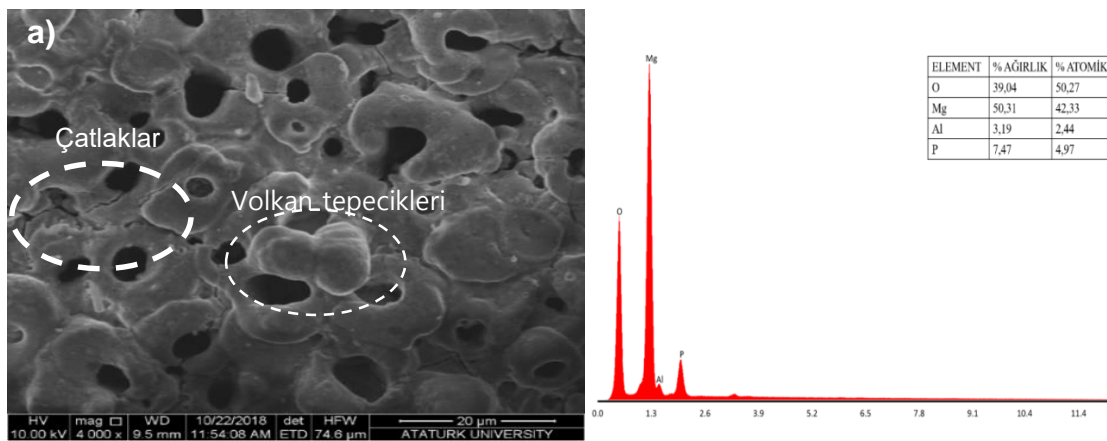


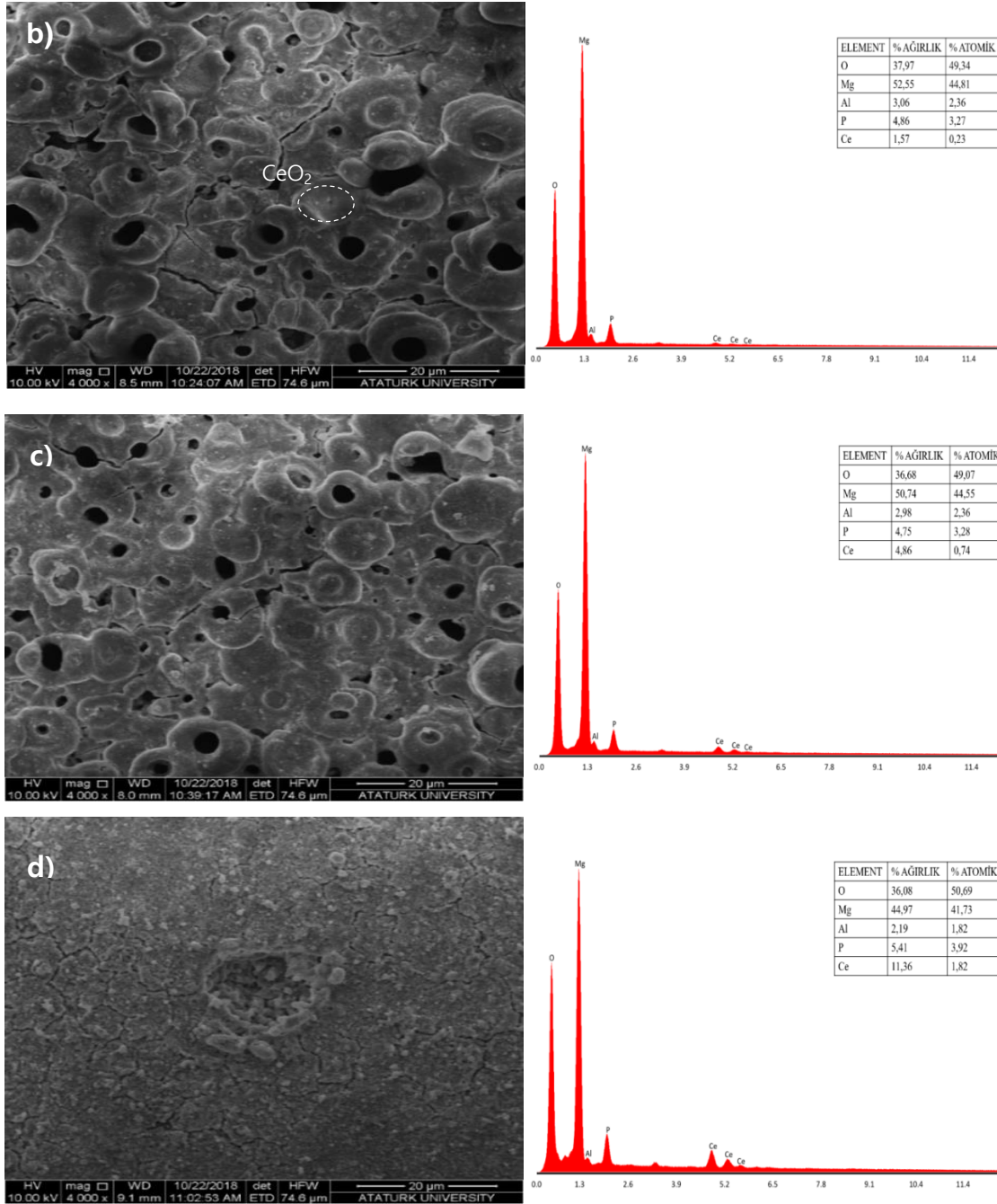
**Şekil 2.** Mg AZ31 taban malzemesi, MO, MC1, MC2 ve MC4 kaplamalarının XRD multi-plot spektraları (XRD multi-plot spectra of Mg AZ31 substrate, MO, MC1, MC2 and MC4 coatings)

### 3.3. SEM-EDS Analizi (SEM-EDS Analysis)

Mg AZ31 taban malzemesi üzerine PEO yöntemi kullanılarak partikülsüz ve farklı miktarlarda nanopartikül içeren elektrolitler içerisinde büyütülen MgO ve MgO/CeO<sub>2</sub> nanokompozit kaplamaların yüzey morfolojileri, EDS spektrumları ve kantitatif sonuçları Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2a'da gösterilen partikülsüz MO kaplamasının yüzey morfoljisi incelendiğinde çok sayıda dairesel formda mikro gözeneklerin oluştuğu ve gözenekler arasında birbiri ile bağlantılı volkan tepeleri şeklinde oluşumların meydana geldiği tespit edilmiştir. PEO prosesi sonrası yüzeyde oluşan gözenekler prosenin

doğasında var olan plazma deşarjlar ile ilişkilendirilmiştir [1,37]. Ayrıca işlem esnasında meydana gelen mikro arklar sonucu ergimiş metalin elektrolitle teması ile hızlı katılaşmadan kaynaklanan mikro çatlakların oluştuğu gözlenmiştir. MO kaplamasının EDS analizinde ise ağırlıkça %39,04 oksijen ve %50,31 oranında magnezyum elementleri tespit edilmiştir. Ayrıca düşük miktarlarda sırasıyla %7,47 ve %3,19 oranında fosfat ve alüminyuma da rastlanmıştır. Yapı içerisindeki fosfat mevcudiyeti elektrolit bileşimi (Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>-Sodyum Fosfat) ile, alüminyum mevcudiyeti ise Mg AZ31 alaşımı ile ilişkilendirilmiştir.





Şekil 3. Kaplamaların yüzey morfolojisi ve EDS analizi a) MO b) MC1 c) MC2 d) MC4 (Surface morphology and EDS analysis of coatings a) MO b) MC1 c) MC2 d) MC4

Şekil 3b ve 3c’de gösterilen 1 ve 2 g/l CeO<sub>2</sub> nanopartikül içeren elektrolit içerisinde büyütülen MC1 ve MC2 kodlu MgO/CeO<sub>2</sub> nanokompozit kaplamaların yüzey morfolojileri incelendiğinde MO kaplamasına kısmen benzeyen bir morfoloji gözlenmiştir. Ancak hem MC1 hem de MC2 kaplamasında gözenek sayısı ve boyutunun yanı sıra volkan tepeliklerinin de azaldığı belirlenmiştir. Bu durum nanopartiküllerin mikro deşarjların oluşumunu engellemesi ile açıklanabilir. Bununla birlikte yüzeyin farklı bölgelerinde küçük miktarlarda nanopartiküllere rastlanmış ve CeO<sub>2</sub>’in varlığı EDS analiziyle de doğrulanmıştır. Ayrıca EDS analizlerinde CeO<sub>2</sub>

ilavesinin miktarına bağlı olarak MC1 ve MC2 kaplamalarında sırasıyla %1,57 ve %4,86 oranında Ce elementi tespit edilmiştir.

Şekil 3d’de verilen MC4 kaplamasının yüzey morfolojisi MC1 ve MC2 kaplamalarına ait SEM görüntülerinden oldukça farklı olduğu gözlenmiştir. 4 g/l CeO<sub>2</sub> ilaveli elektrolit içerisinde büyütülen MC4 kaplama yüzeyinin nanopartiküllerle dolduğu belirlenmiştir. Partiküllerin yüzeye sıvanmış bir şekilde biriktiği ve bazı bölgelerde bu partiküllerin çukurcuklar oluşturduğu tespit edilmiştir. Ayrıca partiküllü yüzeyde

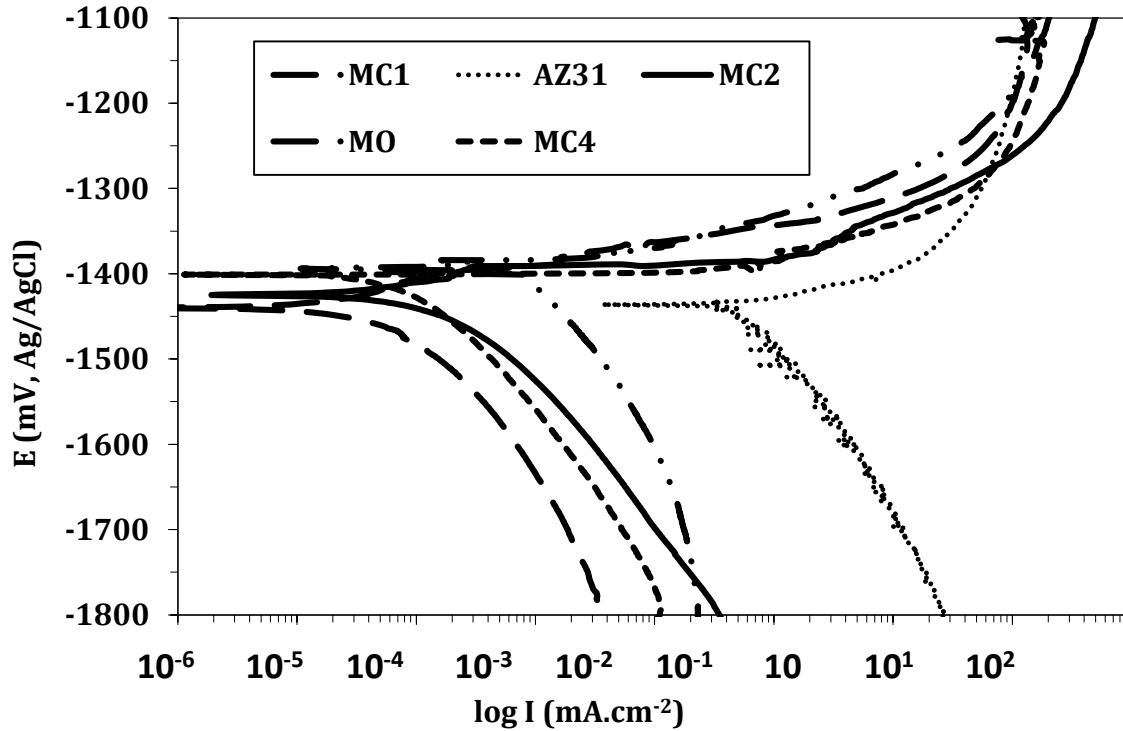
birbirleriyle bağlantılı birçok çatlığa rastlanmıştır. Bu duruma ek olarak, EDS analiz sonuçlarında ağırlıkça %11,36 oranında Ce elementinin varlığı tespit edilmiştir. PEO kaplamaların CeO<sub>2</sub> konsantrasyonun, elektrolit içeriğinde bulunan CeO<sub>2</sub> nanopartikül miktarı ile doğru orantılı olduğu sonucuna varılmıştır ve bu durum literatürle paralellik arz etmektedir [15]. CeO<sub>2</sub> nanopartiküllerin yapıya dâhil olması ile PEO kaplamaların yapısal kusurlarının kısmen iyileştiği, daha düşük çapta gözeneklerin oluştuğu ve mikro çatlak sayısının azaldığını söylemek mümkündür. Elde edilen sonuçlar kaplamaların pürüzlülük değerleri ile benzerlik göstermektedir.

### 3.4. Korozyon Testleri (Corrosion Tests)

PEO işlemleri sonrası yüzeyde oluşan gözenekli yapılar, çatlaklar ve kaplama kalınlığının malzemenin korozyon direncine doğrudan etki ettiği söylenebilir. PEO

kaplamaların gözenekli yapısı ve yüzeydeki kusurlar (çatlaklar) elektrolitin nüfuziyetini artırır ve bu durum korozyonun hızlanmasına sebep olur. Daha genel bir ifade ile malzemenin polarizasyon davranışı, yüzeydeki aktif noktaların bir fonksiyonu durumunda olduğu yapılan çalışmalarda belirtilmiştir [35].

AZ31 magnezyum alaşımı üzerine PEO yöntemiyle büyütülen MgO ve CeO<sub>2</sub> nanopartikül ilaveli MgO/CeO<sub>2</sub> nanokompozit kaplamaların %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki potansiyodinamik (PDS) eğrileri Şekil 4'te karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Bu eğrilerden Tafel ekstrapolasyon yöntemi ile hesaplanan bazı önemli korozyon parametreleri ve kaplamaların korozyon potansiyeli (E<sub>kor</sub>), korozyon akım yoğunluğu (I<sub>kor</sub>), korozyon hızı ve polarizasyon direnci (R<sub>p</sub>) gibi korozyon karakteristikleri ile ilgili parametreler Çizelge 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Mg AZ31 taban malzemesi ve PEO kaplamaların potansiyodinamik polarizasyon eğrileri (Potentiodynamic polarization curves of Mg AZ31 substrate and PEO coatings)

**Çizelge 4.** Mg AZ31 taban malzemesi, MO, MC1, MC2 ve MC4 kaplamalarının  $E_{kor}$  (korozyon potansiyeli),  $I_{kor}$  (korozyon akımı), korozyon hızı ve  $R_p$  (polarizasyon direnci) değerleri (Mg AZ31 substrate, MO, MC1, MC2 and MC4 coatings  $E_{cor}$  (corrosion potential),  $I_{cor}$  (corrosion current), corrosion rate and  $R_p$  (polarization resistance) values)

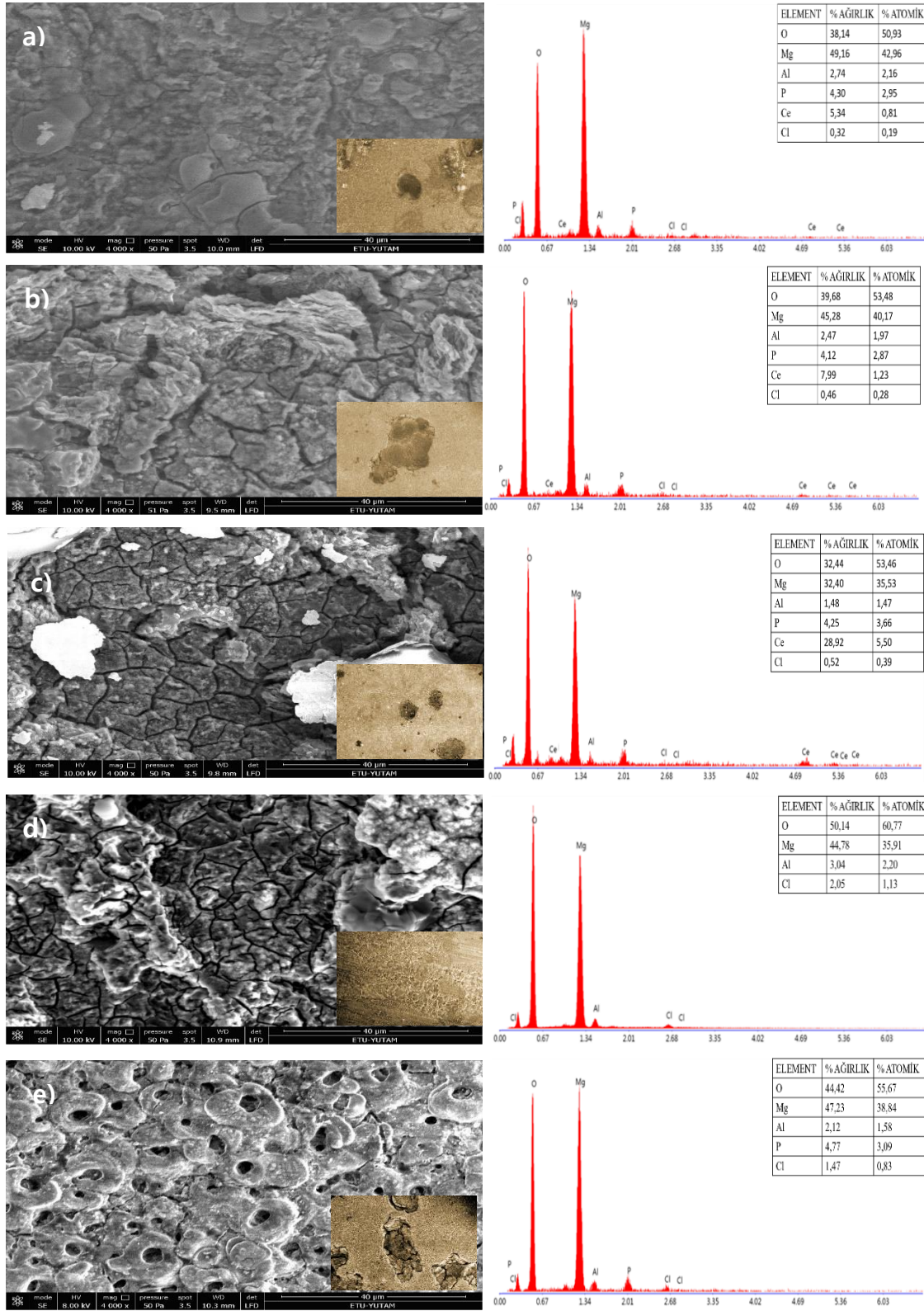
T. Malzeme ve Kaplamalar	$E_{kor}$ (mV)	$I_{kor}$ ( $\mu A/cm^2$ )	Kor. Hızı (mpy)	$R_p$ (ohm $cm^2$ )
AZ31	-1440	87,50	78,71	227
MO	-1390	1,782	0,732	10897
MC1	-1440	0,093	0,021	120000
MC2	-1420	0,140	0,205	69193
MC4	-1400	0,189	0,187	32368

Şekil 4'deki polarizasyon eğrileri incelendiğinde, Mg AZ31 taban malzeme üzerine yapılan kaplamaların bu alaşımın korozyon direncini fark edilir derecede iyileştirdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, farklı miktarlarda  $CeO_2$  nanopartikül takviyeli MgO/ $CeO_2$  nanokompozit kaplamaların korozyon duyarlılıkları karşılaştırıldığında  $MC1 < MC2 < MC4$  olduğu belirlenmiştir. Diğer bir ifade ile en yüksek korozyon direncine sahip kaplama, en düşük miktarda  $CeO_2$  içeren elektrolit içerisinde büyütülen MC1 kaplamasıdır. Bu durum Çizelge 4'te verilen polarizasyon direnci ve  $I_{kor}$  değerleri ile desteklenmektedir. Çizelge 4'deki tüm kaplamaların korozyon hızları karşılaştırıldığında,  $CeO_2$  nanopartikül ilaveli MC1, MC2 ve MC4 kaplamalarının MO kaplamasına göre yaklaşık 34, 9 ve 10 kat daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç PEO işlemi esnasında  $CeO_2$  ilavesinin kaplamaların korozyon direncini büyük ölçüde artırdığını, ancak  $CeO_2$  oranının 1 g/l üzerinde olması durumunda korozyon direncinin çok fazla değişmediğini ve tekrar düştüğünü ortaya koymaktadır. Toorani ve arkadaşları [35] benzer şekilde Mg AZ31 alaşımı üzerine yaptıkları ve değişik oranlarda sadece Ce içeren PEO kaplamaların korozyon dirençlerini karşıladıkları bir çalışmada, %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde Ce oranının ağırlıkça %1,6'yı aşması durumunda kaplamaların korozyon akım yoğunluğu değerlerinin tekrar arttığını ifade etmişler. Bununla birlikte, Lim ve arkadaşları [15] ise bu çalışma ile kıyaslanmayacak kadar yüksek oranlarda (10, 20, 30 g/l)

$CeO_2$  ilaveli PEO kaplamaların korozyon dirençlerinin artan  $CeO_2$  oranı ile arttığını vurgulamaktadır. Yapılan çalışmalarda çelişkiler, aslında korozyon direnci açısından bu alaşımlar için kritik bir  $CeO_2$  oranının olduğunu ortaya koymaktadır. Diğer taraftan tüm kaplamaların korozyon dirençlerinin Mg AZ31 alaşımına göre karşılaştırılamayacak kadar yüksek olduğu tespit edilmiştir. Böylece düşük korozyon direncine sahip Mg alaşımlarının korozyon dirençlerinin iyileştirilmesi için PEO işleminin umut verici bir teknik olduğu belirlenmiştir.  $CeO_2$  nanopartikül ilavesinin korozyon direnci üzerindeki etkisi, PEO işlemi esnasında oluşan gözenekleri tıkayarak elektrolitin taban malzemeye nüfuz etmesini engellemesi ve korozyona karşı bir bariyer gibi davranması şeklinde açıklanabilir.

Şekil 5a-c'de verilen MC1, MC2 ve MC4 kaplamaların korozyon sonrası morfolojik yapıları incelendiğinde  $CeO_2$  nanopartikül miktarının artışı ile çatlak boyutunun ve lokal korozyon izlerinin arttığı ve buna bağlı olarak da korozyon direncinin zayıfladığı düşünülmektedir. Bu durumun PEO işlemi esnasında  $CeO_2$  nanopartikül miktarındaki artışa bağlı olarak deşarj kanallarının kapanması, kaplamanın büyüme hızını yavaşlatması ve bileşenlerin farklı termal genleşme katsayıları ve geçirgenlikleri nedeniyle kaplama yüzeyinde oluşan gerilme yığılmalarının elektrolit teması ile kırılması şeklinde açıklanabilir.





**Şekil 5.** Kaplamaların ve Mg AZ31 taban malzemenin korozyon sonrası yüzey morfolojisi ve EDS analizi a) MC1 b) MC2 c) MC3 d) Mg AZ31 e) MO (Surface morphology and EDS analysis of coatings and Mg AZ31 substrate after corrosion tests a) MC1 b) MC2 c) MC3 d) Mg AZ31 e) MO)

Şekil 5d'de Mg AZ31 alaşımının korozyon sonrası SEM ve EDS analizi verilmiştir. Korozyon sonrası mikroyapı incelendiğinde, aşırı korozyon hasarı oluştuğu

görülmektedir. Mg AZ31 alaşımına ait polarizasyon sonucu en düşük korozyon direnci ile bu durumu desteklenmektedir. Şekil 4 ve Çizelge 4 incelendiğinde

MO kaplamasının AZ31 taban malzemeye göre daha düşük Ikor (1,782  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) ve daha yüksek Rp (10897 ohm  $\text{cm}^2$ ) değeriyle daha yüksek korozyon direncine sahip olduğu tespit edilmiştir. Şekil 5e'deki morfolojik bulgularda bu sonucu doğrulamaktadır. EDS analiz sonuçları değerlendirildiğinde ise en yüksek korozyon direncine sahip MC1 kaplamasındaki, korozyondan kaynaklanan oyuklarda daha az miktarda Cl- iyonu olduğunu tespit edilmiştir [35]. Böylece, CeO<sub>2</sub> nanopartikül ilaveli PEO kaplamaların çok daha iyi korozyon direncine sahip olduğu yapılan yarı kantitatif analizler ile ortaya konmuştur ayrıca sonuçlar literatür ile uyum içerisinde [15].

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Mg AZ31 alaşımları üzerine PEO yöntemi ile büyütülen MO ve CeO<sub>2</sub> nanopartikül ilaveli MgO/CeO<sub>2</sub> nanokompozit kaplamaların yapısal özelliklerinin ve korozyon davranışının araştırılması amacıyla gerçekleştirilen mevcut çalışma ile aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Mg AZ31 taban malzemesinin Ra = 0,15  $\mu\text{m}$  olan yüzey pürüzlülük değeri PEO işlemi sonrası Ra = 1,061  $\mu\text{m}$ 'ye yükseldi.
- CeO<sub>2</sub> ilaveli nanokompozit PEO kaplamaların yüzey pürüzlülük değeri artan partikül miktarı ile azaldı. En düşük pürüzlülük değeri Ra = 0,303  $\mu\text{m}$  ile MC4 ve en yüksek pürüzlülük değeri ise Ra = 0,990  $\mu\text{m}$  ile MC1 kaplaması üzerinden elde edildi.
- Mg AZ31 taban malzemesine uygulanan PEO işlemi ile 10 dk süre içerisinde 26  $\mu\text{m}$ 'lik bir oksit tabakası büyütüldü.
- PEO işlemine farklı miktarlarda CeO<sub>2</sub> nanopartikül ilave edilmesi ile kaplama kalınlık değerlerinin azaldığı belirlendi. En büyük kalınlık 24  $\mu\text{m}$  ile MC1 ve en küçük kalınlık ise 16  $\mu\text{m}$  ile MC4 nanokompozit kaplamasından elde edildi.
- PEO yönteminin doğası gereği birçok gözenek ve volkan tepelerinden oluşan yüzey morfolojisi, nanopartikül ilavesi ile değişime uğradı ve özellikle 4g/l'lik CeO<sub>2</sub> ilavesi ile bu kusurlar yok sayılacak düzeye ulaştı.
- CeO<sub>2</sub> nanokompozit kaplamalarda Ce'nin yapı içerisindeki mevcudiyeti EDS analizi ile ispat edildi ve en yüksek Ce miktarı ağırlıkça %1,82 ile MC4 kaplamasında elde edildi.
- Kaplamaların XRD spektrumlarından elde edilen yansımalarla MgO ve CeO<sub>2</sub> fazlarının oluşumu doğrulandı ve nanopartiküllerin yapı içerisine inert olarak bağlandığı tespit edildi.
- Korozyon testi sonrası potansiyodinamik eğrilerden elde edilen sonuçlara göre 0,093  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  ile en düşük korozyon akımı ve 120000 ohm  $\text{cm}^2$  ile en yüksek polarizasyon direnci MC1 kaplamasında elde edildi. Nanopartikül ilaveli ve ilavesiz kaplamaların Mg AZ31 taban malzemesine göre korozyon dirençlerinin daha fazla olduğu tespit edildi. Korozyon sonrası yapılan EDS analizleri

sonucu tüm numunelerde Cl- iyonuna rastlandı. CeO<sub>2</sub> nanopartiküllerinin Cl- iyonlarına karşı bariyer oluşturduğu belirlendi.

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Yerokhin A., Nie X., Leyland A., Matthews A. and Dowe S., "Plasma electrolysis for surface engineering", *Surface and Coatings Technology*, 122(2-3): 73-93, (1999).
- [2] Curran J. and Clyne T., "Thermo-physical properties of plasma electrolytic oxide coatings on aluminium", *Surface and Coatings Technology*, 199(2-3): 168-176, (2005).
- [3] Arrabal R., Matykina E., Hashimoto T., Skeldon P. and Thompson G., "Characterization of AC PEO coatings on magnesium alloys", *Surface and Coatings Technology*, 203(16): 2207-2220, (2009).
- [4] Cheng Y., Wu F., Matykina E., Skeldon P. and Thompson G., "The influences of microdischarge types and silicate on the morphologies and phase compositions of plasma electrolytic oxidation coatings on Zircaloy-2", *Corrosion Science*, 59: 307-315, (2012).
- [5] Hussein R., Northwood D. and Nie X., "The effect of processing parameters and substrate composition on the corrosion resistance of plasma electrolytic oxidation (PEO) coated magnesium alloys", *Surface and Coatings Technology*, 237: 357-368, (2013).
- [6] Song Y., Dong K., Shan D. and Han E.H., "Investigation of a novel self-sealing pore micro-arc oxidation film on AM60 magnesium alloy", *Journal of Magnesium and Alloys*, 1(1): 82-87, (2013).
- [7] Yagi S., Kuwabara K., Fukuta Y., Kubota K. and Matsubara E., "Formation of self-repairing anodized film on ACM522 magnesium alloy by plasma electrolytic oxidation", *Corrosion Science*, 73: 188-195, (2013).
- [8] Barchiche C.-E., Rocca E., Juers C., Hazan J. and Steinmetz J., "Corrosion resistance of plasma-anodized AZ91D magnesium alloy by electrochemical methods", *Electrochimica Acta*, 53(2): 417-425, (2007).
- [9] Srinivasan P.B., Liang J., Blawert C., Störmer M. and Dietzel W., "Effect of current density on the microstructure and corrosion behaviour of plasma electrolytic oxidation treated AM50 magnesium alloy", *Applied Surface Science*, 255(7): 4212-4218, (2009).
- [10] Hussein R., Zhang P., Nie X., Xia Y. and Northwood D., "The effect of current mode and discharge type on the corrosion resistance of plasma electrolytic oxidation (PEO) coated magnesium alloy AJ62", *Surface and Coatings Technology*, 206(7): 1990-1997, (2011).
- [11] Lu X., "Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) Coatings on a Mg Alloy from Particle Containing Electrolytes", *PhD Thesis*, der Technischen Fakultät, der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, (2017).

- [12] Necula B., Fratila-Apachitei L., Berkani A., Apachitei I. and Duszczak J., "Enrichment of anodic MgO layers with Ag nanoparticles for biomedical applications", *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 20(1): 339, (2009).
- [13] Lee K.M., Ko Y.G. and Shin D.H., "Incorporation of multi-walled carbon nanotubes into the oxide layer on a 7075 Al alloy coated by plasma electrolytic oxidation: Coating structure and corrosion properties", *Current Applied Physics*, 11(4): S55-S59, (2011).
- [14] Li X. and Luan B.L., "Discovery of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles incorporation mechanism in plasma electrolytic oxidation of AM60B magnesium alloy", *Materials Letters*, 86: 88-91, (2012).
- [15] Lim T.S., Ryu H.S. and Hong S.H., "Electrochemical corrosion properties of CeO<sub>2</sub>-containing coatings on AZ31 magnesium alloys prepared by plasma electrolytic oxidation", *Corrosion Science*, 62: 104-111, (2012).
- [16] Arrabal R., Matykina E., Skeldon P. and Thompson G., "Incorporation of zirconia particles into coatings formed on magnesium by plasma electrolytic oxidation", *Journal of materials science*, 43(5): 1532-1538, (2008).
- [17] Liang J., Hu L. and Hao J., "Preparation and characterization of oxide films containing crystalline TiO<sub>2</sub> on magnesium alloy by plasma electrolytic oxidation", *Electrochimica Acta*, 52(14): 4836-4840, (2007).
- [18] Liu J., Lu Y., Jing X., Yuan Y. and Zhang M., "Characterization of plasma electrolytic oxidation coatings formed on Mg-Li alloy in an alkaline silicate electrolyte containing silica sol", *Materials and Corrosion*, 60(11): 865-870, (2009).
- [19] Laleh M., Rouhaghdam A.S., Shahrabi T. and Shanghi A., "Effect of alumina sol addition to micro-arc oxidation electrolyte on the properties of MAO coatings formed on magnesium alloy AZ91D", *Journal of Alloys and Compounds*, 496(1-2): 548-552, (2010).
- [20] Blawert C., Sah S.P., Liang J., Huang Y. and Höche D., "Role of sintering and clay particle additions on coating formation during PEO processing of AM50 magnesium alloy", *Surface and Coatings Technology*, 213: 48-58, (2012).
- [21] Zhang D., Gou Y., Liu Y. and Guo X., "A composite anodizing coating containing superfine Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles on AZ31 magnesium alloy", *Surface and Coatings Technology*, 236: 52-57, (2013).
- [22] Daroonparvar M., Yajid M.A.M., Yusof N.M. and Bakhsheshi-Rad H.R., "Preparation and corrosion resistance of a nanocomposite plasma electrolytic oxidation coating on Mg-1% Ca alloy formed in aluminate electrolyte containing titania nano-additives", *Journal of Alloys and Compounds*, 688: 841-857, (2016).
- [23] Sun M., Yerokhin A., Bychkova M.Y., Shtansky D., Levashov E. and Matthews A., "Self-healing plasma electrolytic oxidation coatings doped with benzotriazole loaded halloysite nanotubes on AM50 magnesium alloy", *Corrosion Science*, 111: 753-769, (2016).
- [24] Mohedano M., Blawert C. and Zheludkevich M., "Silicate-based plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings with incorporated CeO<sub>2</sub> particles on AM50 magnesium alloy", *Materials & Design*, 86: 735-744, (2015).
- [25] Tang M., Liu H., Li W. and Zhu L., "Effect of zirconia sol in electrolyte on the characteristics of microarc oxidation coating on AZ91D magnesium", *Materials Letters*, 65(3): 413-415, (2011).
- [26] Lee K.M., Lee B.U., Yoon S.I., Lee E.S., Yoo B. and Shin D.H., "Evaluation of plasma temperature during plasma oxidation processing of AZ91 Mg alloy through analysis of the melting behavior of incorporated particles", *Electrochimica Acta*, 67: 6-11, (2012).
- [27] Li W., Tang M., Zhu L. and Liu H., "Formation of microarc oxidation coatings on magnesium alloy with photocatalytic performance", *Applied Surface Science*, 258(24): 10017-10021, (2012).
- [28] Wang Y., Wei D., Yu J. and Di S., "Effects of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano-additive on performance of micro-arc oxidation coatings formed on AZ91D Mg alloy", *Journal of Materials Science & Technology*, 30(10): 984-990, (2014).
- [29] Rapheal G., Kumar S., Scharnagl N. and Blawert C., "Effect of current density on the microstructure and corrosion properties of plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings on AM50 Mg alloy produced in an electrolyte containing clay additives", *Surface and Coatings Technology*, 289: 150-164, (2016).
- [30] Wang Y., Wang F., Xu M., Zhao B., Guo L. and Ouyang J., "Microstructure and corrosion behavior of coated AZ91 alloy by microarc oxidation for biomedical application", *Applied Surface Science*, 255(22): 9124-9131, (2009).
- [31] Ma C., Zhang M., Yuan Y., Jing X. and Bai X., "Tribological behavior of plasma electrolytic oxidation coatings on the surface of Mg-8Li-1Al alloy", *Tribology International*, 47: 62-68, (2012).
- [32] Bala Srinivasan P., Liang J., Blawert C., Störmer M. and Dietzel W., "Development of decorative and corrosion resistant plasma electrolytic oxidation coatings on AM50 magnesium alloy", *Surface Engineering*, 26(5): 367-370, (2010).
- [33] Song Y., Sun X. and Liu Y., "Effect of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on the microstructure and corrosion behavior of MAO coatings on magnesium alloy", *Materials and Corrosion*, 63(9): 813-818, (2012).
- [34] Arrabal R., Matykina E., Viejo F., Skeldon P., Thompson G. and Merino M., "AC plasma electrolytic oxidation of magnesium with zirconia nanoparticles", *Applied Surface Science*, 254(21): 6937-6942, (2008).
- [35] Toorani M., Aliofkhaezai M. and Rouhaghdam A.S., "Microstructural, protective, inhibitory and semiconducting properties of PEO coatings containing CeO<sub>2</sub> nanoparticles formed on AZ31 Mg alloy", *Surface and Coatings Technology*, 352: 561-580, (2018).
- [36] Ji R., Peng G., Zhang S., Li Z., Li J., Fang T., Zhang Z., Wang Y., He Y. and Wu J., "The fabrication of a CeO<sub>2</sub> coating via cathode plasma electrolytic deposition for the corrosion resistance of AZ31 magnesium alloy", *Ceramics International*, 44(16): 19885-19891, (2018).
- [37] Sarbishei S., Sani M.A.F. and Mohammadi M.R., "Effects of alumina nanoparticles concentration on microstructure and corrosion behavior of coatings formed on titanium substrate via PEO process", *Ceramics International*, 42(7): 8789-8797, (2016).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



## 2007-2018 Türk deprem yönetmeliklerinde yapı elemanları çıkarma senaryoları ve bina periyotlarının karşılaştırılması

*In Turkish earthquake seismic codes 2007-2018 comparison of building elements extraction scenarios and building periods*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Semi Emrah ASLAY<sup>1</sup>, Tayfun DEDE<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-0127-5474

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0001-9672-2232

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Aslay S.E., ve Dede T., “2007-2018 Türk deprem yönetmeliklerinde yapı elemanları çıkarma senaryoları ve bina periyotlarının karşılaştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1297-1309, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.543239

# 2007-2018 Türk Deprem Yönetmeliklerinde Yapı Elemanları Çıkarma Senaryoları ve Bina Periyotlarının Karşılaştırılması

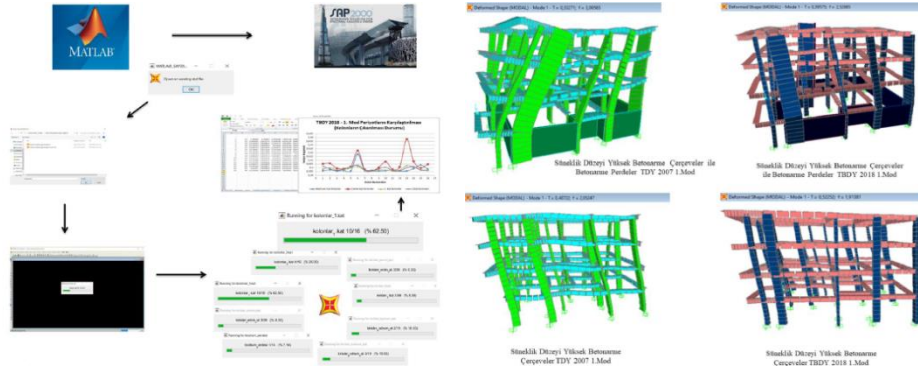
## In Turkish Earthquake Seismic Codes 2007-2018 Comparison of Building Elements Extraction Scenarios and Building

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ SAP2000-OAPI ile yapı elemanlarının çıkarılması / Extracting building elements with SAP2000-OAPI.
- ❖ Deprem yönetmeliklerinde frekans karşılaştırılması / Frequency comparison in seismic codes.
- ❖ Kolon ve kiriş çıkarma senaryoları / Column and beam extraction scenarios

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

SAP2000-OAPI ile yapı elemanlarının her birinin çıkarılması durumuna göre periyotlar elde edilmiştir. 2007-2018 Türk Deprem Yönetmeliklerinde yapı periyotları ve eleman çıkarma senaryoları karşılaştırmalı olarak hızlı bir şekilde iterasyon yapılmıştır. / Periods are obtained with the SAP2000-OAPI, depending on the individual extraction of each of the structural elements. According to the 2007 and 2018 Turkish seismic code, building periods and building element extraction scenarios are comparatively rapidly iterated.



Şekil. Uygulamanın özet olarak anlatımı / Figure. Summary of the application

### Amaç (Aim)

Yapı analizi programına entegre yazılım oluşturularak, betonarme bir bina üzerindeki yapı elemanlarının Türk deprem yönetmeliklerine göre frekans bazlı olarak değerlendirilmesi./ Evaluation of structural elements on a reinforced concrete building based on frequency according to Turkish seismic code by creating software integrated into the structure analysis program.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Betonarme bir yapıda 440 adet yapı elemanın tek tek çıkarılarak frekanslarının karşılaştırılması / Removing 440 building elements in a reinforced concrete structure one by one and comparing their frequency

### Özgünlük (Originality)

SAP2000-OAPI ile deprem yönetmeliklerine göre elemanların çeşitli nedenlerle yapıdan ayrılması hesaplanmıştır. With SAP2000-OAPI, the separation of elements from the structure for various reasons is calculated according to earthquake codes.

### Bulgular (Findings)

Toplamda 440 adet modal analiz yapılmıştır ve yazılım sayesinde %95 zaman tasarrufu sağlanmıştır. / 440 modal analyzes were performed in total and 95% time saving was achieved thanks to the software.

### Sonuç (Conclusion)

2007-2018 TDY'ye göre herhangi bir katta, herhangi bir perde-kolon-kiriş'in yapı periyodunu ne kadar etkileyebildiği incelenmiştir./ According to 2007-2018 TDY, how much a shear wall-column-beam can affect the building period on any floor has been examined.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.



# 2007-2018 Türk Deprem Yönetmeliklerinde Yapı Elemanları Çıkarma Senaryoları ve Bina Periyotlarının Karşılaştırılması

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Semi Emrah ASLAY<sup>1\*</sup>, Tayfun DEDE<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Erzincan, Türkiye

<sup>2</sup>Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye

(Geliş/Received : 22.03.2019 ; Kabul/Accepted : 06.01.2020)

## ÖZ

Bu çalışmada, MATLAB kodları kullanılarak hızlı iterasyon tekniği ile betonarme bir yapıya ait periyot hesabı yapabilen yazılım oluşturulmuştur. Bu yazılımda, SAP2000 OAPI ile yapı elemanlarının her birinin çıkarılması durumuna göre periyotlar elde edilmiştir. 2007-2018 Türk Deprem Yönetmeliklerinde yapı periyotları ve eleman çıkarma senaryoları karşılaştırmalı olarak hızlı bir şekilde iterasyon yapılmıştır. Sonuçta normal şartlar altında çok uzun zaman alacak olan tekrarlı yapısal analizler, oluşturulan yazılım ile çok kısa zamanda yapılmıştır ve yapısal problem teşkil etme ihtimali ile tüm yapı elemanları tek tek periyot bazında değerlendirilmiştir. Çalışma bu yönüyle yapıların hasar senaryolarını oluşturma, çok yönlü analiz yapılabilmesi konularında inşaat mühendisliği alanında hızlı bir çözüm sunmaktadır. Aynı zamanda yapı elemanlarının değerlendirilmesinde bilgisayar otomasyonlarının kullanılmasına yönelik ihtiyacı gidermeye yönelik katkı sağlamaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Yapı periyodu, Türk deprem yönetmelikleri, matlab-sap2000 oapi.

## In Turkish Earthquake Seismic Codes 2007-2018 Comparison of Building Elements Extraction Scenarios and Building Periods

### ABSTRACT

In this study, software is developed by using MATLAB codes, which can make building period calculation for a reinforced concrete structure with fast iteration technique. In this software, periods are obtained with the SAP2000 OAPI, depending on the individual extraction of each of the structural elements. According to the 2007 and 2018 Turkish Earthquake Regulations, building periods and building element extraction scenarios are comparatively rapidly iterated. As a result, repetitive structural analyzes, which will take very long time under normal conditions, are made in a very short time with the software created and all structural elements are evaluated on a period-by-term basis with the possibility of constituting a structural problem. With this aspect, the study provides a rapid solution in the field of civil engineering for creating damage scenarios and performing multi-dimensional analysis. At the same time, it contributes to the need to use computer automations in the evaluation of building elements.

**Keywords:** Building period, Turkish earthquake seismic codes, matlab-sap2000 oapi.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geçtiğimiz son 30-40 yıllarda Türkiye’de ve Dünya’da inşaat teknolojisi ile beraber yazılım teknolojisi de hızla ilerlemiştir. Yine son 15-20 yıllarda inşaat ve yazılım sektörünün ortak payda da ilerlemesinde ciddi bir ivmelenme olmuştur. Özellikle üst yapı grubunda betonarme ve çelik yapıların tasarımında kullanılan yazılımlar inşaat mühendislerinin hesapsal işlerini hiç olmadığı kadar kolaylaştırmıştır. Buna rağmen tekrarlı analizlerde ve iterasyon gibi bir parametre için çok sayıda değişken olması durumunda hızlı analiz tekniği kullanılabilecek yazılımlara ihtiyaç vardır.

Literatüre bakıldığında, bu eksikliği gidermek adına yapısal analizlerde sıklıkla kullanılan SAP2000 programı ve bu programın OAPI özelliği yazılım dilleri ile entegre edilmesi ile ilgili son zamanlarda artan çalışmalar bulunmaktadır. Bu yazılım dilleri ile yapısal analiz yapabilen programların işbirliği her geçen gün artmaktadır, öyle ki, bu özelliği kullanarak birçok araştırma makalesi bulunmaktadır, hatta ticari amaçlı girişimlerde de bulunulmuştur [1]. Yapısal tasarımın yanı sıra mimari alanla birlikte çalışabilirliğinin geliştirilmesi: web araçları ile endüstriyel tabanlı yaklaşımıyla, yazılımlar arasındaki bağlantının önemine vurgu yapılarak, ETABS - SAP2000 - ANSYS - MIDAS programlarının entegre kullanımları ile de yapılan çalışmalar bulunmaktadır [2]. Yine bu çalışmada mod şekilleri, doğal titreşim periyotlarının ilk dört aşamasına

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : seaslay@erzincan.edu.tr



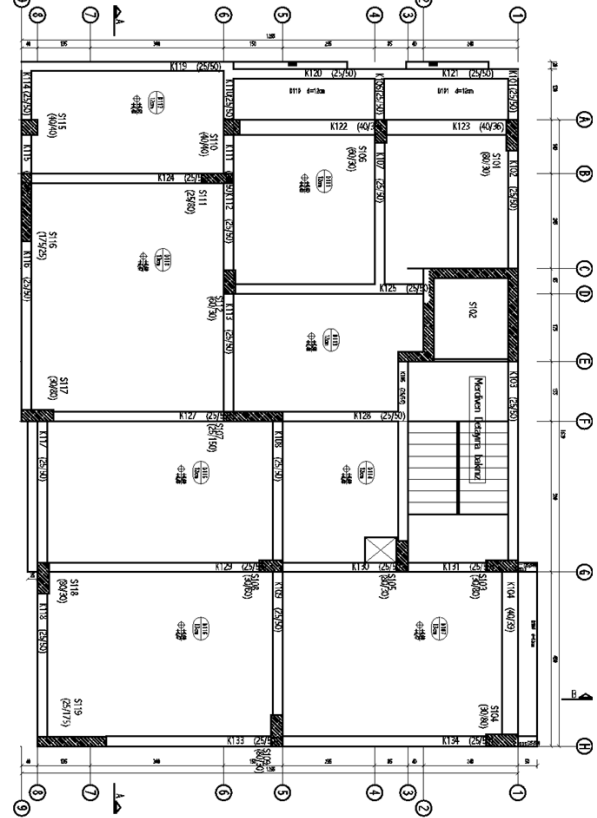
ait hesaplamalar yapılmıştır. İterasyon metotlarını MATLAB-SAP2000 OAPI ile kullanılan başka bir çalışmada, rüzgar yükü altında uzun açıklıklı rijit çerçeve çözümünde eleman seçiminde ve tasarım süreçleri yönetilmiştir [3]. Betonarme yapılarda MATLAB-SAP2000 OAPI kullanılan çalışmalarda ise; betonarme çerçeve yapılarında belirsizlik yayılımı üzerine bir çalışma yapılmıştır ve bu çalışmada sonlu elemanlar modeli kullanılarak, nonlineer dinamik analiz yapılmıştır [4]. Nonlineer zaman tanım analizi ile dolgu duvar dolgu duvarlı çerçeve, betonarme çerçeve, dolgu duvarlı betonarme çerçeve, iki farklı çeşit donatıyla güçlendirilmiş betonarme çerçevede kullanılarak yapılan çalışma [5] ile yük-deformasyon ilişkisini genetik algoritmayla yapan çalışma çalışmaları yapılmıştır [6]. Benzer araştırmalarda betonarme perde duvarlarda bırakılan pencere boşluklarındaki boyut etkilerinde, kısa kolon oluşumu incelenmiştir, çok sayıda analiz yapılmıştır ve C# yazılım programına da yer verilmiştir [7]. Elastik zemine oturan kule tipi yapıların yapısal analizi optimum tasarımı ve optimum maliyet oluşturulabilmesi için söz konusu programlar ortak payda da buluşturularak çözümler elde edilmeye çalışılmıştır [8]. MATLAB-SAP2000 OAPI ortak kullanımının çelik yapılarda bakıldığında; uzay çatılarda genetik algoritma kullanılarak, lineer analiz yapılmıştır ve kodlar ile yapısal analiz programına bağlanmıştır [9]. geometrik olarak doğrusal olmayan kafes yapılarının rüzgara dayanıklı boyut optimizasyonu [10] ve çelik uzay çatılarının optimum ağırlık tasarımı, gerilme kısıtlamaları, kayma, yanal deplasman ile geometrik kısıtlamalar kullanılarak yapılan çalışma [11], çelik yapılarla ilgili aynı yazılımların birlikte kullanılarak çözümlendiği diğer çalışmalardır. Yapısal çözüm ve matematik optimizasyon probleminde kullanılmasında [12], köprüler üzerinde itme analizinde [13], yapay sinir ağlarını kullanarak köprü hasarlarının tespiti yapılmasında [14], 3 açıklı köprü için titreşime dayalı yapısal hasar tespitinde [15] ve yapı sağlığı izlenmesinde [16-17], yine benzer şekilde MATLAB-SAP2000 yazılımlarının ortak olarak kullanıldığı çalışmalardır. Yapı periyotlarının kullanımına ilişkin betonarme, çelik, tarihi, yığma yapılar ve spesifik alanlarla ilgili sayısız çalışma bulunmaktadır [18,19,20]. Her cismin doğal bir periyodu vardır, esasen periyot sismik dalganın bir çevrim yapması için gereken saniye cinsinden zaman süresidir. Frekans ise saniyedeki çevrim sayısı olup periyodun tersidir. Bir yapıda ise yapı yüksekliği, taşıyıcı sistem, malzeme ve geometrik oranlar periyot-frekans değerlerine etki ederler ve periyot değeri yapının önemli bir mühendislik özelliğidir [21]. Taşıyıcı sistem elemanlarının hasar senaryoları ile ilgili, betonarme ve çelik yapılarda; kolon veya kirişlerin kaldırılması, binaların sağlamlık değerlendirmesi için verimli kademeli çökme analizi, etkili aşamalı çökme analizi [22,23,24], aşamalı çöküş, bir elemanın göçmesi, bunun zincir etkisi yapması ile binanın orantısız bir şekilde çökmesi durumları [25] ve hasar senaryolarının farklı aşamaları altında çerçevelerin aşamalı yıkılması,

olasılıkların hesaplanmasına dair [26,27] araştırmalar bulunmaktadır.

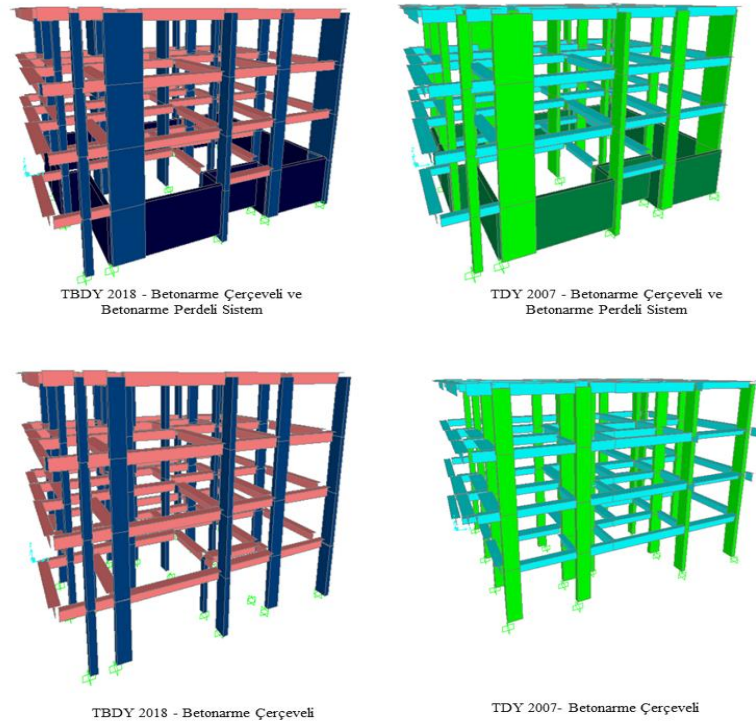
Bu çalışmada ise MATLAB kodları kullanılarak oluşturulan yazılım ile SAP2000 OAPI ile 2007-2018 Türk Deprem Yönetmeliklerine göre yapı periyot hesabı yapılmıştır ve bu hesabın tüm yapısal elemanların sistemden çıkarılması durumu için ele alınmıştır. Örneğin bir adet kolon gibi bir yapı elemanı sistemden yapısal hasar, çarpışma veya patlama gibi herhangi bir nedenden dolayı yapıdan çıkarılmaktadır. Yapı bu haliyle, yani kolonun yapıda olmadığı durum için, yapı periyodu hesaplanmıştır. Daha sonra aynı kolon yapı sistemine ilk tasarlandığı gibi geri yüklenmiştir. Bu işlemten sonra ikinci, üçüncü ve tüm kolonlar aynı şekilde sistemden çıkarılması ve geri yüklenmesi durumu için yapısal analiz yapılarak, yapı periyodu hesaplanmıştır. Tekrarlı analizlerin yapılmasında entegre yazılım kullanıldığı için tüm bu işlemler oldukça kısaltılmıştır.

## 2. YAPI ÖZELLİKLERİ VE KONUMU (STRUCTURE FEATURES AND LOCATION)

Çalışmada ele alınan yapı 4 katlı betonarme tarzında, 2017 yılında inşa edilmiş bir binadır. Söz konusu yapı her iki deprem yönetmeliği içinde riskli sayılan ve tarihte şiddetli depremleri yaşamış olan Erzincan ilindedir. Erzincan ili özellikle geçtiğimiz yüzyılda 1939 ve 1992 yıllarında yaşadığı depremlerle yapı güvenliği konusunda önemli bir tecrübe yaşamıştır. Depremlerin yaşandığı yıllara inşaat teknolojisi olarak



Şekil 1. Kat planı (Storey plan)



Şekil 2. Yapı modelleri (Building models)

Bakıldığında, 1939 depremi yığma yapıların ve 1992 depremi ise betonarme yapıların imtihanı olmuştur. İnşaat teknik ve tasarımları için önemli kazanımlar elde edilmiştir. Bunun bedeli ise ağır olmuştur. Çok sayıda can ve mal kayıpları yaşanmıştır. Bu sebeplerle de bu çalışmada yapının Erzincan ölçeğinde değerlendirilmesi önemlidir. Yapısal analize esas olmak üzere mevcut binada sadece betonarme çerçevelerden oluşan ve betonarme çerçevelerle birlikte betonarme perdelerin olduğu 2 adet tasarım yapılmıştır. Yapılan tasarıma ait kat kalıp planı şekil-1’de verilmiştir. Şekilde verilen kat kalıp planı binanın yapıldığı mevcut durumunu göstermektedir. Yapı ilgili standartlara göre ve mühendisin tasarım inisiyatifine göre hazırlanmıştır. Ayrıca kamu kurumlarınca onaylanarak yapılmıştır. Yapılan tasarımda ise mevcut yürürlükte olan ve geçtiğimiz 10 yılda yürürlükte olmuş olan deprem yönetmelikleri uygulanmıştır. Böylelikle analize esas yapı modelleri 4 farklı şekilde oluşmuştur. Bu durum şekil-2’de verilmiştir. Binada perdeler mevcut kolonların üzerinde oluşturulmuştur. Perde-Kolon-Kiriş ebatları ve aks açıklıkları şekil-1’de detaylı olarak verilmiştir, bunun haricinde sadece betonarme çerçevesi olarak öngörülen yapıda perde elemanlarının tamamında yerini 30x80 cm ebatlarında kolonlar yerleştirilmiştir. Perdeli yapıya binayı dört yanından x ve y yönlerinde çevreleyen bodrum perdeleri, tüm katlarda devam eden asansör perdesi ve ayrıca 3 adet perde ilave edilmiştir. Yine perde tabiri TBDY 2018 tarif edildiği üzere bir kenarı diğer kenarının 6 katı olacak şekilde tasarlanmıştır.

Yapının Deprem dayanıklı tasarımı, yapım yılı itibarı ile Türk Deprem Yönetmeliği 2007 [28] ile yapılmıştır. Makale yazım tarihi itibarıyla yürürlüğe resmi olarak yakın zamanda giren Türk Bina Deprem Yönetmeliği 2018 [29] ile karşılaştırılmıştır. Benzer şekilde bina Erzincan’da aynı konum için değerlendirilmiştir. Bu karşılaşmanın yapılabilmesi için aynı bina kullanılmıştır. Deprem yönetmeliklerinin yanı sıra TS 500 [30] şartları göz önüne alınmıştır. Bunun için yapısal analiz yapan analiz programı kullanılarak gerekli kontroller yapılmıştır [31]. Zemin taşıma kapasitesi, beton sınıfı ve demir sınıfı gibi parametrelerde eşitlenmiştir. Beton sınıfında TBDY 2018’de belirtilen asgari beton sınıfı olan C25 betonu ve TBY 2007’de S420 demir sınıfına yaklaşık olarak karşılık gelen B420C demir sınıfı kullanılmıştır. Bunların dışında yeni yönetmelikte birlikte gelen parametrelerden spektral ivme katsayısı, taşıyıcı sistem davranış katsayısı-dayanım fazlalığı katsayısı gibi değerler için eski yönetmelikte benzer şartlar dikkate alınmıştır. Esasen yapı modelleri ve çevre koşulları birebir aynı, buna karşılık, dönemin deprem yönetmelik koşulları kullanılmıştır. Yapı farklı model ve elemanların çıkarılması için hızlı iterasyon işlemine tabi tutulmuştur.

### 3. YAZILIM KODLARI İLE YAPISAL ANALİZ (STRUCTURAL ANALYSIS WITH SOFTWARE CODES)

Betonarme yapıya ait periyot ve frekansları değerleri yapının dinamik özellikleri hakkında özel bir bilgi

vermektedir. Bina bu şekilde bir bütün olarak değerlendirilebilmektedir ve yapısal davranış hakkında hızlı bir şekilde fikir sahibi olunabilmektedir. Bu çalışmada betonarme bir yapıya ait periyotların belirlenmesi için MATLAB [32] kodları kullanılarak yazılım geliştirilmiştir ve bu yazılım ile SAP2000 [33] programına vasıtasız bağlantı kurmak mümkün olmuştur. Kurulan bağlantı ile statik ve dinamik analiz yapabilen programın çalıştırılması, sonuçları çok seri bir şekilde elde etmeye olanak sağlamıştır. Oluşturulan kodlar Şekil-3’ de verilmiştir. Kodların oluşturulmasında SAP2000 kurulum dosyasında bulunan API dökümanından yararlanılmıştır[33].

Bir kolon, perde veya bir kiriş yapı sisteminden herhangi bir sebeple ayrıldığında elde edilen periyodun nasıl değiştiği bu çalışmanın konusudur. Bu işlem yapı sisteminde bulunan kolon, perde ve kiriş elemanlarının hepsinin tek tek sistemden çıkarılması, bu haliyle analizlerin defalarca yapılmasını kapsamaktadır. Metinde kullanılan 4 katlı yapının perdeli veya perdesiz ve 2007-2018 deprem yönetmeliklerine göre olmak üzere 4 farklı şekilde tasarlanmıştır. Her bir katta yaklaşık 16-18 adet kolon-perde 36-40 adet kiriş bulunmaktadır, bu ise toplamda betonarme yapıda yaklaşık 440 adet elemanın sistemden çıkarılarak, 440 adet SAP2000 programında analiz yapması anlamına gelmektedir.

```

feature('COM_SafeArraySingleDim', 1);
feature('COM_PassSafeArrayByRef', 1);
SapObject = actxserver('sap2000.SapObject');
SapObject.ApplicationStart;
SapModel = SapObject.SapModel;
ret = SapObject.Hide;
h=msgbox('Open an existing sbd
file','MATLAB_SAP2000','custom',imread('SAP2000.png'));
waitfor(h);
[ModelName, ModelDirectory]=uigetfile('*.*sdb','Select the
SAP2000 file');
ModelPath = strcat(ModelDirectory, ModelName);
ret = SapModel.File.
.
.
NumberNames= 0;
MyName= cellstr(' ');
[ret, NumberGroup, GroupList] =
SapModel.GroupDef.GetNameList(NumberNames, MyName);
t=datestr(now,30);
zaman=[t(1:4),'_',t(5:6),'_',t(7:8),'_Saat_',t(10:11),'_',t(12:13),'_'
,t(14:15)];
dosya_adi=[ ModelName(1:end-4),'_', zaman, '.xls' ];
for Group_index=2:11
    NumberItems= 0;
    ObjectName= cellstr(' ');
    ObjectType=cellstr(' ');
    [ret, NumberItems, ObjectType, ObjectName] =
SapModel.....(ObjectIndex, ObjectName);
    wb_string="";
    h = waitbar(0,wb_string,'Name',['Running for ',
GroupList{Group_index} ]);
    for i=1:length(ObjectName)
        ret = SapModel.File.OpenFile ...
.
.
ModelName(1:end-4) '_silinmis.sdb');
ret = SapObject.
.
.
NumberResults= 0;
StepType= cellstr(' ');
StepNum= reshape(0:1,2,1);
Period=reshape(0:1,2,1);
Frequency=reshape(0:1,2,1);
CircFreq=reshape(0:1,2,1);
EigenValue=reshape(0:1,2,1);
LoadCase= cellstr(' ');
ret = SapModel.Results.Setup.DeselectAll...
.;
ret = SapModel.Results.Setup.
.;
[ret, NumberResults, LoadCase,..
] =
SapModel.Results.ModalPeriod(NumberResults,
LoadCase, StepType, StepNum, Period, Frequency, CircFreq,
EigenValue)
my_frekans(i,:)=Frequency;
silinen_frame(i)=str2num(ObjectName{i});
a=(i:length(ObjectName))*100;
wb_string = sprintf([GroupList{Group_index},' %d/%d
(%% %4.2f)'],i,length(ObjectName), a);
waitbar(i:length(ObjectName),h,wb_string);
end
delete(h);
warning('off');
ModelDirectory;
pwd=cd;
xlswrite([pwd.'/Results',dosya_adi],
[[1:length(ObjectName)] silinen_frame(:) my_frekans(:,1:5)],
GroupList{Group_index}, 'A3')
end
ret = SapObject.ApplicationExit(false());
SapModel = 0;
SapObject = 0;

```

Şekil 3. Oluşturulan yazılıma ait kodlar (Developed software codes)

Kolon, perde veya kirişin sistemden çıkarılması, analiz yapıldığı ve sonuçların excel de kaydedilmesi yaklaşık olarak 3 dakika sürmesi ihtimali ile bu analiz toplamda yaklaşık 1320 dakika sürecektir. Bu işe iyi bir ihtimaldir, çünkü buna kullanıcının sabrı, bilgisayarın zorlanması ve benzeri faktörler eklenmemiştir. Geliştirilen yazılım ile yaklaşık 60 dakikada tüm analizler tamamen yapılarak exece aktarılmıştır. Bu durum analizlerin yapılmasında yaklaşık %95 oranında zaman tasarrufu sağladığını göstermektedir. Üstelik bu işlem için SAP2000 programının açılmasına ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu olay iterasyon işleminin defalarca yapılması anlamına gelir. İstenilen iterasyon işlemi yazılım sayesinde çok kısa bir zaman diliminde yapılır. Aslay ve Okuyucu [34] tarafından yapılan çalışmada tarihi yapının yapısal analizinde defalarca iterasyon işlemine ihtiyaç duyulmasına rağmen, analizlerin elle yapılması ciddi zaman kayıplarına neden olmuştur ve tekrarlı analizler haftalarca sürmüştür. Tekrarlı analizlere ihtiyaç duyulan çalışmalarda analizlerin, bu çalışma kapsamında oluşturulan yazılımlar benzeri araçlarla yapılması her geçen gün daha da önem kazanmaktadır.

Yazılan MATLAB programı çalıştırıldığında ilk olarak kullanıcıdan SAP2000'de ilgili dosyayı açması istenir. Daha sonra istenilen SAP2000 dosyası seçilir. Seçilen dosyadan bilgiler alınır ve SAP2000 programı kapalı olduğu durumda analiz hızlı bir şekilde gerçekleşir. Ve bilgiler excel ortamına aktarılır. Yazılım tüm bu işlemleri yaparken kolon, perde ve kiriş kendi içerisinde tanımlar ve ayırır. İstenildiği takdirde yalnız kolon veya yalnız

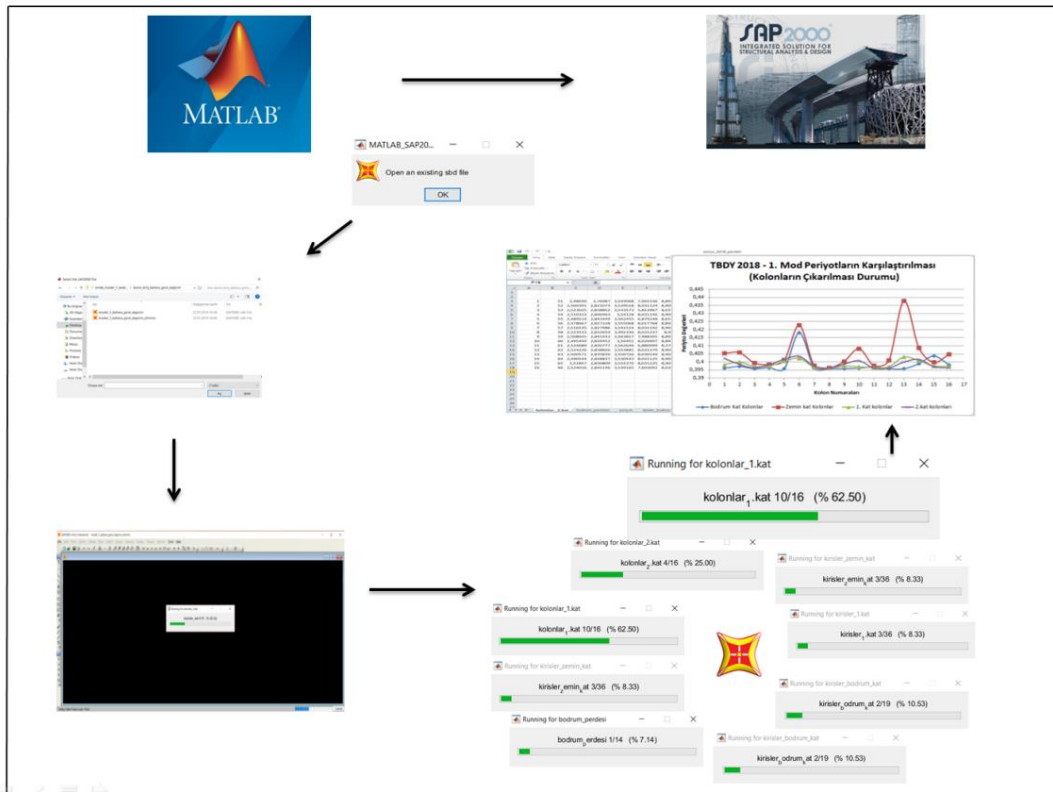
kiriş ya da katlara göre tercih yapılabilir. Yapılan işlemler şekil-4'de özet olarak verilmiştir

#### 4. YAPI PERİYOTLARININ KARŞILAŞTIRILMASI (COMPARISON OF BUILDING PERIODES)

Her iki Deprem yönetmeliği için, yapı periyotları farklı tasarım durumlarında karşılaştırılmıştır (Çizelge1). Aynı bina kullanılmasına karşın 4 farklı şekilde ele alınmıştır. Karşılaştırmada yönetmelikler arasında olmanın yanı sıra sadece betonarme çerçevelerin olduğu ve betonarme çerçevelere ilave olarak sistemde var olan betonarme perdeli olarak tasarlanan yapı için yapılmıştır.

**Çizelge 1.** Yapı Periyotlarının Karşılaştırılması (Comparison Of Building Periodes)

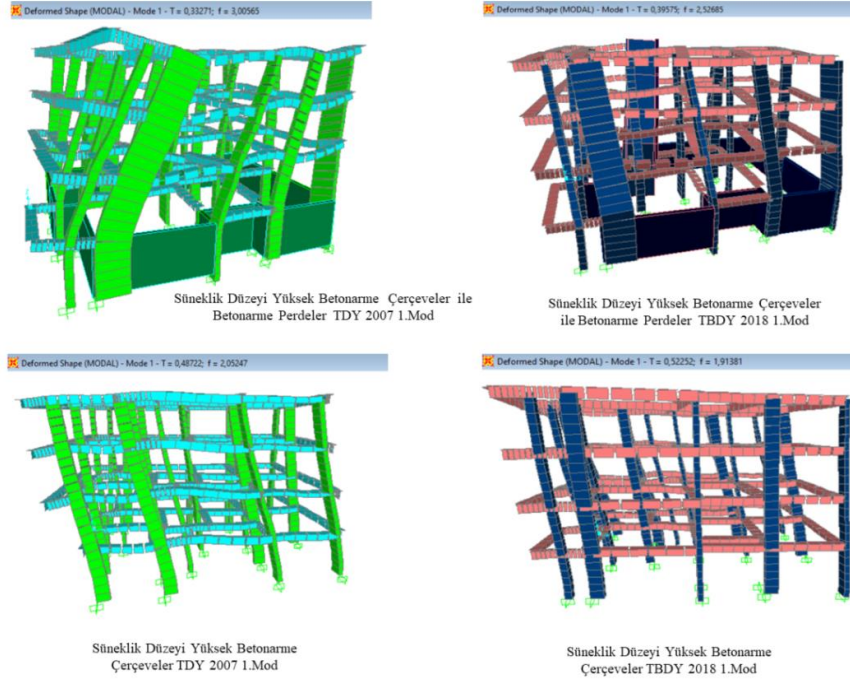
Bina Taşıyıcı Sistemi	Yapı Periyot Değerleri	Yapı Periyot Değerleri
	1.Mod	1.Mod
	TDY 2007	TBDY 2018
Süneklik Düzeyi Yüksek Betonarme Çerçeveler	0.5336	0.5707
Süneklik Düzeyi Yüksek Betonarme Çerçeveler ile Betonarme Perdeler	0.3332	0.3957



**Şekil 4.** Uygulamanın özet olarak anlatımı (Summary of the application)

Yönetmelikler arasındaki bu periyot farkı perdeli yapıda %6.50 olmasına karşılık, perdesiz yapıda %15.79 oranına ulaşmaktadır. Aynı zamanda TDY 2007’ de perdeli ve perdesiz yapıların arasındaki periyot farkı %37.55 iken, TBDY 2018’de %30.66 olmaktadır. Yüzdeler ifadeleri verilen dört farklı durum için birinci mod şekilleri şekil-

muhtemel olarak eleman rijitliklerindeki azalmalar nedeniyle modal analiz sonucu ilk ve hâkim yapı periyodunda daha yüksek değer aldığı görülmektedir. Bunun dışında elde edilen yüzdeler oranlarda, yeni deprem yönetmeliğinde yapının deprem salınıminin daha fazla olacağı öngörüsünün olduğu, betonarme perdelerin

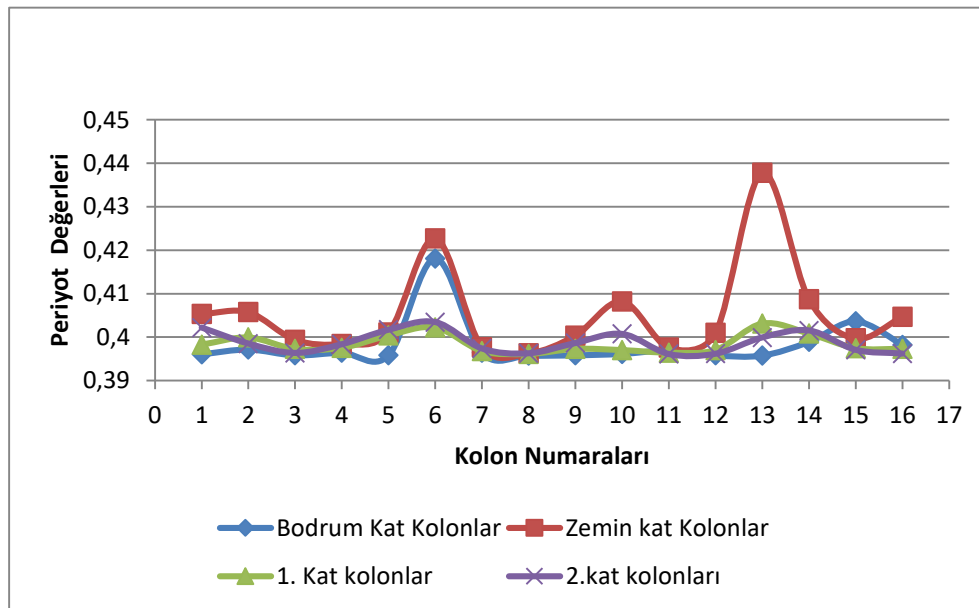


Şekil 5. Yapıların periyotları ve birinci mod şekilleri (Periods of structures and first mode shape)

5’de verilmiştir. Burada yapıya perde olarak, binayı çevresinde bodrum perdeleri, asansör perdesi ve 3 adet tüm katlarda devam eden yapı elemanları yerleştirilmiştir. TBDY 2018 ‘de kuvvetle

önceki yönetmeliğe nispeten tek başına daha az fayda sağlayabileceği ve daha fazla miktarda betonarme perde ihtiyacı oluşturduğu söylenebilmektedir.

Türk Bina Deprem Yönetmeliği 2018’e göre tasarlanan betonarme çerçevesiz ve betonarme perdeli yapının kolon-

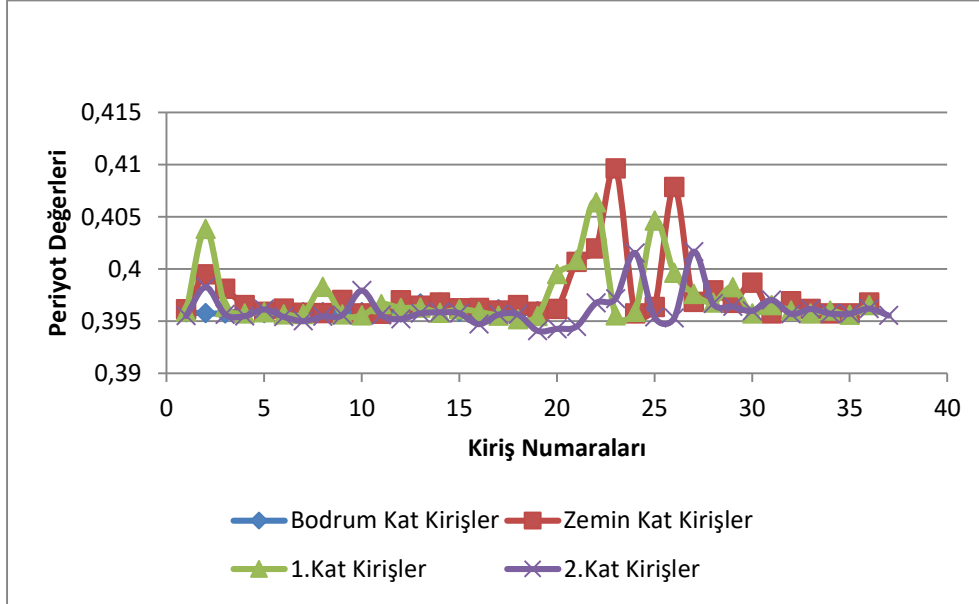


Şekil 6. Betonarme perdeli statik projede kolonların çıkarılması durumu için 1. mod yapı periyotlarının karşılaştırılması - TBDY 2018 (Comparison of 1st period building periods for the extraction of columns in a static project with reinforced concrete shear wall – TBDY 2018)



perde gibi düşey taşıyıcı yapı elemanlarının her birinin sistemden çıkarılması ve kiriş gibi yatay taşıyıcı elemanların her birinin sistemden çıkarılması durumu şekil-6'da ve şekil-7'de grafiksel olarak verilmiştir.

belli miktarlarda etkinliğe sahip olduğu söylenebilmektedir. Tdy 2007'de 2018'de olduğu gibi, kolon-perde gibi yapı elemanların sistemden çıkarılması durumunda (şekil-8) rijit bodrum perdelerinin üst katı olan zemin katın en fazla

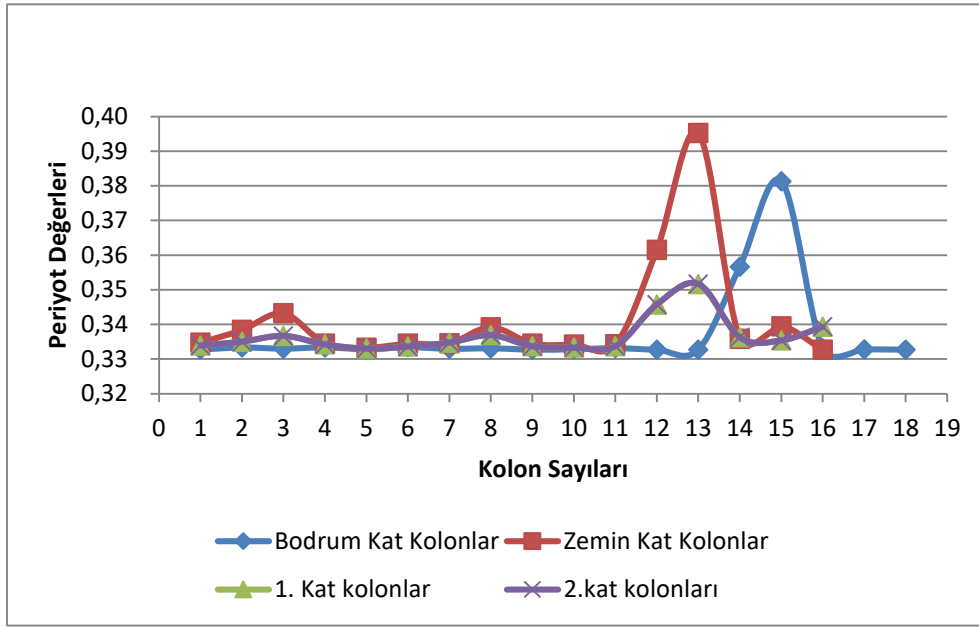


Şekil 7. Betonarme perdeli statik projede kirişlerin çıkarılması durumu için 1. mod yapı periyotlarının karşılaştırılması – TBDY 2018. (Comparison of 1st period building periods for the extraction of beams in a static project with reinforced concrete shear wall – TBDY 2018)

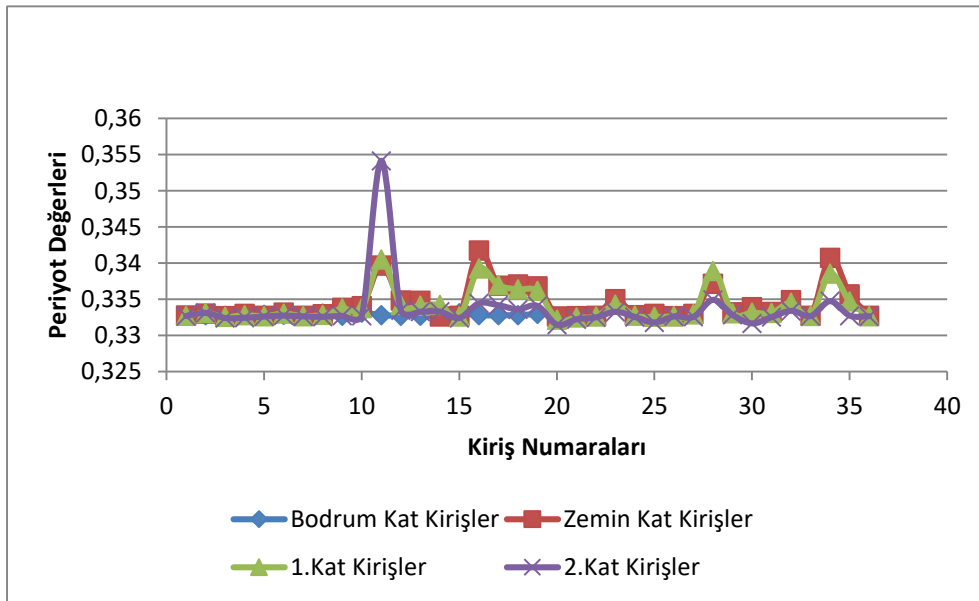
Tbdy 2018'de kolon-perde gibi yapı elemanların sistemden çıkarılması durumunda (Çizelge-2) rijit bodrum perdelerinin üst katı olan zemin katın en fazla etkilendiği görülmektedir. Zira şekilde görüldüğü üzere bu katta bulunan düşey taşıyıcı elemanların sistemden ayrılmasıyla yapı periyodunda ciddi anlamda artışlar yaşanmıştır. Öyle ki grafik üzerinde bu katın diğer katlardan ayrıştığı anlaşılmaktadır. Normal yapı periyot değeri 0.3957sn iken, zemin katta düşey taşıyıcı elemanların bireysel olarak yapıdan ayrılmalarında gözlenen periyot artışı 0.4378sn'lere ulaşmaktadır. Bu durum artış oranının %10.64 olduğu göstermektedir. Yapı elemanlarında betonarme perdelerin periyot hesabında en fazla etkiye sahip olduğu, bunun haricinde de özellikle çerçeve oluşturmayan, konsol yapılmış bölgede periyot farklılıkları belirgin olmaktadır. Bunun dışında bütün katlarda her bir yapı elemanının, yapıda olmadığı kabulü ile oluşan periyot durumu grafikten kolaylıkla analiz edilebilmektedir. Aynı durumda kirişlerin çıkarılması senaryolarına baktığımızda, benzer şekilde zemin kattaki kirişlerin çıkarılması durumunda, periyotta en fazla etkili olduğu, bundan sonra ise 1.kattaki kirişler önem arz etmektedir. Zemin kattaki kirişlerden yapı periyodunu en fazla etkileyen elemanlar konsol kirişler olmayıp, konsolun hemen arkasında çerçeve oluşturan kirişlerin olduğu anlaşılmaktadır. Buradaki elemanlardan çıkarım yapıldığında yapı periyot değerinin 0.4078 değerine ulaştığı görülmektedir. Detaylı inceleme için Çizelge-3'de grafik yeterli olacaktır. Kirişlerde yapı periyodu üzerindeki etkinliği perde-kolondaki gibi olmasa da, bu elemanlardan sonra

etkilendiği görülmektedir. Aynı katta taşıyıcı eleman olarak betonarme perdeye de sahip olan sistemde, grafiğe bakıldığında bazı elemanların münferit olarak ön plana çıktığı görülmektedir. Örneğin bir yapı elemanının çıkarılmasıyla elde edilen maksimum periyot değeri 0.3952sn 'ye ulaşabilmektedir. Yapının Tdy 2007'de analizinde normal şartlar altında gerçek periyot değeri 0,3332sn olmaktadır. Söz konusu değişim %18.60 oranına kadar çıkmaktadır. Bu olay ise düşey taşıyıcı elemanların yapıya katkısındaki homojenliğin nispeten olmadığı anlamına gelmektedir. Eleman bazında periyot değerini etkileyen duruma bakıldığında, betonarme perdeler baskın olsa da Tbdy 2018 'deki gibi hepsi yeterince etkin olamamaktadır. Kolonlardaki dağılımda ise belli bir bölgede yoğunlaşmadığı görülmektedir. Aynı şekilde 2007 deprem yönetmeliğinde kirişlerin çıkarılması durumuna bakıldığında ise bazı istisnaların haricinde periyot üzerinde etkinliğinin fazla olmadığı söylenebilmektedir. Bu değer normal şartlarda yapı periyot değeri 0.3332sn olduğu halde, kirişlerin çıkarılması ile ulaşabildiği değer en fazla 0.3418sn olmaktadır. Söz konusu durum ise şekil-9'da verilmiştir. Betonarme perdeli durumda her iki yönetmelik karşılaştırıldığında Tdy 2007'de kirişlerin periyot üzerindeki etkinliğinin nispeten oldukça az olduğu görülmektedir.





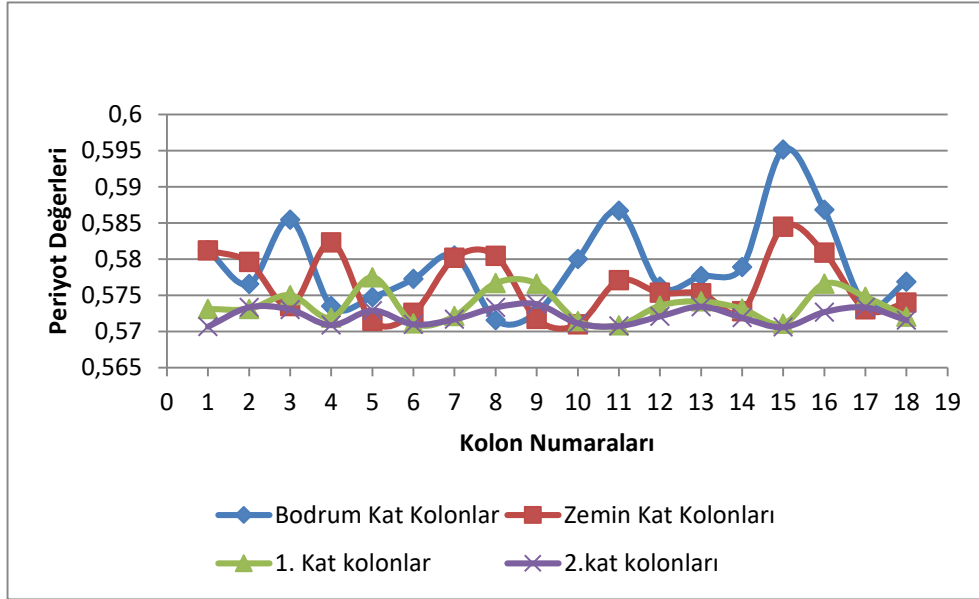
Şekil 8. Betonarme perdeli statik projede kolonların çıkarılması durumu için 1. mod yapı periyotların karşılaştırılması TDY2007. (Comparison of 1st period building periods for the extraction of columns in a static project with reinforced concrete shear wall – TDY 2007)



Şekil 9. Betonarme perdeli statik projede kirişlerin çıkarılması durumu için 1. mod yapı periyotlarının karşılaştırılması TDY 2007. (Comparison of 1st period building periods for the extraction of beams in a static project with reinforced concrete shear wall – TDY 2007)

Projenin betonarme perde olmayan tasarımı da benzer şekilde analiz edilerek grafiksel olarak sunulmuştur. Tbdy 2018 için sadece betonarme kolon-kiriş'ten oluşan sistemde kolonların çıkarılma senaryolarına ait grafik şekil-10'da verilmiştir. Kolonların çıkarılma durumunda kolonlar arasında periyot değeri en fazla 0.5951sn

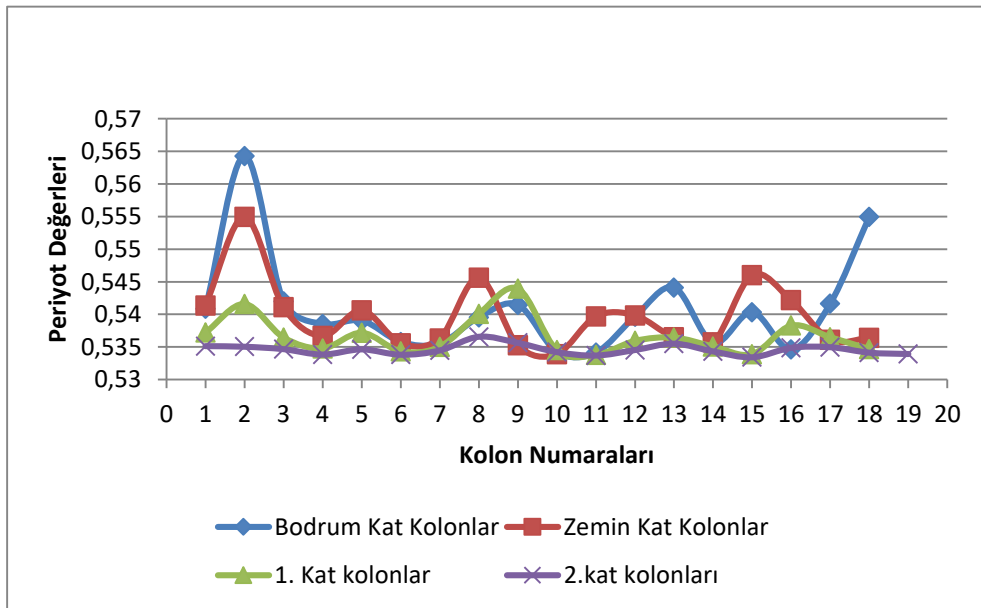
olmaktadır. Perdesiz normal şartlarda yapı periyodu 0.5707sn'dir. Dolayısıyla kolonlar arasında periyot değeri en fazla %4.27 oranında olmaktadır. Bu halde kolonların periyot değişimini en fazla yaşadığı kolonlar ise, dış akslarda ve kiriş çerçevesinin tam oluşmadığı, konsol oluşturan bölgede olmaktadır.



**Şekil 10.** Betonarme perdesiz statik projede kolonların çıkarılması durumu için 1. mod yapı periyotlarının karşılaştırılması (TBDY 2018). (Comparison of 1st period building periods for the extraction of columns in a static project without reinforced concrete shear wall – TBDY 2018)

Çalışmada kullanılan diğer model ise, sadece betonarme çerçeveden oluşan Tdy 2007'ye göre mevcut yapının periyot değeri 0.5336sn olmasına karşılık, kolonların çıkma ihtimalleri arasında en fazla 0.5643sn olmaktadır. Oransal olarak ifade edilecek olursa, %5,75'lik bir artış olduğu anlaşılmaktadır. Benzer şekilde periyot ekinliği en fazla dış akslarda ve çerçeve oluşturmayan konsol bölgesinde olmaktadır. Grafikselsel olarak gösterim şekil-11'de verilmektedir.

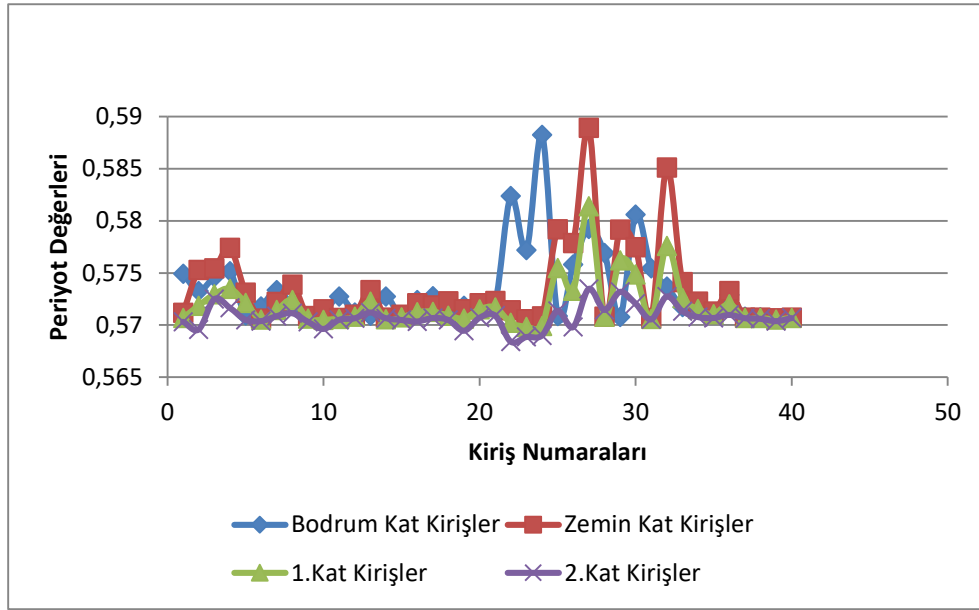
Sadece kolonların karşılaştırıldığı bu iki durumda 2018 deprem yönetmeliğinin, 2007 deprem yönetmeliğine göre daha aktif bir periyot etkinliğinin olduğu söylenebilmektedir. Maksimum periyot değeri daha azdır, ancak daha fazla kolon bu etkinliğe sahip olmaktadır. Kolonların beraber hareket edebilme kabiliyeti daha fazla ön plandadır. Tüm modellerin dışında, betonarme perdeye sahip olmayıp, sadece betonarme çerçevelerden oluşan sistemde, kirişlerin



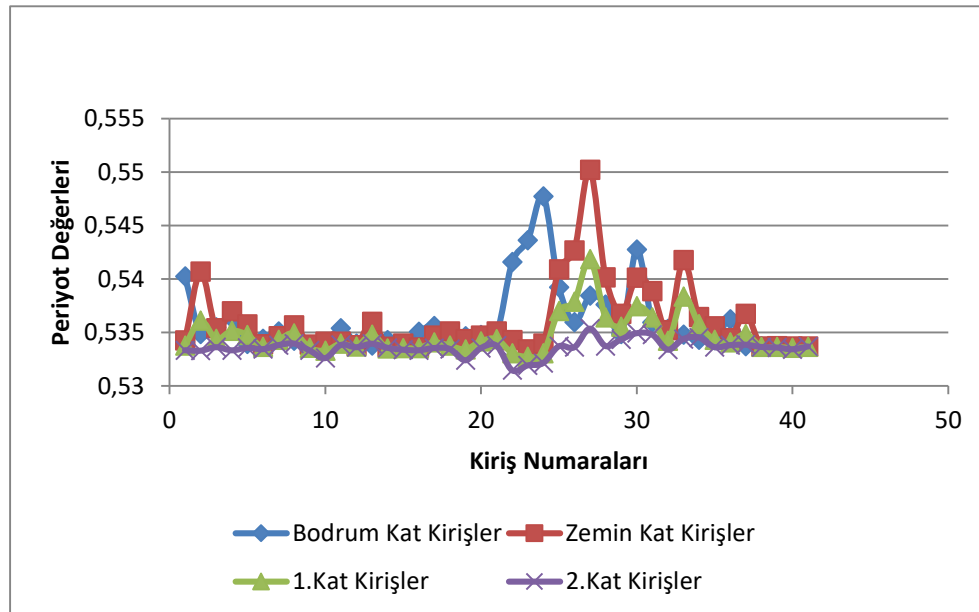
**Şekil 11.** Betonarme perdesiz statik projede kolonların çıkarılması durumu için 1. mod yapı periyotlarının karşılaştırılması - TDY 2007. (Comparison of 1st period building periods for the extraction of columns in a static project without reinforced concrete shear wall – TDY 2007)

çıkartılma durumu incelenmiştir. Kirişlerin yapı sisteminde, yine münferit olmaması durumu şekil-12’de ve Çizelge-13’da verilmiştir. Benzer şekilde bütün kirişler değerlendirilmiştir. Perdeli duruma benzer sonuçlar elde edilmiştir. Tdy 2007’ye göre mevcut 0.5336sn olmasına karşılık, tüm kirişlere tek tek bakıldığında en fazla 0.5427sn olarak, Tbdy 2018 ise mevcut durumda yapı periyodu 0.5707sn olmasına karşılık kirişlerin olmama ihtimalinde en fazla 0.5889sn değerini almaktadır. Yüzdesel fark %1.70 ve % 3.18 olmaktadır. Bu da 2018 yönetmeliğinde kiriş etkinliğinin daha fazla olduğunu göstermektedir.

Çalışmada MATLAB kodlarıyla farklı model ve yönetmelikler için kolon-perde-kiriş gibi yapı elemanlarının her birinin, yapı sisteminde olmaması durumlarına göre periyot hesapları yapılmıştır. Bu hesaplar ilk 5 mod için 440 farklı koşullara göre sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sayısal verilerin çok uzun olması nedeniyle burada ayrıca verilmemiştir. Bunun yerine hakim mod olan, birinci mod değerleri kullanılmıştır ve grafiksel olarak gösterilmiştir. Şekil-14’de ise şimdiye kadar yapılan ve yorumlanan kısımlardan kolonların tüm yapı modelleri ve deprem yönetmelikleri durumlarına göre özet olarak verilmiştir.



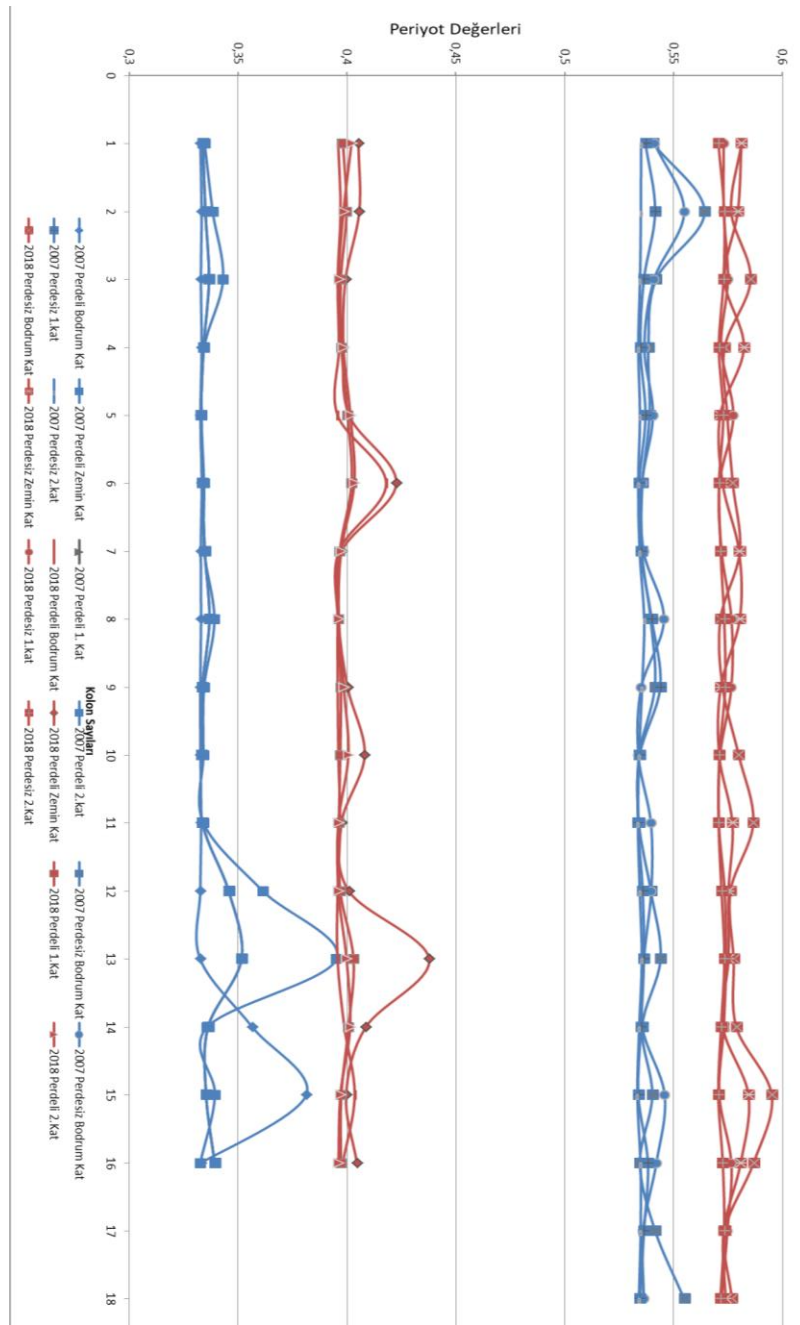
Şekil 12. Betonarme perdesiz statik projede kirişlerin çıkarılması durumu için 1. mod yapı periyotlarının karşılaştırılması (TBDY 2018). (Comparison of 1st period building periods for the extraction of beams in a static project without reinforced concrete shear wall – TBDY 2018)



Şekil 13. Betonarme perdesiz statik projede kirişlerin çıkarılması durumu için 1. mod yapı periyotlarının karşılaştırılması - TDY 2007. (Comparison of 1st Period Building Periods for the Extraction of Beams in a Static Project Without Reinforced Concrete Shear Wall – TDY 2007)

Verilen özet şekilde (şekil-14) çalışmada yapılmış olan kolon bazında tüm durumların kısa bir ifadesi yer almaktadır. Kırmızı renk ile tarif yapılan periyot değerleri TBDY 2018, mavi renk ile tarif yapılan periyot değerleri TDY 2007 standardını belirtmektedir. Betonarme çerçeve ile birlikte perdelerle sahip olan yapı periyotları beklendiği üzere her iki durumda nispeten düşük olduğu görülmektedir. 2018 Deprem yönetmeliğindeki periyot değerleri, 2007 deprem yönetmeliğine göre daha yüksek sonuç vermiştir. 2007 Deprem yönetmeliğinde bir yapı elemanın sistemi periyot olarak daha fazla etkileyebildiği görülmektedir. Örneğin sadece çerçeve olan durumda 3,6,13 numaralı kolonların sistemden çıkarılması ile elde edilen periyot değerleri,

2007 deprem yönetmeliğinde daha belirgin bir şekilde farklılaşmaktadır. Perdeli durumda da 2 numaralı perde için aynı şekilde belirgin periyot farklılaşmasını söylemek mümkün olacaktır. Burada 2 numaralı perde u şeklinde büyük bir rijitlik oluşturabilecek asansör çevresinde yapılan betonarme elemandır. Periyot üzerinde etkinliği belli bir miktarda kabul edilse bile, yeni deprem yönetmeliğinde elemanların etkisi sınırlı tutulmaya çalışılmıştır. Ayrıca bu konuya ilişkin olarak yeni yönetmelikte, taşıyıcı sistemde tek bir perdenin alabileceği taban devrilme momentinin, binanın tamamından gelen deprem yükleri nedeniyle oluşan toplam devrilme momentinin 1/3'ünden fazla olması istenmemektedir [29].



Şekil 14. Kullanılan model ve deprem yönetmeliklerinin kolonların çıkarılması durumu için yapı periyot değerleri özeti. (Created model and summary of building period values for earthquake regulations)

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu makalede SAP2000 yapısal analiz programına entegre olarak çalışabilen, MATLAB kodları kullanılarak yazılım oluşturulmuştur. Çalışma içerisinde yazılan MATLAB kodları da paylaşılmıştır. Bu yazılımla iterasyon tekniğini de kullanarak yapıya modal analiz yaptırılmıştır ve yapı periyotlarına ait sayısal veriler hızlı bir şekilde toplanmıştır. Yine bu çalışmada söz konusu yazılım ile 2007 ve 2018 Türk Deprem yönetmeliklerince tasarlanan farklı modellerde yapı periyotları, elemanların çeşitli nedenlerle yapıdan ayrılması durumuna göre incelenmiştir. Elde edilen değerlendirme ve sonuçlar şu şekilde olmuştur;

\*Bu yazılımda iterasyon tekniği ile yapıdan taşıyıcı sisteme ait herhangi bir elemanın olmaması durumu için hızlı bir şekilde analiz yapılmıştır ve bütün durumlar için ayrı ayrı yapı periyodu hesaplanmıştır.

\*Toplamda 440 adet modal analiz yapılmıştır ve yazılım sayesinde %95 zaman tasarrufu sağlanmıştır.

\*Yapılan tüm analizlerin verileri çok seri bir şekilde toplanmıştır ve grafik haline dönüştürülerek yorumlanmıştır.

\*Bu çalışmada Tbdy 2018 ile Tdy 2007'ye göre herhangi bir katta, herhangi bir perde-kolon-kiriş'in yapı periyodunu ne kadar etkileyebildiği incelenmiştir.

\*Tbdy 2018'de kolon-perde gibi yapı elemanların sistemden çıkarılması durumunda artış oranının %10.64 iken, Tdy 2007'de söz konusu değişim %18.60 oranına kadar çıkmaktadır. Betonarme perdesi olmayan diğer durumda da %4.27 iken, %5.75'e kadar çıkmaktadır. Aynı zamanda sayısal verilere ve özet Çizelgelere bakıldığında elemanların Tbdy 2018'de nispeten yakın tepkiler verdiği söylenebilmektedir.

\*Elde edilen veriler ışığında da Tbdy 2018'de Tdy 2007'ye göre daha gerçekçi sonuçlar oluştuğu kanaatine varılmıştır. Şöyle ki yapı dinamik karakteristik özelliği hakkında çok değerli bir bilgi olan yapının periyot değeri, bu yönetmelikte taşıyıcı elemanların homojen etkiye sahip olduğu söylenebilmektedir. Oluşan kuvvetlere karşı sistemin tek perdenin etrafında toplanmasına müsaade etmemektedir.

\*Aynı zamanda yeni yönetmelikte birden çok perdenin birlikte sisteme dahil olması öngörülmüştür. Perde-kolon-kiriş elemanlarının kendi içerisinde homojen kapasiteye sahip olması ihtimali ön planda tutulmuştur.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Sanayei, M. and Rohela P., "PARAmeter Identification System (PARIS) for Atomated Finite Element Model Updating of Full-Scale Structures", *Structures Congress*, 376-387, (2013).

- [2] Hu, Z., Zhang, X., Wang, H. and Kassem, M., "Improving interoperability between architectural and structural design models: An industry foundation classes-based approach with web-based tools," *Automation in Construction*, 66: 29–42, (2016).
- [3] Wu, J.R., Dong, C.C., Xua, A. and Fu, J.Y., "Structural optimization of long span portal-rigid frames under wind action," *The Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications (BBAA7)* Shanghai, China; September 2-6, (2012).
- [4] Arshian, A.H., Morgenthal, G. and Shanmugam, Narayanan., "Influence of modelling strategies on uncertainty propagation in the alternate path mechanism of reinforced concrete framed structures," *Engineering Structures*, 110: 36–47, (2016).
- [5] Kamari, M., "Yenlikçi Çelik Bağlantılarla, yerleştirilmiş çerçeve doğrusal yüklemeye dayanımı", *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi*, (2016).
- [6] Kamari, M. and Güneş, O., "Fitting Cyclic Experimental Load-Deformation Data to The Pivot Hysteresis Model Using Genetic Algorithm", *International Conference On Civil Engineering, Architecture and City Scape (ICCACS)*, (2016).
- [7] Tayfur B., "Perde duvarlarda bırakılan pencere boşluklarındaki boyut etkilerinin SAP2000 OAPI ile incelenmesi", *Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi*, (2018).
- [8] Karakaş, A.İ., "Elastik zemine oturan kule tipi yapıların SAP2000-OAPI kullanarak yapısal analizi ve optimum tasarımı", *Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi*, (2017).
- [9] Hussein, G. and Taysi, N., "Genetic Algorithm Optimization of Space Frame, 2nd International Balkans" *Conference on Challenges of Civil Engineering, BCCCE*, Albania 23-25 May (2013).
- [10] Fu, J., Wu, B., Wu, J., Deng, T. And Pi, Y., "Zhuang-Ning Xie\_Wind resistant size optimization of geometrically nonlinear lattice structures using a modified optimality criterion method", *Engineering Structures*, 173: 573–588, (2018).
- [11] Artar, M. and Daloğlu, A.T., "Optimum weight design of steel space frames with semi-rigid connections using harmony search and genetic algorithms", *Neural Comput & Applic*, 29: 1089–1100, (2018).
- [12] Mortazavia, A., Toğan, V. and Moloodpoor, M., "Solution of structural and mathematical optimization problems using a new hybrid swarm intelligence optimization algorithm", *Advances in Engineering Software*, 127: 106-123, (2019).
- [13] Sextos, A.G. and Balafas, G.K., "Using the new SAP2000 open application programming interface to develop an interactive front end for the modal push over analysis of bridges", *COMPdyn 2011 3rd ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering* Corfu, Greece, 25–28 May (2011).
- [14] Weinstein, J.C., Sanayei, S. and Brenner, B.R., "Bridge Damage Identification Using Artificial Neural Networks", *Journal of Bridge Engineering*, 223(11): 04018084, (2018).
- [15] Talaei, S., Beitollahi, A., Moshirabadi, S. and Fallahian M., "Vibration-based Structural Damage Detection Using

- Twin Gaussian Process (TGP)”, *Structures*, 16: 10–19, (2018).
- [16] Sanayei, M., Rohela, P., “Automated finite element model updating of full-scale structures with PARAmeter Identification System (PARIS)”, *Advances in Engineering Software*, 67: 99–110, (2014).
- [17] Abdeljaber, O., Avci, O., Kiranyaz, M.S., “Boashash, B., Sodano, S. and Inman, D.J, 1-D CNNs structural damage detection: Verification for on a structural health monitoring benchmark data”, *Neurocomputing* 275: 1308–1317, (2018).
- [18] Kılıç, İ., Bozdoğan, K. B., Aydın, S., Gök, S. G. ve Gündoğan S., “Kule tipi yapıların dinamik davranışının belirlenmesi: Kırklareli Hızır Bey Camii minaresi örneği”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 19-26, (2020).
- [19] Topal, U., Dede, T., Öztürk, H.T., “Stacking Sequence Optimization for Maximum Fundamental Frequency of Simply Supported Antisymmetric Laminated Composite Plates using Teaching–Learning–Based Optimization”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(6): 2281-2288, (2017).
- [20] Kazaz, İ., Kocaman, İ., “Seismic load capacity evaluation of stone masonry mosques”, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30(2): 557-573, (2018).
- [21] Fema 454 / Designing for Earthquakes A Manual for Architects (111-137) December (2006).
- [22] Tay, C.G., Koh, C.G., Liew J.Y.R., “Efficient progressive collapse analysis for robustness evaluation of buildings experiencing column removal”, *Journal of Constructional Steel Research*, 122: 395–408, (2016).
- [23] Rashidian, O., Abbasnia, R., Ahmadi R., “Progressive Collapse of Exterior Reinforced Concrete Beam–Column Sub-assemblages: Considering the Effects of a Transverse Frame”, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 479–497, (2016).
- [24] Bao, Y., Lew, H.S., Kunnath, S.K., “ Modeling of Reinforced Concrete Assemblies under a Column Removal Scenario”, *Journal of Structural Engineering*, 495–541, (2012).
- [25] Jayashankar, K.M., Jayashankar B.S., ”Progressive Collapse Resistance of Seismically Designed RC Framed Structures”, *International Journal of Engineering Science and Computing*, 6(7): 8619-8624, (2016).
- [26] Ilyas, U., Farooq, S.H., Qazi, A.u., Ilyas, M., “Progressive Collapse of RC Frame Under Different Levels of Damage Scenarios”, *The Nucleus* 54(4): 232-241, (2017).
- [27] Le, J., Xue Bao, B., Y., “Probabilistic analysis of reinforced concrete frame structures against progressive collapse”, *Engineering Structures*, 313–323, (2014).
- [28] DBYBHY, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, (2007).
- [29] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, (2018).
- [30] TS500 Türk Standardı: Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, TSE, Şubat (2000).
- [31] STA4-CAD, Structural Analysis for Computer Aided Design, Bilgisayar Destekli Tasarım için Yapısal Analiz, Ankara, (2019).
- [32] MATLAB, The language of technical computing, The Mathworks Inc., Natick, MA, (2014).
- [33] SAP2000, Integrated Software for Structural Analysis and Design: Computers and Struct. Inc. Berkeley, California, (2014).
- [34] Aslay, S.E., Okuyucu, D., “Erzincan Değirmenliköy Kilisesi apsis hasarının teknik olarak araştırılması”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(1): 387-402, (2020)





POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# An application to control media player with voice commands

## *Ses komutları ile media player kontrolü için bir uygulama*

*Yazar(lar) (Author(s)): Emre AVUÇLU<sup>1</sup>, Ayhan ÖZÇİFÇİ<sup>2</sup>, Abdullah ELEN<sup>3</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-1622-9059*

*ORCID<sup>2</sup>: 0000-0001-7733-9959*

*ORCID<sup>3</sup>: 0000-0003-1644-0476*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Avuçlu E., Özçifçi A. ve Elen A., “Ses komutları ile media player kontrolü için bir uygulama”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1311-1315, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.646675

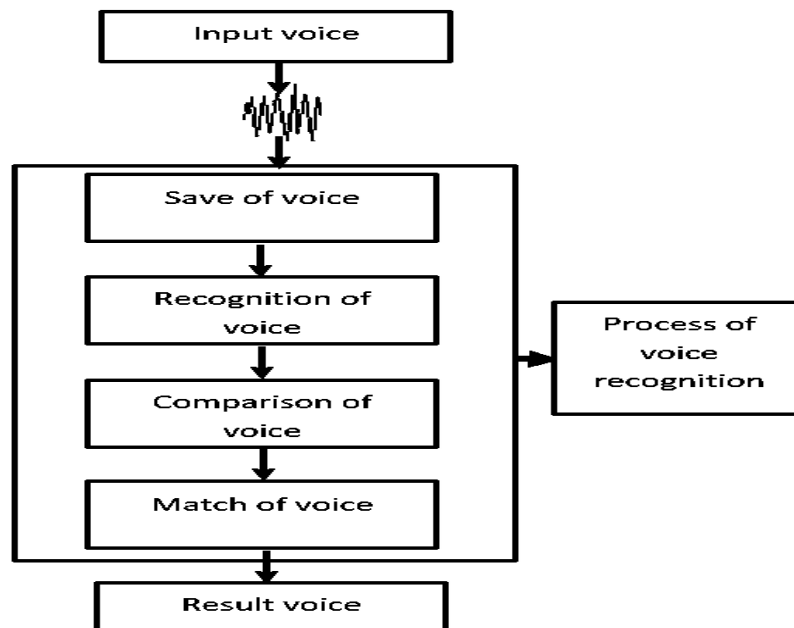
# An Application to Control Media Player with Voice Commands

## Highlights

- ❖ In the developed application, operations with keyboard and mouse can be done with voice commands.
- ❖ Voice commands can be sent with the wireless headset from anywhere in the shooting area.

## Graphical Abstract

The following Figure shows a general voice recognition process.



**Figure.** Voice recognition process

## Aim

This application was developed to address the needs of people who cannot listen to music on their own due to any disability.

## Design & Methodology

In order to manage the media player with voice commands, voice recognition libraries were first used.

## Originality

In this study, an application that provides media player control with voice commands was developed.

## Findings

In this study, test procedures were performed with 20 people. In some word tests, more than one test was performed over the same person's voice.

## Conclusion

100% accurate recognition can be achieved by using short words and words with full pronunciation when making voice definitions.

## Declaration of Ethical Standards

The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Ses Komutları ile Media Player Kontrolü İçin Bir Uygulama

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Emre AVUÇLU<sup>1\*</sup>, Ayhan ÖZÇİFÇİ<sup>2</sup>, Abdullah ELEN<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Bilgisayar Tek. Bölümü, Aksaray Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Mühendislik Fakültesi, Endüstri Müh. Bölümü, Aksaray Üniversitesi, Türkiye

<sup>3</sup>TOBB Meslek Yüksek Okulu, Bilgisayar Tek. Bölümü, Karabük Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 14.11.2019 ; Kabul/Accepted : 07.01.2020)

## ÖZ

Günümüzde teknolojiyi kullanmak insanların hayatlarını kolaylaştırmak açısından büyük öneme sahiptir. Teknoloji ile bazı uygulamaları çalıştırmak çok kolay bir hal almıştır. Bu çalışmada ses komutları ile media player kontrolü sağlayan bir uygulama geliştirilmiştir. Herhangi bir engelinden dolayı kendi kendine müzik dinleyemeyen kişilerin ihtiyaçlarını gidermek için bu uygulama geliştirilmiştir. Uygulama C# programlama dilinde gerçekleştirilmiştir. Media player'ı ses komutları ile yönetebilmek için önce ses tanıma kütüphanelerinden faydalanılmıştır. Geliştirilen uygulama da klavye Mouse ile media player üzerinden yapılan işlemler ses komutları ile gerçekleştirilebilmektedir. Ses komutları kablosuz kulaklık ile çekim alanının olduğu bir yerden verilebilir.

**Anahtar Kelimeler:** Ses tanıma, media player kontrolü, engelli birey.

# An Application to Control Media Player with Voice Commands

## ABSTRACT

Using technology today is of great importance in terms of making people's lives easier. It has become very easy to run some applications with technology. In this study, an application that provides media player control with voice commands was developed. This application was developed to address the needs of people who cannot listen to music on their own due to any disability. The application was implemented in C# programming language. In order to manage the media player with voice commands, voice recognition libraries were first used. In the developed application, operations with keyboard and mouse can be done with voice commands. Voice commands can be sent with the wireless headset from anywhere in the shooting area.

**Keywords:** Voice recognition, media player control, disabled individual.

## 1. INTRODUCTION

Today, it is nearly not possible for people to live and carry out some operations without technology. People have developed and used technology every day for their own benefit. Today it is very easy to control any application with software. Nowadays, many applications can be controlled with software so that people can live more comfortably. People can see examples of such practices in every aspect of their lives.

To facilitate the social life of people in studies in this field in the literature: Different voice recognition algorithms and command sets were used on MATLAB [1]. With different voice recognition algorithms, "On TV", "Off TV", "Volume Up", "Volume Down" and "Channel One" command sets were tried separately for male and female users [2]. It has been tried by establishing different algorithms on a phone simulation. The results obtained were found to vary according to the way the voice is spoken [3]. Over 80% success was achieved in voice recognition on the letters "a", "e" and "i" [4]. In a

different study, separate tests were performed on male and female users with different algorithms [5].

Using artificial intelligence techniques, a voice recognition system independent of text and speaker was developed on the Turkish language [6]. The syllable-based Turkish word recognition system was developed using different voice recognition algorithms [7, 8]. In the simulation environment performed on MATLAB, the successful recognition rate for 10 people was found to be 99% [9]. They performed music and speech recognition [10]. Successful results were obtained in the study which performed 40 commands [11]. It was controlled by voice commands of a remote controlled car [12]. It has been tried to determine the English pronunciation of the numbers 0-9 [13].

In this study; an application was developed to control the media player to listen to music with voice commands over the computer. The application was implemented using the SpeechRecognitionEngine Class in the System.Speech library in the C # .Net Framework. If there is a match in voice commands, the operations that can be done with mouse and keyboard are executed.

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : emreavuclu@aksaray.edu.tr

## 2. MATERIAL and METHOD

The application was programmed in C# programming language. This section describes how the voice recognition process is performed.

### 2.1. Voice Recognition Process

First stage; the voice recorded in the system. Once the voice is recorded, it can go through various processes and be processed. The following Figure 1 shows a general voice recognition process.

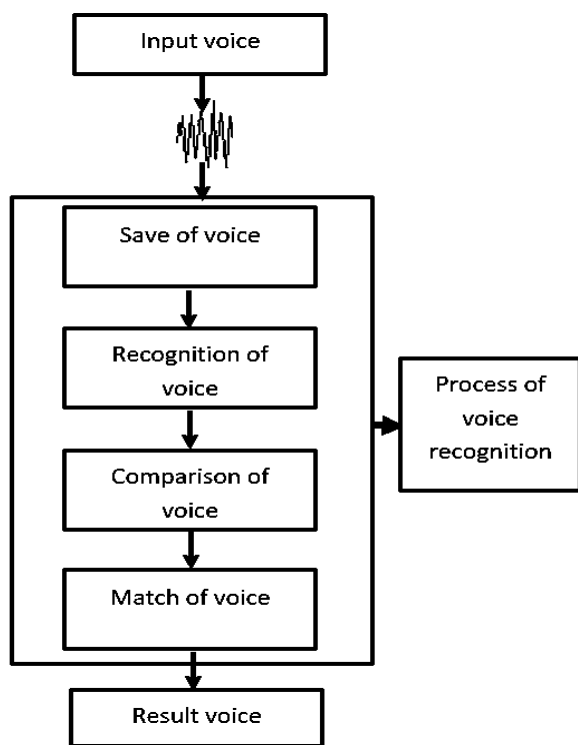


Figure 1. Voice recognition process.

The voice is digitized to perform these operations. The voice is first filtered and then sampled for digitization. Figure 2 shows an example of digitization function.



Figure 2. Example of digitization function.

Where  $x(t)$  is the analog signal,  $x(nT)$  is the digitized signal. In the digitizing stage, the filter shown in Figure 2 refers to the analog filter analog filtering and sampling are performed during the recording of the voice.

In order to use digital signal processing techniques, the analog signal must be represented as a series of numbers [14]. It utilizes the analysis and separation of voice signals to detect voice after sampling.

The voice wave that forms the sound has two important features. These properties are amplitude and frequency [15]. Frequency, while determining the soundness and quiver characteristics of voice; amplitude determines the intensity of the voice and the energy it carries. Equation 1 is given for the Total Amplitude (TG) calculation.

$$TG = \sum_{t=1}^n x(t) \tag{1}$$

In this equation  $x(t)$ ; amplitude at time  $t$ ; In other words, it expresses the energy carried by the voice wave at the moment  $t$ . If the sum of the total amplitude value calculated by this method is above a certain value, then the meaning of sound, that is, speech, is started.

Filters are used for two purposes in the processing of voice. These are the separation of the voice signal and the correction of the voice signal. Digital filters are FIR (Finite Impulse Response) filter and IIR (Infinite Impulse Response) filter. In FIR filters, the input signal forms the output  $y_n$ , which is the weighted sum of the current and previous inputs versus  $x_n$ . The mathematical expression of this filter is given by Equation 2.

$$y_n = b_0x_n + b_1x_{n-1} + b_2x_{n-2} + \dots + b_qx_{n-q} \tag{2}$$

In this equation  $y_n$  is the result of the filter output. In IIR filters, the input signal constitutes the output  $y_n$ , which represents the weighted sum of the previous outputs, together with the weighted sums of the current and previous inputs versus  $x_n$ . In this model, together with the  $x_n$  input, the weighted sum of the previous  $p$  outputs gives the filter output  $y_n$ . After digitizing the voice, the voice is encoded and the voice recognition process is completed. The following libraries should first be added to the system for voice recognition.

```

using System.Diagnostics;
private SpeechLib.SpSharedRecoContext
objRecoContext = null;
private SpeechLib.ISpeechRecoGrammar grammar
= null;
private SpeechLib.ISpeechGrammarRule menuRule
= null;
  
```

The design of the application consists of certain stages. From the recognition of voice commands to the execution of the media player, a number of operations are carried out. The flow diagram of the developed application is as in figure 3.

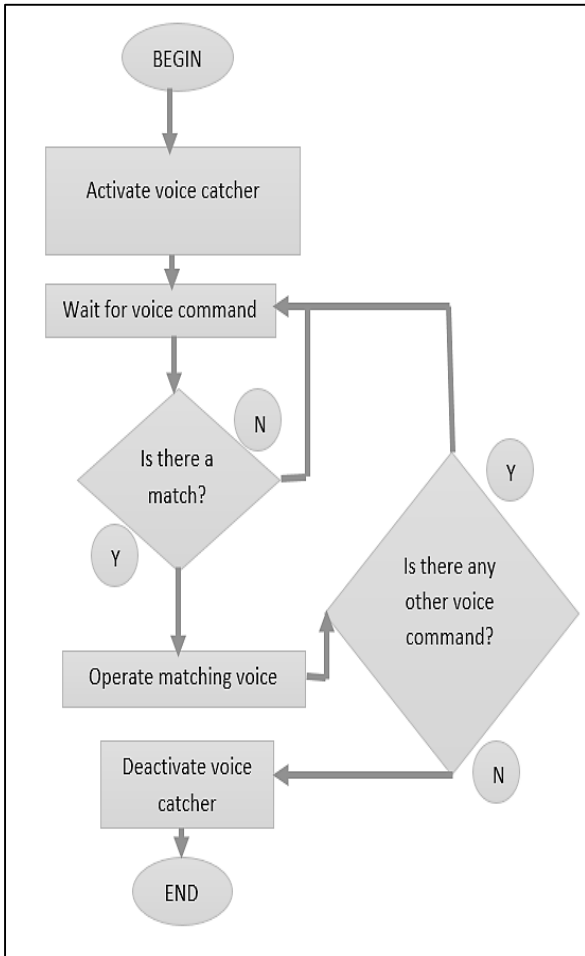


Figure 2. Flow diagram of the system.

Firstly, we need to add the media player component to our application as shown in Figure 4.

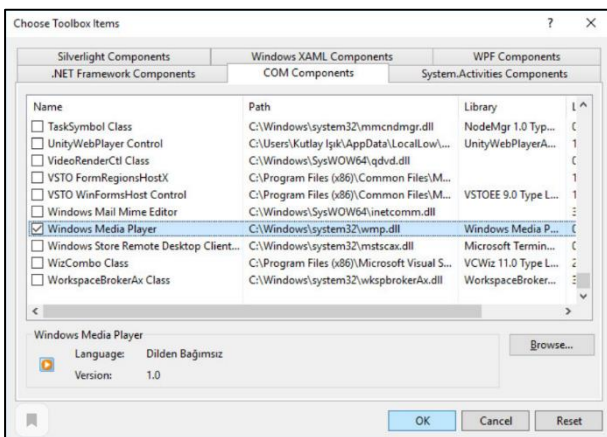


Figure 3. General structure of the system.

The general form design view of the application to be managed by voice commands is shown in Figure 5. We can activate or deactivate this application at any time.

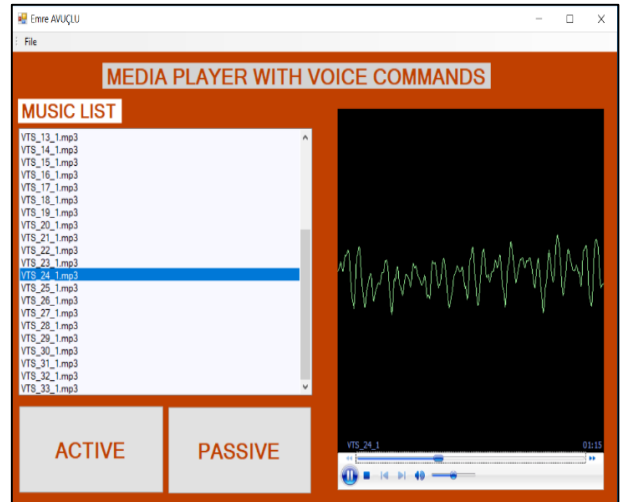


Figure 4. Interface of the developed application.

We need to include the following library in our system first.

```
using System.Speech.Recognition;
```

Voice detection can be performed with the methods in the “System.Speech” library in the .Net Framework. The following code blocks are used in the system for feedback after voice recognition.

```
SpeechSynthesizer Speech = new
SpeechSynthesizer();
PromptBuilder Builder = new PromptBuilder();
SpeechRecognitionEngine Recognition = new
SpeechRecognitionEngine();
```

First, the “player” command is given to start the application. This starts the application.

```
if (avuclu.Text == "player")
{
var mediaPlayer = "C:\\Program Files\\Windows
Media Player\\wmplayer.exe";
System.Diagnostics.Process.Start(mediaPlayer);
}
```

The code block required to activate or deactivate the application is as follows.

```

avuclu.Text = Result.PhraseInfo.GetText(0, -1,
true); // activate
objRecoContext = null; // deactivate

```

The definitions and their use for controlling the media player with voice commands are shown in Table 1 below.

**Table 1.** Commands and functions.

Voice commad	Feature
<b>Player</b>	Open the media player
<b>Open</b>	Add mp3 list to media player
<b>Active</b>	Media player active
<b>Passive</b>	Media player passive
<b>Play</b>	Mp3 Play
<b>Pause</b>	Mp3 Pause
<b>Next</b>	Mp3 Next in list
<b>Previous</b>	Mp3 previous in list
<b>Stop</b>	Mp3 Stop

After verification of the required definitions and voice command, the data transmission process is executed with the following code block.

```

avuclu.Text = Result.PhraseInfo.GetText(0, -1, true);
if (recog.Text == "play")
{
axWindowsMediaPlayer1.Ctlcontrols.play();
SpeechSynth.Speak("play");
}
if (avuclu.Text == "pause")
{
axWindowsMediaPlayer1.Ctlcontrols.pause();
SpeechSynth.Speak("pause");
}
if (avuclu.Text == " next")
{
axWindowsMediaPlayer1.Ctlcontrols.next();
SpeechSynth.Speak("next");
}
if (avuclu.Text == "previous")
{
axWindowsMediaPlayer1.Ctlcontrols.previous();
SpeechSynth.Speak("previous");
}
if (avuclu.Text == "stop")
{
axWindowsMediaPlayer1.Ctlcontrols.stop();
SpeechSynth.Speak("stop");
}

```

### 3. CONCLUSION

As the pronunciation of the voice command becomes more difficult and the number of letters in it increases, the level of accurate voice recognition decreases. 100% accurate recognition can be achieved by using short words and words with full pronunciation when making voice definitions. With misrecognition, the voice command performs the function linked to the nearest voice command. No action can be taken with inability to identify. In this study, test procedures were performed with 20 people. In some word tests, more than one test was performed over the same person's voice. The following in Table 2 shows the results of the experimental studies.

**Table 2.** Experimental results.

Words	Number of trials	Accurate recognition	False recognition	Error rate
<b>Player</b>	20	18	2	%10
<b>Open</b>	20	17	2	%15
<b>Active</b>	15	14	1	%6,66
<b>Passive</b>	15	13	2	%13,33
<b>Play</b>	10	10	0	%0
<b>Pause</b>	12	10	1	%16,66
<b>Next</b>	10	10	0	%0
<b>Previous</b>	25	18	5	%28
<b>Stop</b>	25	23	1	%8

As can be seen from the results, it was more difficult to identify words with a high number of words and difficult to pronounce. The application has a coding that can do everything we do about daily media player with voice commands. It is thought that the application will be useful for people who cannot use the computer for any reason (bedridden, elderly, disabled, etc.). Specially developed to facilitate the lives of the visually impaired. With the application you can meet your daily music listening needs without being connected to anyone.

In this study, media player control was provided to listen to music by remote voice commands. Voice commands can be sent from any point with a wireless or wired headset. Media player was managed with voice commands without using mouse and keyboard. In addition, this study will enable people with disabilities, elderly or bedridden patients to meet their listening needs. The application developed in C # using the Speech.dll library was tested with different voice commands.

### ACKNOWLEDGEMENT

This study was supported by Aksaray University Scientific Research Projects Coordinatorship, Aksaray, Turkey. Project Number: 2018-061.

### DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS

The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.



**REFERENCES**

- [1]. Karakaş M., "Computer Based Control Using Voice Input", *Master Thesis*, Dokuz Eylül University, (2010).
- [2]. Muda L., Begam M., Elamvazuthi I., "Voice Recognition Using Mel Frequency Cepstral Coefficient and Dynamic Time Warping Techniques", *Journal of Computing*, 2(3):138-143, (2010).
- [3]. Baygün M. K., Yaldir A. K., "Linear Predictive Coding ve Dynamic Time Warping Teknikleri Kullanılarak Ses Tanıma Sistemi Geliştirilmesi", *Pamukkale University*, (2009).
- [4]. Öztürk B., Çakar T., "Gerçek Zamanlı Ses Tanıma", *Graduation Project*, Istanbul University Faculty of Engineering Department of Electrical/Electronics Engineering, (2007).
- [5]. Demirci M. D., "Bilgisayar Destekli Ses Tanıma Sistemi Tasarımı", *Master Thesis*, Istanbul University Institute of Science and Technology, (2005).
- [6]. "Bilgisayar destekli bir dil programı" [Online]. Available: <https://docplayer.biz.tr/16256021-Bilgisayar-destekli-bir-dil-programi-turkce-konusma-tanima-sistemi.html> [Accessed: 19-Sep-2019].
- [7]. Aşlıyan R., Günel K., Yakhno T., "Dinamik Zaman Bükmesi Yöntemiyle Hece Tabanlı Konuşma Tanıma Sistemi", Çanakkale Onsekiz Mart University, *Academic Informatics*, (2008).
- [8]. Meral O., "Doğrusal Öngörülü Kodlama ve Adaptif Algoritma Tabanlı Konuşmacı Tanıma", *Master Thesis*, Istanbul University Institute of Science and Technology, (2008).
- [9]. Dede G., Sazlı, M.H., "Biyometrik Sistemlerin Örüntü Tanıma Perspektifinden İncelenmesi ve Ses Tanıma Modülü Simülasyonu", *Institute of Defense Sciences*.
- [10]. Bolat B., Küçük Ü., Yıldırım T., "Aktif Öğrenen PNN ile Konuşma/Müzik Sınıflandırma", *Akıllı Sistemlerde Yenilikler ve Uygulamaları Sempozyumu*, (2004).
- [11]. Asyalı, M.H., Yılmaz, M., Tokmakçı, M., Sedef, K., Aksebzeci, B.H., Mittal, R., "Design and Implementation of a Voice Controlled Prosthetic Hand", *Turk J. Elec. Eng. and Comp.*, 19(1): (2011).
- [12]. Leechor P., Pornpanomchai C., Sukklay P., "Operation of a Radio Controlled Car by Voice Commands", *2nd International Conference on Mechanics and Electronics Engineering (ICMEE 2010)*, (2010).
- [13]. Abushariah A.A.M., Gunawan T.S., Khalifa O.O., "English Digits Speech Based on Hidden Markov Models", *International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE 2010)*, (2010).
- [14]. Rabiner L., and Schafer R. W., "Digital Processing of Speech Signals", *Prentice Hall PTR*, 512, (1978).
- [15]. Huang X., Acero A., and Hon H. W., "Spoken Language Processing: A Guide to Theory", Algorithm and System Development (1st Ed.), *Prentice Hall PTR*, New Jersey, 980, (2001)



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Düşey düz bir levhanın periyodik salınımlarının ısı transferine etkisi

## *Effect on heat transfer of periodic oscillations of a vertical flat plate*

Yazar(lar) (Author(s)): Selma AKÇAY<sup>1</sup>, Ünal AKDAĞ<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-2654-0702

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-1149-742

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Akçay S., Akdağ Ü., “Düşey düz bir levhanın periyodik salınımlarının ısı transferine etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1317-1326, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.648373

# Düşey Düz Bir Levhanın Periyodik Salınımlarının Isı Transferine Etkisi

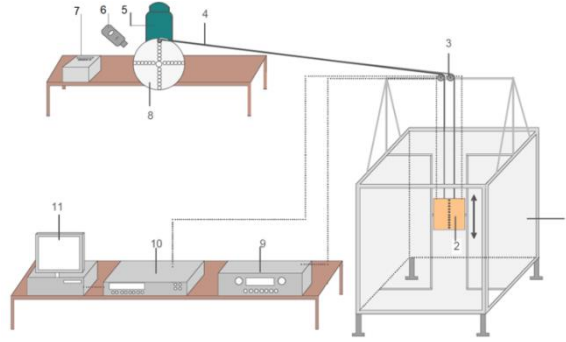
## Effect on Heat Transfer of Periodic Oscillations of a Vertical Flat Plate

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Hareketli dikey düz levha / Moving the vertical flat plate
- ❖ Salınım genliği ve frekansı / Oscillation amplitude and frequency
- ❖ Isı transferi / Heat transfer

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada, düşey düz bir levhanın periyodik salınımlarının ısı transferi üzerindeki etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. / In this study, effects on heat transfer of periodic oscillation of a vertical flat plate are experimentally and numerically investigated.



Şekil. Deneysel şematığı / Figure. Experimental schema

### Amaç (Aim)

Bu çalışma, düşey bir levhanın periyodik salınımlarının ısı transferine etkisini araştırmak için yapılmıştır. / This study was carried out to investigate the effect on heat transfer of periodic oscillations of a vertical plate.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Periyodik hareketli düşey levha üzerinde ısı geçişi, hem deneysel hem de ANSYS Fluent (18.2) ile sayısal olarak incelenmiştir. / Heat transfer on a periodically moving vertical plate was studied both experimentally and numerically with ANSYS Fluent (18.2).

### Özgünlük (Originality)

Salınım hareketinin karmaşık dinamik yapısı nedeniyle ısı transferine etkisi tam anlaşılammıştır ve yeni araştırmalara ihtiyaç vardır. / Due to the complex dynamics of the oscillatory motion, its effect on heat transfer is not fully understood and new researches are needed.

### Bulgular (Findings)

Sonuçlar, tablo ve şekillerle sunulmuştur. Deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki uyum gösterilmiştir. / Results are presented in the tables and figures. The agreement between the experimental and numerical results is shown.

### Sonuç (Conclusion)

Sonuçlar, ısı transferinin salınım genliği ve frekansının artması ile arttığını göstermiştir. / The results are shown the heat transfer increases with the increase in both oscillation amplitude and frequency.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Düşey Düz bir Levhanın Periyodik Salınımlarının Isı Transferine Etkisi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Selma AKÇAY<sup>1\*</sup>, Ünal AKDAĞ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Müh. ABD, Aksaray Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Aksaray Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 18.11.2019 ; Kabul/Accepted : 30.12.2019)

## ÖZ

Bu çalışmada, düşey düz bir levhanın periyodik salınımlarının ısı transferi üzerindeki etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel sistemi, içinde deneysel modelin hareket ettiği şeffaf bir muhafazayı, modelin salınım hareketini üreten volan-motor sistemini, güç kaynağını, veri toplama sistemini ve bilgisayarı içerir. Deneysel model, üzerine termoelemanlar yerleştirilmiş iki bakır levha ve levhalar arasında yerleştirilmiş Kapton ısıtıcılardan oluşur. Çalışmada, levhanın yüzeyine uygulanan ısı akısı ( $q''$ ), Womersley sayısı ( $Wo$ ) ve boyutsuz salınım genliği ( $Ao$ ) değiştirilmiş ve bu parametrelerin ısı transferi üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Ayrıca, çalışma deneysel verilere dayalı kontrol hacim tabanlı bir HAD çözücüsü kullanılarak sayısal olarak çözülmüştür. Sayısal sonuçlar, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Salınım genliği ve frekansının ısı transferine etkisini göstermek için levha yüzeyinde anlık hız ve sıcaklık görüntüleri elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçlar, ısı transferinin salınım parametrelerinden önemli derecede etkilendiğini ve salınım genliği ve frekansının artması ile arttığını göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Salınım genliği, salınım frekansı, hareketli düşey levha, ısı transferi.

# Effect on Heat Transfer of Periodic Oscillations of a Vertical Flat Plate

## ABSTRACT

In this study, effects on heat transfer of periodic oscillation of a vertical flat plate are experimentally and numerically investigated. The experimental setup includes a transparent enclosure hosting a moving experimental model, flywheel-motor assembly generating the oscillating movement of the model, power supply, data logger and personal computer. The experimental model comprises two copper plates with attached thermocouples and Kapton heaters placed between the plates. In the study, heat flux applied to surface of the plates ( $q''$ ), the Womersley number ( $Wo$ ) and dimensionless oscillation amplitude ( $Ao$ ) are varied and the effect of these parameters on the heat transfer is analysed. Furthermore, the study is numerically solved using a control-volume based CFD solver based on experimental data. The numerical results are compared with the experimental results. Instantaneous velocity and temperature profiles of the plate are obtained to explain the heat transfer mechanism. The numerical and experimental results are shown heat transfer is significantly affected by oscillation parameters and the heat transfer increases with the increase in both oscillation amplitude and frequency.

**Keywords:** Oscillation frequency, oscillation amplitude, moving the vertical plate, heat transfer.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Doğal taşınım ısı transferi, enerji verimliliğinin önem kazanmasıyla pek çok bilimsel ve teknolojik alanlarda uygulanan bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak günümüzde ısıtma ve soğutma uygulamalarında yalnız doğal taşınımın kullanılması ısı transferinde yetersiz kalmakta ve doğal taşınımın birlikte ısı transferini artıran alternatif yöntemler üzerinde durulmaktadır.

Zorlanmış taşınım, ısı taşınım katsayısının doğal taşınımından çok yüksek olması nedeniyle ısı transferinde sıklıkla tercih edilmektedir. Zorlanmış taşınım ısı transferinde, özellikle akış yatay olduğu zaman, ısıtılmış yüzeyler üzerindeki kaldırma kuvvetleri ihmal

edilmektedir, ancak düşey veya eğimli yüzeylerde kaldırma kuvvetleri akış alanında kuvvetli bir etkiye sahiptir ve bu durumlarda doğal taşınımı ihmal etmek büyük hatalara neden olmaktadır. Özellikle akışkan hızının düşük olduğu ve/veya yüzeyin sıcaklığının yüksek olduğu düşey veya eğimli yüzeylerde ısı transferi uygulamalarında zorlanmış taşınım ve doğal taşınım etkilerinin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Doğal taşınım ve zorlanmış taşınımın birlikte görülmesi durumu karışık taşınım olarak adlandırılır. Dolayısı ile doğal ve zorlanmış taşınım ısı transferini iyileştiren tüm aktif ve pasif ısı transferi yöntemleri, karışık taşınım ısı transferini de iyileştirebilir. Yüzey alanını artırmak için kanatçık kullanımı, akış içine çeşitli türbülantörlerin ilavesi, elektrik veya manyetik alan uygulamaları, temel akışkan içine nano boyutlu partiküllerin eklenmesi, süperkritik şartlar altında temel akışkanların kullanılması, salınımlı/pulsatif akışlar veya

\*Sorumlu Yazar (Corresponding author)  
e-posta : selma.352@hotmail.com

hareketli yüzeylerin kullanılması gibi uygulamalar ısı transferini artırmaktadır [1-9].

Salınlı/hareketli yüzeyler üzerinde hız ve sıcaklık dağılımları yüzeydeki ısı transfer hızını etkileyebilir. Hareketli yüzeyler üzerinde sınır tabaka içindeki kaldırma etkileri yatay yüzeyler için [10-11], eğik yüzeyler için [12-14], düşey düzlemler için [15-18] pek çok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bu çalışmalardan, salınlı akışların, yüksek ısı ve kütle transferine neden olduğu bilinmektedir. Salınım hareketi ya sabit bir cisim etrafındaki akışkanın titreşimi ile ya da durgun bir ortamdaki katı yüzeyin titreşimi ile elde edilmektedir. Her ikisinde de aynı amaca ulaşılmasına rağmen, sabit bir cisim etrafındaki akışkan titreşimi için daha fazla enerji gerekmektedir. Salınlı akışlar, yüksek performanslı kompakt ısı değiştiricilerinde, pistonlu motorlarda, pulsatif yakıcılarda, kimyasal reaktörlerde, stirling motorlarında, kriyojenik soğutucularda, uzay endüstrisinde ve askeri alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [19-23].

Prasad ve Ramanathan [24], elektrikle ısıtılmış dikey bir levhadan doğal taşınım ısı transferi üzerinde, boyuna harmonik salınımların etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında, farklı salınım genliği (0-25 inch), salınım frekansı (10-20 cps) ve levha sıcaklığı (100-200 °F) için sınır tabakada sıcaklık profillerini Mach-Zehnder interferometer ile ölçmüşlerdir. Isı transferinin salınım parametrelerine bağlı olarak arttığını ve en yüksek ısı transferinin %33 olarak elde edildiğini bildirmişlerdir. Zhang vd. [25], periyodik salınlı, ısıtılmış dikey bir levhadan doğal taşınım ısı transferini laminer akış şartlarında incelemişler ve sonuçlarını literatürdeki teorik çalışma sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Ayrıca, levha salınımlarının sabit levhaya göre ısı transferini önemli derecede iyileştirdiğini bildirmişlerdir. Goma ve Taweel, [26] sabit sıcaklığa sahip düşey yüzeylerde doğal ve zorlanmış taşınım ısı transferi üzerinde salınımların etkisini analitik olarak incelemişler ve yüzey salınımlarının ısı transferinin iyileşmesinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu bildirmişlerdir.

Saeid [27], düşey bir levha yüzeyinden zamana bağlı, karışık taşınım üzerinde sıcaklığın periyodik salınımlarının etkisini implicit sonlu fark metodu ile incelemiştir. Düşey levhada, sıcaklığın farklı genlik ve frekanslarında, yardımcı ve zıt yöndeki akışın ısı transferini ve sürtünme katsayısını laminer akış rejiminde  $Pr=0.72$  ve  $Pr=7.0$  için araştırmıştır. Çalışma sonucunda sabit  $Pr$  ve  $Ri$  sayıları için yüzey sıcaklık salınımlarının genliğinin veya frekansının artması ile çevrim ortalamalı  $Nu$  sayısının azaldığını bildirmiştir.

Nobari ve Naderan, [28] farklı salınım frekansı ve genliğine sahip iki boyutlu dairesel bir silindir etrafındaki akışı, sonlu eleman metodu kullanarak incelemişlerdir. Akış alanında cismin hareketini tariflemek için Arbitrary Lagrangian–Eulerian (ALE) şeması kullanarak silindir hareketinin çapraz akış ve düz salınım için iki farklı durumunu araştırmışlardır. Sayısal sonuçların deneysel

verilerle karşılaştırmasını yaparak, simülasyonların  $Re=300$ 'e kadar geçerli olduğunu belirterek akış görüntüleme yöntemi ile silindir salınımlarının akış alanı ve vorteks şekli üzerindeki etkisini göstermişlerdir. Ayrıca, sonuçları literatürde yer alan deneysel verilerle iyi bir uyum içinde olduğunu belirtmişlerdir. Ramesh vd. [29], taşınım sınır şartları ile eğimli sabit/hareketli düz bir levhanın geçen akış ve ısı transferinde sınır tabaka için matematiksel bir model sunmuşlardır. Akış ve ısı transferi üzerinde levhanın eğim açısının,  $Pr$ , yerel  $Gr$  ve Biot sayılarının etkilerini analiz etmişler, çalışmalarının sonucunda, sabit levhanın sıcaklığının, hareketli levhanın sıcaklığından daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Li vd. [30], sabit ısı akısına sahip dikdörtgen düşey düz bir düzlemden ısı transferini ve etrafındaki akışkan akışını, laminer pulsatif akış şartlarında sayısal olarak inceleyerek elde ettikleri sonuçları, yaptıkları deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Sonuçta, pulsatif parametrelerin akış ve ısı transferini önemli derecede etkilediğini ve düşük pulsatif genliklerde sıcaklık değişimlerinin tek tepe noktası oluşturduğunu, yüksek pulsatif genliklerde ise sıcaklığın çoklu tepe modlarında dalgalandığını göstermişlerdir. Krishna ve Jyothi [31], gözenekli bir ortam içerisinde bulunan salınlı levhanın üniform manyetik alan etkisi altında, ısı ve kütle transferini teorik olarak incelemişler ve salınım frekansı nedeniyle akış alanında ters akış etkilerinin gözlemlendiğini, ısı  $Gr$  sayısının artması ile akış alanının hızının düştüğünü,  $Pr$  sayısının artması ile ısı sınır tabaka kalınlığının azaldığını bildirmişlerdir.

Khan vd. [32], analitik çalışmalarında, tam çözümler için Laplace ve sonlu Hankel dönüşümlerini uygulayarak düşey yönde salınlı bir silindirde, doğal taşınım sonucu gerçekleşen ısı transferini incelemişler ve silindirin kosinüs ve sinüs salınımlarına karşılık gelen hız ve sıcaklık dağılımlarını elde etmişlerdir. Sonuç olarak  $Pr$  sayısının artması ile sıcaklık değerlerinin düştüğünü ve  $Nu$  sayısının arttığını, zamanın çok küçük değerlerinde taşınım ısı transferi baskın iken, büyük değerlerinde iletim yoluyla ısı transferinin daha baskın olduğunu, ayrıca akışkan hızının  $Gr$  sayısı ile arttığını,  $Pr$  sayısı ile azaldığını bildirmişlerdir.

Ghiasi vd. [33], döner salınlı, dairesel silindirden tutturulmuş bir ayırma plakasında laminer sıkıştırılmaz akış için ısı transferini sayısal olarak incelemişlerdir. Parametrik çalışmalarında salınım frekansı, ayırıcı plaka uzunluğu ve  $Re$  sayısını değiştirerek bu parametrelerin akış ve ısı transferine etkilerini incelemişlerdir. Farklı frekanslarda salınımların komplike olduğunu, daha yüksek frekanslarda daha fazla ısı transferi sağlandığını, ancak ayırıcı bölgede, sürtünme katsayısının çok fazla arttığını bildirmişlerdir. Salınım ve ayırıcı plakanın eşzamanlı kullanımının, sürüklemenin azaltılması ve ısı transferi artışında hem olumlu hem de olumsuz etkilere sahip olabileceğini gözlemlenmiştir.

Sarhan vd. [34], yatay ve farklı açılarda eğimli düz bir alüminyum levhanın ısı performansı üzerinde, düşey düzlemden sinüzoidal titreşimlerin etkilerini deneysel olarak incelemişler ve çalışmalarında titreşim genliğini

(1.5-7.5 mm), titreşim frekansını (0-16 Hz) ve oryantasyon açısını (30°, 45° ve 60°) değiştirmişlerdir. Sonuçta, ortalama ısı transferi katsayısının, plakanın yatay olduğu durumlarda çok daha yüksek olduğunu, oryantasyon açısı arttıkça azaldığını bildirmişler ve salınım frekansındaki artışın, ortalama ısı transfer katsayısında bir artışa yol açtığını ve maksimum artışın, yatay konumda ve yüksek frekanslarda elde edildiğini belirtmişlerdir. Lee vd. [35], kare şeklinde kapalı bir muhafaza içerisinde, dönen düz bir levhadan ve ısı kaldırma kuvvetlerinden meydana gelen karışık taşınım ısı transferini sayısal olarak incelemişlerdir. Hesaplamalarını, Pr sayısını sabit ( $Pr=0.71$ ) tutarak farklı Rayleigh sayısı ve rotasyonel Re sayısı için gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda, ısı transferi için kritik bir Ra sayısı olduğunu ( $Ra=0.13 \times 10^6$ ) ve bu değerin altında ısı transferinin iyileştiğini, üzerinde ise baskılandığını bildirmişlerdir. Ra sayısının eşik değeri aştığında termal salınım meydana geldiğini ve termal salınım frekansının, Ra sayısına, rotor uzunluğuna ve rotorun dönme hızına bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Salınlı akışlar ve hareketli yüzeyler ile ilgili bugüne kadar yapılan çalışmalarda, genelde ısı transferinin iyileştiği yönünde görüşler bildirilmekle birlikte aksi yönde görüşlerde mevcuttur [33, 36]. Ayrıca bu konuda deneysel çalışmalar oldukça azdır. Periyodik salınım hareketinin dinamiğinin karmaşık olması nedeniyle ısı transferi üzerindeki etkisi tam olarak anlaşılabilmiştir. Akış rejimi, katı yüzeyin geometrisi, akışkan sıcaklığı, yüzey sıcaklığı, salınımın genliği ve frekansı gibi akış ve ısı transferini etkileyen pek çok parametrelerin bulunması nedeniyle optimum parametreleri belirlemek için yeni araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada, sabit ısı akısına sahip düşey bir levhanın yüzeyinde karışık taşınım ısı transferi üzerinde periyodik salınımların etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir.

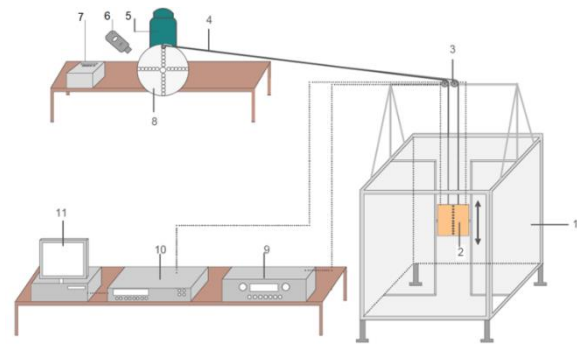
## 2. DENEYSSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

Bu çalışmada kullanılan deney sistemi Şekil 1'de verilmiştir. İçerisinde, deneysel modelin salınım hareketini yaptığı  $800 \times 800 \times 800$  mm<sup>3</sup> ölçülerinde alüminyum profilden oluşan bir muhafaza tasarlanmıştır. Bu muhafazanın alt ve üst kısmı açık, diğer yan yüzeyleri kapalıdır. Muhafazanın amacı, deneysel modele baca etkisi oluşturmak ve dışardan gelen hava akımlarını önlemektir. Deneysel modelin, düşey yönde hareketini sağlamak için muhafaza içerisine kılavuz raylar monte edilmiş ve alüminyum çerçevenin üzerine askı sistemi oluşturulup 4 adet makara yerleştirilmiştir.

Deneysel model,  $210 \times 210 \times 1.5$  mm<sup>3</sup> ölçülerinde iki adet düz bakır levha, levhaların üzerine belirli aralıklarla monte edilen termoelemanlar ve levhalar arasına yerleştirilen Kapton ısıtıcılardan oluşmuştur. Modelin alt kısmına  $210 \times 15 \times 4$  mm<sup>3</sup> ölçülerinde üçgen şeklinde ahşap uç yerleştirilmiştir. Deneysel modelin detayları Şekil 2'de şematik olarak verilmiştir.



a



b

Şekil 1. a-Deney sistemi (Experimental setup), b-Deney şematığı (Experimental schema)

(1- Şeffaf muhafaza, 2- Deneysel model, 3- Makara sistemi, 4- Askı sistemi, 5- DC motor, 6- Takometre, 7- Hız ayar ünitesi, 8-Volan, 9- Güç kaynağı, 10-Veri toplama sistemi, 11- Bilgisayar.)

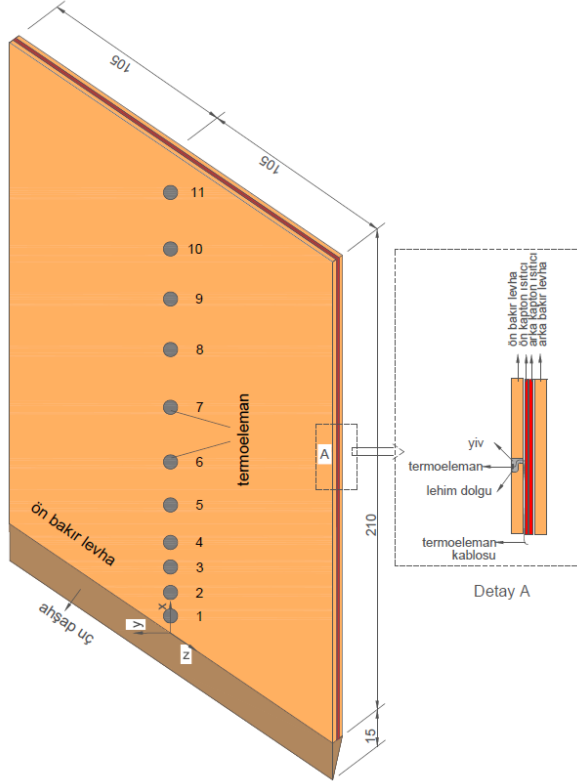
Yüzey sıcaklığını ölçmek için bakır levhalar üzerine, orta eksen boyunca, düşey yönde, tek sıra halinde, belli aralıklarla K-tipi termoelemanlar yerleştirilmiştir. Ön bakır levhada 11, arka bakır levhada ise 3 adet termoeleman bulunmaktadır. Ortam sıcaklığını ölçmek için 2 adet termoeleman kullanılmıştır. Termoeleman kabloları, deneysel modelin yan kısımlarından dışarı çıkarılmış ve veri toplama sistemine bağlanmıştır.

Yüzey sıcaklığını ölçmek için bakır levhalar üzerine, orta eksen boyunca, düşey yönde, tek sıra halinde, belli aralıklarla K-tipi termoelemanlar yerleştirilmiştir. Ön bakır levhada 11, arka bakır levhada ise 3 adet termoeleman bulunmaktadır. Ortam sıcaklığını ölçmek için 2 adet termoeleman kullanılmıştır. Termoeleman kabloları, deneysel modelin yan kısımlarından dışarı çıkarılmış ve veri toplama sistemine bağlanmıştır.

Kapton ısıtıcılardan çıkan güç kabloları ise güç kaynağına bağlanmıştır. Hesaplamalarda, ön bakır levhada bulunan 11 adet termoelemanın alınan sıcaklık değerleri değerlendirmeye alınmış, arka bakır levhadaki termoelemanlar ise kontrol amacıyla kullanılmıştır. Veri toplama sisteminden alınan sıcaklık verileri bilgisayara aktarılmış ve bu veriler ısı transferi hesaplamalarında kullanılmıştır. Deneysel modelin üst kısmına açılan iki ayrı delikten rijit bir ip geçirilmiş ve bu ipler



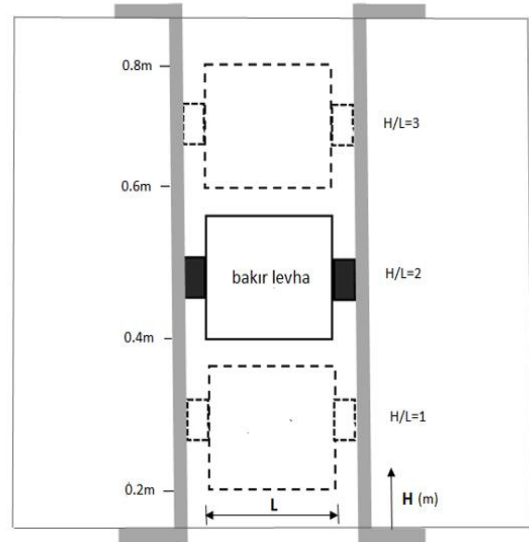
makaralardan geçirilerek belli mesafeden sonra birleştirilmiş ve volana bağlanmıştır. Modelin periyodik salınım hareketinde kullanılan volan, 2.4 kW bir DC motor tarafından tahrik edilmektedir. Volan üzerinde açılmış deliklerden salınımın genliği ve motor hız ayar ünitesinden salınımın frekansı ayarlanmaktadır.



Şekil 2. Deneysel model (Experimental model)

Deneyleerin uygulanmasında, ilk önce sabit ısı akısına sahip deneysel model, şeffaf muhafazanın içerisinde düşey olarak üç ayrı konumda sabit bırakılmıştır. Bu konumlar, H/L ile tariflenmiştir (Şekil 3). Burada H, muhafazanın altından ölçülen düşey mesafeyi, L ise levha uzunluğunu göstermektedir. Deneysel model, şeffaf muhafaza içinde üç farklı konumunda (H/L=1, 2, 3) sabit bırakılmış ve her H/L konumda levha yüzeyinden alınan sıcaklıklar kaydedilmiştir. Daha sonra sabit levhadan elde edilen sıcaklıklara göre doğal taşınım ile ısı transferi hesaplanmış ve H/L=2 ile elde edilen değer, salınımlı levhanın ısı transferinde referans olarak kullanılmıştır.

Periyodik salınım hareketi için deneysel model, şeffaf muhafaza içerisinde H/L=2 konumunda bırakılmış, volan üzerinden salınım genliği, motor hız ünitesinden salınım frekansı ayarlanmış ve levhaya verilen sabit ısı akısı güç kaynağından ayarlanmıştır. Böylece deneysel model, şeffaf muhafaza içinde, belirlenen sabit ısı akısında, belirli genlik ve frekansta periyodik olarak salınım hareketine belirli bir süre (t=2700s) devam etmiştir. Bu süre sonunda, termoelemanlardan alınan sıcaklık verilerine göre karışık taşınım ile ısı transferi hesaplanmıştır.



Şekil 3. Deneysel modelin muhafaza içindeki H/L konumları (H/L positions of experimental model in enclosure)

Bu çalışmada, ısı transferini etkileyen boyutsuz sayılar aşağıda verilmiştir:

$$Nu = f(Pr, Gr, Re_w, A_o)$$

Deneysel modelin salınım genliği ve salınım frekansını tariflemek için boyutsuz salınım genliği ( $A_o$ ) ve Womersley sayısı ( $Wo$ ) kullanılmıştır:

kullanılmıştır:

$$Wo = L \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} \quad (1)$$

$$A_o = \frac{x_m}{L} \quad (2)$$

burada,  $\omega$ ,  $\nu$ ,  $x_m$ , L parametreleri sırasıyla açılma hızı (rad/s), kinematik viskoziteyi ( $m^2/s$ ), volanın genişliğini (m), levha uzunluğunu (m) göstermektedir. Deneyleer, üç farklı ısı akısında ( $q''$ : 250 W/m<sup>2</sup>, 500 W/m<sup>2</sup> ve 625 W/m<sup>2</sup>), dört farklı boyutsuz salınım genliğinde ( $A_o$ : 0.4, 0.75, 1.1, 1.4) ve beş farklı  $Wo$  sayısında ( $Wo$ : 65, 92, 113, 131, 146) yapılmıştır.

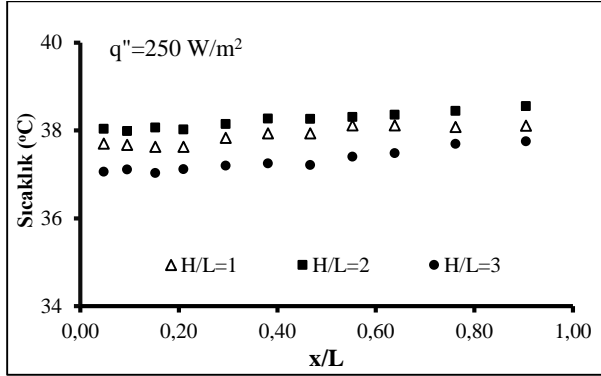
Sabit ısı akısına sahip düşey levhanın periyodik salınım hareketinden dolayı levha üzerinde periyodik akış meydana gelmekte ve alınan sıcaklık değerleri zamana bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle, her bir termoelemanından alınan sıcaklık verileri zamana bağlı olarak ayrı ayrı kaydedilmiştir. Ortalama sıcaklıklar, her bir termoelemanından alınan anlık sıcaklıkların zaman ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Zaman aralıkları eşit olduğu için ortalama sıcaklıklar Eşitlik 3 ile hesaplanmıştır.

$$T_{w,x} = \frac{1}{N\Delta t} \sum_{i=1}^N T_{w,i} \Delta t \quad (3)$$

burada, N toplam veri sayısı,  $\Delta t$  zaman aralığı,  $T_w$  yüzeyin anlık sıcaklıklarını göstermektedir. Ortalama levha yüzey sıcaklığı ise her termoelemanından alınan ortalama sıcaklıkların aritmetik ortalaması ile bulunmuştur (Eşitlik 4).

$$\bar{T}_w = \frac{T_{w1} + T_{w2} + T_{w3} + \dots + T_{wn}}{n} \quad (4)$$

$q''=250 \text{ W/m}^2$  sabit ısı akısında, deneysel modelin, şeffaf muhafaza içindeki farklı H/L sabit konumlarında levha yüzey sıcaklıkları Şekil 4'te verilmiştir. Yüzey sıcaklıkları, H/L=3 konumunda en düşük, H/L=2 konumunda en yüksek olarak bulunmuştur. Referans olarak alınan doğal taşınım ile ısı transferi hesaplamalarında H/L=2 konumu kullanılmıştır.



Şekil 4. Deneysel modelin farklı H/L konumları için yüzey sıcaklıkları (Surface temperatures for different H/L positions of the experimental model) ( $q''=250 \text{ W/m}^2$ )

Şekil 5 ile  $q''=625 \text{ W/m}^2$  için, farklı salınım genliği ve frekans ile yüzey sıcaklıklarının değişimi verilmiştir. Düşük genlikte,  $Wo$  sayısının yüzey sıcaklıkları üzerindeki etkisi çok azdır, yüksek genliklerde ise salınım frekansının etkisi daha net gözlemlenmiştir. Yüksek genliklerde, levha yüzey sıcaklıkları arasındaki farkın arttığı ve  $Wo$  sayısının artması ile yüzey sıcaklıklarının düştüğü görülmektedir.

Bu çalışmada, hem sabit düşey levha üzerindeki doğal taşınım ile ısı transferi hem de periyodik salınımlı düşey levha üzerindeki karışık taşınım ile ısı transferi hesaplanmıştır. Isı transferi için kullanılan  $Nu$  sayısı Eşitlik 5 ile verilmiştir.

$$Nu(x, t) = \frac{h(x, t)L}{k_f} \quad (5)$$

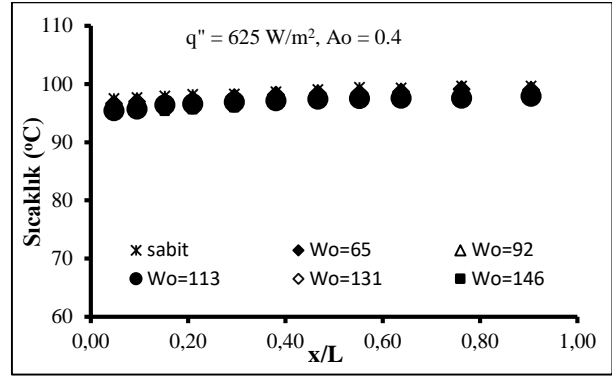
Periyodik akışta, çevrim ortalamalı  $Nu$  sayısı ise Eşitlik 6'da verilmiştir.

$$Nu_m = \frac{1}{\tau L} \int_0^L \int_0^\tau Nu(x, t) dt dx \quad (6)$$

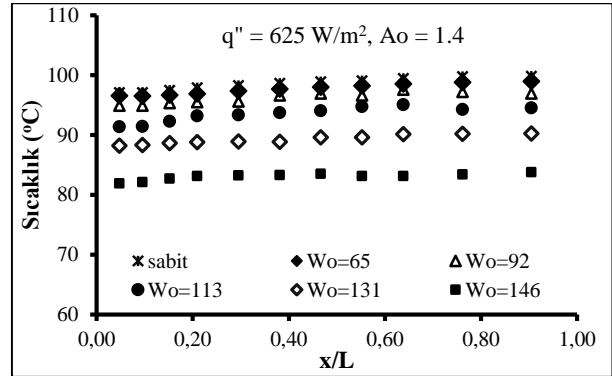
burada,  $\tau$  periyodik akışın çevrim zamanı,  $L$  (m) ise levha uzunluğudur. Hesaplamalarda kullanılan ortalama  $Nu$  sayısı Eşitlik 7 ile tariflenmiştir;

$$Nu_m = \frac{q''L}{k_f(\bar{T}_w - T_\infty)} \quad (7)$$

burada,  $h$  ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ) ısı taşınım katsayısı,  $k$  ( $\text{W/mK}$ ) akışkanın ısı iletim katsayısı,  $T_w$  ( $^\circ\text{C}$ ) yüzeyin ortalama sıcaklığı, ve  $T_\infty$  ( $^\circ\text{C}$ ) ise ortam sıcaklığıdır. Kapton ısıtıcı tarafından yüzeye uygulanan sabit ısı akısı ise  $q''$  ( $\text{W/m}^2$ ) olarak tariflenmiştir.



a



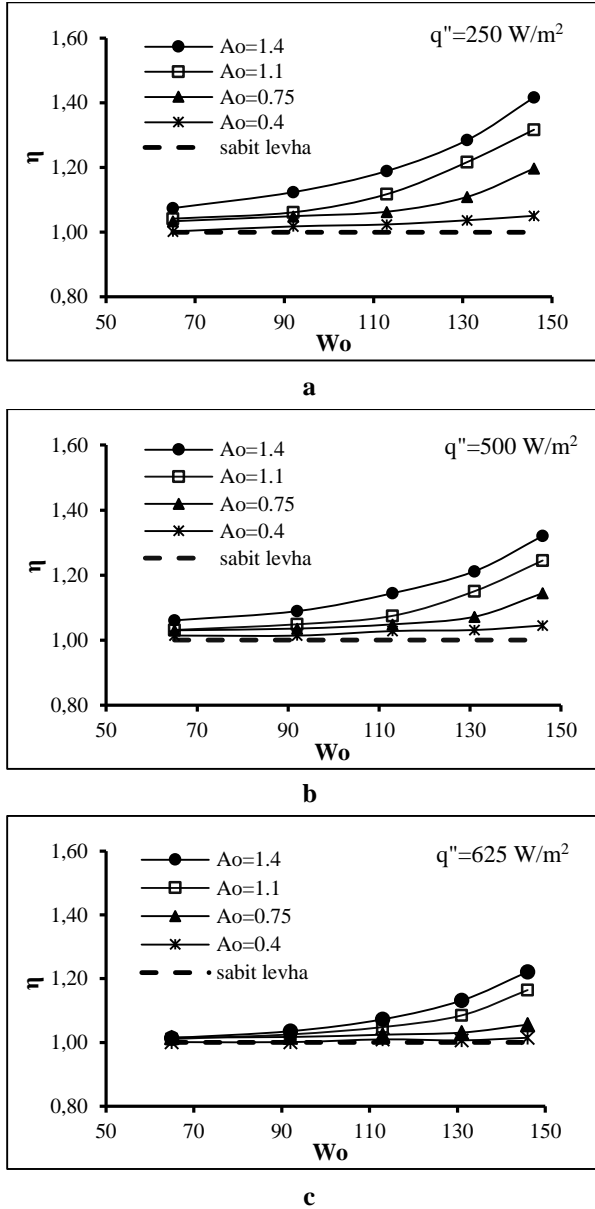
b

Şekil 5. Salınım frekansı ile levha yüzey sıcaklıklarının değişimi, (Variation of the plate surface temperatures with oscillation frequency) a-  $Ao=0.4$ , b- $Ao=1.4$  ( $q''=625 \text{ W/m}^2$ )

Periyodik salınımlı düşey levha üzerinde karışık taşınım için elde edilen  $Nu$  sayısının ( $Nu_m$ ), H/L=2 konumunda sabit bırakılan düşey levha üzerinde doğal taşınım için hesaplanan  $Nu$  sayısına ( $Nu_s$ ) oranı ısı transferi performansı ( $\eta$ ) olarak tariflenmiş ve Eşitlik 8'de verilmiştir. Isı transferi performansının 1'den büyük olması, sabit levha üzerinde doğal taşınım ile ısı transferine göre, salınımlı levha üzerinde karışık taşınım ısı transferindeki iyileşmeyi göstermektedir.

$$\eta = \frac{Nu_m}{Nu_s} \quad (8)$$

Şekil 6'da farklı ısı akılarında, değişen genlik ve frekansların ısı transferi performansına etkileri verilmiştir. Tüm ısı akılarında artan genlik ve frekansla birlikte ısı transferi performansının da arttığı görülmektedir. Düşük ısı akılarında bu artışın daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, artan ısı akılarında doğal taşınım ile  $Nu$  sayısının artmasından kaynaklanmaktadır. En yüksek ısı transferi performansı,  $q''=250 \text{ W/m}^2$  için yüksek genlikte ( $Ao=1.4$ ) ve yüksek frekansta ( $Wo=146$ ) elde edilmiştir. Deneysel çalışmada, Holman [37] tarafından geliştirilen "Belirsizlik Analizi" yöntemi ile deneylerdeki toplam belirsizlik hesaplanmış ve ortalama toplam belirsizlik % 4.23 olarak tespit edilmiştir.



**Şekil 6.** Farklı ısı akıları için değişen genlik ve frekansla ısı transfer performansının değişimi (Variation of heat transfer performance with varying amplitude and frequency for different heat fluxes), a- $q''=250 \text{ W/m}^2$ , b- $q''=500 \text{ W/m}^2$ , c- $q''=625 \text{ W/m}^2$

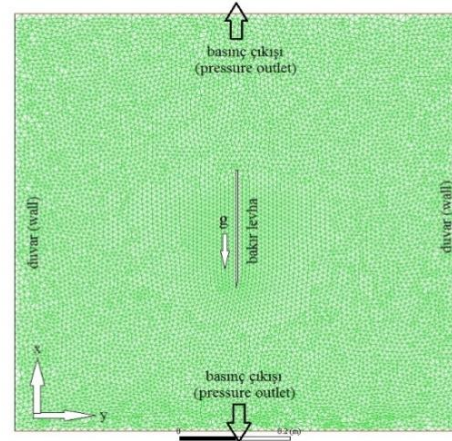
### 3. SAYISAL ÇALIŞMA (NUMERICAL STUDY)

Bu bölümde, düşey yönde periyodik hareketli düz levha üzerinde karışık taşınım ile oluşan ısı geçişi, deneysel parametreler esas alınarak sayısal olarak incelenmiştir. Simülasyonlarda, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analiz yöntemine göre çözüm yapan ANSYS FLUENT 18.2 ticari yazılımı kullanılmıştır. Bu programda, süreklilik, momentum ve enerji denklemleri sonlu hacimler yöntemi ile ayrıştırılmaktadır [38]. Sayısal çözüm alanının çizilmesi ve hücrelere bölünmesi (mesh) Workbench programı ile yapılmıştır. Sayısal model için şeffaf muhafaza  $800 \times 800 \text{ mm}^2$  ölçülerinde iki

boyutlu olarak düşünülmüştür. Bu muhafaza içerisine  $210 \text{ mm}$  uzunluğunda ve  $4 \text{ mm}$  kalınlığında bakır levha düşey olarak yerleştirilmiştir. Oluşturulan sayısal model ve uygulanan ağ yapısı, sınır şartları ile birlikte Şekil 7'de verilmiştir.

Grid bağımsızlığını sağlamak, optimum hücre sayısı ve büyüklüğünü tespit etmek amacıyla farklı eleman sayılarında testler uygulanmış ve elde edilen Nu sayıları karşılaştırılmıştır. Bu nedenle,  $H/L=2$  konumunda  $q''=250 \text{ W/m}^2$  için sabit düşey levha yüzeyinden doğal taşınım ile elde edilen Nu sayıları hesaplanmıştır. Sayısal modelde 9847, 11699, 13756, 18643, 19857, 21453 eleman (ağ) sayıları için hesaplanan Nu sayıları sırasıyla 108.55, 110.78, 114.65, 115.31, 116.82, 117.23 olarak elde edilmiştir. 18643 eleman sayısından sonra Nu sayısındaki değişimin %1.5'den az olduğu için bu çalışmada sabit levha için 18643 eleman sayısı (ağ) tercih edilmiştir. Çözüm metodunda zamana bağlı problemlerde daha hassas sonuç verdiği için PISO algoritması tercih edilmiştir.

Basınç, momentum ve enerji denklemlerinin ayrıştırılmasında Second Order Upwind şema kullanılmıştır.



**Şekil 7.** Sayısal model ağ yapısı ve sınır şartları (Numerical model mesh structure and boundary condition)

Yakınsama kriteri olarak enerji eşitliklerinde  $10^{-8}$ , momentum eşitliklerinde  $10^{-6}$  ve süreklilik denkleminde  $10^{-3}$  kullanılmıştır. Çözümlere doğal taşınım etkilerini de dahil etmek için akışkan yoğunluğunu sıcaklığın fonksiyonu olarak tanımlayan Boussinesq yaklaşımı seçilmiştir.

Sayısal çalışmada, bakır levhanın düşey yönde periyodik hareketini tariflemek için zamana bağlı hız profili Eşitlik 9 ile verilmiştir.

$$u_w = A_0 \sin(\omega t) \quad (9)$$

Hava tabakası içerisindeki bakır levhanın periyodik hareketi için programda, hareketli ağ (dynamic mesh) bölümü aktif hale getirilmiştir. Hareketli mesh modeli, sürekli yenilenen ağ yapısından dolayı daima zaman bağlı çözüm gerektirmektedir. Bu modelde, Smoothing

metod için Spring/Laplace yöntemi, Remeshing metodunda ise Local Cell yöntemi kullanılmıştır. Cismin periyodik hareketi sırasında deforme olan bölgelerdeki mevcut ağ yapısı, belirlenen parametreler doğrultusunda sürekli olarak yenilenmiştir.

Düşey yönde periyodik hareketli, iki boyutlu, düz bir levha üzerinden geçen zamana bağlı, karışık taşınım akışı için, Boussinesq yaklaşımına göre kütle, momentum ve enerji korunum denklemleri aşağıda verilmiştir.

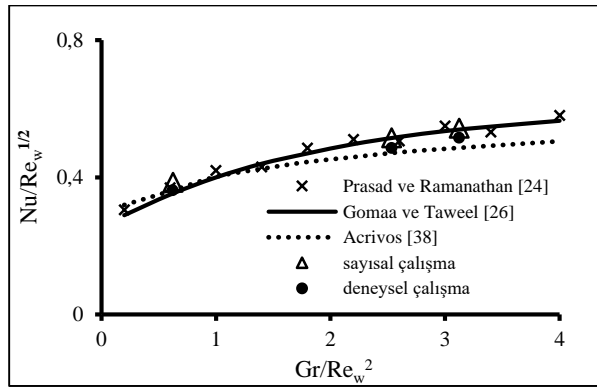
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + g\beta(T - T_\infty) \quad (11)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (12)$$

Çözüm sonuçlarını değerlendirmek için 0.01 zaman adımında, 2700 s süreye ulaşana kadar iterasyonlar devam etmiştir. Levhanın periyodik hareketinden dolayı yüzeyde periyodik akış meydana gelmektedir, çözümlerin değerlendirilmesinde bir periyodu içeren zaman dilimi kullanılmıştır. Bir çevrim, açısal hız, frekans ve faz açısı cinsinden  $\varphi = \omega t = 2\pi ft = 360^\circ$  olarak tariflenmiştir. Sayısal çalışmada, çeşitli salınım parametrelerine bağlı olarak bir çevrim boyunca elde edilen anlık sıcaklık değerleri ile anlık hız ve sıcaklık görüntüleri sunulmuştur.

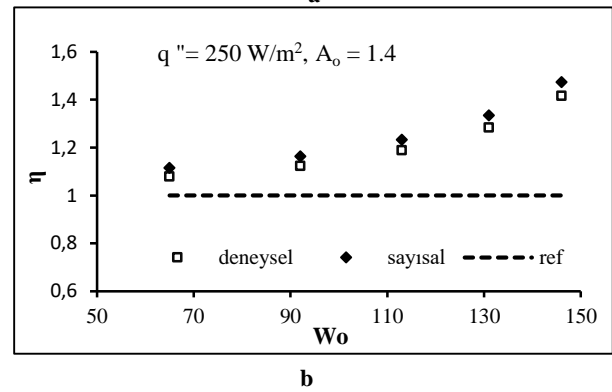
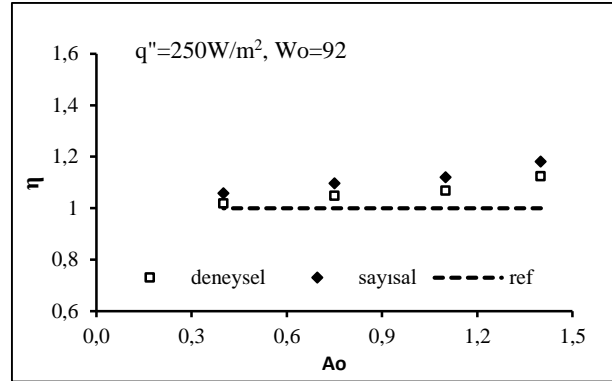
#### 4. SONUÇ VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSION)



Şekil 8. Diğ er çalışmalar ile deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırması (Comparison of the numerical and experimental results with those of other studies)

Bu çalışmada elde edilen deneysel ve sayısal sonuçlar, Acrivos [38] yaklaşımı, Goma ve Taweel [26] tarafından yapılan teorik çalışma sonuçları ve Prasad ve Ramanathan [24] tarafından yapılan deneysel çalışma sonuçları ile de karşılaştırılmıştır. Yapılan bu çalışmada en düşük  $Re_w$  değeri ( $Re_w=4000$ ) sabit tutularak üç farklı Gr sayısı için  $Nu/Re_w^{1/2}$  değeri hesaplanmıştır. Elde edilen deneysel ve sayısal sonuçların, literatür sonuçları ile karşılaştırılması Şekil 8'de verilmiştir. Sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir.

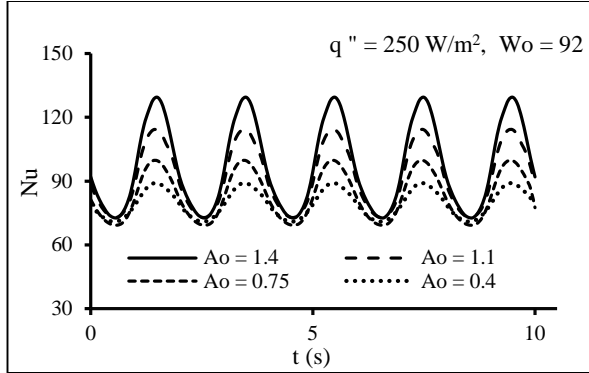
Şekil 9'da  $q''=250 \text{ W/m}^2$  için farklı genlik ve frekanslarda deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sabit levha üzerinde doğ al taşınım ısı transferi ( $Nu_s$ ) referans olarak düşünölmüş ve kesikli çizgi ile gösterilmiştir. Her iki sonuçlarda, artan genlik ve frekansla ısı transferi performansı artmaktadır.



Şekil 9. Deneysel ve sayısal ısı transfer performansının karşılaştırması (Comparison of the experimental and numerical heat transfer performance)

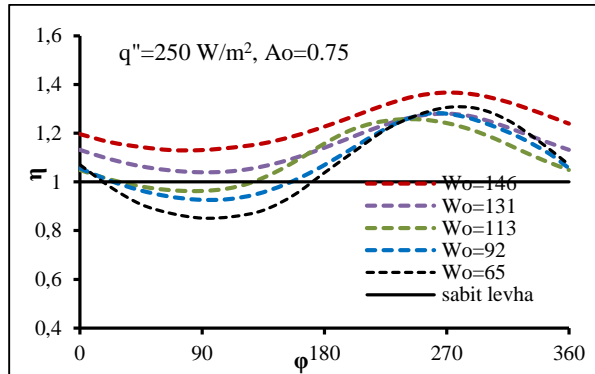
Şekil 10'da  $q''=250 \text{ W/m}^2$  ısı akışı ve  $Wo=92$  için farklı salınım genlikleri ile anlık Nu sayılarının değ işimi gösterilmiştir. Her salınım genliğinde, Nu sayısının sinüsoidal olarak değ iştiğ i ve salınım genliğ i arttıkça sinüsoidal eğrinin genliğinin de arttığ ı görölmektedir. Düşük genliklerde, levha daha küçük mesafede salınım

yaptığı için yüzey sıcaklıkları dolayısı ile Nu sayıları daha küçük aralıkta dalgalanmaktadır.



Şekil 10. Farklı salınım genlikleri için zamanla Nu sayısının değişimi (Variation of Nu number with time for different oscillation amplitudes)

Şekil 11'de salınımlı levhanın, sabit genlik ( $Ao=0.75$ ) ve sabit ısı akısında ( $q''=250 \text{ W/m}^2$ ), salınım frekansı ile bir çevrim boyunca ısı transferi performansındaki değişim verilmiştir. Yüksek frekanslarda ısı transferi performansının daha yüksek olduğu ve frekansın azalması ile ısı transferi performansı eğrisinin genliğinin arttığı görülmektedir. Yüksek frekanslarda levhanın salınım hızı yüksek olduğundan ısı transferi performansı eğrisi de daha düşük genliklerde dalgalanmaktadır.

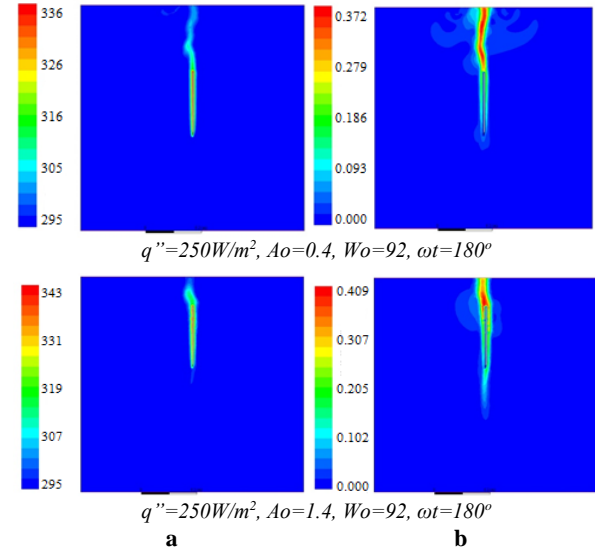


Şekil 11. Bir çevrim boyunca salınım frekansı ile ısı transferi performansının değişimi (Variation of heat transfer performance with oscillation frequency over a cycle)

Sayısal çalışmada, farklı salınım parametrelerine bağlı olarak levha üzerinde meydana gelen anlık hız ve sıcaklık görüntüleri elde edilmiştir. Şekil 12 ile  $q''=250 \text{ W/m}^2$ ,  $\omega t=180^\circ$  ve  $Wo=92$  için farklı salınım genliklerinde hız ve sıcaklık görüntüleri verilmiştir. Şekillerden, levha yüzeyindeki hız ve sıcaklık dağılımlarının salınım genliğinden oldukça etkilendiği anlaşılmaktadır. Yüksek genliklerde, levha daha büyük mesafelerde salındığı için

yüzey sıcaklığının daha yüksek olduğu ve levha etrafının daha yoğun hava tabakasıyla kaplı olduğu görülmektedir.

Şekil 13'te,  $q''=250 \text{ W/m}^2$ ,  $Ao=0.75$  ve  $\omega t = 270^\circ$  ile farklı salınım frekansları için levha yüzeyinde elde edilen hız ve sıcaklık görüntüleri verilmiştir.

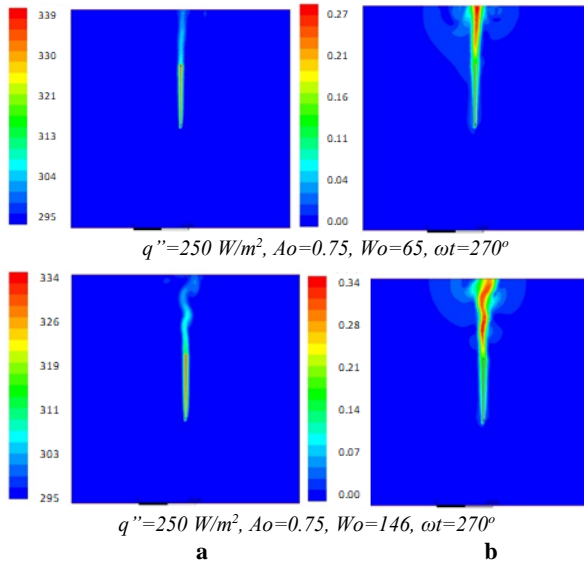


Şekil 12. Farklı genlikler için, sıcaklık (a) ve hız (b) görüntüleri, (For different amplitudes, temperature (a) and velocity (b) contours)  $q'' = 250 \text{ W/m}^2$ ,  $Wo = 92$ ,  $\omega t = 180^\circ$

Şekillerden, levha yüzeyindeki sıcaklık ve hız dağılımlarının salınım frekansından önemli ölçüde etkilendiği ve yüksek frekansta, levhanın üst kısmındaki sıcak hava tabakasının daha yoğun olduğu görülmektedir. Yüzeydeki hız ve ısıl sınır tabakalarının deformasyonu ve yenilenmesi, salınım frekansındaki artış nedeniyle daha kısa sürede gerçekleşmekte, bu da levha yüzeyinin soğuk hava tabakası ile daha sık temasını sağlayarak yüzeyin daha hızlı soğumasına yardımcı



olmaktadır. Yüksek frekansta levha yüzey sıcaklığının düşük olduğu görülmektedir.



**Şekil 13.** Farklı frekanslar için sıcaklık (a) ve hız (b) görüntüleri (The temperature (a), The velocity contours (b) for different  $Wo$  number)

Yapılan deneysel ve sayısal çalışma sonuçları, düşey levhanın periyodik salınımlarının ısı transferini sabit levhaya göre önemli derecede iyileştirdiğini göstermiştir.

## 6. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışma ile sabit ısı akısına sahip düşey düz bir levhanın periyodik salınımlarının ısı transferine etkileri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda, değişen ısı akılarında, farklı salınım parametrelerinde levha yüzeyindeki anlık ve ortalama sıcaklıklar elde edilmiş ve ısı transferi performansı hesaplanmıştır. Sayısal çalışmalar için deneysel veriler kullanılarak HAD tabanlı ANSYS Fluent 18.2 programı ile simülasyonlar yapılmıştır. Simülasyonlar sonucunda levha yüzeyinden ortama geçen karışık taşınım ile ısı transferi miktarı hesaplanmış ve sonuçlar literatür sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca levha yüzeyinde farklı salınım parametreleri için anlık hız ve sıcaklık görüntüleri elde edilmiştir.

Sonuçlarda, sabit ısı akısına sahip periyodik salınımlı düşey levha için elde edilen ısı transferi miktarının, sabit düşey levha için elde edilen ısı transferi miktarından daha yüksek olduğu, salınım genliği ve frekansının artması ile ısı transferi performansının arttığı gösterilmiştir. Isı transferi performansının, yüzeye uygulanan ısı akısından ve salınım parametrelerinden oldukça etkilendiği görülmüştür. Levha yüzeyine uygulanan ısı akısı arttıkça, doğal taşınım etkilerinin artması nedeniyle ısı transferi performansının düşük ısı akılarına göre daha az arttığı gözlenmiştir. En yüksek ısı transferi performansı düşük ısı akısında ( $q''=250 \text{ W/m}^2$ ), yüksek salınım genliği ( $Ao=1.4$ ) ve yüksek salınım frekansında ( $Wo=146$ )

yaklaşık 1.43 olarak elde edilmiştir. Çalışma, deneysel limitler dahilinde gerçekleştirilmiştir. Levha yüzeyine uygulanacak daha yüksek ısı akılarında ve daha yüksek salınım parametrelerinde ısı transferinin ne yönde değişeceği araştırılabilir.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Chida K., and Katto Y., "Conjugate heat transfer of continuously moving surfaces", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 19: 461–470, (1976).
- [2] Chamkha, A. J., Takhar, H. S., and Nath, G., "Mixed convection flow over a vertical plate with localized heating (cooling), magnetic field and suction (injection)", *Heat and Mass Transfer*, 40: 835–841, (2004).
- [3] Cortell, R., "Flow and heat transfer in moving fluid over a moving flat surface", *Theor. Comput. Fluid Dyn.*, 21: 435–446, (2007).
- [4] Zhang, H., "A Study of the Boundary Layer on a Continuous Moving Surface in Power Law Fluids", *University of Science and Technology Beijing*, China, (2008).
- [5] Bachok N., Ishak A., and Pop I., "Boundary layer flow of nanofluid over a moving surface in a flowing fluid", *Int. J. Therm. Sci.*, 49:1663–8, (2010).
- [6] Rana P., and Bhargava R., "Numerical study of heat transfer enhancement in mixed convection flow along a vertical plate with heat source/sink utilizing nanofluids", *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat*, 16: 4318–4334, (2011).
- [7] Dogan M., and Sivrioglu M., "Experimental and numerical investigation of clearance gap effects on laminar mixed convection heat transfer from fin array in a horizontal channel-A conjugate analysis", *Appl. Therm. Eng.*, 40: 102–113, (2012).
- [8] Taji S.G., Parishwad G.V., and Sane N.K., "Enhanced performance of horizontal rectangular fin array heat sink using assisting mode of mixed convection", *Int. Journal of Heat and Mass Transfer* 72: 250–259, (2014).
- [9] Khonakdar D.R., and Raveshi M.R., "Mixed convection on a vertical plate in supercritical fluids byselecting the best equation of state", *J. of Supercritical Fluids*, 107: 549–559, (2016).
- [10] Chen T.S., and Strobel, F.A., "Buoyancy effects on heat and mass transfer in boundary layer on a continuous, moving horizontal plate", *Journal Numerical Heat Transfer*, 3: (1), 115-130, (1980).
- [11] Calmidi V.V., and Mahajan R.L., "Mixed convection over a heated horizontal surface in a partial enclosure", *Int. Journal of Heat and Fluid Flow*, 19: 358-367, (1998).
- [12] Moutsoglou A., and Chen T.S., "Buoyancy effects in a boundary layers on inclined, continuous, moving sheets", *Journal of Heat Transfer*, 102: 371-372, (1980).



- [13] Chamkha A.J., Takhar H.S., and Nath G., "Effect of buoyancy force on the flow and heat transfer over a continuous moving vertical or inclined surface", *Int. Journal of Thermal Sciences*, 40: 825-833, (2001).
- [14] Souza J.A., Vargas J.V.C., and Bianchi M.V.A., "Friction and heat transfer for inclined surfaces in relative motion to an air stream under buoyancy effect", *Int. Journal of Heat and Fluid Flow*, 24: 713-725, (2003).
- [15] Ramachandran N., Chen T.S., and Armaly B.F., "Mixed convection from vertical and inclined moving sheets in a parallel free stream", *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 1(3): 274-281, (1987).
- [16] Lin H.T., and Hoh H.L., "Mixed convection from an isothermal vertical plate moving in a parallel or reversely to a free stream", *Heat and Mass Transfer*, 32: 441-445, (1997).
- [17] Pantokratoras A., "Opposing mixed convection along vertical isothermal moving bodies", *Int. Journal of Heat and Fluid Flow*, 25: 692-696, (2004).
- [18] Subhashini S.V., and Sumathi R., "Dual solutions of a mixed convection flow of nanofluids over a moving vertical plate", *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, 71: 117-124, (2014).
- [19] Khalid A., Khan I., and Shafic. S., "Heat transfer in free convection flow of micropolar fluids over an oscillating vertical plate", *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 13(4): 654-658, (2017).
- [20] Pradhan B., Das S.S., Paul A.K., and Dash R.C., "Unsteady Free Convection Flow of a Viscous Incompressible Polar Fluid past a Semi Infinite Vertical Porous Moving Plate", *Int. Journal of Applied Engineering Research*, 12(21): 10958-10963, (2017).
- [21] Koffi M., Andreopoulos Y., and Jiji L., "Heat transfer enhancement by induced vortices in the vicinity of a rotationally oscillating heated plate", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 112: 862-875, (2017).
- [22] Ashafa S., Ahmed A.A., and Sakir A.A., "Analytical Solution of the Effect of MHD Inclination and Unsteady Heat Transfer in a Laminar, Transition and Turbulent Flow of a Basic Gaseous Micro-Flow past a Vertically Moving Oscillating Plate", *American Journal of Engineering & Natural Sciences (AJENS)*, 1(2): 30-35, (2017).
- [23] Ellahi R., Alamri S.Z., Basit A., and Majeed A., "Effects of MHD and slip on heat transfer boundary layer flow over a moving plate based on specific entropy generation", *Journal of Taibah University for Science*, 12(4): 476-482, (2018).
- [24] Prasad K.K., and Ramanathan V., "Heat transfer by free convection from a longitudinally vibrating vertical plate", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 15: 1213-1223, (1972).
- [25] Zhang X.R., Maruyama S., and Sakai S., "Numerical Investigation of laminar natural convection on a heated vertical plate subjected to a periodic oscillation", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 47: 4439-4448, (2004).
- [26] Goma H., and Al Taweel A.M., "Effect of oscillatory motion on heat transfer at vertical flat surfaces", *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, 48: 1494-1504, (2005).
- [27] Saeid, N.W., "Mixed convection flow along a vertical plate subjected to time-periodic surface temperature oscillations", *Int. J. Therm. Sci.*, 44: 531-539, (2005).
- [28] Nobari M.R.H., and Naderan H., "A numerical study of flow past a cylinder with cross flow and inline oscillation", *Computers & Fluids*, 35(4): 393-415, (2006).
- [29] Ramesh G.K., Chamkha A.J., and Giresha B.J., "Boundary layer flow past an inclined stationary/moving flat plate with convective boundary condition", *Afrika Matematika*, 27(1): 87-95, (2016).
- [30] Li G.N., Zheng Y.Q., and Hu G.L., "Heat transfer enhancement from a rectangular flat plate with constant heat flux in pulsating flows", *Experimental Heat Transfer*, 27(2): 198-211, (2014).
- [31] Krishna M.V., and Jyothi, K., "Hall effects on mhd rotating flow of a visco-elastic fluid through a porous medium over an infinite oscillating porous plate with heat source and chemical reaction", *Materials Today: Proceedings*, 5: 367-380, (2018).
- [32] Khan I., Shah N.A., Tassaddiq A., Mustapha N., and Kechi S.A., "Natural Convection heat transfer in an oscillating vertical plate", *PLoS ONE*, 13(1):1-14, (2018).
- [33] Ghiasi A., Razavi S.E., Rouboa A. and Mahian O., "Numerical study on flow over a confined oscillating cylinder with a splitter plate", *Int. Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 29(5): 1629-1646, (2019)
- [34] Sarhan A.R., Karim M.R., Kadhim Z.K., and Naser J., "Experimental investigation on the effect of vertical vibration on thermal performances of rectangular flat plate", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 101: 231-240, (2019).
- [35] Lee S., Chiou J., and Cyue G., "Mixed convection in a square enclosure with a rotating flat plate", *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, 131: 807-814, (2019).
- [36] Kim Y.J., "Unsteady MHD convective heat transfer past a semi-infinite vertical porous moving plate with variable suction", *International Journal of Engineering Science*, 38(8): 833-845, (2000).
- [37] Holman, J.P., *Experimental Methods for Engineers*, McGraw-Hill, New York, (2001).
- [38] ANSYS Inc., *ANSYS Fluent user's guide*, (2018).
- [39] Acrivos A., "Combined laminar free-and forced-convection heat transfer in external flows", *AIChE J.* 4, 285-289, (1958).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Plent-miks temel tabakası yapımında kazınmış asfalt kaplama (RAP) malzemesi kullanımını ve ekonomik analizi

## *Economic analysis of the use of reclaimed asphalt pavement (RAP) materials in plant-mix base courses*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Ayşegül Güneş SEFEROĞLU<sup>1</sup>, Mehmet Tevfik SEFEROĞLU<sup>2</sup>, Muhammet Vefa AKPINAR<sup>3</sup>, Muhammet ÇELİK<sup>4</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-1008-6456

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0003-4677-3335

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0001-7912-8274

ORCID<sup>4</sup>: 0000-0002-3998-8146

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Seferoğlu A. G., Seferoğlu M. T., Akpınar M. V. ve Çelik M., "Plent-miks temel tabakası yapımında kazınmış asfalt kaplama (RAP) malzemesi kullanımını ve ekonomik analizi", *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1327-1338, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.631698

# Plant-mix Temel Tabakası Yapımında Kazınmış Asfalt Kaplama (RAP) Malzemesi Kullanımı ve Ekonomik Analizi

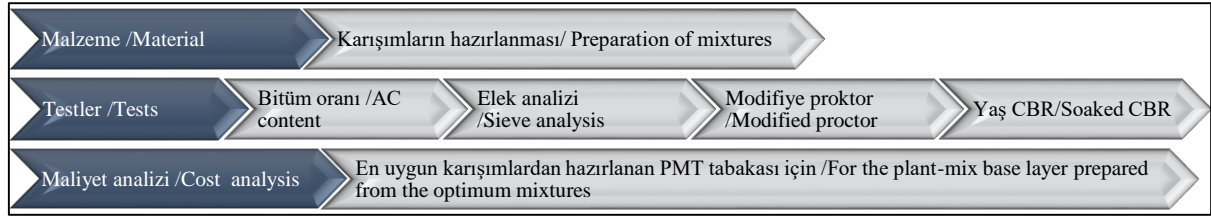
## Economic Analysis of the Use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Materials in Plant-Mix Base Courses

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Kazınmış asfalt kaplama/Recycled asphalt pavement
- ❖ Geri dönüşüm/Recycling
- ❖ Filler içeriği/Filler content
- ❖ Plant-mix temel tabakası/Plant-mix base layer
- ❖ Geri dönüşüm maliyet analizi/Recycling cost analysis

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada farklı filler içeriğine sahip RAP agregası-doğal agregası (DA) karışım oranına filler içeriğinin etkisi incelenmiş ve maliyet analizi yapılmıştır. Sonuç olarak filler içeriği düşük RAP kullanılması durumunda daha yüksek oranda RAP kullanılabilirliği ve yaklaşık olarak karışımda kullanılan RAP oranı kadar malzeme maliyetlerinde azalma olduğu belirlenmiştir./ In this study, the effect of filler content on the mixing ratio of RAP with different filler content and natural aggregate (NA) was examined and cost analysis was made. As a result, it was determined that if RAP with low filler content is used, a higher rate of RAP can be used in mixtures and there is a decrease in material costs approximately as much as the RAP ratio used in the mixture



Şekil. Çalışma iş akışının şematik diyagramı / Figure. Schematic diagram of the study workflow

### Amaç (Aim)

Bu çalışmada, farklı filler içeriklerine sahip RAP agregalarının DA'ya alternatif olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi ve etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır./ In this study, it was aimed to examine the usability of RAP aggregates with different filler contents as an alternative to NA and to evaluate their effects.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

RAP agregalarının kullanım oranları deneysel olarak değerlendirilmiş ve karışımlar için maliyet analizi yapılmıştır. / The usage rates of RAP aggregates were examined experimentally and the optimum mixture ratio was evaluated by performing cost analysis for the mixtures.

### Özgünlük (Originality)

Farklı RAP agregaları daha önce PMT tabakasında kullanılmamıştır. Bu nedenle, hem içerik hem de sonuçları bakımından orijinal bir çalışmadır./ Different RAP aggregates have not been used in the PBL. Therefore, it is an original study in terms of both content and results.

### Bulgular (Findings)

RAP malzemelerinin PMT tabakalarında kullanılabilirliği ve maliyeti belirgin oranda düşürdüğü mevcut görülmüştür./ It has been observed that RAP aggregates can be used in PBLs and significantly reduce the cost.

### Sonuç (Conclusion)

Düşük filler oranına sahip RAP agregasının PMT tabakası için daha yüksek oranlarda DA ikamesi olarak kullanılabilirliği ve daha düşük maliyet sağlayacağı görülmüştür. / It has been observed that the RAP aggregate with a low filler ratio can be used as a NA substitute for the PBL at higher rates and provides lower costs.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Plent-miks Temel Tabakası Yapımında Kazınmış Asfalt Kaplama (RAP) Malzemesi Kullanımı ve Ekonomik Analizi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Ayşegül Güneş SEFEROĞLU<sup>1\*</sup>, Mehmet Tevfik SEFEROĞLU<sup>2</sup>, Muhammet Vefa AKPINAR<sup>2</sup>,  
Muhammet ÇELİK<sup>3</sup>

<sup>1</sup>İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane, Türkiye  
<sup>2</sup>İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye  
<sup>3</sup>Trabzon İl AFAD Müdürlüğü, Trabzon, Türkiye

(Geliş/Received : 10.10.2019 ; Kabul/Accepted : 14.01.2020)

## ÖZ

Bu çalışmanın amacı, Karayolu Teknik Şartnamesi (KTS) kriterlerine göre tasarımı yapılacak olan bir plent-miks temel (PMT) tabakası için kullanılabilir kazınmış asfalt kaplama (RAP) malzemesi oranlarına bağlı olarak elde edilecek mali faydaların belirlenmesidir. Tüm RAP katkılı karışımların fayda-maliyet analizleri yapılarak PMT tabakası yapımı ve malzemelerin nakliye harcamaları göz önüne alındığında, RAP malzemesinin hangi uzaklıktan getirilmesi durumunda ekonomik bir uygulama olacağı araştırılmıştır. Çalışma neticesinde RAP malzemesinin %100 oranında PMT tabakalarında kullanımının çimento takviyesi ile mümkün olduğu ve doğal agrega (DA) yerine kullanılması durumunda %16'nın üzerinde kâr sağladığı belirlenmiştir. RAP malzemesinin, PMT Tip-1 tabakası için doğal agregaya alternatif ve maliyet açısından daha ekonomik bir malzeme olduğu sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Plent-miks temel tabakası, kazınmış asfalt kaplama, RAP, kâr, maliyet.

## Economic Analysis of the Use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Materials in Plant-Mix Base Courses

### ABSTRACT

The aim of this study is to determine the financial benefits to be gained based on the percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP) material suitable for use in plant-mix courses (PBCs) to be designed according to the specification of Turkey Department of Transportation. Cost analysis of all RAP mixtures were made considering the construction of the plant-mix base course and the transportation costs of the materials, it was researched that the use of RAP would be an economical application in terms of how far the RAP material was taken. As a result of the study, it has been determined that the use of 100% RAP material in PBC is possible with cement reinforcement and it provides a profit of more than 16% in terms of costs in case of using virgin aggregate (VA) instead. RAP material is an alternative to virgin aggregate and is a more economical material in terms of cost.

**Keywords:** Plant-mix base course, reclaimed asphalt pavement, RAP, benefit, cost.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mevcut yol üst yapısını oluşturan karayolu kaplama tabakaları, belirli bir kullanım süresinden sonra ömrünü tamamlar. Yol kaplama tabakasının çeşitli etkilerle deforme olması, kullanılamaz hale gelmesi ya da başka nedenlerle yenilenmesi, onarımı, profilinin düzeltilmesi veya uygun bir sürüş yüzeyi elde edilmesi için tabaka, kaplandığı yerden kazınarak sökülür. Elde edilen bu bitümlü malzeme, kazınmış asfalt kaplama (RAP) malzemesi olarak adlandırılır. Uygulanacak doğru işlemlerle yeniden şekillendirilerek geri kazanılması ile tekrar kullanılabilir ve daha yüksek ekonomik katma değer sağlanabilir [1].

Türkiye'de servis ömrünü tamamlayan veya bakım onarımı yapılacak olan asfalt kaplamalar yerinden kazınmak yerine eski kaplama üzerine yeni sıcak karışım kaplama serilmesi ya da bozulan kısmın kesilerek yamalama yapılması şeklinde iyileştirilmektedir. Bu durum da, yaya kaldırımı ile yol yüzeyi arasındaki kot farkının kapanmasına, drenaj açıklıklarının gömülmesine, altta kalan bozulmuş kaplamadaki çatlakların yeni kaplamaya yansıma çatlağı olarak sirayet etmesine ve yeni kaplama ile eski kaplama arasında soğuk derz oluşması sebebiyle yeni kaplama tabakasında sökülmele sebep olmaktadır [2].

Ülkemizde yaygın olarak uygulanmayan fakat dünyada en çok geri dönüşümü yapılan malzemelerden biri olan RAP malzemesi [3], ülkemiz gibi petrol ürünlerinin çok pahalı olduğu ve şehir içi yol kaplamalarının büyük bir çoğunluğu asfalt kaplama olan ülkelerdeki yerel

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : gnskaya61@gmail.com

yönetimler tarafından hızla uygulamaya geçilmesi gereken bir geri dönüşüm projesidir. RAP malzemesinin sürdürülebilir bir yöntem olarak kullanımının ekolojik ve ekonomik avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Mevcut malzemeler yeniden kullanılarak taş ocaklarından temin edilen doğal agregaya (DA) olan talep azalacak ve doğal kaynakların korunmasına katkı sağlanacaktır.
- Yeni doğal agrega malzemesinin üretim, kırma, işleme maliyetinin azaltılması ile büyük enerji tasarrufu sağlanabilecektir.
- Doğal agreganın nakliyesinden kaynaklanan trafik rahatsızlığı azalarak sera gazı salınımı da düşecektir [4].
- Kazıma çalışmaları sonucu elde edilen atık haldeki kaplama parçalarının yeniden kullanılmasıyla, bu malzemelerin oluşturacağı atık sahalarının önüne geçilebilecektir.
- Yüzey iyileştirmesi yapılacak olan asfalt kaplamanın yüzeyden kazınması ile yaşlanmış kaplama tabakasındaki çatlak ve bozulmalar giderilerek, yolun sürüş emniyeti ve konforu artırılmış olacaktır.
- Bozulan yol yüzeyi üzerine yeni bir kaplama serilmediği için özellikle şehiriçi yol kesimlerinde kaldırım yükseklikleri, drenaj kanalı girişleri ve rögar kapaklarındaki kot düzensizlikleri ortadan kaldırılmış olacaktır. Aynı zamanda özellikle köprü ve menfez gibi sanat yapılarına gelen zati yüklerin artması engellenebilecektir.
- Eski ve cilalanmış asfalt kaplamanın yüzeyden kazınması ile, yeni kaplamayla daha iyi aderans sağlayacak kaba dokulu bir yüzey elde edilecektir.
- Mevcut kaplamanın üzerine yeni kaplama yapılması halinde yansıma çatlaklarının önlenememesi sorunu eski kaplamanın kazınması ile giderilebilecektir [5].

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ (LITERATURE REVIEW)

### 2.1. RAP Malzemesi Kullanım Oranları ve Katkı Malzemeleri (RAP Material Usage Rates and Additives)

Bağlayıcısız temel tabakalarında RAP malzemesi kullanım oranıyla ilgili KTS’nde bir kriter mevcut değildir. Yurtdışında ise RAP malzemesinin farklı oranlarda kullanımı ve kullanım oranının artırılması için kullanılabilir katkı malzemeleri ilgili yapılan çalışmalar aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

McGarrah [6], granüler temel tabakası kullanılan RAP karışımları üzerindeki çalışmaları neticesinde %100 RAP malzemesi ile yeterli kalitede bir temel teşkil edilemeyeceğini, bu sebeple tek başına kullanılmaması gerektiğini belirtmiştir. RAP-DA karışımlarındaki RAP içeriği arttıkça, karışımın kayma mukavemetinin gerekli seviyenin altına düştüğünü belirterek RAP içeriğinin

%25 ile sınırlandırmasını ve RAP malzemesinin DA ile plentte karıştırılması gerektiğini önermiştir.

Schaefer vd. [7], temel tabakası uygulamalarında %20-50 arasında bir RAP oranının kullanılabilirliğini belirtmiştir. Taha vd. [8], RAP malzemesinin alttemel tabakasında kullanım oranının %60, granüler temel tabakasında ise %10 ile sınırlandırılması gerektiğini belirtmiştir. Cosentino vd. [9], çalışmada, RAP içeren tüm karışımların bir miktar sünme gösterdiği sonucuna varmıştır. RAP malzemesinin karayolu temel tabakası uygulamalarında kullanılabilmesi için karışımda en fazla %25 oranında kullanılmasını önermiştir. Bennert ve Maher [10], yoğun gradasyonlu agrega temel tabakaları için RAP içeriğinin ağırlıkça %50 ile sınırlandırılması gerektiğini belirtmiştir.

Soğuk geri dönüşüm uygulamalarında karışımlara katkı maddesi ilave etme zorunluluğu yoktur. RAP malzemesinin fazla kullanılması durumunda tabakanın taşıma gücünün düşmesine bağlı olarak taşıma kapasitesinin artırılması veya kaba agregalar arası boşluğun fazla olmasına bağlı olarak permeabilitenin fazla ve dayanımın düşük olmasından ötürü bağlayıcı malzeme ilavesi yapmak mümkündür. Polimer, uçucu kül, enzimatik stabilizatörler, kireç, fiber katkılı çimento ve puzolanik çimento gibi zeminin performansını artırmak için çok çeşitli kimyasal katkı maddeleri mevcuttur [11].

Taha vd. [8], %0, %10, %20, %30 ve %100 RAP içeren RAP-DA karışımlarına kuru ağırlıkça %0, %3, %5 ve %7 oranında tip-1 puzolanik çimento karıştırarak bağlayıcılı ve bağlayıcısız bu karışımlar üzerinde sıkıştırma ve serbest basınç dayanımı testleri yürütmüşlerdir. Çalışmada RAP malzemesinin temel ve alttemel tabakalarında kullanılan DA malzemesine uygun bir alternatif olduğu sonucuna varılmıştır. Bununla beraber, çimentoyla stabilize edilen tüm RAP-DA karışımlarında RAP oranının artırılması durumunda temel tabakası kalınlığının artırılması gerekliliği doğmuştur.

Bleakley ve Cosentino [12], RAP-kireçtaşı karışımlarının temel tabakası için stabilize edici katkı maddeleri olmadan dayanım ve sünme gereksinimlerini karşılaması için RAP malzemesinin karışımdaki oranının en çok %25 olması gerektiği sonucuna varılmıştır. Maksimum %50 RAP kullanılması durumunun çimento gibi bir bağlayıcı katkı maddesi ile mümkün olabileceği belirtilmiştir. Bu durumda ağırlıkça %2-3 oranında çimento ilavesi, stabilize edilmiş RAP malzemesi için tatmin edici mukavemet ve deformasyon özellikleri verdiği belirtilmiştir.

Literatürde görüldüğü gibi RAP malzemesi temel tabakalarında %10-50 arasındaki oranlarda kullanılabilir bir malzemedir. Ülkemizde ise belirli bir standarda bağlı kalmaksızın dolgu malzemesi olarak belediyeler tarafından kullanılmaktadır. KTS’nde RAP malzemesinin kullanımıyla ilgili olarak bitümlü temel tabakalarında en fazla %25 oranında DA ile karıştırılabilir ifadesi yer almaktadır [13]. RAP malzemesi kullanımının granüler temel, PMT gibi bağlayıcısız temel tabakaları için de



uygulanması durumunda daha büyük ekonomik katma değer oluşturulması mümkündür. Fakat bu karayolu tabakalarındaki RAP malzemesi kullanım oranıyla ilgili bir kriter KTŞ'nde henüz mevcut değildir. İsfalt'ın (İstanbul asfalt fabrikaları), uygulamada kullandığı oranlar; aşınma tabakasında %10, binder tabakasında %15-20, bitümlü temel tabakasında da %35'tir [5]. Ülkemizde RAP malzemesi kullanımının az olmasının nedenleri arasında; ülkemizde büyük doğal agrega rezervlerinin olması, Türkiye'de taş ocağı açılması ve işletilmesinin çok kolay olması, çevre koruma bilincinin gelişmemiş olması, geri dönüşüm için yapılacak ilk yatırım maliyetinin fazla olması ve KTŞ'ndeki eksiklikler sayılabilmektedir.

## 2.2. RAP Malzemesi Kullanım Maliyeti (RAP Material Usage Cost)

RAP malzemesi kullanımı, karışım maliyetini büyük ölçüde azaltır. RAP kullanımı, karışım için gereken doğal malzeme miktarını ve bu malzemelerin çıkarılması, işlenmesi ve taşınması için gereken enerjiyi azaltarak doğal kaynakları da korur. Dünyada her yıl yaklaşık 1,5 milyar ton asfalt üretimi için 1,425 milyar ton agrega ve 75 milyon ton bitüm tüketilmekte, sökülün asfaltın oluşturduğu atık yığınları doğaya kontrolsüz olarak terk edilmektedir. Amerika Birleşik Devletlerinde her yıl yaklaşık 500 milyon ton asfalt üretiminin yaklaşık %15'ini sökülmiş asfaltın geri kazanılması ile elde etmekte ve yılda 300 milyon \$ tasarruf sağlanmaktadır [1].

Franke ve Ksaibati [14] çalışmasında sıcak asfalt karışım, stabilize yollar ve temel tabakası olmak üzere 3 farklı karayolu uygulaması için RAP kullanımının maliyet açısından sağlayacağı faydaları araştırmıştır. Yapılan maliyet analizine dayanarak, karışıma katılacak her bir ton RAP malzemesi için sıcak karışımlarda %40,87, stabilize yollarda %17,07 ve temel tabakalarında %15,71 kâr edildiği belirtilmiştir.

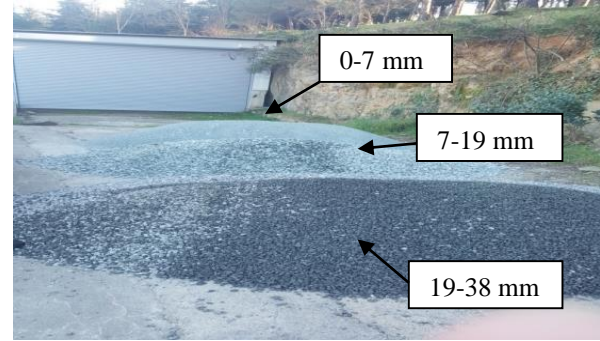
Andreen vd. [15] çalışmasında malzeme maliyetleri göz önüne alındığında, %20 oranında RAP malzemesi içeren temel tabakasının ton başına maliyetinin, tamamı doğal agregadan yapılan temel tabakasına kıyasla 15,71 \$ daha ucuza mâl edildiğini belirtmiştir.

Bu çalışmada farklı oranlarda RAP malzemesi ile taş ocağından elde edilen doğal agregalardan hazırlanan karışımlara %1, %2 ve %3 oranlarında puzolanik çimento takviyesi yapıldıktan sonra KTŞ kriterlerine göre PMT tabakasında kullanılabilir RAP/DA/çimento karışımları yapılan yaş CBR testleri doğrultusunda belirlenmiştir. Kullanılabilir oranlar belirlendikten sonra PMT Tip-1 temel tabakası tasarımı için RAP oranı/maliyet analizi yapılarak RAP kullanımının sağlayacağı kâr oranları tespit edilmiştir.

## 3. YÖNTEM (METHOD)

### 3.1. Malzemeler (Materials)

Çalışmada PMT tabakası tasarımı için farklı RAP, DA ve çimento oranlarında karışımlar hazırlanmıştır. Kullanılan DA malzemesi 0-7 mm, 7-19 mm, 19-38 mm olmak üzere üç farklı boyuttadır (Şekil 1).



Şekil 1. Depolanmış haldeki farklı boyutlardaki DA malzemesi (VA material of different sizes stored)

RAP malzemesi Trabzon ili Fatih Mahallesi'nde bulunan bir şehir içi yolun aşınma tabakasından Trabzon Belediyesi bünyesinde bulunan özel kazıma aracı ile belirli derinlikte kazınmıştır (Şekil 2). Kazıma yol üzerine yapılan araştırmalar, yolun 3 yıldır kullanıldığını ve yer yer bozulmaların (kopma, sökülme, timsah sırtı çatlaklar) başladığını, bu yüzden aşınma tabakasının değişmesi gerekliliğini göstermiştir. Malzeme yoldan kazınırken, kazı makinesi, yolu 5 cm kalınlığında ve ortalama %3-4 eğimle kazacak şekilde ayarlanmıştır. Aracın hızı 10-12 km/sa olarak belirlenmiştir. Elde edilen RAP malzemesi en büyük tane boyutu 25 mm olacak şekilde bir eleme işleminden geçirilmiş olup, ilave bir kırma işlemine tabi tutulmamıştır.



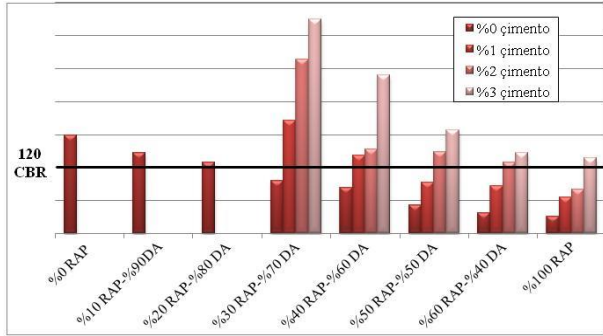
Şekil 2. RAP malzemesinin elde edilmesi ve depolanması (Obtaining and storing of RAP material)



RAP-DA karışımlarındaki RAP malzemesi oranındaki artışın, karışımların yaş CBR değerini düşürmesi nedeniyle karışımlara CEM IV/A 32,5 R puzolanik çimento stabilizatör katkı malzemesi olarak eklenmiştir [16]. Puzolanik çimentonun Portland çimentosuna kıyasla daha ucuz bir malzeme olması seçime dikkate alınmıştır.

### 3.2. Karışımların Hazırlanması (Preparation of the Mixtures)

KTŞ'nde PMT Tip-I tabakası malzeme karışımları için gerekli olan kriterler; belirtilen gradasyonun sağlanması ve minimum yaş CBR değerinin 120'nin üzerinde olmasıdır. Bu sebeple, PMT Tip-1 tabakası için hazırlanan RAP-DA ve RAP-DA-çimento karışımlarına elek analizi testi TS 3530 EN 933-1'e [17] göre yapılarak gradasyon eğrilerinin PMT tabakası Tip-1 alt ve üst limitleri içerisinde olduğu görülmüştür. AASHTO T-193'e göre [18] çimento takviyeli ve takviyesiz tüm karışımlar üzerinde yapılan yaş CBR testi sonuçları Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Karışımların yaş CBR testi sonuçları (The soaked CBR test results of the mixtures)

Şekil 3'te %10 ve %20 RAP oranındaki RAP-DA karışımlarının KTŞ'nde PMT tip-1 için belirtilen minimum 120 yaş CBR kriterini sağladığı görülmektedir. Bu oranlar için çimento takviyesine gerek duyulmamış, çimento takviyesine %30 RAP karışımından başlanmıştır. RAP-DA karışım numunelerinde kuru ağırlıkça %1, %2 ve %3 olmak üzere üç farklı çimento içeriği kullanılmıştır. Karışımlardaki RAP oranı artarken CBR değeri azalmış, fakat çimento içeriğindeki artış CBR değerlerinin artmasına sebep olmuştur.

### 4. MALİYET ANALİZİ (COST ANALYSIS)

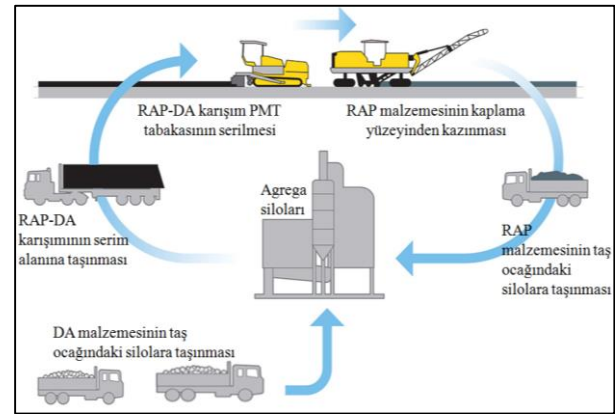
Bir PMT tabakası için yapılacak maliyet hesaplarında maliyeti oluşturan kalemler; malzeme maliyetleri, malzemelerin taşınma maliyetleri ve tabaka yapım maliyetleridir. Bu çalışmada, RAP malzemesinin kazıma maliyeti, zaten yol yüzeyinden kazınıp atık sahalarına boşaltılacağı için fazladan bir kazı maliyeti oluşturmadığı, malzeme için de para ödenmediği için malzeme maliyetinin olmadığı hesaba katılmıştır. Ayrıca yapılan çalışmada hazırlanan karışımların silodan-serim alanına taşıma maliyetlerinin taşınan karışım ne olursa olsun mesafeye bağlı olarak aynı olması sebebiyle taşıma

maliyetleri hesaplara katılmamıştır. Hesaba katılan taşıma maliyetleri yalnızca RAP malzemesinin kazıma alanından-siloya, çimentonun da temin noktasından-siloya olan maliyetler olarak hesaplanmış ve tutarlara dâhil edilmiştir.

Tasarımı yapılacak olan PMT tabakası uzunluğu 1 km, kalınlığı 20 cm, genişliği ise 8 m olacak şekilde tasarlanmıştır. Taşıma maliyeti hesaplamalarında taş ocağı-silo arası mesafe 150 m ve çimento temin noktası-silo arası mesafe 5 km olarak dikkate alınmıştır.

#### 4.1. Malzemelerin Taşıma Maliyetleri (Transportation Costs of Materials)

RAP-DA-çimento karışım malzemesi ile yapılacak yeni bir PMT tabakası için malzemelerin taşınma maliyetleri; DA'nın ocaktan siloya taşınması, RAP malzemesinin kazındığı alandan siloya taşınması, çimentonun taş ocağına en yakın noktadan temin edilip siloya taşınması ve silo bantlarından daha önceden belirlenen oranlarda geçerek kamyonlara yüklenip PMT tabakası yapım alanına taşınması kalemlerinden oluşmaktadır (Şekil 4).



Şekil 4. PMT tabakası yapımı için malzemelerin taşınması (Transportation of materials for PBC construction) [19]

Bu çalışma kapsamında yapılan malzeme taşıma maliyetleri hesaplamalarında karışım malzemelerinin serim alanına taşınma maliyeti hesaplara katılmamıştır. Bunun sebebi RAP malzemesi kullanılsın ya da kullanılsın doğal agreganın serim alanına taşınacak olmasından ötürü ekstra bir maliyet doğurmayacak oluşudur.

#### 4.1.1. %100 DA malzemesinin ocaktan konkasöre taşınma maliyeti (The transportation cost of 100% VA material from quarry to crusher)

Taş ocağından elde edilen DA malzemesi konkasöre götürülüp belirlenen gradasyonlara ayrılarak silolarda depolanmak üzere şantiye sahasına getirilir. DA'nın ocaktan konkasöre getirilmesi için gereken nakliye ücreti; taşıma mesafesinin ortalama 150 m olması durumunda PMT tabakası yapımı için gereken poz birim fiyatına dâhildir. Karayolları Genel Müdürlüğü'nün (KGM) KGM/6100/3 pozuna göre PMT tabakası yapımında (kırılmış ve elenmiş ocak taşıyla) ocak-

konkasör arası mesafenin 150 m'den fazla 10 km'den az olması durumunda taşıma bedeli Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanır. 10 km'den daha fazla taşıma bedelleri için ise Eşitlik 2 kullanılır [20].

$$F = A \times 1,25 \times 0,00017 \times K \times \sqrt{M} - 0,0026 \times K \quad (1)$$

$$F = A \times 1,25 \times K \times (0,0007 \times M + 0,01) - 0,0026 \times K \quad (2)$$

Burada; F mali tutar (TL/ton), M ortalama taşıma mesafesi (m), K motorlu araçlara ait taşıma katsayısı ve A güçlük katsayısıdır.

#### 4.1.2. Çimento ve RAP malzemesinin siloya taşınma maliyetleri (Transportation costs of cement and RAP materials to the silo)

PMT tabakası için kullanılan çimento, CEM IV 32,5 R puzolanik çimento olarak belirlenmiştir. Kazıdan başka inşaat malzemelerinin taşınmasına ilişkin pozlar için KGM tarafından kullanılan iki poz vardır [21, 22]. Bunlar eşitlikleri ile birlikte Çizelge 1'de gösterilmektedir.

**Çizelge 1.** Kazıdan başka inşaat malzemelerinin taşınmasına ilişkin pozlar ve tanımları (Poses and definitions related to transportation of construction materials other than excavation)

Rayiç No	Tanımları	Tanımı
KGM 07.005/K	Kazıdan başka inşaat malzemesinin taşınması $\leq 10$ km	$F = A \times 1,25 \times K \times 0,00017 \times M^{1/2}$
	F	Tutar (TL)
	M	Ortalama taşıma mesafesi (m)
	K	Motorlu araçlara ait taşıma katsayısı
	A	Güçlük katsayısı
KGM 07.006/K	Kazıdan başka inşaat malzemesinin taşınması $> 10$ km	$F = A \times 1,25 \times K \times (0,0007 \times M + 0,01)$
	F	Tutar (TL)
	M	Ortalama taşıma mesafesi (km)
	K	Motorlu araçlara ait taşıma katsayısı
	A	Güçlük katsayısı

K=196 olup rayiç cetvelinde yazılı olan (poz no: 02.017) her cins ve tonajda motorlu araca ait taşıma katsayısıdır.

M= Taşıma yolu üzerinden ölçülen mesafeler esas alınarak hesaplanan ortalama taşıma mesafesidir.

“Güçlük katsayısı (A) güç şartlar altında yapılacak taşımalarda taşıma yollarının özelliklerini, iklimi ve taşımamın o bölgenin ticari nakliyesinin yoğun olduğu zamana rastlaması gibi faktörlerden birinin veya birkaçının aynı anda olması halinde ayrıca işin özelliğine bağlı olarak ilk keşif sırasında veya ihaleden önce olmak üzere idarece yetkili makamlarca tespit edilen A katsayısı 1 (dâhil) - 3 (dâhil) arasında bir değerdir. Kolay şartlar altında yapılan çalışmalardan 1'den küçük de tespit edilebilir. Eğer ilk keşif veya ihaleden önce A için bir değer tespit edilmemişse A=1 alınarak uygulama yapılmaktadır” [21]. Çalışmada güçlük katsayısı değeri “1” olarak alınmıştır.

#### 4.2. PMT tabakası yapımı birim fiyatları (Unit prices for PBC construction)

KGM tarafından 1 ton kırılmış ve elenmiş ocak taşıyla PMT tabakası yapımı için gerekli gradasyonda malzemelerin hazırlanmasından arazöz ile sulanmasına kadar malzemelerin miktarları Çizelge 2'deki KGM/6100/3 pozunda gösterilmektedir. Ocak-konkasör arası ortalama 150 m'den fazla mesafeye taşıma, agreganın plent sahasına, suyun iş başına ve plente, karışımın ise serilme yerine taşınma maliyeti birim fiyata dâhil değildir.

KGM/6100/3 pozunda agregalar için belirtilen elek numaraları taş ocağından PMT tabakası için temin edilen 0-7 mm, 7-19 mm ve 19-38 mm boyutlarındaki agregalar için verilmemektedir. Bu boyutlardaki ocak taşından kırılmış elenmiş agregalar hazırlanması için de bir poza rastlanmamıştır. Fakat KGM'de yapım işleri ekipleri tarafından keşfe çıkılarak agregalar için özel pozlar hazırlanabilmektedir. Bu çalışma kapsamında kullanılan 0-7 mm, 7-19 mm ve 19-38 mm ocak taşından kırılmış ve elenmiş agregalar hazırlanması için özel bir poz hazırlanarak 2017 birim fiyatları KGM/6100/3 pozundaki birim fiyat listesinden yaklaşık olarak hesap edilmiştir. Kaba taneli agreganın ince taneli agregaya göre daha ucuz olması göz önünde bulundurulmuştur. Belirlenen agregalar birim fiyatları ve özel hazırlanan poz numaraları Çizelge 3'teki gibi yapılmıştır.

**Çizelge 2.** KGM/6100/3 pozu analizi (Analysis of KGM /6100/3 pose) [20]

Rayiç No	Tanımı	2017 Birim Fiyat (TL/ton)	Miktar
KGM/4101/B	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 37,5 mm (1 1/2")'lik agrega hazırlanması	16,62	0,239
KGM/4102/B	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 25 mm (1") ve 19 mm (3/4")'lik agrega hazırlanması	18,58	0,239
KGM/4105/B	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 12,5 mm (1/2") ve 9,5 mm (3/8")'lik agrega hazırlanması	21,06	0,239
KGM/4107/B	Ocak taşından kırılmış ve elenmiş 4,75 mm (No.4) ve daha küçük agrega hazırlanması	22,28	0,24
KGM/4465/3	Plent-miks alttemel ve temel karışımı hazırlanması	4,59	1
KGM/4269	Malzemenin kantar ile tartılması	0,05	1
KGM/4466/5	Plent-miks alttemel ve temel karışımlarının elektronik duyargalı finişerle serilmesi ve silindire sıkıştırılması	9,94	1
KGM/15.047	Arazöz ile sulama	8,86	0,01

**Çizelge 3.** Belirlenen özel pozlar ile PMT yapım maliyeti hesabında kullanılan veriler (Data used in the calculation of PBC construction cost with identified special poses)

Rayiç No	Tanımı	Birim	Miktar	2017 Birim Fiyat (TL)
Özel poz/1	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 37,5 mm ve 19 mm'lik agrega hazırlanması	ton	1	17,5
Özel poz/2	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 19 mm ve 7 mm'lik agrega hazırlanması	ton	1	20,0
Özel poz/3	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 7 mm ve daha küçük agrega hazırlanması	ton	1	22,0
Özel poz/4	Kaplama yüzeyinden 0-25 mm'lik RAP malzemesinin hazırlanması	ton	1	0
04.011/1C	Puzolanik çimento (torbalı) (TS EN 197-1 CEM IV/A 32,5 R)	ton	1	150,0
KGM/4465/3	Plent-miks alttemel ve temel karışımı hazırlanması	ton	1	4,59
KGM/4466/5	Malzemenin kantar ile tartılması	ton	1	0,05
KGM/4269	Plent-miks alttemel ve temel karışımlarının elektronik duyargalı finişerle serilmesi ve silindire sıkıştırılması	ton	1	9,94
KGM/15.047	Arazöz ile sulama	ton	1	8,86

Agrega ocağı ile konkasör arası mesafe 150 m'ye kadar taşınması fiyata dâhildir.

KGM/6100/3 pozuna göre yapılan bir PMT tabakasının yapım maliyeti, belirlediğimiz özel pozlara göre yapılan PMT tabakasından daha ucuz olmaktadır. Bu çalışma kapsamında kullanılan DA malzemesinin ince tane içeriğinin fazla olması malzeme birim fiyatlarını arttırmıştır. Fakat daha fazla ince tane boyutunda malzeme kullanılarak daha iyi kalitede bir PMT tabakası teşkil edilmiştir.

#### 4.3. PMT tabakası için RAP-DA-çimento karışımları malzeme miktarları (Material quantities of RAP-NA-cement mixtures for PBC)

DA, RAP ve çimento malzemeleri ocaktaki silolara hesaplanan gradasyonlarda ayrı ayrı yerleştirildikten

sonra DA-RAP-çimento oranına göre gereken ağırlıktaki malzemenin gereken gradasyonlarından alınmak üzere sisteme ağırlık verileri girilerek bantlardan gelen malzemeler plente yüklenerek harmanlanır. PMT tabakası için yapılan çalışmalarda KTŞ'nin yaş CBR ve gradasyon limitlerini sağlayan RAP-DA ve RAP-DA-çimento karışımları ve bu karışımlar için plente yüklenecek malzemelerin tane boyutlarının karıştırılma oranları Çizelge 4'te verilmektedir.

**Çizelge 4.** Eleklerden alınan malzeme miktarı ve cinsleri (Amount and types of material taken from sieves)

Karışımlar	Elek açıklıkları (mm)			
	19-38	7-19	0-25	0-7
	%DA	%DA	%RAP	%DA
% 100 DA	26	30	0	44
%10 RAP - %90 DA	24	26	10	40
%20 RAP - %80 DA	24	22	20	34
% 30 RAP - % 70 DA - %1 çimento	18	18	30	34
% 30 RAP - % 70 DA - %2 çimento	18	18	30	34
% 30 RAP - % 70 DA - %3 çimento	18	18	30	34
%40 RAP - %60 DA - %1 çimento	15	17	40	28
%40 RAP - %60 DA - %2 çimento	15	17	40	28
%40 RAP - %60 DA - %3 çimento	15	17	40	28
%50 RAP - %50 DA - %2 çimento	13	13	50	24
%50 RAP - %50 DA - %3 çimento	13	13	50	24
%60 RAP - %70 DA - %2 çimento	11	11	60	18
%60 RAP - %40 DA - %3 çimento	11	11	60	18
% 100 RAP - %3 çimento	0	0	100	0

**Çizelge 5.** 1 km uzunluğundaki PMT tabakasında kullanılacak malzeme miktarları (Amount of material to be used in 1 km long PBC)

Malzeme	Genişlik (m)	Uzunluk (m)	Kalınlık (m)	$\gamma_{kmaks}$ (t/m <sup>3</sup> )	Toplam malzeme miktarı (ton)
% 100 DA	8	1000	0,20	2,23	3.568
% 10 RAP - % 90 DA				2,181	3.489,6
% 20 RAP - % 80 DA				2,15	3.440
% 30 RAP - % 70 DA - %1 çimento				2,178	3.484,8
% 30 RAP - % 70 DA - %2 çimento				2,184	3.494,4
% 30 RAP - % 70 DA - %3 çimento				2,21	3.536
%40 RAP - %60 DA - %1 çimento				2,141	3.425,6
%40 RAP - %60 DA - %2 çimento				2,158	3.452,8
%40 RAP - %60 DA - %3 çimento				2,176	3.481,6
%50 RAP - %50 DA - %2 çimento				2,138	3.420,8
%50 RAP - %50 DA - %3 çimento				2,142	3.427,2
%60 RAP - %40 DA - %2 çimento				2,064	3.302,4
%60 RAP - %40 DA - %3 çimento				2,100	3.360,0
% 100 RAP - %3 çimento				2,092	3.347,2

Yapılacak PMT tabaka kesitinin boyutları, kullanılacak malzemelerin maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ( $\gamma_{kmaks}$ ) ve toplam malzeme miktarları Çizelge 5'te gösterilmektedir.

#### 4.3.1. Karışımlardan hazırlanan PMT tabakasının maliyet analizi (Cost analysis of PBC prepared from mixtures)

%100 DA malzemesinden serilecek bir PMT tabakası için malzeme temininden arazözle sıkıştırmaya kadar malzemenin boyutlarına göre kullanım oranlarına göre yapılan maliyet hesabına, karışımın konkasörden serim alanına olan taşıma maliyeti dâhil değildir. Ocak-konkasör arası mesafenin 150 m'den az olduğu düşünülmüştür. Dolayısıyla ocak-konkasör nakliye masrafı PMT tabakası yapım fiyatına dâhildir. Çizelge

5'te yapılan hesaba göre 1 km yol için PMT tabakasında kullanılacak toplam %100 DA ağırlığı 3.568 ton'dur. Hesaplarda miktarlar bu ağırlığa göre belirlenmiştir.

DA-RAP karışımından serilecek bir PMT tabakası için malzeme temininden arazözle sıkıştırmaya kadar yapılan maliyet hesabına, karışımın konkasörden serim alanına olan taşıma maliyeti dâhil değildir. Ocak-konkasör arası mesafenin 150 m'den az olduğu düşünülmüştür. Dolayısıyla ocak-konkasör nakliye masrafı PMT tabakası yapım fiyatına dâhildir. RAP malzemesinin kazıma alanından siloya taşıma maliyeti Çizelge 1'de verilen hesaba göre analize dâhil edilerek RAP malzemesinin kazındığı yerden siloya taşınması için gereken taşıma maliyetinin hesabında kullanılmıştır. Kazıma alanı ile silo arasındaki mesafenin 50 km olduğu

ve dolayısıyla 10 km'den uzak mesafe olması sebebiyle 07.006/K pozundaki eşitlikten faydalanılmıştır.

DA-RAP-çimento karışımından serilecek bir PMT tabakası için malzeme temininden arazözle sıkıştırmaya kadar 1 ton malzemenin boyutlarına göre kullanım oranlarına göre yapılan maliyet hesapları yapılmıştır. Bu hesaplarda, karışımın konkasörden serim alanına olan taşıma maliyeti dâhil değildir. Ocak-konkasör arası mesafenin 150 m'den az olduğu düşünülmüştür. Dolayısıyla ocak-konkasör nakliye masrafı PMT tabakası yapım fiyatına dâhildir. RAP malzemesinin

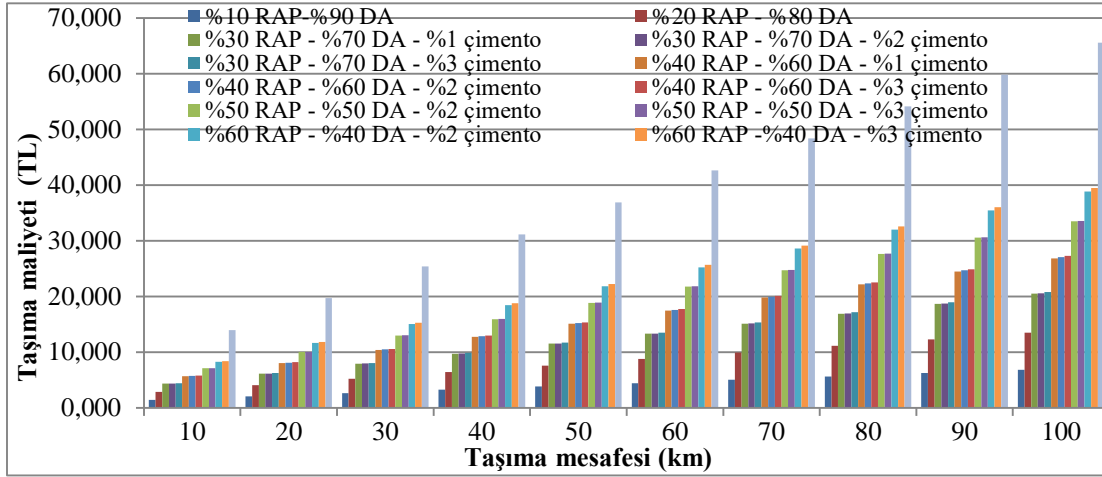
kazıma alanından siloya ve çimentonun da temin noktasından siloya taşıma maliyetinin hesabı Çizelge 1'e göre hesaba katılmıştır. Kazıma yeri ile silo arasındaki mesafenin ortalama 50 km olduğu ve dolayısıyla 10 km'den uzak mesafe olması sebebiyle 07.006/K pozundaki eşitlikten faydalanılmıştır. Çimentonun kolay temin edilebilir bir malzeme olması sebebiyle silo civarındaki yaklaşık 5 km mesafe içinde bir noktadan temin edilebileceği düşünülerek hesap yapılmıştır. Temin noktasından siloya olan mesafe 5 km olarak alınması sebebiyle 07.005/K pozunu kullanarak maliyet hesaplanmıştır. Tüm karışımların, RAP malzemesinin

**Çizelge 6.** RAP malzemelerinin farklı mesafelere bağlı taşıma maliyetleri (Transportation costs of RAP materials at different distances)

Karışımlar	%10 RAP - %90 DA	%20 RAP - %80 DA	%30 RAP - %70 DA - %1 çimento	%30 RAP - %70 DA - %2 çimento	%30 RAP - %70 DA - %3 çimento	%40 RAP - %60 DA - %1 çimento	%40 RAP - %60 DA - %2 çimento	%40 RAP - %60 DA - %3 çimento	%50 RAP - %50 DA - %2 çimento	%50 RAP - %50 DA - %3 çimento	%60 RAP - %40 DA - %2 çimento	%60 RAP - %40 DA - %3 çimento	%100 RAP - %3 çimento
RAP ağırlığı (ton)	349	688	1.045	1.048	1.060	1.370	1.381	1.392	1.710	1.713	1.981	2.016	3.347
Taşıma mesafesi (km)	RAP malzemesi taşıma maliyetleri (kazıma alanından siloya) (TL)												
10	1.453	2.865	4.354	4.366	4.418	5.707	5.752	5.800	7.123	7.137	8.252	8.396	13.941
20	2.051	4.045	6.147	6.164	6.237	8.057	8.120	8.188	10.057	10.075	11.650	11.854	19.681
30	2.650	5.225	7.940	7.961	8.056	10.406	10.489	10.577	12.990	13.014	15.049	15.311	25.421
40	3.248	6.405	9.733	9.759	9.876	12.756	12.858	12.965	15.923	15.953	18.447	18.768	31.162
50	3.847	7.585	11.525	11.557	11.695	15.106	15.226	15.353	18.857	18.892	21.845	22.226	36.902
60	4.445	8.765	13.318	13.355	13.514	17.456	17.595	17.742	21.790	21.831	25.243	25.683	42.643
70	5.044	9.945	15.111	15.153	15.333	19.806	19.964	20.130	24.723	24.770	28.641	29.141	48.383
80	5.642	11.124	16.904	16.951	17.153	22.156	22.332	22.518	27.657	27.708	32.039	32.598	54.124
90	6.241	12.304	18.697	18.749	18.972	24.506	24.701	24.907	30.590	30.647	35.438	36.056	59.864
100	6.839	13.484	20.490	20.547	20.791	26.856	27.069	27.295	33.523	33.586	38.836	39.513	65.605

10-100 km uzaklıktan temin edilmesi durumunda meydana getireceği taşıma maliyetleri Çizelge 6'da ve grafiksel olarak da Şekil 5'te gösterilmektedir.

katsayısı "1" olarak alınmıştır. Arazi şartları düşünüldüğünde bu katsayının daha düşük alınabileceği ve bu durumda taşıma maliyetlerinin düşeceği aşıkârdır.



Şekil 5. Karışımların farklı mesafelere bağlı taşıma maliyetleri (Transportation costs of blends at different distances)

RAP malzemesi kullanım oranı arttıkça taşıma maliyeti de lineer bir şekilde artmaktadır. Karışımda %10 RAP kullanılması durumunda 100 km mesafeye taşıma maliyeti %100 RAP karışımının taşıma maliyetinin yaklaşık 1/10'udur. Yapılan hesaplamalarda güçlük

KTŞ'nin PMT Tip-1 tabakası için belirttiği yaş CBR ve gradasyon kriterlerini karşılayan tüm karışımların yapılacak olan 1 km'lik PMT tabakası için yapım, RAP malzemesinin ve çimentonun siloya taşınma maliyeti dâhil toplam tutarı, çimento temin noktasının silonun 5

Çizelge 7. Malzemelerin siloya taşınma ve PMT yapım maliyetleri dâhil toplam maliyetler (Total costs including material transportation to silo and PBC construction)

Karışım	RAP kazıma alanı-silo arası mesafe (km)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	<b>Toplam Tutar (TL)</b>									
%100 DA	155.814,0									
%10 RAP - %90 DA	146.760	147.358	147.957	148.555	149.154	149.752	150.351	150.949	151.548	152.146
%20 RAP - %80 DA	138.814	139.994	141.174	142.354	143.534	144.713	145.893	147.073	148.253	149.433
%30 RAP - %70 DA - %1 çimento	140.999	142.791	144.584	146.377	148.170	149.963	151.756	153.549	155.342	157.135
%30 RAP - %70 DA - %2 çimento	146.774	148.572	150.370	152.168	153.966	155.763	157.561	159.359	161.157	162.955
%30 RAP - %70 DA - %3 çimento	153.973	155.792	157.611	159.431	161.250	163.069	164.888	166.708	168.527	170.346
%40 RAP - %60 DA - %1 çimento	133.025	135.375	137.725	140.075	142.425	144.774	147.124	149.474	151.824	154.174
%40 RAP - %60 DA - %2 çimento	139.404	141.773	144.141	146.510	148.878	151.247	153.616	155.984	158.353	160.722
%40 RAP - %60 DA - %3 çimento	145.934	148.322	150.711	153.099	155.488	157.876	160.264	162.653	165.041	167.430
%50 RAP - %50 DA - %2 çimento	117.994	120.927	123.861	126.794	129.727	132.661	135.594	138.527	141.461	144.394
%50 RAP - %50 DA - %3 çimento	138.124	141.063	144.002	146.941	149.879	152.818	155.757	158.696	161.635	164.574
%60 RAP - %40 DA - %2 çimento	122.543	125.941	129.339	132.737	136.135	139.534	142.932	146.330	149.728	153.126
%60 RAP - %40 DA - %3 çimento	129.860	133.317	136.775	140.232	143.690	147.147	150.605	154.062	157.520	160.977
%100 RAP - %3 çimento	107.880	113.620	119.361	125.101	130.841	136.582	142.322	148.063	153.803	159.544



km civarında olması ve kazıma alanı-silo arası mesafenin 10-100 km arasında değişmesi durumunda Çizelge 7'de gösterilmektedir.

Çizelge 7'ye göre tamamı ocak malzemesinden (%100 DA ile) serilecek 1 km uzunluğundaki bir PMT tabakası için konkasör-serim alanı taşıma maliyeti hariç toplam tutar yaklaşık 155.814,0 TL olarak belirlenmiştir. Çizelgede görüldüğü gibi %10 RAP-%90 DA, %20 RAP-%80 DA, %40 RAP-%60 DA-%1 çimento, %50 RAP-%50 DA-%2 çimento ve %60 RAP-%40 DA-%2 çimento oranlarında hazırlanan karışımların toplam maliyeti, RAP malzemesinin 100 km uzaklıktan temin edilmesi durumunda bile %100 DA malzemesinden yapılacak bir PMT tabakasına göre daha ekonomik olmaktadır.

Çizelge 7'de, karışımda kullanılan çimento miktarının artması ve dolayısıyla siloya olan taşıma maliyetinin artmasından ötürü karışımın ekonomik kazanımını belirgin biçimde düşürdüğü görülmektedir. Örneğin %30 RAP-%70 DA-%1 çimento karışımı 90 km'ye kadar ekonomik bir alternatif olurken %30 RAP-%70 DA-%3 çimento karışımı sadece 20 km'ye kadar RAP taşınması durumunda ekonomiktir. %30 RAP-%70 DA-%1 çimento karışımının toplam maliyetinin %100 DA malzemesinden yapılacak bir PMT tabakasının kine kıyasla %0,08 gibi bir zarar ettirdiği görülmektedir. Bu denli ufak bir farkın RAP kullanımının çevresel avantajları düşünüldüğünde kabul edilebilir olduğu düşünülmelidir.

%100 RAP-%3 çimento karışımının kullanılması durumunda RAP malzemesinin kazıma alanından siloya taşıma maliyetinin 90 km'nin üzerindeki bir uzaklıktan temini durumunda toplam maliyeti %100 DA malzemesinden yapılacak bir PMT tabakasının üzerine çıkarttığı görülmektedir. Fakat karışımda DA kullanılmaması nedeniyle malzemelerin taş ocağındaki

silolara taşınarak DA ile silolarda karıştırılma gereksinimi kalmadığı için RAP malzemesinin serim alanına en yakın yerdeki bir siloya taşınması taşıma maliyetini düşürecektir. RAP-DA-çimento malzemeleri siloda karıştırıldıktan sonra malzemelerin serim alanına taşıma maliyetleri de göz önüne alınırsa hem siloya taşıma maliyeti hem de serim alanına taşıma maliyetleri olacaktır. Bu sebeple silonun serim yerine yakın olması kazıma alanı-silo, silo-serim alanı malzeme taşıma maliyetlerinde belirgin bir azalma oluşturacaktır. Bu durumda da %100 RAP-%3 çimento malzemelerinin karışımından yapılacak bir PMT tabakasının toplam maliyeti %100 DA ile yapılan PMT tabakasından daha ekonomik olabilecektir.

%100 DA ile yapılan PMT tabakasını dikkate alarak, PMT tabakasında RAP malzemesi veya RAP-çimento karışımı kullanmanın sağlayacağı kâr veya zarar miktarları ve oranları Çizelge 8'de sunulmuştur. RAP malzemesinin kazıma alanından-siloya olan uzaklığı 50 km, çimentonun siloya uzaklığı ise ortalama 5 km olarak hesaba katılmıştır.

Çizelge 8'de görüldüğü gibi çimento takviyesiz karışımlarda RAP malzemesinin karışımdaki kullanım oranının artmasıyla birlikte sağlanan kâr artmaktadır. Karışımdaki çimento oranının artması ise kâr oranını düşürmektedir. En büyük kâr oranı %50 RAP-%50 DA-%2 çimento karışımından elde edilmiştir (%16,74). Sonraki sırada ise %100 RAP-%3 çimento karışımı gelmektedir (%16,2). RAP malzemesinin kazı alanının siloya olan taşıma mesafesinin 50 km olarak, çimentonun temin edildiği noktanın siloya olan uzaklığının da 5 km olarak baz alındığında daha kısa mesafelerde bu taşıma maliyetinin azalmasından ötürü kâr oranının artacağı aşikârdır. Bu sebeple serim alanına yakın bölgelere silo yapılması ve karışımların orada hazırlanması taşıma masraflarını düşürerek RAP kullanımının sağlayacağı

**Çizelge 8.** PMT tabakasında RAP/çimento kullanımından sağlanan kâr oranları (Profit rates from the usage of RAP/cement mixtures in PBC)

Malzeme	Tutar (TL/km)	Kâr (+) / Zarar (-) miktarı (TL)	Kâr oranı
%100 DA	155.814	0	%0
%10 RAP-%90 DA	149.154	+6.659	%4,27
%20 RAP-%80 DA	143.534	+12.280	%7,88
%30 RAP-%70 DA-%1 çimento	148.170	+7.643	%4,90
%30 RAP-%70 DA-%2 çimento	153.966	+1.847	%1,19
%30 RAP-%70 DA-%3 çimento	161.250	-5.436	-%3,49
%40 RAP-%60 DA-%1 çimento	142.425	+13.389	%8,59
%40 RAP-%60 DA-%2 çimento	148.878	+6.935	%4,45
%40 RAP-%60 DA-%3 çimento	155.488	+0.325	%0,21
%50 RAP-%50 DA-%2 çimento	129.727	+26.086	%16,74
%50 RAP-%50 DA-%3 çimento	149.879	+5.934	%3,81
%60 RAP-%40 DA-%2 çimento	136.135	+19.678	%12,63
%60 RAP-%40 DA-%3 çimento	143.690	+12.123	%7,78
%100 RAP-%3 çimento	130.841	+25.167	%16,2

kârı atarak ekonomiklik sıralamasında ilk sırayı alabilecektir. Ayrıca bozulan asfalt kaplamalar yeni kaplama serilmesi için yerinden kazınarak atık sahalarına taşınmaktadır. Dolayısıyla yine bir taşıma maliyeti oluşturmaktadır. Zaten taşıma maliyeti oluşturacak RAP malzemesinin atık sahasına olan taşıma mesafesi siloya olan mesafeden çıkarılarak daha doğru ve daha karlı bir hesap yapılması mümkün olmaktadır.

Sonuçlarda dikkati çeken husus; karışımlarda çimento oranının artmasının maliyeti arttırması olmuştur. %2 çimento katkılı karışımların çoğu %100 DA ile yapılan PMT tabakası yerine 100 km için ekonomik bir çözüm olarak görünürken %3 çimento kullanımı tüm karışımlar için ekonomik olmamıştır.

## 5. SONUÇ ve ÖNERİLER (CONCLUSION and RECOMMENDATIONS)

Kazınmış asfalt kaplama (RAP) malzemelerinin PMT Tip-1 tabakasında çimento takviyeli ve takviyesiz olarak kullanım oranlarına bağlı, malzeme maliyeti, malzemelerin taşıma maliyetleri ve temel tabakası yapım maliyeti dâhil toplam tutarların araştırıldığı bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

1. Düşük çimento ve yüksek RAP oranındaki karışımların toplam maliyeti, tamamı %100 DA malzemesinden teşkil edilecek bir PMT tabakasından daha ekonomik olmaktadır.
2. Temel tabakası yapılacak karışımdaki RAP oranı arttıkça malzeme nakliyesinden doğan taşıma maliyeti de lineer bir şekilde artmaktadır.
3. Karışımlarda kullanılan çimento miktarının artması ve dolayısıyla siloya taşıma maliyetinin artması nedeni ile çimento takviyesi RAP malzemesi kullanımından sağlanacak ekonomik kazanımını belirgin biçimde düşürmektedir.
4. RAP malzemesinden yapılan temel tabakaları için maliyetin büyük kısmını oluşturan kalem, RAP malzemesinin kazı alanından doğal agreganın bulunduğu taş ocağındaki siloya taşınması olmuştur. Temel tabakası serim alanına yakın bir noktaya silo yapılması ve karışımların orada hazırlanması taşıma masraflarını düşürüp RAP kullanımının sağlayacağı kârı arttırarak ekonomiklik sıralamasında %100 RAP kullanımı ilk sırayı alabilecektir.

Bu çalışma ülkemiz karayollarının tamamına yakınının bitümlü sıcak kaplama tabakasıyla yapılmış olmasından dolayı yeniden yapım veya yerinden kaldırma gibi işlemler neticesinde elde edilen asfalt kaplama atıklarının (RAP) yeniden kullanımını teşvik etmek amacıyla yürütülmüştür. Yapılan çalışma neticesinde RAP malzemesinin PMT Tip-1 tabakasında kullanılabileceği ve yüksek oranlarda ( $\geq$ %50) kullanımının puzzolanik çimento takviyesiyle mümkün olduğu belirlenmiştir. RAP malzemesi kullanımı, doğal agregaya olan ihtiyacı azaltarak malzeme maliyetlerinde azalmaya sebep

olmaktadır. Fakat bu malzemelerin temin edildikleri noktalara veya malzeme silolarına uzaklıklarından kaynaklanan nakliye maliyetlerinin de zarar ettirmeyecek şekilde hesaplanması gerekmektedir. İşte bu noktada çalışmamız gerek KGM ve gerekse belediyelere, atık malzemelerin geri dönüşümünü sağlarken, malzeme, nakliye ve yapımın kar ettirecek olan RAP malzemesi kullanımının mümkün olduğunu göstermek ve kullanımını teşvik etmek için bir rehber niteliğindedir.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Oruç Ş., Yılmaz B. and Mazlum M.S., “Geri Kazanılan Asfalt Kaplamaların Sıcak Asfalt Karışımlarda Yeniden Kullanılabilirliğinin Araştırılması”, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(1): 87-93, (2018).
- [2] <http://www.singemat.com.tr/tr/CevreArge/AsfaltGeriKazanimi>, “Simge Mat A.Ş. Asfalt geri kazanımı”, (2018).
- [3] Kaya B., “Bitümlü karışımların geri dönüşümü, çevresel etkileri ve maliyet analizi”, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2011).
- [4] Carswell I., Nicholls J.C., Elliot R.C., Harris J. and Strickland D., “Feasibility of recycling thin surfacing back into thin surfacing systems”, *Transport Research Laboratory (TRL) Report TRL645*, Wokingham, UK, (2005).
- [5] Arapoğlu A.S., “Bozulmuş asfalt kaplamaların geri dönüşümü ve maliyet analizi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, (2014).
- [6] McGarrah E.J., “Evaluation of current practices of reclaimed asphalt pavement/virgin aggregate as base course material”, Final Report No: WA-RD 713.1, *Washington State Department of Transportation*, Washington DC, A.B.D., (2007).
- [7] Schaefer V., Stevens L., White D. and Ceylan H., “Design guide for improved quality of roadway subgrades and subbases”, Final Report No: IHRB Project TR-525, Iowa Highway Research Board, *Iowa Department of Transportation*, A.B.D., (2008).
- [8] Taha R., Ali G., Basma A. and Al-Turk O., “Evaluation of reclaimed asphalt pavement aggregate in road bases and subbases”, *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 1652(1): 264-269, (1999).
- [9] Cosentino P. J., Kalajian E. H., Bleakley A. M., Diouf B.S., Misilo T.J., Petersen A.J. and Sajjadi A.M., “Improving the properties of reclaimed asphalt pavement for roadway base applications”, Final Report

- No: FL/DOT/BDK81 97702, *Florida Department of Transportation*, A.B.D., (2012).
- [10] Bennert T., and Maher A., “The Development of a Performance Specification for Granular Base and Subbase Material”, Final Report No: FHWA-NJ-2005-003, *Federal Highway Administration*, Washington DC., A.B.D., (2005).
- [11] Seferoğlu A.G., Seferoğlu M.T. and Akpınar M.V., “Türkiye’de geri dönüşüm asfalt kaplamaların (RAP) bağlayıcısız temel tabakalarında kullanılabilirliği ve şartname gereksinimleri”, *Yapı Dünyası*, 254: 21-26, (2017).
- [12] Bleakley A.M., and Cosentino P.J., “Improving properties of reclaimed asphalt pavement for 484 Roadway base applications through blending and chemical stabilization”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 486(2335): 20-28, (2013).
- [13] Karayolu Teknik Şartnamesi (KTS), Kısım 402: Temel, *Karayolları Teknik Şartnamesi*, Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası, Ankara, (2013).
- [14] Franke R. and Ksaibati K.A., “Methodology for cost-benefit analysis of recycled asphalt pavement (RAP) in various highway applications”, *International Journal of Pavement Engineering*, 16(7): 660-666, (2015). DOI: 10.1080/10298436.2014.943217
- [15] Andreen B., Rocheville H. and Ksaibati K.A., “Methodology for cost/benefit analysis of recycled asphalt pavement (RAP) in various highway applications”, *Transportation Research Board (TRB) 2012 Annual Meeting*, (2011).
- [16] Seferoğlu A.G., Seferoğlu M.T. and Akpınar M.V., “Experimental study on cement-treated and untreated RAP blended bases: Cyclic plate loading test”, *Construction and building materials*, 182: 580-587, (2018). DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.160
- [17] Türk Standartları Enstitüsü (TSE), TS 3530 EN 933-1: Agregaların geometrik özellikleri için deneyler Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini-Elleme metodu, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2015).
- [18] AASHTO T 193, Standard method of test for the California bearing ratio, The American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, (2013).
- [19] <http://applications.dynapac.com/soil/millingrecycling/>, “Milling recycling”, (2017).
- [20] <http://www.birimfiyat.net/kgm-6100-3-plent-miks-temel-yapilmasi-kirilmis-ve-elenmis-ocak-tasi-ile>, “Plent-miks temel yapılması”, (2017).
- [21] <http://www.birimfiyat.net/07.005-k-kazidan-baska-insaat-malzemesinin-tasinmasi-10-000-m.ye-kadar>, “1000 m’ye kadar kazıdan başka inşaat malzemelerinin taşınması”, (2017).
- [22] <http://www.birimfiyat.net/07.006-k-kazidan-baska-ins.malzemesinin-tasinmasi-10000-mt>, “Kazıdan başka inşaat malzemesinin taşınması”, (2017).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Profil kaydırılmalı silindirik evolvent dişli çarkların matematik modellenmesi

## *Mathematical modelling of profile-shifted cylindrical involute gears*

*Yazar (Author): Mahmut Cüneyt FETVACI*

*ORCID: 0000-0002-1622-1583*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Fetvacı, M.C., “Profil kaydırılmalı silindirik evolvent dişli çarkların matematik modellenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1339-1346, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.570841

# Profil Kaydırmalı Silindirik Evolvent Dişli Çarkların Matematik Modellenmesi (TR)

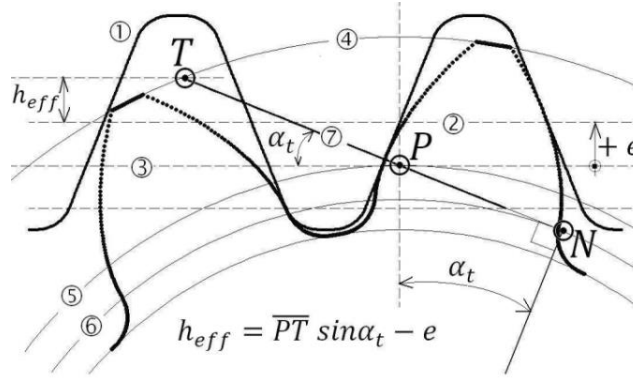
## Mathematical Modelling of Profile-Shifted Cylindrical Involute Gears (EN)

### Önemli Noktalar (Highlights)

- ❖ Eş zamanlı pinyon-çark profil oluşturma / Simultaneous pinion-wheel profile generation
- ❖ Asimetrik profilli dişliler ve profil kaydırma / Asymmetric gears and addendum modification
- ❖ Efektif evolvent üst parametre limiti / Effective upper limit for involute parameter

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada kremayer takımla imal edilen helisel dişli çarkların matematik modeli ele alınmıştır. Evolvent parametresinin üst limitinin tayini için bir analitik metot geliştirilmiştir. / This paper studies the mathematical models of helical gears generated by rack-type cutters. An analytical method for determining effective upper limit of involute parameter is proposed.



Şekil. Alın kesitte dişli geometrisi / Figure. Gear geometry at transverse section

### Amaç (Aim)

Bu çalışmada kremayer takımla imal edilen evolvent profilli dişli çark mekanizmalarının modellenmesi ele alınmıştır. / This paper studies the equations of involute gears manufactured by rack-type cutters.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Dişli teorisi ve imalat metodundan hareketle profil kaydırmalı pinyon ve çarkın tam matematik modeli verilmiştir. / Based on the gear theory and production method a complete mathematical model of a profile-shifted gear pair is given.

### Özgünlük (Originality)

Profil kaydırma takımın vektör modeline uygulanmıştır. / The amount of profil shift is represented in the vector model of the rack cutter.

### Bulgular (Findings)

Bir bilgisayar programı geliştirilerek profil kaydırmanın imal edilen dişli geometrisindeki etkileri incelenmiştir. / A computer simulation program is developed to investigate the effect of profile shifting on the generated teeth surfaces.

### Sonuç (Conclusion)

Sayısal uygulamalar matematik modelin ve programlamanın doğruluğunu ve geçerliliğini göstermiştir. / Numerical examples demonstrate the verification and validation of the simulation model.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Profil Kaydırmalı Silindirik Evolvent Dişli Çarkların Matematik Modellenmesi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Mahmut Cüneyt FETVACI\***

Mühendislik Fakültesi, Makina Müh. Bölümü, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Türkiye

(Geliş/Received : 28.05.2019 ; Kabul/Accepted : 29.11.2019)

## ÖZ

Bu çalışmada kremayer takımla imal edilen evolvent profilili dişli çark mekanizmalarının modellenmesi ele alınmıştır. Dişli teorisi ve imalat metodundan hareketle profil kaydırmalı pinyon ve çarkın tam matematik modeli verilmiştir. Asimetrik diş profile de göz önüne alınmıştır. Bir bilgisayar programı geliştirilerek profil kaydırmanın imal edilen dişli geometrisindeki etkileri incelenmiştir. Sayısal uygulamalar matematik modelin ve programlamanın doğruluğunu ve geçerliliğini göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Evolvent profil, profil kaydırmalı dişliler, kremayer takım.

## Mathematical Modelling of Profile-Shifted Cylindrical Involute Gears

### ABSTRACT

This paper studies the equations of involute gears manufactured by rack-type cutters. Based on the gear theory and production method a complete mathematical model of a profile-shifted gear pair is given. Also asymmetric tooth profile is considered. A computer simulation program is developed to investigate the effect of profile shifting on the generated teeth surfaces. Numerical examples demonstrate the verification and validation of the simulation model.

**Keywords:** Involute profile, profile-shifted gears, rack cutter.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Düz ve helisel evolvent dişli çarklar paralel miller arasında güç ve hareketin iletiminde yaygın olarak kullanılır. Helisel dişliler daha sessiz çalışmakta ve daha büyük yük taşımaktadır. Dişli çarkların seri imalatında yuvarlanma yöntemini esas alan takımlar kullanılmaktadır. Takım ve imal edilen dişli arasındaki izafi harekete göre kremayer, azdırma ve pinyon-tipi olarak sınıflandırılan bu takımlar verilen bir modül için tüm diş sayılarındaki çarkların imalatında kullanılır [1-2].

Tsay, kremayer takımla imal edilen helisel dişli çarkların matematik modelini sunmuştur [3]. Chen ve Tsay, dişli teorisi ve yuvarlanma yönteminden hareketle helisel dişli çark mekanizmalarının matematik modelini sunmuş ve küçük diş sayılarına inmeyi sağlayan kök düzeltmesini incelemiştir [4]. Yang, helisel dişli çarklarda asimetrik diş profilini de göz önüne alan matematik modeli sunmuştur [5]. Asimetrik dişlilerde sağ ve sol profiller farklı kavrama açıları ile oluşturularak yüksek mukavemet ve verimlilik, düşük titreşim ve gürültü gibi performanslar elde edilir. Liu ve Tsay, evolvent dişli çarkların geliştirilmiş hali olan beveloid dişli çarkların matematik modelini sunmuştur [6]. Beveloid dişli çarklar diş genişliği boyunca lineer

profil kaydırmalı evolvent dişli çarklar olarak tanımlanabilir. Brauer ise konvansiyonel profil kaydırmayıda gözönüne alan beveloid dişli modelini ve bu modelden hareketle sonlu eleman modelini sunmuştur [7]. Huang ve Su, beveloid dişli çark modeline fonksiyonel modifikasyonları (uç kabartma ve bombeli diş) ilave ederek dinamik sonlu eleman analizini gerçekleştirmişlerdir [8]. Alttan kesme evolvent dişlilerde küçük diş sayılarında meydana gelen ve dişdibini zayıflatarak yük taşıma kabiliyetini azaltan bir olaydır. Profil kaydırma alttan kesmeyi önlemek için kullanılan yöntemlerden en çok uygulananıdır. Bunun nedeni profil kaydırmalı dişlilerin standart (profil kaydırmaz) dişlilerde kullanılan takımlarla ve tezgahlarla imal edilebilmeleridir. Profil kaydırma alttan kesmeyi önlemenin yanısıra mekanizmayı istenen eksenlerarası mesafeye yerleştirmek ve diş mukavemetini arttırmak için de kullanılmaktadır. Dişlilere uygulanan profil kaydırma faktörlerinin toplamına göre mekanizmalar sınıflandırılmaktadır. Profil kaydırmalı mekanizmalar  $x_1 + x_2 = 0$  durumunda V-0 Mekanizmaları,  $x_1 + x_2 \neq 0$  durumunda ise V-Mekanizmaları olarak adlandırılmaktadır [9].

Literatürde mevcut çalışmalarda matematik modellerin detayları genellikle verilmemektedir. Takımın şekillendirici yüzeylerine ait parametrelerin değişim aralıkları birçok çalışmada okuyucuya bırakılmaktadır. Ayrıca profil kaydırmanın matematik modele ilavesi değişik düzenlemelerle yapılmakta ve denklemlerde açık

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : fetvacic@istanbul.edu.tr



olarak gösterilmemektedir. Genelde sadece resim üzerinden nasıl yapılacağı belirtilmektedir. Yang, pinyon ve çarka uygulanacak profil kaydırmada takımın çarklara göre izafi konumlarını belirtmekle birlikte vektör modelde ve koordinat dönüşümlerinde profil kaydirmayı göstermemiştir. Çalışmada asimetrik dişli durumunda profil kaydırmalı mekanizmaların montaj özellikleri belirtilmemiştir [5]. Bair, profil kaydırma miktarını denklemlere ilave etmekle birlikte evolvent parametresinin değişim aralığını belirtmemiştir [10].

Yukarıda belirtilen çalışmalarda profil kaydırmalı mekanizmalarında gözönüne alan detaylı bir matematik modelin olmaması yazarı bu konuda çalışmaya teşvik etmiştir. Sunulan bu çalışmada profil kaydırmalı mekanizmaların bilgisayar simülasyonu için kremayer takımla imal edilen düz ve helisel dişli çark mekanizmalarının (pinyon ve çark) matematik modellenmesi ele alınmıştır. Vektör formunda ifade edilen takım matematik modeline profil kaydırma miktarında eklenmiştir. Normal kesitte tanımlanan takım modelinden hareketle koordinat dönüşüm, diferansiyel geometri ve dişli ana kanunu uygulanarak asimetrik evolvent profilli helisel dişli çiftinin matematik modeli elde edilmiştir. Bu model programlanarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Farklı dizayn parametreleri seçilerek hazırlanan ve görselleştiren sayısal uygulamalarda modelin hem V-0 hemde V-Mekanizmaları için doğru ve geçerli olduğu sonucu elde edilmiştir. Asimetrik dişli durumda sınırlamalar belirtilmiştir. Ayrıca kremayer takımla dişli çark imalatında evolvent parametresinin üst sınırının imal edilen diş profilinde standart dişbaşı sağlayan analitik yöntem [11] bu çalışmada sunulan profil kaydırmalı modele adapte edilmiştir.

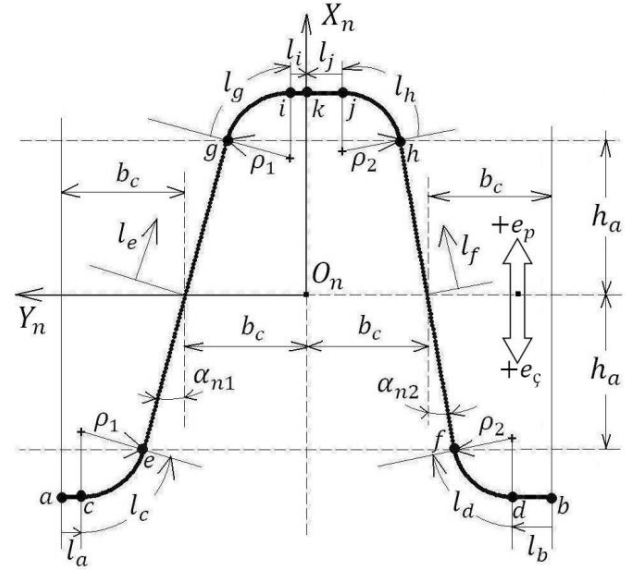
Profil kaydırmanın ve asimetrik diş profilinin de göz önüne alındığı takımın matematik modeli çalışmanın ikinci bölümünde verilmiştir. İmal edilen dişli çarkların matematik modelleri üçüncü bölümde ele alınmaktadır. Dördüncü bölümde evolvent parametresinin üst limiti için geliştirilen yöntem anlatılmıştır. Beşinci bölümde sayısal uygulamalar ele alınmış ve sonuçlar görselleştirilmiştir. Altıncı bölümde sonuçlar vurgulanmıştır.

## 2. KREMYER TAKIMIN MATEMATİK MODELİ (MATHEMATICAL MODEL OF THE RACK CUTTER)

### 2.1. Normal Kesitte Takım Geometrisi (Cutter Geometry on the Normal Section)

Helisel dişli çark mekanizmasını imal eden kremayer takım geometrisi Şekil 1'de normal kesitte gösterilmektedir. Burada pinyon-çark mekanizmasını eşzamanlı oluşturan kremayer takım, dişlileri ayrı ayrı oluşturan iki özdeş kremayerin üstüste bindirilmiş durumu olarak değerlendirilmektedir. Diğer bir anlatımla takım imajinerdir. Trapez şekilli bu takımın köşeleri yuvarlatılmıştır. Takım öteleme hareketi yaparken eş çalışan dişliler dönme hareketi yapmaktadır. Normal

kesitte takım geometrisini belirlemek için kullanılan  $S_n(X_n, Y_n, Z_n)$  koordinat sistemi sağ el kuralına uymaktadır.  $Y_n$  eksenli takım taksimat hattında ve  $X_n$  eksenli diş boşluğu merkez doğrusu üzerindedir. Takımın imal edilen dişlilerin yanak, kök ve tabanlarını şekillendiren bölgelerinin literatürde mevcut olan denklemleri [5, 12] profil kaydırma faktörleri ilave edilerek aşağıda verilmektedir. Denklemlerde normal kesitte kavrama açısı  $\alpha_n$  ve takım ucu yuvarlatma yarıçapı  $\rho$  sembolleriyle gösterilmektedir. Bu sembollerin alt indislerindeki rakamlar sırasıyla sol ve sağ profiller içindir. Taksimat hattında diş kalınlığının yarısı veya diş boşluğunun yarısı  $b_c = 0.25\pi m_n$  ifadesiyle hesaplanır.  $c_y = 0,1,2 \dots$  alınarak takım geometrisi istenilen diş sayısında oluşturulabilir.



Şekil 1. Kremayer Takımın Normal Kesiti (Normal Section of the Rack Cutter) [5, 12]

Pinyon dişlisinin tabanını şekillendiren  $\overline{ac}$  ve  $\overline{bd}$  bölgelerinin yer vektörleri (1-2) numaralı eşitliklerde verilmektedir.  $\overline{ac}$  bölgesindeki bir noktanın konumunu tayin eden eğrisel parametrenin değişim aralığı  $[l_a \in 0, b_c - h_a \tan \alpha_{n1} - \rho_1 \cos \alpha_{n1}]$  dir. Benzer şekilde  $\overline{bd}$  bölgesindeki bir noktanın konumunu tayin eden eğrisel parametrenin değişim aralığı  $[l_b \in 0, b_c - h_a \tan \alpha_{n2} - \rho_2 \cos \alpha_{n2}]$  dir. Profil kaydırma miktarı  $e_p$  sembolü ile gösterilmektedir ve  $e_p = m_n \cdot x_1$  dir.

$$R_n^{ac} = \begin{Bmatrix} x_n^{ac} \\ y_n^{ac} \\ z_n^{ac} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -h_a + \rho_1 \sin \alpha_{n1} - \rho_1 + e_p \\ \frac{\pi m_n}{2} - l_a + c_y \pi m_n \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$R_n^{bd} = \begin{Bmatrix} x_n^{bd} \\ y_n^{bd} \\ z_n^{bd} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -h_a + \rho_2 \sin \alpha_{n2} - \rho_2 + e_p \\ -\frac{\pi m_n}{2} + l_b + c_y \pi m_n \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Pinyon dişlisinin kökünü şekillendiren  $\overline{ce}$  ve  $\overline{df}$  bölgelerinin yer vektörleri (3-4) numaralı eşitliklerde verilmektedir. Bu bölgelerdeki herhangi bir noktanın

konumunu tayin eden eğrisel parametrelerin sınırları  $[l_c \in 0, 90^\circ - \alpha_{n1}]$  ve  $[l_d \in 0, 90^\circ - \alpha_{n2}]$  dir.

$$R_n^{ce} = \begin{Bmatrix} x_n^{ce} \\ y_n^{ce} \\ z_n^{ce} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -h_a + \rho_1 \sin \alpha_{n1} - \rho_1 \cos l_c + e_p \\ b_c + h_a \tan \alpha_{n1} + \rho_1 \cos \alpha_{n1} - \rho_1 \sin l_c + c_y \pi m_n \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$R_n^{df} = \begin{Bmatrix} x_n^{df} \\ y_n^{df} \\ z_n^{df} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -h_a + \rho_2 \sin \alpha_{n2} - \rho_2 \cos l_d + e_p \\ -b_c - h_a \tan \alpha_{n2} - \rho_2 \cos \alpha_{n2} + \rho_2 \sin l_d + c_y \pi m_n \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

Pinyon dişlisinin evolvent yanaklarını şekillendiren  $\overline{eg}$  ve  $\overline{fh}$  bölgelerinin yer vektörleri (5-6) numaralı denklemlerde verilmektedir. Bu bölgelerdeki herhangi bir noktanın konumunu tayin eden eğrisel parametrelerin sınırları  $[l_e \in -h_a/\cos \alpha_{n1}, h_a/\cos \alpha_{n1}]$  ve  $[l_f \in -h_a/\cos \alpha_{n2}, h_a/\cos \alpha_{n2}]$  dir.

$$R_n^{eg} = \begin{Bmatrix} x_n^{eg} \\ y_n^{eg} \\ z_n^{eg} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} l_e \cos \alpha_{n1} + e_p \\ b_c - l_e \sin \alpha_{n1} + c_y \pi m_n \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$R_n^{fh} = \begin{Bmatrix} x_n^{fh} \\ y_n^{fh} \\ z_n^{fh} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} l_f \cos \alpha_{n2} + e_p \\ -b_c + l_f \sin \alpha_{n2} + c_y \pi m_n \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

İmajiner takımın pinyonun evolvent yanağını şekillendiren bölgesi ile çarkın evolvent yanağını şekillendiren bölgesi aynıdır. Ancak imal edilen taslaklara göre profil kaydırma yönleri farklı olduğundan çark dişlisinin evolvent yanaklarını şekillendiren  $\overline{eg}$  ve  $\overline{fh}$  bölgelerinin yer vektörleri (7-8) numaralı denklemlerde verilmektedir. Profil kaydırma miktarı bu denklemlerde  $e_c$  sembolü ile gösterilmektedir ve  $e_c = m_n \cdot x_2$  dir. Bu denklemlerde bölge parametrelerinin değişim aralıkları pinyon için verilenlerle aynıdır.

$$R_n^{eg} = \begin{Bmatrix} x_n^{eg} \\ y_n^{eg} \\ z_n^{eg} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} l_e \cos \alpha_{n1} - e_c \\ b_c - l_e \sin \alpha_{n1} + c_y \pi m_n \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

$$R_n^{fh} = \begin{Bmatrix} x_n^{fh} \\ y_n^{fh} \\ z_n^{fh} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} l_f \cos \alpha_{n2} - e_c \\ -b_c + l_f \sin \alpha_{n2} + c_y \pi m_n \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (8)$$

Çark dişlisinin kökünü şekillendiren  $\overline{gi}$  ve  $\overline{hj}$  bölgelerinin yer vektörleri (9-10) numaralı denklemlerde verilmektedir. Bu denklemlerde bölge parametrelerinin değişim aralıkları  $[l_g \in 90^\circ - \alpha_{n1}, 0]$  ve  $[l_h \in 90^\circ - \alpha_{n2}, 0]$  dir.

$$R_n^{gi} = \begin{Bmatrix} x_n^{gi} \\ y_n^{gi} \\ z_n^{gi} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} h_a - \rho_1 \sin \alpha_{n1} + \rho_1 \cos l_g - e_c \\ b_c - h_a \tan \alpha_{n1} - \rho_1 \cos \alpha_{n1} + \rho_1 \sin l_g + c_y \pi m_n \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

$$R_n^{hj} = \begin{Bmatrix} x_n^{hj} \\ y_n^{hj} \\ z_n^{hj} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} h_a - \rho_2 \sin \alpha_{n2} + \rho_2 \cos l_h - e_c \\ -b_c + h_a \tan \alpha_{n2} + \rho_2 \cos \alpha_{n2} - \rho_2 \sin l_h + c_y \pi m_n \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

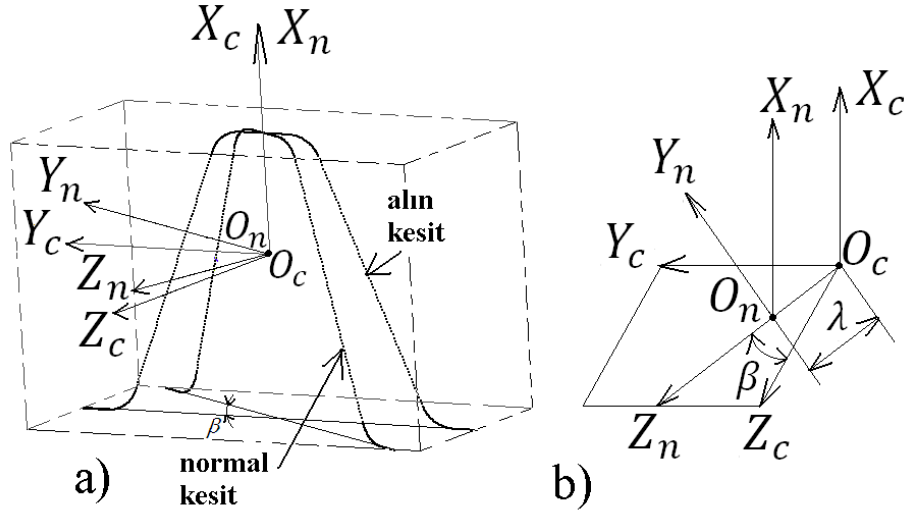
Çark dişlisinin tabanını şekillendiren  $\overline{ik}$  ve  $\overline{jk}$  bölgelerinin yer vektörleri (11-12) numaralı denklemlerde verilmektedir. Bu denklemlerde bölge parametrelerinin değişim aralıkları  $[l_i \in b_c - h_a \tan \alpha_{n1} - \rho_1 \cos \alpha_{n1}, 0]$  ve  $[l_j \in b_c - h_a \tan \alpha_{n2} - \rho_2 \cos \alpha_{n2}, 0]$  dir.

$$R_n^{ik} = \begin{Bmatrix} x_n^{ik} \\ y_n^{ik} \\ z_n^{ik} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} h_a - \rho_1 \sin \alpha_{n1} + \rho_1 - e_c \\ l_i + c_y \pi m_n \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (11)$$

$$R_n^{jk} = \begin{Bmatrix} x_n^{jk} \\ y_n^{jk} \\ z_n^{jk} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} h_a - \rho_2 \sin \alpha_{n2} + \rho_2 - e_c \\ -l_j + c_y \pi m_n \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (12)$$

### 2.1. Helisel Yüzey Oluşturma (Helical Surface Generation)

Helisel dişli çarklarda temel boyut ve büyüklükleri tanımlamak için diş doğrultusuna dik olan normal kesit ve mil dik olan alın kesit kullanılır. Normal kesitte ve alın kesitte referans profilleri trapez şekilli kremayer olmakla birlikte kavrama açıları ve modüller farklıdır. Standart ölçüler normal kesitte belirlenmektedir. Dişler mil eksenine göre eğik olduğundan helisel takım yüzeyini elde etmek için normal kesitten hareketle koordinat dönüşümü uygulanır. Böylece Şekil 2'de görüldüğü üzere  $S_n$  koordinat sistemine bağlı normal kesitteki yüzey  $\overline{O_n O_c}$  doğrusu boyunca ötelenir.  $\lambda = |\overline{O_n O_c}|$  takım yüzeyinin dizayn parametrelerinden biridir ve  $\beta$  imal edilen dişlinin helis açısıdır. Dönüşümün matematik ifadesi (13) numaralı eşitlikte verilmektedir.



Şekil 2. Helisel Yüzey İçin Koordinat Dönüşüm (Helical Surface Generation)

$$[M_{cn}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta & -\lambda\sin\beta \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta & \lambda\cos\beta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Böylece helisel dişli kremayer takımın vektörel ifadesi  $S_c(X_c, Y_c, Z_c)$  koordinat sisteminde elde edilir.

$$R_c^i = [M_{cn}]R_n^i \quad (14)$$

Bu ifadede üst indis  $i$  sırasıyla  $\overline{ac}$ ,  $\overline{bd}$ ,  $\overline{ce}$ ,  $\overline{df}$ ,  $\overline{eg}$  ve  $\overline{fh}$  bölgelerini gösterir. Açık formda ifade aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} x_c^i &= x_n^i \cos\beta - \lambda \sin\beta \\ y_c^i &= y_n^i \\ z_c^i &= x_n^i \sin\beta + \lambda \cos\beta \end{aligned} \quad (15)$$

Diferansiyel geometriden takımın imal eden yüzeylerinin birim normal vektörleri aşağıdaki ifade ile elde edilir [13].

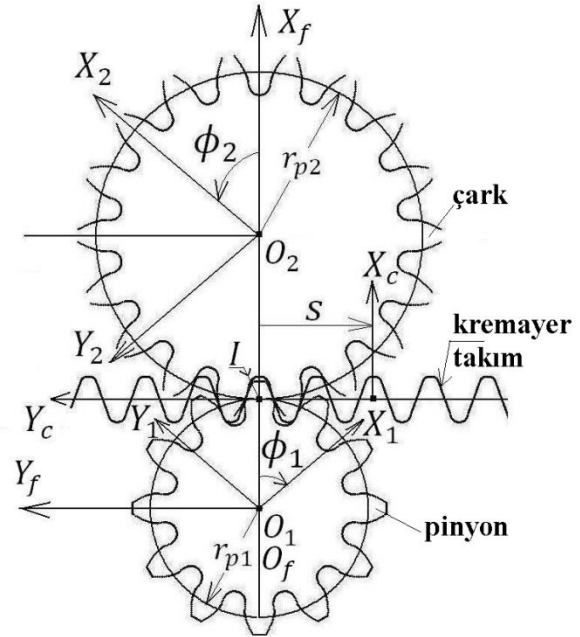
$$n_c^i = \frac{\partial R_c^i}{\partial t_j} \times \frac{\partial R_c^i}{\partial \lambda} \Big/ \left| \frac{\partial R_c^i}{\partial t_j} \times \frac{\partial R_c^i}{\partial \lambda} \right| \quad (16)$$

Bu ifadede üst indis  $i$  takımın bölgelerini ve alt indis  $j$  bu bölgelere ait eğrisel parametreleri gösterir.

### 3. İMAL EDİLEN ÇARKLARIN MATEMATİK MODELLERİ (MATHEMATICAL MODELS OF GENERATED GEARS)

İmajiner kremayer takım ile imal edilen dişli çark arasındaki koordinat bağı Şekil 3'de gösterilmiştir.  $S_c(X_c, Y_c, Z_c)$  kremayer takımın koordinat sistemi,  $S_1(X_1, Y_1, Z_1)$  imal edilen pinyon dişlisinin koordinat sistemi,  $S_2(X_2, Y_2, Z_2)$  imal edilen çark dişlisinin koordinat sistemi ve  $S_f(X_f, Y_f, Z_f)$  sabit olan referans koordinat sistemidir. Takımın öteleme hareketi

$S = r_{p1}\phi_1 = r_{p2}\phi_2$  değerindedir. İmal edilen pinyon dişlisi  $\phi_1$  ve çark dişlisi  $\phi_2$  açıları kadar dönmektedir. Pinyon taksimat yarıçapı  $r_{p1}$  ve çark taksimat yarıçapı  $r_{p2}$  sembollerıyla gösterilmektedir.



Şekil 3. Takım ile İmal Edilen Dişliler Arasındaki Koordinat Dönüşümü (Coordinate Relationship between Rack Cutter and Generated Gears) [5, 13]

$S_c$  takım koordinat sisteminden pinyon  $S_1$  koordinat sistemine dönüşümün matris ifadesi (17) numaralı denklemde verilmektedir [13].

$$[M_{1c}] = \begin{bmatrix} \cos\phi_1 & -\sin\phi_1 & 0 & r_{p1}(\cos\phi_1 + \phi_1 \sin\phi_1) \\ \sin\phi_1 & \cos\phi_1 & 0 & r_{p1}(\sin\phi_1 - \phi_1 \cos\phi_1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

(1-6) ve (17) numaralı ifadeler kullanılarak kremayer takım yüzeyinin geometrik yeri imal edilen pinyon dişlinin koordinat sisteminde ifade edilir.

$$R_1^i = [M_{1c}]R_c^i, \quad (i = \overline{ac} \sim \overline{fh}) \quad (18)$$

$S_c$  koordinat sisteminden çark  $S_2$  koordinat sistemine dönüşümün matris ifadesi (19) numaralı denklemde verilmektedir [13].

$$[M_{2c}] = \begin{bmatrix} \cos\phi_2 & \sin\phi_2 & 0 & -r_{p2}(\cos\phi_2 + \phi_2 \sin\phi_2) \\ -\sin\phi_2 & \cos\phi_2 & 0 & r_{p2}(\sin\phi_2 - \phi_2 \cos\phi_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

(7-12) ve (19) numaralı ifadeler kullanılarak kremayer takım yüzeyinin geometrik yeri imal edilen çarkın koordinat sisteminde ifade edilir.

$$R_2^i = [M_{2c}]R_c^i, \quad (i = \overline{eg} \sim \overline{jk}) \quad (20)$$

Takımın alın kesiti ile imal edilen dişli yüzeyinin ortak normali ani dönme merkezinden (yuvarlanma dairelerinin değme noktası) geçmelidir. Böylece eş çalışma denklemi takımın  $S_c(X_c, Y_c, Z_c)$  koordinat sisteminde ifade edilebilir.  $\phi_j$  yuvarlanma parametresi ile  $l_j$  bölge parametresi arasındaki bağ kurulmuş olur. Bu makalede kullanılan eksen takımına göre düzenleme yapılarak pinyon için (21) numaralı ve çark için (22) numaralı eşitlikler elde edilir.

$$\phi_1 = \frac{y_c^i n_{xc}^i - x_c^i n_{yc}^i}{r_{p1}}, \quad (i = \overline{ac} \sim \overline{fh}) \quad (21)$$

$$\phi_2 = \frac{y_c^i n_{xc}^i - x_c^i n_{yc}^i}{r_{p2}}, \quad (i = \overline{eg} \sim \overline{jk}) \quad (22)$$

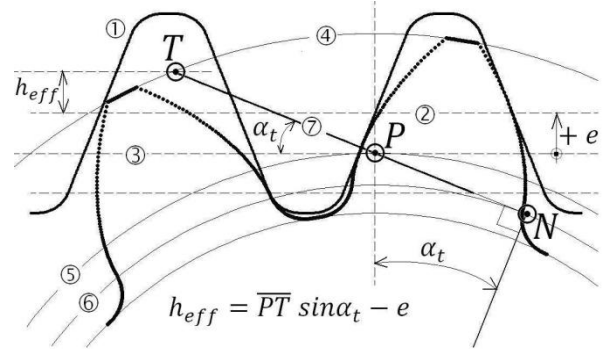
Bu denklemlerde  $x_c^i, y_c^i$  ve  $z_c^i$  takım yüzeyinin koordinatlarını;  $n_{xc}^i, n_{yc}^i$  ve  $n_{zc}^i$  takım koordinat sisteminde birim normal vektörünün bileşenlerini göstermektedir.

Sonuç olarak imal edilen pinyonun matematik modeli (17), (18) ve (21) numaralı denklemler kullanılarak elde edilmektedir. Benzer şekilde çarkın matematik modeli (19), (20) ve (22) numaralı denklemlerden elde edilir.

Diş genişliği boyunca herhangi bir alın kesitte takım geometrisini elde etmek için (9) numaralı denklemin üçüncü satırı  $\lambda = (z_c^i - x_n^i \sin\beta) / \cos\beta$  olarak düzenlenir ve birinci satırda yerine konular. Böylece  $z_c$ 'nin sabit bir değeri için takımın iki boyutlu modeli dönme düzleminde elde edilir. Helisel ekstrüzyonla 3-boyutlu model oluşturulur.

#### 4. EVOLVENT PARAMETRESİNİN ÖNERİLEN ÜST LİMİTİ (PROPOSED UPPER LIMIT OF INVOLUTE PARAMETER)

Literatürde verilen denklemlerde evolvent parametresinin üst sınırı imal edilen dişli çark profilini standart dişbaşı dairesinin üzerinde bir noktada sonlandırmaktadır. Fazlalık kısmın CAD programında giderilmesi gerekmektedir. Fetvacı kavrama kütasında katedilen mesafeden hareketle evolvent parametresinin üst limitini veren bir analitik ifade geliştirmiştir [11]. Beveloid dişli çarklar için alın kesitte geliştirilen ifade bu çalışmada sunulan matematik modele uyarlanmıştır.



Şekil 4. Alın Kesitte Takım ve Dişli Geometrisi (Cutter and Gear Geometry at Transverse Section)

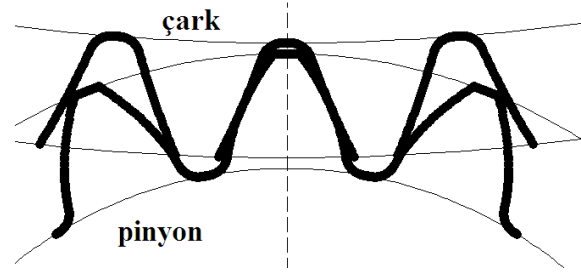
Şekil 4'de kremayer takım ile helisel dişli çarkın teması alın kesitte gösterilmektedir. Burada pozitif profil kaydırmalı imalat söz konusudur. ① kaydırılmış kremayer takımı, ② kaydırılmış takımın referans hattını, ③ imalat taksimat dairesinin teğetini, ④ dişbaşı dairesini, ⑤ imalat taksimat dairesini, ⑥ temel dairesini ve ⑦  $\overline{NT}$  kavrama doğrusunu göstermektedir. Standart yerleştirmede (profil kaydırmazlık durumu) takım referans hattı taksimat dairesine P noktasında teğettir. Dişbaşı dairesi yarıçapı  $r_t$ , temel dairesi yarıçapı  $r_b$  ve alın kavrama açısı  $\alpha_t$  dir. Temasın üst sınırı dişli çarkın baş dairesinin kavrama doğrusunu kestiği T noktasıdır. Burada  $\overline{PT}$  uzaklaşma hattının uzunluğudur ve  $\overline{PT} = -r_b \tan\alpha_t + \sqrt{r_t^2 - r_b^2}$  olarak hesaplanır. T noktasından ② numaralı hatta bir dikme indirilirse profil kaydırılmış durum için  $h_{eff}$  efektif yükseklik (evolvent parametresinin üst limiti) hesaplanır. Profil kaydırma miktarı  $e = m_n \cdot x$  olmak üzere  $h_{eff} = \overline{PT} \sin\alpha_t - e$  dir. Sonuç olarak imal edilen dişli geometrisini hesaplarken takım geometrisi için verilen  $[l_j \in -h_a / \cos\alpha_n, h_a / \cos\alpha_n]$  yerine  $[l_j \in -h_a / \cos\alpha_n, h_{eff} / \cos\alpha_n]$  ifadesi kullanılmalıdır.

#### 5. SAYISAL UYGULAMALAR (NUMERICAL EXAMPLES)

Önceki bölümlerde açıklanan matematik modeli doğrulamak üzere görselleştirilen sayısal uygulamalar aşağıda verilmiştir. Simetrik profilli dişli çark mekanizmaları için literatürde mevcut olan sayısal

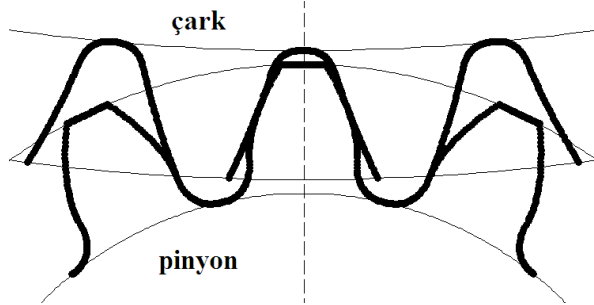
uygulamalardan faydalanılmıştır. Sonuçlar alın kesitte görselleştirilmiştir.

Şekil 5’de görselleştirilen simetrik profilli helisel dişli çark mekanizmasında normal modül  $m_n = 4mm$ , kavrama açısı  $\alpha_n = 20^\circ$ , helis açısı  $\beta = 23.5782^\circ$ , pinyon diş sayısı  $T_1 = 17$  ve çark diş sayısı  $T_2 = 81$  alınmıştır. Takım uç yuvarlatma yarıçapı  $\rho = 0.38 \cdot m_n$  dir. Bu mekanizmada pinyona  $x_1 = +0.6$  ve çarka  $x_2 = +0.3$  profil kaydırma uygulanarak eksenler arası mesafesi  $a_v = 217.287mm$  olan V- mekanizması elde edilmiştir [14].



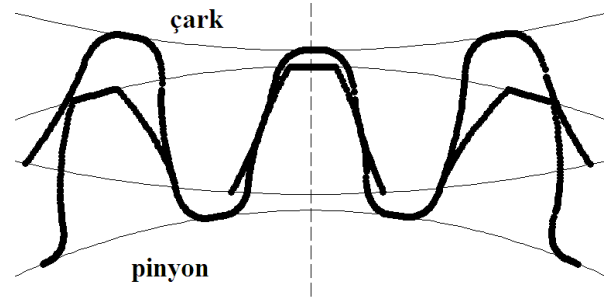
Şekil 5. Helisel Dişli V-Mekanizması (Helical Gear Mechanisms with General Nonstandard System)

Şekil 6’da görselleştirilen simetrik profilli helisel dişli çark mekanizmasında normal modül  $m_n = 8mm$ , kavrama açısı  $\alpha_n = 20^\circ$ , helis açısı  $\beta = 25^\circ$ , pinyon diş sayısı  $T_1 = 14$  ve çark diş sayısı  $T_2 = 70$  alınmıştır. Takım uç yuvarlatma yarıçapı  $\rho = 0.38 \cdot m_n$  dir. Bu mekanizmada pinyona  $x_1 = 0.0$  ve çarka  $x_2 = -0.334$  profil kaydırma uygulanarak eksenler arası mesafesi  $a_v = 368mm$  olan V- mekanizması elde edilmiştir [15].



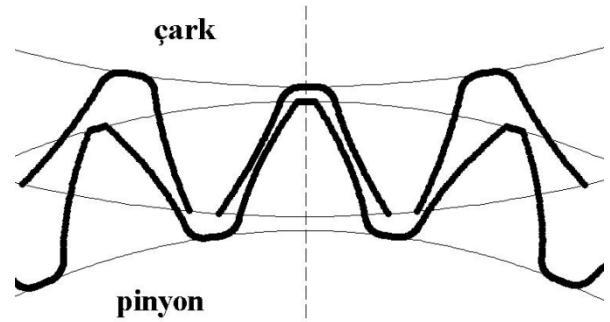
Şekil 6. Helisel Dişli V-Mekanizması (Helical Gear Mechanisms with General Nonstandard System)

Şekil 7’de görselleştirilen asimetrik profilli dişli çark mekanizmasında normal modül  $m_n = 2.5mm$ , pinyon diş sayısı  $T_1 = 24$  ve çark diş sayısı  $T_2 = 40$  alınmıştır. Sağ profilin kavrama açısı  $\alpha_{n1} = 20^\circ$  ve takım uç yuvarlatma yarıçapı  $\rho_1 = 0.38 \cdot m_n$  dir. Sol profilin kavrama açısı  $\alpha_{n2} = 15^\circ$  ve takım uç yuvarlatma yarıçapı  $\rho_2 = 0.3373 \cdot m_n$  dir.  $\alpha_n = 15^\circ$  için minimum diş sayısı  $T_{min} = 30$  olduğundan pinyonda düşük kavrama açılı kenarda alttan kesme söz konusudur. Önlemek için  $x_1 = +0.2$  profil kaydırma faktörü yeterlidir. Çarka  $x_2 = -0.2$  uygulanarak V-0 mekanizması elde edilebilir. Eksenler arası mesafe  $a_v = 80mm$  dir.



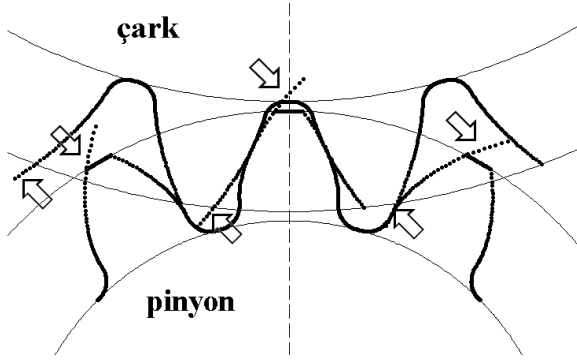
Şekil 7. Asimetrik Profilli Düz Dişli V-0 Mekanizması (Spur Gear Mechanism with Asymmetric Profile and Long-Short Addendum System)

Şekil 8’de görselleştirilen asimetrik profilli dişli çark mekanizmasında normal modül  $m_n = 2.5mm$ , pinyon diş sayısı  $T_1 = 24$  ve çark diş sayısı  $T_2 = 40$  alınmıştır. Sağ profilin kavrama açısı  $\alpha_{n1} = 20^\circ$  ve takım uç yuvarlatma yarıçapı  $\rho_1 = 0.38 \cdot m_n$  dir. Sol profilin kavrama açısı  $\alpha_{n2} = 15^\circ$  ve takım uç yuvarlatma yarıçapı  $\rho_2 = 0.3373 \cdot m_n$  dir. V-Mekanizması oluşturmak için pinyona  $x_1 = +1.0$  ve çarka  $x_2 = +1.0$  profil kaydırma uygulanmıştır. Mekanizma yan boşluklu çalışmakta ve eksenlerarası mesafe  $a_v = 85mm$  dir. Asimetrik dişlilerde yan boşluksuz V-mekanizmasında sağ ve sol profiller için farklı genişletilmiş eksenlerarası mesafe elde edildiğinden sunulan matematik model doğru cevap vermemektedir.



Şekil 8. Asimetrik Profilli Düz Dişli Yanboşluklu V-Mekanizması (Asymmetric Gear Pair with General Nonstandard System and Backlash)

Önerilen evolvent parametre limiti ile literatürdeki limit arasındaki farkı göstermek üzere hazırlanan mekanizma Şekil 9’da gösterilmiştir. Simetrik profilli helisel dişli çark mekanizmasında normal modül  $m_n = 4mm$ , kavrama açısı  $\alpha_n = 20^\circ$ , helis açısı  $\beta = 23^\circ$ , pinyon diş sayısı  $T_1 = 12$  ve çark diş sayısı  $T_2 = 24$  alınmıştır. Takım uç yuvarlatma yarıçapı  $\rho = 0.38 \cdot m_n$  dir. Bu mekanizmada pinyona  $x_1 = +0.3$  ve çarka  $x_2 = +0.4$  profil kaydırma uygulanmıştır. Okla işaretlenen kenarlarda literatürde verilen  $l_j \in -h_a/\cos\alpha_n, h_a/\cos\alpha_n$  limitler kullanılmıştır. Evolvent profil taslağın dişbaşı dairesinden ötede sonlanmaktadır. Dördüncü bölümde belirtilen hususlar çerçevesinde diğer yanaklarda ise önerilen  $l_j \in -h_a/\cos\alpha_n, h_{eff}/\cos\alpha_n$  limitler kullanılarak tam değer elde edilmektedir.



Şekil 9. Evolvent Parametre Limiti İçin Karşılaştırma (Comparison of Involute Parameter Limits)

## 6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Kremayer-tipi takımlar düz ve helisel dişlilerin imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatürde çok sayıda çalışmada kremayer takımla dişli imalatının matematik modellenmesi ve bilgisayar simülasyonu sunulmaktadır. Çalışmalarda matematik modellerden hareketle geliştirilen programlarla çeşitli dizayn parametrelerinin imal edilecek dişli geometrisi üzerindeki etkileri fiziki imalattan önce incelenmektedir. Ayrıca sonlu elemanlar yöntemi gibi sayısal yöntemlerle gerilme analizi için modeller elde edilmektedir. Güvenilir gerilme analizi için öncelikle diş profilinin doğru ifadesi gerekmektedir. Bu bakımdan çeşitli tipten dişli çarkların matematik modellenmesini konu alan çalışmalar devam etmektedir. Literatürde dişli çark matematik modelleri ile ilgili çalışmalar çoğunlukla Litvin'in Vektör Yaklaşımını esas almaktadır [13]. Bununla birlikte çalışmalarda detaylı matematik model verilmemekte, farklı referans koordinat sistemi kullanılmakta ve bölge parametrelerinin değilim aralıkları genellikle açıklanmamaktadır. Bu nedenle okuyucu bir makalede verilen denklemler ile dişli çark profilini elde eden bir programı yazmakta zorlanabilir.

Matematik modelinin tüm detaylarının verildiği bir makalenin nadir oluşu yazarı bu makaleyi hazırlamaya teşvik etmiştir. Bu çalışmada literatürde mevcut çalışmalar incelenerek ayrı ayrı bir çok makaledeki bilgiler değerlendirilip detayların verildiği bir matematik geliştirilmiştir. Pinyon ve çarkı birarada oluşturan tam matematik model sunulmuştur. Asimetrik diş profili de göz önüne alınmıştır. Dişli çarkların taban, kök ve evolvent yanaklarını oluşturan takım bölgelerinin parametrik ifadeleri için değişim aralıkları açık verilmiştir. Pinyon ve çark için profil kaydırma miktarları takımın vektör ifadesine eklenmiştir.

İmalatta standart olarak takım taksimat hattı ile taslak taksimat dairesi teğettir. Bununla birlikte çeşitli amaçlar için takım taslağa göre radyal mesafede yaklaştırılır veya uzaklaştırılır. Bu şekilde imal edilen dişliler profil kaydırmalı dişli olarak adlandırılır. Profil kaydırmalı dişli çark mekanizmaları  $x_1 + x_2 = 0$  durumunda V-0 Mekanizmaları,  $x_1 + x_2 \neq 0$  durumunda ise V-Mekanizmaları olarak adlandırılmaktadır [9]. İncelenen

makalelerde profil kaydırma modellere farklı şekillerde eklenmiş, detaylar açıklanmamıştır. Ayrıca V-Mekanizmaları ile ilgili çalışmalar nadirdir.

Sunulan bu çalışmada ise profil kaydırma takımın vektör ifadesine pinyon ve çark için ayrı ayrı eklenmiştir. (1-6) numaralı denklemler pinyonu şekillendiren bölgelere aittir. (7-12) numaralı denklemler çarkı şekillendiren bölgelere aittir. Uygulanan profil kaydırmaların pozitif yönleri Şekil 1'de belirtilmiştir. Modelde profil kaydırma faktörlerinin tüm geçerli kombinasyonları göz önüne alınmaktadır. Böylece kaydırmaz, ( $x_1 + x_2 = 0$ ) kaydırmalı ve ( $x_1 + x_2 \neq 0$ ) kaydırmalı mekanizmalar modellenebilmektedir. Bu çalışmada sunulan matematik modelin doğruluğu ve geçerliliğini test etmek üzere farklı örnekler ele alınmıştır. Şekil 5 ve Şekil 6'da simetrik profilli helisel dişli V- mekanizmaları görselleştirilmiştir. Bu mekanizmaların ilkinde genişletilmiş ve ikincisinde daraltılmış eksenlerarası mesafe söz konusudur. Şekil 7'de asimetrik profilli düz dişli çark mekanizması görselleştirilmiştir. Pinyon ve çarka eksenlerarası mesafeyi değiştirmeyecek toplam profil kaydırma uygulanmıştır. Böylelikle bir V-0 mekanizması elde edilmiştir. Şekil 5-7'de görselleştirilen mekanizmalar yanboşluksuz çalışan mekanizmalardır. Şekil 8'de görselleştirilen uygulamada ise yanboşluklu çalışan asimetrik profilli V-Mekanizması elde edilmiştir. Genişletilmiş (veya daraltılmış) eksenlerarası mesafede eşçalışmayı tanzim eden (23-24) numaralı denklemler gereği asimetrik profilin söz konusu olduğu durumlarda mekanizma sadece yanboşluklu olarak oluşturabilmektedir.

Endüstride V-Mekanizmalarının yanboşluksuz olarak çalıştırılması tercih edilmektedir. Bu durumda eksenlerarası mesafe  $a_v < a + m_n(x_1 + x_2)$  dir. Eğer mekanizma  $a_v = a + m_n(x_1 + x_2)$  olarak düzenlenirse yanboşluklu mekanizma olarak adlandırılır. Sunulan model simetrik dişlilerde her iki duruma uyumludur. Ancak asimetrik dişli durumunda denklem gereği sağ ve sol taraftaki yuvarlanma daireleri çapları farklı olduğundan yanboşluksuz çalışmada hatalı geometri vermektedir. Yanboşluksuz durumda eşçalışmayı düzenleyen denklemler aşağıda verilmektedir. Bu denklemler asimetrik dişli profiline uyarlanmamaktadır.

$$x_1 + x_2 = \frac{T_1 + T_2}{2 \tan \alpha_n} \text{ev} \alpha_{sv} + \text{ev} \alpha_s \quad (23)$$

$$a_v = \frac{m_n}{\cos \beta} \frac{T_1 + T_2}{2} \frac{\cos \alpha_s}{\cos \alpha_{sv}} \quad (24)$$

Evolvent parametresinin üst limiti imal edilen diş profilinde diş başından yukarıda bir noktayı göstermektedir. Fazlalığın giderilmesi CAD programında yapılırsa veya programa uygun bir algoritma eklenir. Yazar kavrama kütanesinden hareketle analitik bir ifade geliştirerek efektif üst limiti elde etmiştir [11]. Kremayer takımla imal edilen beveloid dişli çarklar için geliştirilen yaklaşım bu çalışmada sunulan modele uyarlanmıştır.



## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Juvinall, R.C. and Marshek, K.M., “Machine Component Design”, *John Wiley & Sons*, ISBN 9781118092262, Singapore , (2012).
- [2] Jelaska, D. T., “Gears and Gear Drives”, *John Wiley & Sons*, West Sussex, (2012).
- [3] Tsay, C.-B., “Helical gears with Involute shaped teeth: geometry, computer simulation, tooth contact analysis and stress analysis”, *ASME Journal of Mechanical Design*, 110: 482–491, (1988).
- [4] Chen, C.-F. and Tsay, C.-B., “Tooth profile design for the manufacture of helical gear sets with small numbers of teeth”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45: 1531-1541, (2005).
- [5] Yang, S.-C., “Mathematical model of a helical gear with asymmetric involute teeth and its analysis”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26: 448-456, (2005).
- [6] Liu, C.C. and Tsay, C.-B., “Tooth undercutting of beveloid gears”, *ASME Journal of Mechanical Design*, 123 : 569–576, (2001).
- [7] Brauer, J., “A general finite element model of involute gears”, *Finite Elements in Analysis and Design*, 40: 1857-1872, (2004).
- [8] Huang, K. J. and Su, H. W., “Approaches to parametric element constructions and dynamic analyses of spur/helical gears including modifications and undercutting”, *Finite Elements in Analysis and Design*, 46: 1106-1113, (2010).
- [9] Ulukan, L., “Makina Elemanları Dersleri: Tashihli Dişliler”, *İTÜ Makina Fakültesi*, İstanbul, (1970).
- [10] Bair, B. -W., “Computer aided design of non-standard elliptical gear drives”, *Imech Journal of Mechanical Engineering Science*, 216: 473-482, (2002).
- [11] Fetvaci, M. C., “Determination of effective involute parameter limit in generation simulation of gears manufactured by rack-type cutters”, *Mechanics & Industry*, 18 : 405, (2017).
- [12] Yang, S. -C., “Meshing analysis of a gear with a ring-involute gear”, *Imech Journal of Mechanical Engineering Science*, 217: 1287-1299, (2003).
- [13] Litvin, F.L., “Gear Geometry and Applied Theory”, *Prentice Hall*, New Jersey, (1994).
- [14] Kabus, K., “Decker Maschinenelemente: Funktion, Gestaltung und Berechnung”, *Carl Hanser Verlag*, München, (2016).
- [15] Şekercioğlu, T., “Makine Elemanları: Çözümlü Problemler”, *Birsan Yayınevi*, İstanbul, (2019)



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Çerçeve sistemlerin yapı zemin etkileşimli serbest titreşim analizi

## *Free vibration analysis of frame systems with soil structure interaction*

*Yazar(lar) (Author(s)): Döndü KARA<sup>1</sup>, Kanat Burak BOZDOĞAN<sup>2</sup>, Erdinç KESKİN<sup>3</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-5721-2851*

*ORCID<sup>2</sup>: 0000-0001-7528-2418*

*ORCID<sup>3</sup>: 0000-0002-8728-2906*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Kara D., Bozdoğan K. B. ve Keskin E., “Çerçeve sistemlerin yapı zemin etkileşimli serbest titreşim analizi”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1347-1355, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.598627

# Çerçeve Sistemlerin Yapı Zemin Etkileşimli Serbest Titreşim Analizi

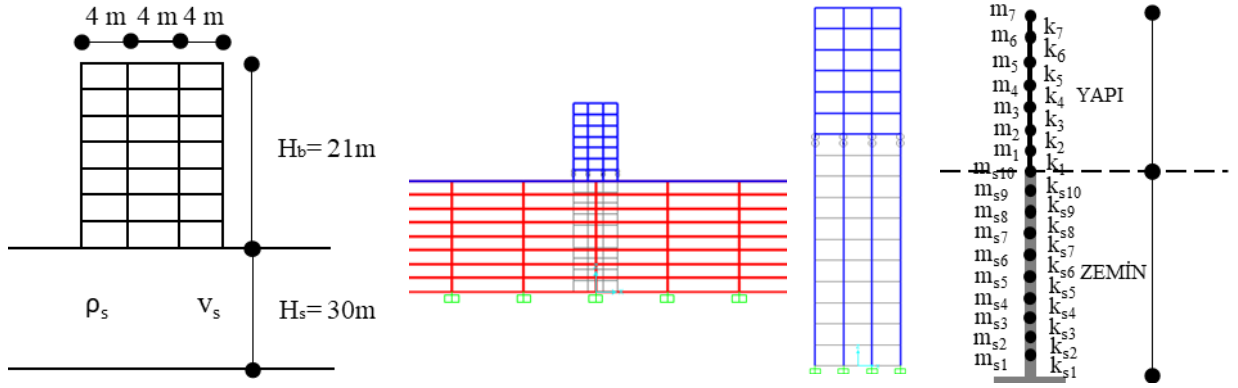
## Free Vibration Analysis of Frame Systems with Soil Structure Interaction

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Düzlem çerçevelerin yapı zemin etkileşimli periyotlarının değişimi incelenmiştir./ In this study, the change of periods of planar frames by considering the soil-structure interaction was investigated.
- ❖ Çalışmada 5 farklı zemin sınıfı ve 4 farklı model kullanılmıştır./ 5 different soil classes and 4 different models were used in the study.
- ❖ Çalışmada basitleştirilmiş yöntemlerin uygunluğu araştırılmıştır./ The suitability of simplified methods was investigated in the study.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Çalışmada basitleştirilmiş yöntemlerin yapı zemin etkileşiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır./ In the study, the usability of simplified methods in the interaction of soil-structure interaction analysis was investigated.



Şekil. Çalışmada kullanılan modeller / Figure . Models used in the study

### Amaç (Aim)

Bu çalışmada, düzlem çerçevelerin yapı zemin etkileşimi dikkate alınarak periyotlarının dört farklı model değişimi incelenmiştir./ In this study, the change of periods of planar frames by considering the soil-structure interaction is examined.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Tipik bir çerçeve sistemin serbest titreşim analizi beş farklı zemin sınıfı için dört farklı yaklaşımla yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır./ Free vibration analysis of a typical frame system was carried out with four different approaches for five different soil classes and the results were compared.

### Özgünlük (Originality)

Çalışmada özgün olarak basitleştirilmiş yöntemlerin yapı-zemin etkileşiminin serbest titreşim analizinde kullanılmasının uygunluğu araştırılmıştır. / In this study, the suitability of using simplified methods for free vibration analysis of soil-structure interaction was investigated.

### Bulgular (Findings)

Zeminin kayma kirişi olarak temsil edildiği modeller, zeminin kabuk elemanlarla temsil edildiği modelle uyumlu ve yeterince yakın sonuçlar vermiştir. / Models in which the soil is represented as a shear beam gave results that are compatible and close enough to the model in which the soil is represented by shell elements.

### Sonuç (Conclusion)

Yapı-zemin davranışının daha az parametre ile daha iyi anlaşılabilmesi açısından ve ön boyutlandırma aşamasında zeminin kayma kirişi olarak temsil edildiği modeller kullanılabilir. / Models where the soil is represented as a shear beam can be used in the preliminary stage and in order to better understand the building soil interaction behavior using fewer parameters.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Çerçeve Sistemlerin Yapı Zemin Etkileşimli Serbest Titreşim Analizi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Döndü KARA<sup>1</sup>, Kanat Burak BOZDOĞAN<sup>2\*</sup>, Erdinç KESKİN<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Kırklareli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kırklareli

<sup>2</sup>Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Çanakkale

(Geliş/Received : 30.07.2019 ; Kabul/Accepted : 16.01.2020)

## ÖZ

Bu çalışmada, düzlem çerçevelerin periyotlarındaki değişim yapı zemin etkileşimi dikkate alınarak incelenmiştir. Bu amaçla Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde yer alan zemin sınıflarını temsil eden 5 farklı zemin sınıfı dikkate alınmıştır. Çalışmada basitleştirilmiş yöntemlerin bu tür sistemlerin serbest titreşim analizinde kullanılmasının uygunluğu araştırılmıştır. Tipik bir çerçeve sistemin serbest titreşim analizi beş farklı zemin sınıfı için dört farklı yaklaşımla yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Birinci modelde SAP2000 yazılımı kullanılarak zemin kabuk elemanlarla modellenmiştir. İkinci modelde gene SAP2000 kullanılmış ancak zemin eşdeğer kolonlarla temsil edilmiştir. Üçüncü modelde ise çerçeve sistem ile zemin eşdeğer kayma kirişi yaklaşımı ile modellenmiştir. Bu modele ait yatay rijitlik matrisleri ve kütle matrisleri SCILAB paket programı yardımıyla oluşturularak periyotlar elde edilmiştir. Dördüncü model ise yapı ve zeminin yapı yüksekliği ve zemin tabakaları boyunca üniform olduğu kabulüne dayanmaktadır. Dördüncü modelde literatürde yer alan pratik bir bağıntı çalışmada ele alınan örneğe uygulanarak doğal titreşim periyotları farklı beş zemin sınıfı için elde edilmiştir. Çalışmanın sonunda elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Çerçeve sistem, yapı zemin etkileşimi, kabuk eleman, eşdeğer kolon, kayma kirişi.

# Free Vibration Analysis of Frame Systems with Soil Structure Interaction

## ABSTRACT

In this study, the change of periods of planar frames by considering the soil-structure interaction is examined. For this aim, 5 different soil classes which representing in Turkey seismic code are considered. In this study, the suitability of using simplified methods for free vibration analysis of structure-soil interaction was investigated. Free vibration analysis of a typical frame system was carried out with four different approaches for five different soil classes and the results were compared. In the first model, the soil was modeled with shell elements using SAP2000 software. In the second model, SAP2000 was used again, but the soil was represented by equivalent columns. In the third model, the frame and shell are modeled with the equivalent shear beam approach. Lateral stiffness matrices and mass matrices of this model were created by the help of SCILAB software and periods were obtained. The fourth model is based on the assumption that the structure and soil are uniform throughout the building height and soil layers. In the fourth model, a practical equation in the literature was applied to the sample and the natural vibration periods were obtained for five different soil classes. At the end of the study, the results were evaluated.

**Keywords:** Frame systems, soil-structure interaction, shell element, equivalent column, shear beam.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yapı zemin etkileşimi özellikle taşıma gücü düşük olan zeminlere oturan yüksek yapılarda oldukça önemlidir. Bu nedenle bu etkinin doğru bir şekilde analize yansıtılması gerekmektedir. Yapı ve zeminin deprem yükleri altındaki davranışının doğru olarak belirlenebilmesi için yapı ve zeminin beraber modellenmesi gerekmektedir. Bu nedenle yapı mühendisi ile geoteknik mühendisinin beraber çalışması önerilmektedir. Yapı-zemin etkileşiminde farklı çözüm yöntemleri geliştirilmiştir. Genel olarak iki farklı yaklaşım söz konusudur. Bu yaklaşımlardan ilki zemin ve yapının ayrı ayrı çözümlerle birleştirildiği alt sistem yaklaşımıdır. Bu yöntem basitliği nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapı-zemin etkileşiminde kullanılan ikinci yaklaşım ise zemin ile

yapının birlikte modellendiği direkt (doğrudan) yaklaşım yöntemidir. Direkt yaklaşım yöntemi zaman alıcı ve karmaşık işlemleri gerektirmesi bakımından çok tercih edilmese de son yapılan çalışmalar alt sistem yaklaşımının direkt yaklaşım yöntemine göre iç kuvvetler açısından farklı sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Literatürde yapı-zemin etkileşimi ile ilgili birçok çalışma yapılmış olup aşağıda bazı çalışmalar özetlenmiştir.

Wolf çalışmalarında [1-2] yapı zemin etkileşimiyle ilgili analiz yöntemlerini çeşitli açılardan sınıflandırmıştır.

Nadjai vd. [3] yüksek yapıların zemin yapı etkileşimli elastoplastik analizini ayrık kuvvet yöntemini kullanarak incelemiştir. Çalışmada taşıyıcı sistem olarak çekirdek sistem seçilmiş olup zemin-yapı etkileşimi yapı temeline yerleştirilmiş yaylar yardımı ile dikkate alınmıştır.

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : kbozdogan@comu.edu.tr

Mylonakis ve Gazetas [4] çalışmalarında yapı zemin etkileşiminin yapının deprem davranışına etkisini irdelemişlerdir. Çalışmada özellikle mevcut yönetmeliklerde yapılan basitleştirici kabullerin güvensiz tasarımlara yol açabileceği vurgulanmıştır.

Massumi ve Tabatabaiefar [5] çalışmalarında çerçeve taşıyıcı sisteme sahip yapılarda yapı zemin etkileşiminin ne zaman dikkate alınması gerektiğini belirleyen kriterler önermişlerdir. Çalışmada İran Deprem Yönetmeliği'nde yer alan zemin sınıfları temel alınmıştır. Çalışmanın sonunda İran Deprem Yönetmeliği'ne göre zemin tipi 2 ( $375 < V_s < 750$  m/s) için betonarme çerçeve yapılarda zemin yapı etkileşiminin dikkate alınması gerektiği, zemin tipi 3 ( $175 < V_s < 375$  m/s) üzerine yapılmış ve 7 kattan daha yüksek betonarme çerçeve yapılarda zemin yapı etkileşiminin mutlaka dikkate alınması gerektiği ve zemin tipi 4 ( $V_s < 175$  m/s) için 3 kattan daha yüksek betonarme çerçeve yapılarında yapı zemin etkileşiminin dikkate alınması gerektiği ifade edilmiştir.

Garcia [6] bodrumlu altı katlı bir yapının tasarım ve analizinde zemin yapı etkileşiminin etkisini incelemiştir. Çalışmada ele alınan betonarme çerçeve yapıda iki farklı durum dikkate alınmıştır. Birinci durumda yapının temel seviyesinde ankastre olduğu kabul edilerek analiz yapılmış, ikinci durumda ise zemin yapı etkileşimi dikkate alınarak analiz yapılmıştır. Çalışmada zeminin yapıya etkisi yay ve sönümleyiciler kullanılarak modellenmiştir. Çalışmanın sonunda zemin etkisi dikkate alındığında oluşacak ivme değerinin yüzde 29.6 azaldığı ifade edilmiştir.

Kausel [7] çalışmasında yapı zemin etkileşiminin tarihsel gelişimini ele alarak konu üzerinde yapılan çalışmalarını incelemiştir.

Mahmoudpour vd. [8] zemine kısmi gömülü yapıların zemin yapı etkileşimli davranışını incelemiştir. Çalışmada alt sistem yaklaşımı kullanılmış olup sonlu elemanlarla modelleme için ölçeklendirilmiş sonlu elemanlar metodu sınırsız zemin yüzeyini modellemek için kullanılmıştır.

Kraus ve Džakić [9] çalışmalarında betonarme çerçevelerde zemin yapı etkileşiminin deprem davranışına etkisini araştırmışlardır. Çalışmada üç farklı model kullanılarak karşılaştırılmıştır. Birinci modelde çerçeve temele ankastre olarak bağlanmıştır. İkinci modelde temel bağlantısı için Winkler yay modeli kullanılmıştır. Üçüncü modelde ise zemin yarı sonsuz bir uzay olarak modellenmiştir. Çalışmada kullanılan ikinci ve üçüncü modelden elde edilen periyot değerleri yakın olarak bulunmuştur. Çalışmada özellikle az katlı ve zayıf zemine oturan betonarme çerçevelerde yaygın görüşün aksine yapı zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda taban kesme kuvvetinde artış meydana gelebileceği gösterilmiştir.

Tabatabaiefar ve Fatahi [10] çalışmalarında yapı zemin etkileşimini temsil etmek üzere yeni ve geliştirilmiş bir model önermişlerdir. Önerilen model FLAC 2D yazılımı ile direkt analiz yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Çalışmanın sonunda özellikle yapı zemin etkileşiminin D

ve E zemin sınıflarında mutlaka dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Venanzi vd. [11] rüzgar etkisi altındaki yüksek yapıların zemin yapı etkileşimli davranışını incelemiştir. Çalışmada temel sisteminin modellenmesi için iki farklı yaklaşım kullanılmıştır. Birinci yaklaşımda viskoelastik davranışı temsil etmek üzere empedans fonksiyonları kullanılırken, ikinci yaklaşımda ise 6 serbestlik dereceli makro elamanlar kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan yöntemler ile bulunan yapı tabanındaki moment ve kuvvetler arasında farklılıklar olduğu görülmüştür.

Bilotta vd. [12] Napoli'de 1980 yılında yapılmış olan 100 metrelik kazık temele oturan 29 katlı bir bina örneği üzerinde yapı zemin etkileşimini incelemiştir. Çalışma sonucunda yapı zemin etkileşiminin bina periyodunu arttırdığı buna karşın sönüm oranında bir değişim olmadığı belirlenmiştir.

Tabatabaiefar ve Clifton [13] çalışmalarında çaprazlı çelik çerçevelerde zemin yapı etkileşimini incelemiştir. Çalışmada zemin yapı etkileşiminin taban kesme kuvvetinde azaltıcı etkisi olduğu buna karşın deplasman ve görel kat ötelemesi oranlarında ise arttırıcı etkisi olduğu gösterilmiştir. Artan görel kat ötelemesi oranının yapının inelastik davranışına yol açmakta olduğu da çalışma kapsamında vurgulanmıştır.

Kabtanu vd. [14] yumuşak zemine oturan çerçeve sistemlerin zemin yapı etkileşimli dinamik analizini iki farklı yaklaşım kullanarak incelemiştir. Birinci yaklaşımda yapı temelinde Winkler hipotezine uygun bir şekilde yaylar tanımlanarak dinamik analiz yapılmıştır. İkinci yaklaşımda ise zemin yarı sonsuz bir uzay olarak dikkate alınarak yapı zemin etkileşimi direkt modele uygun olarak modellenmiştir. Analiz için SAP2000 yazılımı kullanılmıştır. Çalışma sonunda yaylarla modelleme ile elde edilen sonuçların direkt modelleme ile elde edilen sonuçlarla genellikle uyumlu olduğu ifade edilmiş ancak görel kat ötelemeleri için ise özellikle üst katlarda iki model sonuçları arasında fark olduğu gözlenmiştir. Bu farkın nedeni olarak direkt yöntemde dikkate alınan yüksek modların etkisi gösterilmiştir.

Bap ve Kollar [15] zemin yapı etkileşiminde sonlu zemin tabakalarının rezonansa etkisini incelemiştir. Çalışmada çoğu zaman ihmal edilen rezonans etkisinin deprem davranışı açısından önemi vurgulanarak hangi durumlarda bu etkinin dikkate alınması gerektiği gösterilmiştir.

Peneva vd. [16] kule tipi yapıların dinamik yapı zemin etkileşimi problemini spektral elamanlar kullanarak incelemiştir. Çalışmada yapı zemin etkileşimini içeren denklemler frekans alanında yazılmış ve spektral elamanlar kullanılması durumunda bazı durumlarda bilinmeyen sayısının azaldığı ifade edilmiştir.

Anwar vd. [17] yapıların deprem davranışında zemin yapı etkileşiminin önemini incelemiştir. Bu amaçla değişik özellikteki yapılar hem alt sistem hem direkt analiz yöntemi ile çözümlenerek sonuçlar değerlendirilmiştir. Buna göre beklendiği üzere yüksek yapılarda yapı zemin etkileşiminin yapı periyoduna önemli bir etkisinin

olmadığı görülmüştür. Alt sistem yaklaşımının kat yer değiştirmeleri ve görelî kat ötelemeleri oranına az etkisi olduğu buna karşın kat kesme kuvveti, momentler ve tepe noktası ivmesine etkisinin olmadığı ifade edilmiştir. Çalışmada alt sistem yaklaşımı ile direkt yaklaşım arasında özellikle kuvvetler açısından oldukça farklı sonuçlar elde edildiği ifade edilmiştir.

Arias ve Jaramillo [18] yapı zemin etkileşimi dikkate alınan çok serbestlik dereceli sistemlerin modal spektral analizi yöntemi ile taban kesme kuvvetlerinin belirlenmesi için bir yaklaşım önermişlerdir. Çalışmada temel zeminin etkisi yay rijitlikleri ile temsil edilmiştir. Yapılan örneklerden sunulan yaklaşımın uygun sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Ülkemizde ise yapı zemin etkileşimi ile ilgili ilk çalışmalar Aydınoglu [19] ve Dumanoglu [20] tarafından yapılmış olup daha sonra bir çok çalışma yapılmıştır ;

Livaoğlu ve Doğangün [21] farklı taşıyıcı sistemli ayaklı kulelerin dinamik analizini zemin yapı etkileşimini dikkate alarak incelemişlerdir. Çalışmada sonlu elemanlar yöntemi ve mod birleştirme yöntemi kullanılmış olup yapı sıvı etkileşimi için ise Westergaard yaklaşımı kullanılmıştır.

Çağlar vd. [22] 6 farklı zemin türü üzerine oturan 5 farklı betonarme binanın deprem davranışını 1999 Marmara deprem kaydı kullanarak zaman tanım alanında analiz yöntemi ile incelemişlerdir. Çalışmada yeraltı su seviyesinin etkisi de dikkate alınmıştır.

Mısır vd. [23] yatak katsayısı kavramını inceleyerek iki parametrelî Vlasov–Leontiev yaklaşımına alternatif olan Winkler yatak katsayısı yöntemini geliştirerek örnek bir uygulama üzerinde sonuçları tartışmışlardır.

Karabörk vd. [24] izolatörlü yapılarda yapı zemin etkileşimini incelemişlerdir. Çalışmada dinamik zaman tanım alanında analiz için Yarımca istasyonundan elde edilen deprem kaydı kullanılmıştır. SAP2000 ile yapılan analizler sonucunda yer değiştirmeler ve iç kuvvetler karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda izolatörlü yapıların avantajları ortaya konulmuştur.

Geniş vd. [25] Antakya ilinde mevcut olan betonarme çerçevesel bir hastane binası ile bir okul binasının yapı zemin etkileşimli periyotlarını yerinde yaptıkları ölçümlerle iki farklı deprem kaydı için belirlemişler ve sonuç olarak yapı zemin etkileşiminin periyotlara olan etkisini incelemişlerdir.

Siyahi vd. [26] yapı zemin etkileşimi analizinde mevcut durumu ortaya koyarak geoteknik açıdan yapı zemin etkileşimini incelemişlerdir. Ayrıca çalışmada kinematik ve eylemsizlik etkileşimleri özellikle kazıklara olan etkisi bakımından ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Derdiman [27] 7 farklı zemine oturan 5, 10 ve 15 katlı betonarme çerçevesel yapıları zemin yapı etkileşimini dikkate alarak sonlu elemanlar yöntemi ile analiz etmiştir. Analiz sonucunda yapı periyotlarındaki değişim incelenmiştir.

Çaycı ve İnel [28] çalışmalarında 1975 ve 1998 deprem yönetmeliklerine göre tasarlanmış üç boyutlu 7 katlı ve

iki farklı betonarme taşıyıcı sisteme sahip yapıların ankastre mesnet ve zemin etkisi dikkate alınarak analizlerini zaman tanım alanında doğrusal olmayan yöntem ile gerçekleştirerek sonuçları karşılaştırmışlardır. Çalışmada alt sistem yaklaşımı kullanılmıştır.

Garip [29] çalışmasında yumuşak kat düzensizliğine sahip yapıların zemin yapı etkileşimli davranışlarını incelemiştir. Çalışmada SAP2000 programını kullanarak ankastre mesnet ve yapı zemin etkileşimi durumlarına ait yer değiştirmeler ve kuvvetler karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak özellikle yumuşak kat düzensizliğine sahip yapılarda yapı zemin etkileşiminin analizlerde dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Çetinkaya vd. [30] temel empedans fonksiyonlarını kullanarak Adapazarı'nda bulunan bir köprü ayağındaki deprem davranışını zemin sönümü açısından incelemişlerdir. Çalışmada sonuç olarak yapı zemin etkileşiminin özellikle düşük periyotlara sahip yapılar için önemli olduğu ifade edilmiştir.

Kılıçer ve Özgan [31] 1999 Kocaeli deprem kaydını kullanarak 12 katlı bir yapı örneğini rijit temel, Winkler ve geliştirilmiş Vlasov modelleriyle analiz ederek sonuçları karşılaştırmışlardır. Çalışmada SAP2000 ile MATLAB programları beraber kullanılmıştır.

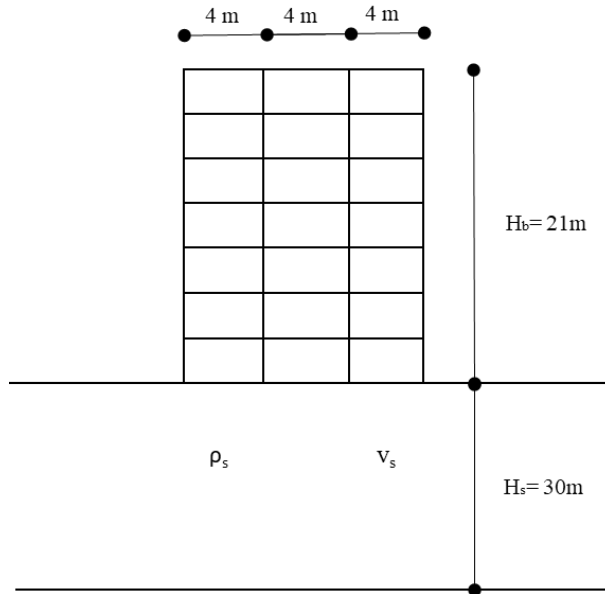
Avcı ve Yazgan [32] “Doğrusal olmayan Winkler-zeminine oturan giriş” modelini kullanarak yapıların performansını zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemi ile incelemişlerdir.

Bu çalışmada ise düzlem çerçevelerin yapı zemin etkileşimli serbest titreşim analizi dört farklı model kullanılarak incelenmiştir. Modellerin ilk ikisi SAP2000 kullanılarak gerçekleştirilirken diğer iki modelin uygulanmasında SCILAB ve MATLAB programlarından yararlanılmıştır. Modellemelerde zemin ve yapının malzeme bakımından doğrusal elastik davranış gösterdiği, yer değiştirmelerin yeterince küçük ve dolayısıyla geometrik nonlineer etkilerin terk edilebileceği kabul edilmiş olup yapı ve zemindeki sönümde ihmal edilmiştir.

## 2. SEÇİLEN DÜZLEM ÇERÇEVE ÖRNEĞİNİN ÖZELLİKLERİ (PROPERTIES OF THE SELECTED PLANE FRAME EXAMPLE)

Çalışmada Şekil 1’de görülen 7 katlı ve 3 açıklıklı düzlem çerçeve örneği kullanılmıştır. Verilen düzlem çerçevede C30/37 betonu kullanıldığı kabul edilmiş olup kat yükseklikleri 3’er metre olarak alınmıştır. Kolonlar 35 cm/70 cm, kirişler ise 30 cm/60 cm boyutlarında alınmış olup hesaplarda brüt kesit atalet momenti kullanılmıştır. Kat kütleleri 7. Katta 45 ton diğer katlarda ise 60 ton olarak hesaplarda dikkate alınmıştır. Çerçevenin oturmuş olduğu zemin tabakasının kalınlığı 30 m olarak seçilmiş olup Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği’nde [33] yer alan 5 farklı zemin sınıfı dikkate alınarak çözümlenmeler gerçekleştirilmiştir.





**Şekil 1.** Zemin yapı etkileşimi için dikkate alınan düzlem çerçeve örneği (Plane frame example considered for soil structure interaction)

Çizelge 1’de dikkate alınan zemin sınıfları için seçilen kayma dalgası hızları, poisson oranı ve birim hacim ağırlıkları verilmiştir. Verilen zemin özelliklerinin belirlenmesi Tezcan ve Durgunoğlu’nun çalışması kaynak alınarak yapılmıştır. [34]

Çalışmada zeminin doğrusal davrandığı kabul edildiğinden analizlerde Çizelge 1’de verilen değerler dikkate alınmıştır.

**Çizelge 1.** Dikkate alınan zemin sınıflarının özellikleri (Characteristics of the soil)

zemin sınıfı	Kayma hızı (m/sn)	Poisson oranı	Birim hacim ağırlığı (kN/m <sup>3</sup> )
ZA	2000	0.30	21
ZB	1200	0.28	20
ZC	560	0.41	19
ZD	300	0.42	18
ZE	150	0.48	17

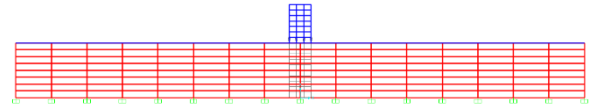
### 3. SEÇİLEN ZEMİN YAPI ETKİLEŞİMİ İÇİN KULLANILAN MODELLER (MODELS USED FOR SOIL STRUCTURE INTERACTION)

Çalışma kapsamında zeminin modellenmesinde 4 farklı model kullanılmıştır. Bu modeller aşağıda kısaca özetlenmiştir.

#### 3.1. Birinci Model (Model First)

Şekil 2’de gösterilen bu modelde zemin kabuk elemanlarla modellenmiştir. Modellemede zemin için toplam 128 tane kabuk eleman kullanılmıştır. Kabuk elemanların kalınlığı 0.00321 m olarak dikkate alınmıştır. Zemin tabanındaki kabuk elemanlar ankastre olarak mesnetlenmiştir. Bu modelde zeminin sınırları

büyük önem arz etmektedir. Literatürde kabul edilen bazı yaklaşımlarda zemin sınırlarının yapının her iki tarafına doğru yapı genişliğinin 3-4 katı kadar uzatılması önerilmektedir. Bu çalışma kapsamında önerilen bu değerlerin yeterli olmadığı görülerek bu değer 10 kat olarak dikkate alınmıştır. Modelde yapı ile zeminin beraber çalışmasını sağlamak üzere yapının altına rijitliği büyük olan bir bağlantı elemanı tanımlanmıştır. Çalışma kapsamında bu model kullanılarak yapılan analizler SAP2000 yazılımı [35] yardımıyla gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 2.** Model 1’ in SAP2000 görüntüsü (SAP2000 view of model 1)

Zemin tabakalarının hakim periyotları da SAP2000 yazılımı yardımıyla bulunmuştur. Bulunan sonuçlar literatürden [36, 37] bilinen (1) denklemi ile hesaplanarak Çizelge 2’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

$$T_s = \frac{4H_s}{v_s} \quad (1)$$

- (1) denklemindeki  $H_s$  zemin tabakası kalınlığını,  $v_s$  ise kayma dalgası hızını göstermekte olup (2) denklemi ile hesaplanabilir.

$$v_s = \sqrt{\frac{G_s}{\rho_s}} \quad (2)$$

Çizelge 2 ‘den görüldüğü üzere SAP2000 ile elde edilen sonuçlar ile denklem (1)’den elde edilen sonuçların birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

**Çizelge 2.** Dikkate Zemin hakim periyotlarının karşılaştırılması

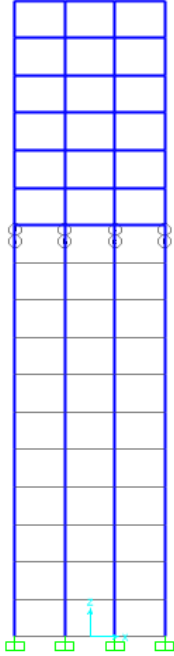
(Comparison of soil fundamental periods)

zemin sınıfı	SAP2000	(1) Nolu denklem
ZA	0.06 sn	0.06 sn
ZB	0.11 sn	0.10 sn
ZC	0.22 sn	0.21 sn
ZD	0.42 sn	0.40 sn
ZE	0.80 sn	0.80 sn

#### 3.2. İkinci Model (Second Model)

Bu modelde Şekil 3’te görüldüğü gibi zemin eşdeğer kolonlar olarak temsil edilmiştir. Bunun için çerçevenin kolonları zemin derinliği kadar uzatılmıştır. Eşdeğer

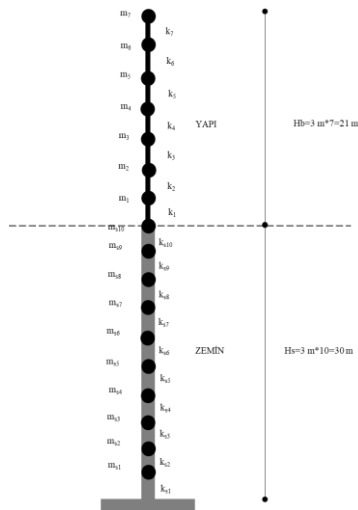
kolonların kayma modülü zeminin kayma modülü olarak tanımlanırken kayma alanı zemini temsil eden kolon sayısı  $n$  olmak üzere  $1/n$  olarak dikkate alınmıştır. Bu modelleme ile analiz SAP2000 programı [35] yardımıyla yapılmıştır.



Şekil 3. Model 2'ye ait SAP2000 görüntüsü (Model 2)

### 3.3. Üçüncü Model (Third Model)

Bu modelde çerçeve üstyapı ve zemin eşdeğer kayma kirişi olarak Şekil 4'te gösterildiği gibi modellenmiştir.



Şekil 4. Zemin yapı etkileşimi için kayma kirişi modeli (Shear beam model for soil structure interaction)

Eşdeğer kayma kirişinde çerçeve sistemde birinci kat için kayma rijitliği Taranath [38] tarafından önerilen aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır.

$$k_1 = \frac{8}{h_1^2 \left( \frac{1}{5r_1} + \frac{1}{s_1} \right)} \quad (3)$$

Burada sırasıyla  $r_1$  ve  $s_1$  sırasıyla birinci katta kiriş ve kolonların redörlerinin toplamını göstermekte olup bu değerler aşağıdaki bağıntılarla hesaplanmıştır.

$$r_1 = \sum_{j=1}^m \frac{EI_{bj}}{I_j} \quad (4)$$

$$s_1 = \sum_{j=1}^n \frac{EI_{cj}}{h_1} \quad (5)$$

Burada  $m$  kattaki toplam kiriş sayısını  $I_{bj}$ ,  $j$ . kiriş atalet momentini,  $I_j$   $j$ . kiriş açıklığını göstermektedir.  $n$  kattaki toplam kolon sayısını  $I_{cj}$   $j$ . kolon atalet momentini  $h_1$  ise kolonun birinci kat yüksekliğini göstermektedir. Çerçevenin diğer katlarındaki kayma rijitliği ise kiriş ve kolonlarda moment sıfır noktalarının ortada olduğu kabulüyle aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır [39,40,41].

$$k_i = \frac{12}{h_1^2 \left( \frac{1}{r_i} + \frac{1}{s_i} \right)} \quad i=2...n \quad (6)$$

Burada sırasıyla  $r_i$  ve  $s_i$  sırasıyla  $i$ . kattaki kiriş ve kolonların redörleri toplamını göstermekte olup aşağıdaki bağıntılarla hesaplanmıştır.

$$r_i = \sum_{j=1}^m \frac{EI_{bj}}{I_j} \quad (7)$$

$$s_i = \sum_{j=1}^n \frac{EI_{cj}}{h_i} \quad (8)$$

Zemin ortamı ise 3'er metrelik eşit kayma kirişleri ile temsil edilmiş olup kayma rijitliği ise aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$k_{si} = \frac{G_s A_s}{h_s} \quad (9)$$

Burada sırasıyla  $G_s$  ve  $A_s$  zemin ortamının kayma modülünü ve eşdeğer alanını göstermektedir.  $h_s$  zemin ortamının kalınlığını göstermekte olup bu çalışmada 3 m olarak dikkate alınmıştır. Zeminin kütlesi ise kayma kirişi modelinde ayrı olarak dikkate alınmış olup aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$m_{si} = \rho_s A_s h_s \quad (10)$$

Burada  $\rho_s$  zeminin birim hacim kütlelerini göstermektedir.

Yukarıdaki bağıntılar yardımıyla hesaplanmış olan  $k_i$  ve  $k_{si}$  değerleri Çizelge 3 'te verilmiştir.

**Çizelge 3.** Dikkate Yatay rijitlik değerleri (Lateral stiffness values)

zemin sınıfı	ks1=ks2=...=ks10 (kN/m)	k <sub>1</sub> (kN/m)	k <sub>2</sub> =k <sub>3</sub> =...=k <sub>7</sub> (kN/m)
ZA	2854230.38	228684.86	132540.75
ZB	978593.27		
ZC	202460.08		
ZD	55045.87		
ZE	2854230.38		

İlgili yatay rijitlikler hesaplandıktan sonra sistem yatay rijitlik matrisi (**K**) ve sistem kütle matrisi (**M**) kayma kirişi algoritması ile kolayca yazılabilir.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{s1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & m_7 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{s1}+k_{s2} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & k_7 \end{bmatrix} \quad (12)$$

**Çizelge 4.** Yapı zemin etkileşimine bağlı olarak periyottaki değişim (Change in the period depending on the soil-structure interaction)

Ankastre durumunda mesnet periyodu	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0
ZE	3.61	3.69	4.02	4.54	5.21	5.99	6.40	6.83	7.27	7.71	8.17	8.63	9.09	9.0	9.5	10
ZD	1.80	1.97	2.58	3.0	4.0	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10
ZC	1.02	1.31	2.16	3.11	4.0	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10
ZB	0.64	1.07	2.03	3.02	4.0	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10
ZA	0.55	1.02	2.01	3.01	4.01	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10

Daha sonra **K** ve **M** matrisleri kullanılarak aşağıdaki frekans denklemi yardımıyla açısal frekans ve modlar bulunur.

$$[\mathbf{K}-\omega^2\mathbf{M}]\{\phi\} = \{0\} \quad (13)$$

Bu çalışmada **K**, **M** matrisleri ve frekans denklemi SCILAB yardımıyla [42] oluşturularak periyotlar hesaplanmıştır.

### 3.4. Dördüncü Model (Fourth Model)

Bu modelde periyotlar Kiefer ve Leger [43] tarafından önerilen yaklaşım kullanılarak hesaplanmıştır. Bu yaklaşımda hem yapı hem zemin ortamı sürekli üniform bir kayma kirişi olarak modellenmiş olup aşağıdaki transandantal (aşkın) denklemin çözümü ile yapı zemin etkileşimine ait periyot değerleri hesaplanmıştır.

$$\frac{v_s \rho_s A_s}{v_b \rho_b A_b} \tan\left(\frac{\omega}{v_s} H_s\right) \tan\left(\frac{\omega}{v_b} H_b\right) - 1 = 0 \quad (14)$$

Burada  $v_s$  zeminin ortalama kayma hızını,  $H_s$  zeminin kalınlığını,  $H_b$  bina yüksekliğini,  $\rho_b A_b$  yapının yayılı kütlelerini,  $\omega$  açısal frekansı göstermektedir.  $v_b$  yapının

eşdeğer kayma hızını göstermekte olup yaklaşık olarak aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanabilir.

$$v_b = \frac{4H_b}{T_{1b}} \quad (15)$$

Burada  $T_{1b}$  yapının hakim periyodunu göstermektedir.

Sunulan çalışmada zemin yapı etkileşimli çerçevenin periyotlarının bulunması için (15) nolu transandantal (aşkın) denklemi çözülmüştür. Çözüm için MATLAB programından [44] yararlanılmıştır. Aşkın denklemin çözümünden elde edilen kökler arasında salt üstyapı ve salt zemine ait değerler de elde edilmektedir. Çözüm için bu değerler elimine edilmiştir. Çalışma kapsamında ayrıca 5 farklı zemin sınıfını temsil eden zemin hakim periyotları dikkate alınarak zemin yapı etkileşimi dikkate alınması durumunda yapı periyodundaki değişim (15) nolu bağıntı yardımıyla hesaplanarak Çizelge 4'te verilmiştir. Bu model yapı ve zemin özelliklerinin yapı yüksekliği ve zemin tabakaları boyunca üniform olduğu kabulüne dayanmaktadır.

Çizelge 4'ten görüldüğü üzere periyot değerlerinin uzun olduğu yüksek yapılarda yapı-zemin etkileşiminin periyotlara etkisi olmamaktadır. Özellikle yapı periyodu

6 saniyeden uzun olan yapılarda yapı zemin etkileşiminin periyoda etkisi olmadığı açık olarak görülmektedir.

Bu çalışmada zeminin ve yapının doğrusal elastik davranış gösterdiği kabul edilmiştir. Zemin şiddetli depremlerde doğrusal olmayan davranış gösterecek olup artan kayma birim deformasyonları ile kayma modüllerinde azalma buna karşın sönüm oranında ise artış meydana gelecektir. Azalan kayma modülü ile birlikte kayma dalgası hızları da azalacaktır. Bu azalmaya bağlı olarak yapı periyodunun önemli oranda uzayacağı açıktır. Yapı periyodunun uzaması ile birlikte ise yapıya gelecek olan ivmeler önemli oranda azalacaktır. Literatürdeki çalışmalarda [7,13,14,27] ve bu çalışmada ise periyotların hesabında zeminin elastik davranışı esas alınmıştır. Zeminin elastik davranış gösterdiği kabulüyle bulunan deprem kuvvetleri daha büyük olarak alınmakta ve olabilecek en elverişsiz durum dikkate alınmaktadır.

Ruiz ve Saragoni çalışmalarında [45] şiddetli depremlerde zemin serbest titreşim davranışını incelemişler ve yerinde yapmış oldukları ölçüm sonucunda bulmuş oldukları zemin hakim periyodunun

zeminin elastik davranışını dikkate alarak hesaplanan değerle uyumlu olduğunu tespit etmişlerdir.

#### 4. BULGULAR (RESULTS)

Şekil 1’de verilen düzlem çerçeve sistemin serbest titreşim analizi 5 farklı zemin sınıfı için yapılmış ve sonuçlar toplu halde Çizelge 5’te sunulmuştur.

Çizelgeden görüldüğü üzere çalışma kapsamında kullanılan dört modelden elde edilen sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu gözlenmektedir. Zeminin kabuk elemanla modellenmesi durumu için periyotların ilk dört mod için değişimi Şekil 5’te verilmiştir.

Çizelge 5 ve Şekil 5’ten görüldüğü üzere en büyük değişim birinci modda meydana gelmektedir.

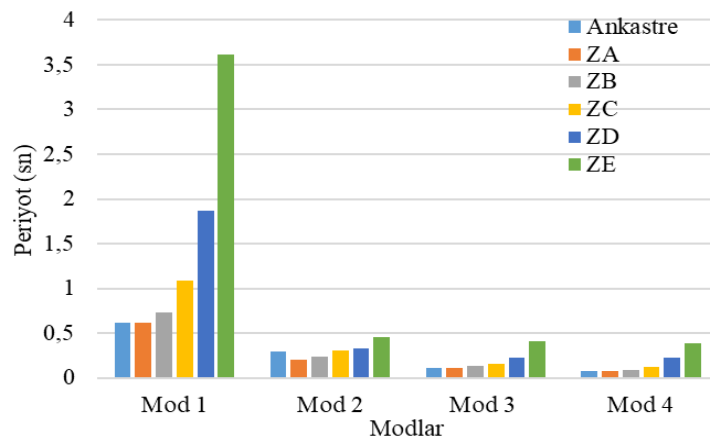
#### 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışma kapsamında yapı zemin etkileşiminin incelenmesi için düzlem çerçeve sistemlerin yapı zemin etkileşimli dinamik analizi yapılmıştır. Çalışmada zemin yapı etkileşimi için yapı ve zeminin birlikte modellendiği direkt (doğrudan) yöntem kullanılmıştır. Direkt yaklaşım için ise 4 farklı model kullanılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Yapılan karşılaştırma sonucunda zeminin kayma kirişi olarak temsil edildiği modellerin, yapı ve zemin davranışını gerçeğe en yakın olarak temsil eden zeminin kabuk elemanlarla temsil edildiği modellerle uyumlu ve yeterince yakın sonuçlar verdiği değerlendirilmiştir. Bu sonuçların ışığı altında özellikle yapı zemin davranışının

Çizelge 5. Beş farklı zemin sınıfı için periyotlar (Periods for 5 different soil classes)

	Periyotlar (sn)				
	Mod	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
ZA Zemin sınıfı	1	0.62	0.62	0.62	0.62
	2	0.20	0.19	0.21	0.21
	3	0.11	0.11	0.13	0.19
	4	0.08	0.08	0.10	0.09
ZB Zemin sınıfı	1	0.73	0.72	0.70	0.69
	2	0.24	0.24	0.23	0.23
	3	0.13	0.13	0.14	0.19
	4	0.09	0.09	0.10	0.14
ZC Zemin sınıfı	1	1.09	1.05	1.06	1.05
	2	0.30	0.29	0.28	0.28
	3	0.15	0.14	0.16	0.19
	4	0.12	0.11	0.12	0.15
ZD Zemin sınıfı	1	1.87	1.83	1.83	1.82
	2	0.33	0.32	0.30	0.30
	3	0.22	0.20	0.20	0.19
	4	0.22	0.14	0.15	0.14
ZE Zemin sınıfı	1	3.61	3.53	3.63	3.62
	2	0.46	0.40	0.41	0.41
	3	0.41	0.30	0.29	0.29
	4	0.39	0.19	0.20	0.27



Şekil 5. Zeminin kabuk elemanla modellenmesinde beş farklı zemin ve ankastre mesnetlenme durumları için periyotun değişimi ( Change of the period for five different soil condition and fixed support conditions in the modeling of the soil with the shell element)

daha az parametre ile daha iyi anlaşılabilmesi açısından ve ön boyutlandırma aşamasında zeminin kayma kirişi olarak temsil edildiği modellerin kullanılabileceği görülmektedir.

Ayrıca zeminin kabuk elemanlarla temsil edildiği modelde özellikle zemin sınırlarının doğru olarak belirlenmesinin önemli olduğu çalışmada görülmüştür. Zemin sınırının yetersiz seçilmesi durumunda sonuçların gerçeğe uzak olduğu gözlenmiştir.

Bu çalışma zemin ve yapı davranışının doğrusal olduğu kabulüne dayanmakta ve elde edilen sonuçlar bu kabulle sınırlıdır. Yapı zemin davranışının daha gerçekçi olarak belirlenmesi için hem yapının hem zeminin doğrusal olmayan davranışı dikkate alınmalıdır.

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Wolf, J.P. ,” *Dynamic soil-structure interaction*”, Prentice Hall, (1987).
- [2] Wolf, P. J., “Classification of analysis methods for dynamic soil-structure interaction, *Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering & Soil Dynamics* ,Missouri University of Science and Technology Scholars' Mine ,1821-1832,(1991).
- [3] Nadjai, A., Johnson, D.and Lyness, F. J., “Soil–structure interaction in tall buildings by a discrete force method”, *Proc. Instn Civ. Engrs Structs & Bldgs*, 134(1): 9-18, (1999).
- [4] Mylonakis G. and Gazetas, G.,“Seismic soil structure interaction: beneficial or detrimental”, *Journal Of Earthquake Engineering*, 4( 3): 277-301.(2000).
- [5] Massumi, A. and Tabatabaiefar, H.R., “A Criterion for considering soil-structure interaction effects in seismic design of ductile rc-mrfs according to Iranian codes” , *The 14 th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China,(2008).
- [6] García, A. J., “Soil structure interaction in the analysis and seismic design of reinforced concrete frame buildings”, *The 14 th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China ,(2008).
- [7] Kausel, E., “ Early history of soil-structure interaction”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*,30:822-832,(2010).
- [8] Mahmoudpour, S., Attarnejad, R.and Behnia, C., “Dynamic analysis of partially embedded structures considering soil-structure interaction in time domain”, *Mathematical Problems in Engineering*, (2011).
- [9] Kraus, I. and Džakić, D., “Soil-structure interaction effects on seismic behaviour of reinforced concrete frames” *5.SE-EEE Conference*,Croatia.(2013).
- [10] Tabatabaiefar, R.H. and Fatahi B,“Idealisation of Soil–structure system to determine inelastic seismic response of mid-rise building frames”,*Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 66: 339–351, (2014).
- [11] Venanzi, I., Salciarini D. and Tamagnini C.,”The effect of soil-foundation-structure interaction on the wind-induced response of tall buildings, *Engineering Structures* ,79: 117-130,(2014).
- [12] Bilotta, E., Sanctis D. L., Laora D. R., D’onofrio, A. and Silvestri, F., “Importance of seismic site response and soil–structure interaction in dynamic behaviour of a tall *Geotechnique*,65(5):391–400, (2015).
- [13] Tabatabaiefar, R.H. and Clifton, T., “Significance of considering Soil-Structure interaction Effects On seismic design of unbraced building frames resting on soft soils”, *Australian Geomechanics*,51(1),(2016).
- [14] Kabtamu, G.H., Peng, G. and Denghong, C., “Dynamic analysis of soil structure interaction effect on multi story rc frame”, *Open Journal of Civil Engineering*, 8: 426-446, (2018).
- [15] Bap B. Z.and Kollár P.L,”Effect Of Resonance in Soil-Structure Interaction For Finite Soil Layers”, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62(3):738-747,(2018) .
- [16] Penava, D., Ivan Kraus, I., Petronjević, M. and Schmid, G., “Dynamic Soil-Structure Analysis Of Tower-Like Structures Using Spectral Elements”,*Grdevinar* ,25(3):(2018).
- [17] Anwar, N., Uthayakumar, A. and Najam F. A., “Significance Soil-Structure Interaction in Seismic Response of Buildings”, *Ned University Journal Of Research-Special Issue On First South Asia Conference On Earthquake Engineering (Sacee'19)*,(2019).
- [18] Arias,H. and Jaramillo,J.D.,”Base Shear Determination Using Response-Spectrum Modal Analysis of Multi-Degree-of-Freedom Systems with Soil–Structure Interaction”, *Bulletin of Earthquake Engineering*,17(4),3801-3814:(2019).
- [19] Aydınoğlu,N.” *Üstyapı-Zemin Ortak Sisteminin Deprem Hesabı*”,Doktora tezi,İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,(1977).
- [20] Dumanoğlu,A, “Yansıtmayan sınırların yapı zemin dinamik etkileşim problemlerine uygulamasında hata analizleri”, *Deprem Araştırma Enstitüsü Bülteni*, 6(21): 1-16,(1978).
- [21] Livaoglu R. and Doğangün A., “Farklı taşıyıcı sisteme sahip ayaklı depoların zemin sınıflarına göre dinamik davranışlarının irdelenmesi”, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7(3): 70-77,(2003).
- [22] Çağlar, N., Garip, Z., Ş. and Yaman, Z., D., “Deprem etkisindeki betonarme yapılarda yapı-zemin etkileşimi”, *Deprem Sempozyumu* ,Kocaeli,1089-1096: (2005).
- [23] Mısıır, İ., S., Özden, G. and Kahraman, S., “Temel-zemin yaylarının alansal etkileşimi ve yapı davranışına etkisi”, *Deprem Sempozyumu* ,Kocaeli,1064-1073: (2005).
- [24] Karabörk, T., Deneme, Ö., İ. and Bilgehan, R., P., “Temeli izole edilen yapılarda dinamik yapı-zemin etkileşimi”, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 26(1): 77-87,(2010).
- [25] Geneş, M. C., Doğanay, E., Bikçe and M., Kaçın, S., (2011) “Soil-structure interaction in rc frame buildings from strong-motion recordings”, *KSU Mühendislik Dergisi*, 14(1),(2011).

- [26] Siyahi, B., Çetin, K. O. and Bilge H. T., "Geoteknik deprem mühendisliği açısından zemin - temel - yapı etkileşimine kritik bakış", *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 484:41-50, (2013).
- [27] Derdiman, M., K., "Farklı özelliklere sahip zeminlerin betonarme yüksek yapılarda yapı salınım periyoduna etkisi", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13: 9-15,(2013).
- [28] Çaycı, B., T. and İnel, M., "Mevcut betonarme binalarda zemin yapı etkileşiminin sismik davranış üzerindeki etkileri", *3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, İzmir, (2015).
- [29] Garip, Z., Ş., "Yumuşak kat düzensizliği olan betonarme binalarda yapı zemin etkileşimi", *5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, Bakü ,1036-1045,(2017).
- [30] Çetinkaya, M. Y., Çelebi, E. and Kırtel, O., "Yapı-temel-zemin sismik etkileşim probleminin Adapazarı bölgesi için empedans fonksiyonları yardımıyla analizi", *Politeknik Dergisi*, 20 (2): 325-332,(2017).
- [31] Kılıçer, S. and Özgan, K., "Deprem yükü etkisindeki betonarme yapıların tasarımında yapı-zemin etkileşiminin incelenmesi", *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 4(1): 1-10,(2018).
- [32] Avcı, Y. and Yazgan, U., "Zemin-yapı etkileşimli sistemlerde en büyük doğrusal olmayan yer değiştirme oranı", *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(3):1527-1537,(2019).
- [33] TBDY 2018, "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği", AFAD, (2018).
- [34] Tezcan, S. and Durgunoğlu, T., "Jeofizik etütlerin zemin büyütme analizindeki önemi ve örnekler", *Jeofizik*, 14:43-60, (2000).
- [35] SAP2000, "Evaluation Version", *Computers and Structures*, (2018).
- [36] Das, B., "Principles of Soil Dynamics", PWS-Kent Pub. Co, (1993).
- [37] Özkan M.Y., "Zemin Dinamiğine Giriş", Nobel Akademik Yayıncılık, (2017).
- [38] Taranath B.S., "Reinforced Concrete Design of Tall Buildings", CRC Press, (2009).
- [39] Murashev, V., Sigalov, E., and Baikov, V. N., "Design of Reinforced Concrete Structures", Mir Publishers, (1976).
- [40] Bilyap, S., "Betonarme Yüksek Yapılarda Perde Çerçeve Sistemlerinin Yatay Kuvvetlere Göre Hesabı", Ege Üniversitesi Matbaası, (1979).
- [41] Ertutar, Y., "Betonarme Yüksek Yapılarda Yatay Yük Etkisi", Dokuz Eylül Üniversitesi Yayınları, (1995).
- [42] SCILAB, Open Sources Software for Numerical Computations, <https://www.scilab.org/fr>.
- [43] Kiefer, A. and Leger, P., "Semi-continuum seismic analysis of soil-building systems", *Engineering Structures*, 21:332-340,(1999).
- [44] The MathWorks Inc. MATLAB 7.0 (R14SP2). The MathWorks Inc., (2005).
- [45] Ruiz, S. and Saragoni, G.R., "Free vibration of soils during large earthquakes", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29:1-16,(2009).





POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Nitrokarbürizasyon sonrası oksidasyon işlemlerinin AISI 4140 çeliğinin tribolojik özelliklerine etkisi

## *The effect of oxidation process after nitrocarburation on tribological properties of AISI 4140 steel*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Yavuz KAPLAN<sup>1</sup>, Abdalbaki YILDIRIM<sup>2</sup>, Sinan AKSÖZ<sup>3</sup>

*ORCID<sup>1</sup>:* 0000-0002-3144-9332

*ORCID<sup>2</sup>:* 0000-0002-1913-6616

*ORCID<sup>3</sup>:* 0000-0003-4324-5043

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Kaplan Y., Yıldırım A. ve Aksöz S., "Nitrokarbürizasyon sonrası oksidasyon işlemlerinin AISI 4140 çeliğinin tribolojik özelliklerine etkisi", *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1357-1362, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.585031

# Nitrokarbürizasyon Sonrası Oksidasyon İşlemlerinin AISI 4140 Çeliğinin Tribolojik Özelliklerine Etkisi

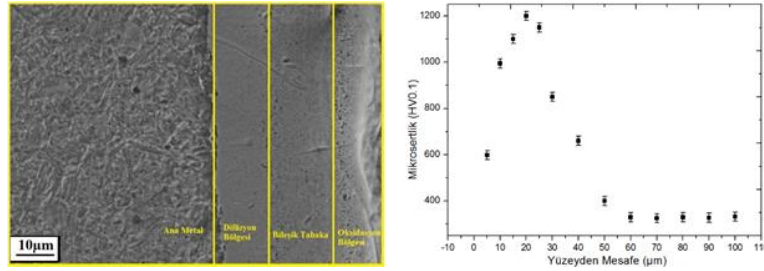
## The Effect of Oxidation Process After Nitrocarburization on Tribological Properties of AISI 4140 Steel

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ NK+O işlemi ile malzemenin en dış yüzeyinde yaklaşık  $10\mu\text{m}$  kalınlığında, 600HV sertliğinde demir oksit tabakası elde edilmiştir. / NK + O process provides an iron oxide layer approximately  $10\mu\text{m}$  thickness and 600HV hardness on the outer surface of the material.
- ❖ Oksit tabakasının hemen altında demir nitrür ve demir karbürler içeren yaklaşık  $10\mu\text{m}$  kalınlığında, 1200HV sertliğinde bileşik tabaka elde edilmiştir. / Composite layer containing iron nitride and iron carbides was obtained under the oxide layer approximately  $10\mu\text{m}$  thick and 1200HV hardness.
- ❖ Ana metal ile bileşik tabaka arasında ise karbürce zengin  $50\mu\text{m}$ 'ye kadar uzanan sertliği ana metalden daha yüksek difüzyon bölgesi oluşmuştur. / A carbide rich diffusion zone between the base metal and the composite layer was formed with higher hardness than the base metal up to  $50\mu\text{m}$ .

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada, karbon ve azot atomlarının eşzamanlı difüzyonu temeline dayanan nitrokarbürizasyon sonrası oksidasyon işlemlerinin AISI 4140 çeliğinin mikroyapı, mikrosertlik ve tribolojik özelliklerine etkileri incelenmiştir. / In this study, microstructure, microhardness and tribological properties were investigated after nitrocarburisation process (on the AISI 4140 steel) which was the oxidation processes based on simultaneous diffusion of carbon and nitrogen atoms.



Şekil. Tabakalar ve mikrosertlik değerleri / Figure. Layers and microhardness values

### Amaç (Aim)

Nitrokarbürizasyon sonrası oksidasyon işleminin mikroyapı, mikrosertlik ve tribolojik davranışına etkileri. / The effect of oxidation process after nitrocarburization on microstructure, microhardness and tribological behavior.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

İlk olarak ıslah edilen numunelere sırasıyla; nitrokarbürizasyon ve oksidasyon işlemleri uygulanmıştır. / Nitrocarburization and oxidation processes were applied to the samples after firstly quenched and tempered.

### Özgünlük (Originality)

Geleneksel yöntemlere nazaran nitrokarbürizasyon ile kısa sürede istenilen derinliklere ulaşılabilmektedir. The desired depths can be reached in a short time in the nitrocarburizing process compared to traditional methods.

### Bulgular (Findings)

NK + O işleminin aşınma direncini arttırdığı ve sürtünme katsayısını düşürdüğü belirlenmiştir. / It was determined that NK + O processes increased the wear resistance and decreased the friction coefficient.

### Sonuç (Conclusion)

Tüm veriler analiz edildiğinde NK + O işleminin AISI 4140 çeliğinin mekanik ve tribolojik özelliklerini olumlu etkilediği belirlenmiştir. / When all datas were analyzed, it was determined that NK + O process provide positive effects on mechanical and tribological properties of AISI 4140 steel.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Nitrokarbürizasyon Sonrası Oksidasyon İşlemlerinin AISI 4140 Çeliğinin Tribolojik Özelliklerine Etkisi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Yavuz KAPLAN<sup>1</sup>, Abdulbaki YILDIRIM<sup>1</sup>, Sinan AKSÖZ<sup>2\*</sup>**

<sup>1</sup>Teknoloji Fakültesi, Makine ve İmalat Mühendisliği Bölümü Pamukkale Üniversitesi, , Denizli, Türkiye,

<sup>2</sup>Teknoloji Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Pamukkale Üniversitesi, , Denizli, Türkiye,

(Geliş/Received : 01.07.2019 ; Kabul/Accepted : 16.01.2020)

## ÖZ

Bu çalışmada, karbon ve azot atomlarının eşzamanlı difüzyonu temeline dayanan nitrokarbürizasyon sonrası oksidasyon işlemlerinin AISI 4140 çeliğinin mikroyapı, mikrosertlik ve tribolojik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Nitrokarbürizasyon işleminin birçok avantajı olmasına rağmen özellikle malzemelerin korozyon ve tribolojik özelliklerini iyileştirilmek için işlem sonrası farklı ısıtma tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Nitrokarbürizasyon + oksidasyon işlemleri sonucunda malzeme yüzeyinin en dışında yaklaşık 5µm kalınlığında oksit tabakası, hemen altında nitrid ve karbürlerden oluşan yaklaşık 5µm kalınlığında bileşik tabaka ve karbürce zengin difüzyon bölgesi olmak üzere 3 farklı bölge oluşmuştur. Ana fazdan daha sert difüzyon bölgesi, nitrokarbürizasyon ve oksidasyon katmanları sayesinde malzemenin tüm yüzeyinde aşınma davranışları iyileştirilmiştir. Böylece aşınma direnci ile birlikte aynı zamanda sürtünme katsayısı da iyileştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Nitrokarbürizasyon, oksidasyon, triboloji, aşınma.

## The Effect of Oxidation Process After Nitrocarburization on Tribological Properties of AISI 4140 Steel

### ABSTRACT

In this study, microstructure, microhardness and tribological properties were investigated after nitrocarburisation process (on the AISI 4140 steel) which was the oxidation processes based on simultaneous diffusion of carbon and nitrogen atoms. Although the nitrocarburisation process has many advantages, different post-treatment heat treatment techniques are needed to improve the corrosion and tribological properties of the materials in particular. As a result of the nitrocarburization + oxidation processes, 3 different zones were formed on the outermost surface of the material. These zones were obtaining of respectively as; about 5 mm thick oxide layer, just below it, about 5 mm thick compound layer consisting of nitride and carbides and diffusion zone rich in carbide. Wear behavior on the entire surface of the material was improved by means of a harder diffusion zone, nitrocarburization and oxidation layers than the main phase. Thus, the wear resistance is also improved, as well as the coefficient of friction.

**Keywords:** Nitrocarburization, oxidation, tribology, wear.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

AISI 4140 (42CrMo4) ıslah çeliği alaşımındaki krom (Cr) ve Molibden (Mo) elementleri nedeniyle su verme ve temperleme işlemleri sonrası yüksek mukavemet, süneklik ve tokluk gibi mekanik özellikleri bir arada sunan bir çeliktir. Üstün mekanik özellikleri sebebiyle dişli çark, krank mili, aks mili gibi dönen parçalarda ve yataklamalarda tercih edilmektedir [1-4].

Günümüzde makine elemanlarından beklenen yüksek aşınma ve korozyon direnci, yorulma dayanımı gibi mekanik özellikleri geliştirmek için birçok ısıtma işlemi kullanılmaktadır. Özellikle yorulma dayanımı arttırılmak için ısıtma teknikleriyle yüzeyde bası gerilmesi oluşturulması gerektiği bilinmektedir [4-5].

Termokimyasal bir yüzey işlemi olan Nitrokarbürizasyon (NK) mühendislik malzemelerinin aşınma, korozyon ve

yorulma hasarlarını önlemek için tercih edilen bir ısıtma işlemi tekniğidir [6-8]. Karbon ve azot atomlarının eşzamanlı difüzyonu temeline dayanan NK işlemi, malzeme yüzeyinde 10-20µm kalınlığında beyaz bir tabaka oluşturur. Karbür ve nitridler içeren bu tabaka malzemelerin mekanik özelliklerinde iyileşmeler sağlar. Beyaz tabakanın hemen altında da bir difüzyon bölgesi meydana gelir [9-12].

Fakat çoğu zaman oluşan tabakanın gözenekli yapısından dolayı NK işlemi tek başına yeterli olmamaktadır. NK sonrası oksidasyon işlemi (NK+O) uygulamak malzemenin aşınma ve korozyon direnci arttıracak iyi bir seçenek olarak görülmektedir [13]. Oksidasyon işlemi oksijence zengin gaz veya gaz karışımı atmosferinde, 350-500°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir. İşlem sonrası malzeme yüzeyinde 0.5-3.5µm kalınlığında demir oksit tabakası oluşmaktadır [14-16].

Aşınma, mekanik etkilerle sürtünme halindeki yüzeylerden parçacıkların kopup ayrılması olarak

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

tanımlanmaktadır [17]. DIN 50320'de aşınma, malzeme yüzeylerinden mekanik etkilerle küçük parçacıkların ayrılması sonucu, arzu edilmeyen şekilde meydana gelen değişiklik olarak tanımlanmaktadır. Aşınma sebebiyle yüzeyler ilk şekillerini kaybederler, parçalar arasındaki boşluklar artar ve istenilen işlevi gerektiği şekilde gerçekleştiremez [18,19].

Bu çalışmada, düşük aşınma direncine sahip AISI 4140 çeliğine ileri teknoloji ve uygulama alanına sahip NK+O işlemleri uygulanarak aşınma direnci geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla gaz NK işlemi sonrası uygulanan oksidasyon işleminin AISI 4140 çeliğin tribolojik özellikleri üzerine etkisi mikroyapı analizi, mikrosertlik ölçümleri ve aşınma testleriyle detaylı olarak incelenmiştir. Bu çalışma ile, endüstride aşınma direnci istenen parçalarda NK+O ısıl işlemlerinin tercih edilebilir olduğu gösterilmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Deneyisel çalışmalarda kullanılan AISI 4140 ıslah çeliğinin kimyasal bileşimi Çizelge 1.'de yer almaktadır.

**Çizelge 1.** AISI 4140 çeliğinin kimyasal kompozisyonu (Chemical Composition of AISI 4140 Steel)

C	Si	Mn	Pmax	Smax	Cr	Mo	Fe
0.40	0.20	0.60	0.020	0.030	0.95	0.20	Kalan

### 2.1. Islah, Nitrokarbürizasyon ve Oksidasyon İşlemleri (Quenching and Tempering, Nitrocarburisation and Oxidation Processes)

Çalışmada aşınma özelliklerinin incelenbilmesi amaçlı Ø10x25mm boyutlarında aşınma test numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere ilk olarak 850°C'de 60dk bekletilen ıslah işlemine tabi tutularak yağda su verme işlemi gerçekleştirilmiştir. Islah işlemi uygulanan numuneler 500°C'de 1 saat fırında bekletilerek çıkarılmış ve havada kendiliğinden soğuma işlemine tabi tutulmuştur. Islah etme işlemi sonrası numunelere sırasıyla; nitrokarbürizasyon ve oksidasyon işlemleri uygulanmıştır. Nitrokarbürizasyon (NK) işlemi için karbondioksit (CO<sub>2</sub>), amonyak (NH<sub>3</sub>) ve azottan (N<sub>2</sub>) oluşan karışım gaz atmosferinde, 570°C sıcaklıkta 18 saat süreyle bekletilmiştir. Oksidasyon işlemi (O) ise 400°C sıcaklıkta 60 dakika saf oksijen (O<sub>2</sub>) gazı ortamında gerçekleştirilmiştir.

### 2.2 Mikrosertlik, Mikroyapı ve Aşınma Deneyleri (Microhardness, Microstructure and Wear Experiments)

Mikrosertlik ölçümleri için ise en dış katmandan başlayarak (Oksidasyon bölgesi) 30 µm'ye kadar (difüzyon bölgesine kadar) her 5 µm'de beşer ölçüm alınarak ortalama değerleri (hata çubukları eklenerek) verilmiştir. Difüzyon bölgesinden (DB) sonra ise her 10 µm'de üçer ölçüm alınarak ortalama değerleri verilmiştir. Mikroyapı görüntülerinin elde edilmesi için numune yüzeyleri 200-1200'lük zımpara aralığında

zımparalanmış ve sonrasında ise sırasıyla 6µm ve 3µm'lik keçelerde parlatma işlemleri uygulanmıştır. Parlatılan yüzeyler %5 Nital çözeltisiyle dağlanarak mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

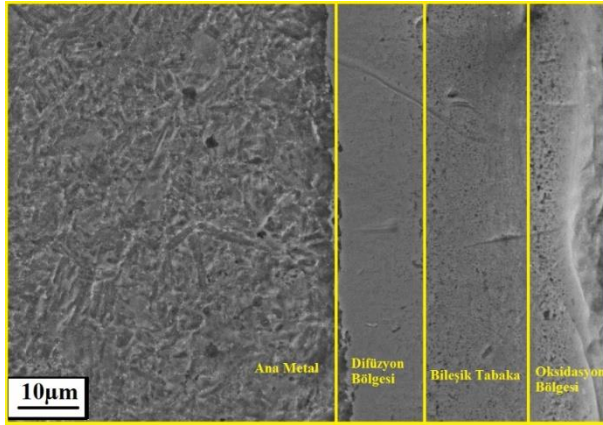
Mikroyapı incelemeleri için sırasıyla; Optik Mikroskop (OM), Alan Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) ve Element Dağılım Spektrometresi (EDS) analizleri gerçekleştirilmiştir. OM görüntüleri için NIKON marka ECLIPSE-LV150NL model optik mikroskop ve FESEM görüntüleri ve EDS analizleri için Zeiss marka SUPRA 40VP model cihaz kullanılmıştır. Mikrosertlik testlerinde HARDWAY marka DV-1AT-4.3 model mikrosertlik cihazı kullanılmıştır.

Aşınma deneyleri ASTM G99 standardına uygun olarak pin-on-disk aşınma deney cihazında gerçekleştirilmiştir. Ø10x25mm ölçülerindeki numuneler pim, AISI 52100 malzeme ise disk olarak kullanılmıştır. Kullanılan disk malzemesinin sertliği, su verme işlemi sonucu 60 HRC olarak tespit edilmiştir.

## 3. BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

### 3.1. Mikroyapı Analizi (Analysis of Microstructure)

Şekil 1'de NK+O uygulanan AISI 4140 çeliğinin FESEM görüntüsü, Çizelge 2'de EDS analiz sonuçları verilmiştir. Isıl işlemler sonrası malzeme yüzeyinde 3 farklı bölge oluştuğu belirlenmiştir. EDS analizi sonuçları incelendiğinde, AISI 4140 çeliğinin en dış kısmında oksijence zengin bir tabakanın oluştuğu görülmektedir. Atomal olarak ağırlıkça %26.37 Fe ve %41.33 O tespit edilmiştir. Bu oranlar en dış katmanda oksit tabakasının varlığını kanıtlamaktadır. Tabakanın 400°C'de 1 saat saf oksijen ortamında gerçekleştirilen oksidasyon işlemiyle oluştuğu söylenebilir. Oksidasyon bölgesinin hemen altındaki bileşik tabaka üzerinden alınan EDS incelendiğinde ise oksijen miktarının azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte tabaka içerisinde atomal olarak ağırlıkça %20.42 N ve %17.24 C bulunmaktadır. Bu elementlerin varlığı, bu bölgenin malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileşmesine katkı sağlayan, demir nitrür ve demir karbürler içeren bir tabakadan oluştuğunu gösterir niteliktedir. Difüzyon bölgesinde ise atomal olarak ağırlıkça %45.81 Fe ve %41.13 C'dan oluşan karbonca zengin bir alanın oluştuğu EDS analiziyle belirlenmiştir. Bu sonuçlar ile difüzyon bölgesinin ağırlık olarak demir karbürlerden oluşan bir tabaka olduğu söylenebilir. Sonuç olarak nitrokarbürizasyon işlemi ile azot ve karbon elementlerinin difüzyonu sağlanarak karbon atomunun atomik boşlukları doldurması ve azotun yüzeyde birikmesini sağlamıştır.



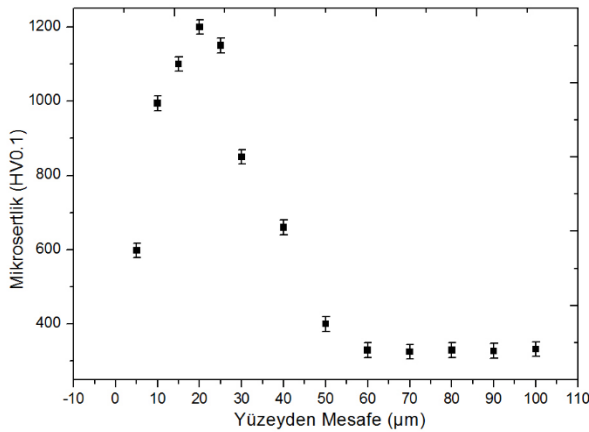
**Şekil 1.** NK+O işlemi sonrası oluşan tabakanın ayrıntılı FESEM görüntüsü (Detailed FESEM image of the layer formed after NK+O process)

**Çizelge 2.** FESEM görüntüsündeki bölgelere ait EDS analiz sonuçları (EDS analysis results of the regions in the FESEM image)

Elementler (% at.)	Oksidasyon Bölgesi	Bileşik Tabaka	Difüzyon Bölgesi
Fe	26.37	58.65	45.81
O	41.33	3.69	7.63
C	19.26	17.24	41.13
N	13.04	20.42	5.43

### 3.2. Mikrosertlik Sonuçları (Microhardness Results)

Numunelerin uygulanan NK ve O ısıt işlemleri sonrası elde edilen mikrosertlik ölçüm sonuçları Şekil 2’de yer almaktadır.



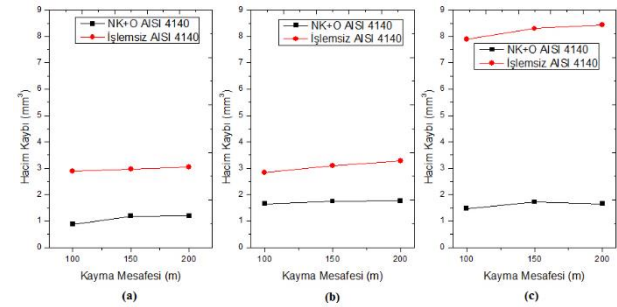
**Şekil 2.** NK+O işlemi sonrası AISI 4140 çeliğinin sertlik profili (Hardness profile of AISI 4140 steel after NK+O process)

AISI 4140 çeliğinin ısıt işlem öncesi en yüksek sertlik değeri 270 HV iken, uygulanan NK+O ısıt işlemleri neticesinde çekirdek sertliği en yüksek değeri 338 HV sertliğe ulaştığı görülmüştür (Şekil 2). Bununla birlikte en dış katmanda yer alan oksit bölgesinin en yüksek sertliği 620 HV olarak ölçülmüştür. Dış katmandan (O

bölgesi), nitrokarbürizasyon bölgesine doğru (NK) gidildikçe sertlik değerinin arttığı belirlenmiştir. NK bölgesinde ölçülen en yüksek sertlik değerinin 1250HV’ye kadar ulaştığı tespit edilmiştir. Numunenin NK bölgesinden DB doğru gidildikçe sertliğin kademeli olarak düştüğü ve bu bölgenin 50µm’ye kadar uzandığı tespit edilmiştir. 50µm’den sonra sertlik çekirdek sertliğine eşitlenmiştir.

### 3.3. Aşınma Test Sonuçları (Wear Test Results)

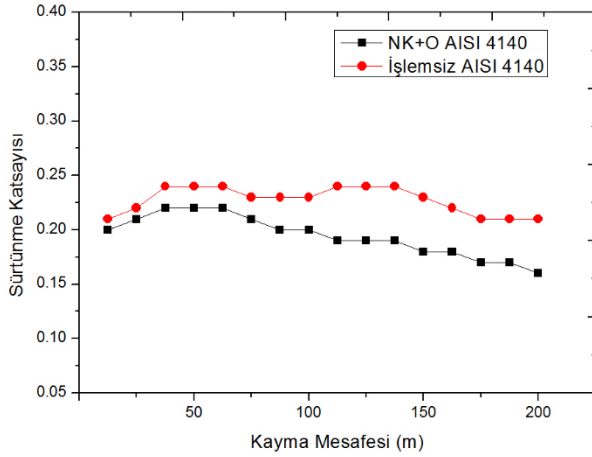
Şekil 3’de AISI 4140 çeliğine uygulanan NK+O ısıt işlemleri sonrası, farklı yüklerdeki ve kayma mesafelerindeki hacim kaybı grafikleri yer almaktadır.



**Şekil 3.** NK+O uygulanmış ve işlemsiz (herhangi bir ısıt işlem uygulanmamış) AISI 4140 çeliğinin hacim kaybı grafikleri (a) 5N (b) 10N ve (c)15N (Volume loss graphs of NK+O applied and untreated AISI 4140 steel (a) 5N (b) 10N (c) 15N )

Şekil 3 incelendiğinde, NK+O ısıt işlemlerinin AISI 4140 çeliğinin aşınma direncini arttırdığı söylenebilir. Uygulanan tüm yük ve kayma mesafelerinde işlemsiz (herhangi bir ısıt işlem uygulanmamış) AISI 4140 çeliğinin hacim kaybı ısıt işlem uygulanan numunelerden daha fazladır. NK+O uygulanan numunelerde üç yükte de (Şekil 3 a-b-c) kayma mesafeleri 100m’den 150m’ye çıkarken bir hacim kaybı gerçekleştiği, fakat 150m’den 200m’ye geçişlerde hacim kaybının azaldığı hatta hacim kaybı yaşanmadığı görülmüştür. Bunun sebebinin en dıştaki oksit tabakasının 100m mesafeye kadar dayanması, daha sonra yüzeyden kaybolarak daha sert bir tabaka olan bileşik tabakanın ortaya çıkması olduğu düşünülmektedir. İşlemsiz AISI 4140 numunesinde ise böyle bir durumla karşılaşmamış kayma mesafesinin artmasıyla 3 yük altında da hacim kaybında artış meydana gelmiştir. Bununla birlikte işlemsiz numunede 5N ve 10N yük altında hacim kayıpları birbirine yakınken 15N yük altında hızlı bir şekilde yükselmektedir. Bunun nedeni ise, artan yükte birlikte yüzeyde oluşan aşırı deformasyon, yüzeyde kopma ve kırılma gibi etkenleri oluşturarak, yüksek hacim kayıplarının meydana gelmesine sebep olmaktadır [20]. Genel literatür çalışmaları incelendiğinde görülmektedir ki, artan yükte birlikte hacim ve veya ağırlık kaybında artış olacağı aşıkardır ve bu çalışma verilerini destekler niteliktedir [21, 22]. Şekil 4’de NK+O uygulanan ve işlemsiz AISI 4140 çeliğinin 10 N yük altındaki sürtünme katsayısı grafiği verilmiştir.





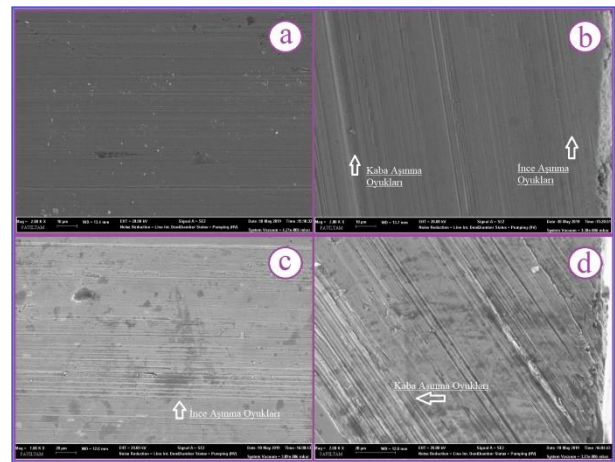
**Şekil 4.** NK+O uygulanmış ve işlemsiz AISI 4140 sürtünme katsayısı grafiği (10N yük altında) (Friction coefficient of AISI 4140 with NK+O applied and untreated (Under 10N load))

Şekil 4 incelendiğinde, AISI 4140 çeliğine uygulanan NK+O işlemlerinin sürtünme katsayısını düşürdüğü açıkça görülmektedir. Bununla birlikte 100m kayma mesafesine kadar ısıtılmış ve ısıtılmamış numunelerin sürtünme katsayısı değerleri birbirine daha yakinken, 100m'den sonra NK+O ısıtılmış işlemleri uygulanmış numunenin sürtünme katsayısında fark edilir derecede bir düşüş gözlenmiştir. Bunun sebebinin 100m'den sonra yüzeydeki oksit tabakasının kalkmaya başlaması ve böylece sürtünmenin doğrudan karbür ve nitrürlerden oluşan çok daha sert bir katmanla sürtünmeye başlaması olarak söylenebilir. Ayrıca, artan sürtünme mesafesine bağlı olarak yüzeyde oluşan deformasyonla birlikte yüzey sertliğinde bir artış meydana geleceği bilinmektedir [23]. Yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde, artan mesafeye bağlı olarak sünek yüzeyler (aşınmanın olduğu daha sünek çekirdek yapı) aşınmaya bağlı olarak termomekanik olarak etkilenmektedir. Oluşan bu termomekanik ve termal nedenlerden dolayı yüzeyde bir oksit tabakası meydana gelebilmektedir. Yapıda oluşması muhtemel oksit film tabakaları yüzeyde yağlayıcı görevi görerek, sürtünme katsayısını doğrudan etkilemektedir [24, 25]. Bu sonuçlarla birlikte, deneysel çalışma verileri göstermektedir ki, yüzeyde oluşturulan kaplama ile birlikte sürtünme katsayısı iyileştirilmiştir.

### 3.4. Aşınmış Yüzey FESEM Görüntüleri (FESEM Images of the Worn Surfaces)

Şekil 5-a ve b'de NK+O işlemleri uygulanmış numunenin 15 N yük altındaki aşınmış yüzey görüntüleri yer almaktadır. Şekil 5-c ve d'de ise işlem görmemiş numunelerin aşınmış yüzey FESEM görüntüleri yer almaktadır. Bu görüntüler sayesinde aşınmış yüzeyde oluşan oyukların oluşumu ve aşınma davranışları etkileri incelenebilmektedir [26]. Görüntüler incelendiğinde uygulanan aşınma mesafesi arttıkça aşınma izlerinin daha belirgin hale geldiği ve Şekil 5 b 'de görüldüğü gibi, ince aşınma oyukları belirgin hale gelmeye başladığı

görülebilmektedir. Şekil 5-d'de yer alan FESEM görüntüsü incelendiğinde, aşındırılmış yüzeylerde sürekli kaba aşınma oyuk çizgilerinin meydana gelmesi ve oluşan yorulma mekanizması ile birlikte mikro boyutlu çatlaklara neden olmuş, böylece hem abrasif aşınma mekanizmasının hem de adhesif aşınma mekanizmasının oluşması ile sonuçlanmıştır [27]. Şekil 5-b'de FESEM görüntüsü incelendiğinde, kenar bölgelerde yer alan kaplamalar ile birlikte (NK+O) ince aşınma oyukları meydana gelirken, çekirdek bölgede ise çok daha derin kaba aşınma oyuklarının meydana geldiği görülmektedir. Bu sonuç ise, uygulanan kaplamanın istenildiği gibi yapıda aşınma direncini arttırdığını göstermektedir. Ayrıca aşınma sonrası herhangi bir dökülme ve çatlak oluşmaması (NK+O numunesi için), istenilen kaplama katmanlarının oluştuğunu göstermektedir.



**Şekil 5.** 15N yük altında aşınmış yüzey görüntüleri a) 100m kayma mesafesinde NK+O, b) 200m kayma mesafesinde NK+O, c) 100m kayma mesafesinde işlem görmemiş, d) 200m kayma mesafesinde işlem görmemiş (Worn surface images under 15N load a) NK + O at 100m sliding distance, b) NK + O at 200m sliding distance, c) untreated at 100m sliding distance, d) untreated at 200m sliding distance)

## 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

NK+O işlemi uygulanan AISI 4140 çeliğinin mikroyapı, mikrosertlik ve aşınma davranışının incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- NK+O işlemi ile malzemenin en dış yüzeyinde yaklaşık 5µm kalınlığında, 600HV sertliğinde demir oksit tabakası, oksit tabakasının hemen altında demir nitrür ve demir karbürler içeren yaklaşık 5µm kalınlığında, 1100HV-1200HV sertlik aralığında bileşik tabaka, ana metal ile bileşik tabaka arasında ise karbürce zengin 50µm'ye kadar uzanan sertliği ana metalden yüksek difüzyon bölgesi oluşmuştur.
- Karbür ve nitrürlerden oluşan bileşik tabakanın (NK) aşınma direncinin oksit tabakasından yüksek olduğu ve bileşik tabakanın sürtünme katsayısının oksit tabakasından daha düşük olduğu belirlenmiştir.



- Aşınma testleri sonucunda NK+O işleminin AISI 4140 malzemenin aşınma direncini arttırdığı ve sürtünme katsayısını düşürdüğü belirlenmiştir. Bu sonuçlar ışığında NK+O işlemi AISI 4140 çeliğinin aşınmaya maruz kaldığı çalışma şartlarında tercih edilebilecek bir ısıtma işlemi tekniği olduğu tespit edilmiştir.
- Aşınma sonrası ısıtma işlemi uygulanmayan yapılar kaba aşınma oyukları görülürken, NK+O sonrası ısıtma işlemleri sayesinde ince aşınma oyuklarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Ayrıca aşınma işleminde NK+O uygulanan numunelerde dış katmanlara doğru gidildikçe yapıdaki artan sertlikle birlikte aşınma hızlarının incelendiği gözlemlenmiştir.
- Sonuç olarak AISI 4140 çeliğine uygulanan NK+O işlemlerinin malzemenin aşınma direncinin olumlu olarak etkilediği gözlemlenmiştir.

Çalışmada sonunda tüm veriler analiz edildiğinde, AISI 4140 çeliklerinde olumlu sonuçlar ile karşılaşılmış ve bu çalışma ile NK ve O işlemlerinin farklı malzeme türlerinde de olumlu etkiler oluşturacağı kanaatine ulaşılmıştır. Çalışma verilerinden sağlanan etkiler ile birlikte, daha kapsamlı çalışmalara, yeni araştırma alanlarına ve yeni projelere öncülük yapacağı düşünülmektedir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Çalışma IMSMATEC 2019’da sunumu yapılan “The Effect Of Nitrocarburization on Microstructure and Microhardness Of AISI 4140 Steel After Oxidation Process” isimli çalışma geliştirilerek yapılmıştır. Bu sunumun yapılmasında, katkılarından dolayı Pamukkale Üniversitesi BAP birimine ait 2019KRM004-048 kodlu projeye yazarlar teşekkürlerini iletmektedir.

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Avner S. H., “Introduction to Physical Metallurgy”, *McGraw Hill Book Company*, ISBN: 978-0070024991, New York, (1986).
- [2] Park H., Lee H., Moon K. and Lee B., “Wear Properties of a Sulfnitrided Layer Formed on AISI 4140 Steel by Using Plasma Treatments”, *Journal of the Korean Physical Society*, 74(9): 880-884, (2019).
- [3] Medina A., Aguilar C., Béjar L., Oseguera J., Ruiz A. and Huape E., “Effects of post-discharge nitriding on the structural and corrosion properties of 4140 alloyed steel”, *Surface and Coatings Technology*, 366: 248-254, (2019).
- [4] Kızılkaya E., Ovalı İ., “AISI 4140 Çeliğine Uygulanan Sığ Kriyojenik İşleminin Mekanik Özellikler Üzerindeki

- [5] Doğançan Ç., “SAE 4340 çeliğinde ısıtma işlem parametrelerinin yorulma ve mikro yapı üzerine etkisi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2018).
- [6] Karakan M., “Plazma nitrokarbürülen AISI 4140 ve 1020 çeliklerinin yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerinin araştırılması”, *Doktora Tezi*, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2004).
- [7] Sun H. Z., Zheng J., Song Y., Chi J. and Fu Y. D., “Effect of the deformation on nitrocarburizing microstructure of the cold deformed Ti-6Al-4V alloy”, *Surface and Coatings Technology*, 362:234-238, (2019).
- [8] Fontes M. A., Scheid V. H. B., Machado D. D. S., Casteletti L. C. and Nascente P. A. D. P., “Morphology of the DIN 100Cr6 Case Hardened Steel after Plasma Nitrocarburizing Process”, *Materials Research*, 22(3): 1-6, (2019).
- [9] Altakan C., “AISI 1010 ve 1040 Çeliklerine Nikel ve Krom Yayındırılarak Yüzey Özelliklerin Geliştirilmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2011).
- [10] Wang L., Lu J. ve Lu K., “Chromizing Behaviors of a Low Carbon Steel Processed by Means of Surface Mechanical Attrition Treatment”, *Acta Materialia*, 53: 2081-2089, (2005).
- [11] Xi W., Ding W., Yu S., Lin N., Meng T., Guo Q. and Liu X., “Corrosion behavior of TaC/Ta composite coatings on C17200 alloy by plasma surface alloying and CVD carburizing”, *Surface and Coatings Technology*, 359: 426-432, (2019).
- [12] Chen G., Wang J., Fan H., Wang D., Li X. and Dong H., “Combat molten aluminum corrosion of AISI H13 steel by low-temperature liquid nitrocarburizing”, *Journal of Alloys and Compounds*, 776: 702-711, (2019).
- [13] Sicoe G. M., “Researches on the Diffusion Phenomena in the Thermo-Chemical Treatment of Oxy-nitrocarburizing of Some Grey Cast Irons”, *Revista de Chimie*, 69(12): 3367-3371, (2018).
- [14] Bell T., Sun Y. and Suhadi A., “Environmental and technical aspects of plasma nitrocarburizing”, *Vacuum*, 59: 14-23, (2000).
- [15] Sun Y., “Structures and properties of oxide films formed on plasma nitrocarburized steels by post-oxidation treatments”, *Heat Treatment of Metals*, 15-19, (2002).
- [16] Esfahani A., Sohi M. H., Rassizadehghani J. and Mahboubi F., “Effect of treating atmosphere in plasma post-oxidation of nitrocarburized AISI 5115 steel”, *Vacuum*, 82: 346-351, (2008).
- [17] Ludema C. K., “Friction, Wear, Lubrication: A Textbook in Tribology”, *CRC Press*, ISBN: 9781482210170, 107-108, (1996).
- [18] Owsalou R. G., “Aşınmaya maruz parçaların aşınma dayanımlarının araştırılması”, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2012).
- [19] Kaplan Y., “İmplant yapımında kullanılan Ti6Al4V titanyum alaşımının mekanik özelliklerine ve biyouyumluluğuna borlama işleminin etkisi” *Doktora Tezi*, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2017).

- [20] Sudarshan, Surappa M. K., “Dry Sliding Wear of Fly Ash Particle Reinforced A356 Al Composites”, *Wear*, 265: 349-360, (2008).
- [21] Şimşek İ., Yıldırım M., Özyürek D. and Tunçay T., “AA7075 Alaşımının T6 Isıl İşleminde Yaşlandırma Süresinin Aşınma Davranışı Üzerine Etkisi”, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 7: 42-49, (2018).
- [22] Aksöz S., Bostan B. “AA2014/B4C MMK yapının döküm ve döküm sonrası sinterleme işlemleri ile üretiminin aşınma davranışlarına etkileri”, *Boron*, 3(2): 132 - 137, (2018).
- [23] Aksöz S., “Wear Behavior of Hot Forged NiTi Parts Produced by PM Technique”, *Trans Indian Inst Met*, 72: 1949-1957, (2019).
- [24] Şimşek İ., Yıldırım M., Özyürek D., Şimşek D., “Basıncısız infiltrasyon yöntemiyle üretilen SiO<sub>2</sub> takviyeli alüminyum kompozitlerin aşınma davranışlarının incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 22(1): 81-85, (2019).
- [25] Saka N., Eleiche A. M., Suh N. P., “Wear of metals at high sliding speeds”, *Wear*, 44(1): 109-125, (2003).
- [26] Aksöz S., Bican O., Çalın R., Bostan B., “Effect of T7 heat treatment on the dry sliding friction and wear properties of the SiC-reinforced AA 2014 aluminium matrix composites produced by vacuum infiltration”, *Journal of Engineering Tribology*, 228(3): 312–319 (2014).
- [27] Özyürek D., Çiftçi İ., Tunçay T., “The effect of aging and sliding speed on wear behaviour of Cu-Cr-Zr alloy”, *Materials Testing*, 55(6): 468-471, (2013)



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Investigating of the best location of solar plants in Turkey by different multiple decision methods

*Yazar(lar) (Author(s)):* Vadoud NAJJARI<sup>1</sup>, Amin MIRZAPOUR<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-1139-4650

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0003-0769-5178

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Najjari V., Mirzapour A., “Investigating of the best location of solar plants in Turkey by different multiple decision methods”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1363-1369, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.605026

# Investigating of the Best Location of Solar Plants in Turkey by Different Multiple Decision Methods

## **Highlights**

- ❖ Identify optimum locations for development of solar plants in Turkey.
- ❖ This study applies kam and copula technique.

## **Graphical Abstract**

*In selecting location of solar plants, we relied on the results from applying CCR, BCC, KAM and SFA models. There is not high dependence between the outcomes of the CCR, BCC, KAM models and the SFA models*

## **Aim**

*Selecting best location of solar plants.*

## **Design & Methodology**

*We used SFA with copulas and KAM method.*

## **Originality**

*The first time to select location of solar plants a comparison of the two methods is used.*

## **Findings**

*There are not high dependence between the outcomes of the CCR, BCC, KAM models and the SFA models.*

## **Conclusion**

*The CCR, BCC and KAM models shows Usak, Diyarbakir and Rize as the best cities, while the Frontier and SFA with copulas models concur on Elazig and Diyarbakir cities in selecting location of solar plants.*

## **Declaration of Ethical Standards**

*The authors of this article declare and promised that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and legal-special permission.*

# Investigating of the Best Location of Solar Plants in Turkey by Different Multiple Decision Methods

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Vadoud NAJJARI<sup>1</sup>, Amin MIRZAPOUR<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Young Researchers and Elite Club, Maragheh branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran

<sup>2</sup>Department of Electrical and Computer, Zanjan branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran

(Geliş/Received : 16.09.2019; Kabul/Accepted : 10.02.2020)

## ABSTRACT

Exponential development of solar photovoltaic projects during the past decades has vastly relied on findings from location identification analyses. This article draws upon the most important site selection factors in order to identify optimum locations for development of solar plants in Turkey from a subset of thirty selected Turkish cities. This study applies CCR, BCC, stochastic frontier analysis (SFA) and Kourosh and Arash Model (KAM) methods in decision-making. KAM method is a new powerful technique in measuring efficiency of firms (DMUs) and has obtained an important role in economy and managements. It also benefits from the novelty of using copula technique in the SFA methods which has been only recently presented to the literature.

**Keywords:** Copulas, DEA, KAM, stochastic frontier, technical efficiency.

## 1. INTRODUCTION

Data Envelopment Analysis (DEA), Free Disposal Hull (FDH) and SFA are well established in the Literature as main instruments to measure efficiency of firms. Nevertheless, DEA and FDH are nonparametric models and therefore, do not place restrictions on functional forms relating inputs and outputs. In other words, in these nonparametric models every deviation from the frontier is considered as inefficiency. SFA is a parametric model where error term represented by two types of variables ( $\varepsilon = u + v$ ). Smith (2008) proposed copula technique in modeling of these  $u, v$  error terms. In his proposed models, copulas play an important role in measuring the efficiency of firms. This study also employs KAM Model, which recently presented by Khezrimotlagh et al. (2013) to improve both technically efficient and inefficient DMUs in DEA. A general overview on SFA with copulas and KAM method will be shown in the next Section. Many activities in the literature are using the mentioned methods in evaluation efficiency of firms. Amy et al. (2015) for evaluating the suitability of renewable energy plant site, proposes DEA to assess the efficiencies of plant site candidates by two-stage framework. In the first stage, a fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) is adopted to set the assurance region (AR) of the quantitative factors, and the AR is incorporated into DEA to assess the efficiencies of plant site candidates. Kinaci et al. (2016) clarify efficiency scores and ranks of hydroelectricity centers by using data envelopment analysis and stochastic frontier analysis methods. Applying copula technique in the stochastic frontier analysis is an advantage to their study between similar activities. Lutz et al. (2017) studied on the

determinants of energy efficiency in the German manufacturing sector based on official firm-level production census data. By means of a stochastic frontier analysis. Huaimo et al. (2018) by data

envelopment analysis compared the environmental efficiency of 118 photovoltaic (PV) plants in China. Dehghani et al. (2018) aim at evaluating different areas for solar plants according to a set of social, geographical and technical criteria through a DEA model. The proposed DEA model considers both information of the efficient and anti-efficient frontiers in order to rise discrimination power in DEA analysis.

Installation of a solar plant is very expensive and thus, identifying the optimum location for it is one of the most important initial considerations from investor's side. The main aim of this study is to use some of the most effective factors in evaluating thirty Turkish cities efficiency as target locations for building a solar plant. The final decision relies on efficiency evaluation results using the CCR, BCC, SFA and KAM methods. In the SFA model, we will also include copula technique by using five Archimedean families, which two of them have been recently presented to the literature. These new families have hyperbolic generators and are more flexible in modeling dependence structures. Drawn upon the obtained efficiency scores, we will identify best candidate cities to locate solar plants. The rest of this paper is organized as follows. Section 2 reviews CCR and BCC, SFA including copulas, and KAM model. The reader who is already familiar with the basics of these models may wish to skip directly to Section 3 uses them in an applied setting, with the ultimate purpose of prioritizing thirty Turkish cities viewed as potential locations for installation of solar plants. Finally, Section 4 presents conclusions from the findings in preceding Sections.

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : aminmirzapour60@gmail.com

**2. MATERIAL AND METHOD**

Some factors that are effective for selecting the location of solar plants were proposed. These parameters were then used for determining the priority of cities for location of a solar plant. After careful consideration of previous studies into the plant location problem, certain quantitative and qualitative factors were selected for focus. These factors were utilized by techniques aimed at prioritizing different possible locations of solar plants.

This section is a brief review of CCR and BCC models, SFA with copulas as well as KAM method. References to most important publications are given inside the text for interested readers who are looking for a deeper understanding of these models.

**Stochastic Frontier Analysis With Copulas:**

Following subsection includes an overview on copulas. Interested readers are referred to see more details in Nelsen (2006).

Copulas and their properties.

A copula is a function  $C : [0,1]^2 \rightarrow [0,1]$  which satisfies:

- (a) for every  $u,v$  in  $[0,1], C(u,0) = 0 = C(0,v)$  and  $C(u,1) = u$  and  $C(1,v) = v$ ;
- (b) for every  $u_1, u_2, v_1, v_2$  in  $[0,1]$  such that  $u_1 \leq u_2$  and  $v_1 \leq v_2, C(u_2, v_2) - C(u_2, v_1) - C(u_1, v_2) + C(u_1, v_1) \geq 0$ .

Copulas functions are powerful technique in modeling dependence structures. Copulas allow us to combine univariate distributions to obtain a joint distribution with a particular dependence structure, in the famous Sklar Theorem: Let  $X$  and  $Y$  be random variables with joint distribution function  $H$  and marginal distribution functions  $F$  and  $G$ , respectively. Then there exists a copula  $C$  such that,  $H(x,y) = C(F(x),G(y))$ , for all  $x,y$  in  $R$ . If  $F$  and  $G$  are continuous, then  $C$  is unique. Otherwise, the copula  $C$  is uniquely determined on  $Ran(F) \times Ran(G)$ . Conversely, if  $C$  is a copula and  $F$  and  $G$  are distribution

functions, then the function  $H$  is joint distribution function with margins  $F$  and  $G$ . As a result of the Sklar Theorem, copulas link joint distribution functions to their onedimensional margins. This study focuses on Archimedean copulas (AC) which are one of important classes of copulas. These copulas are easy to construct, include many parametric families, and have great variety of different dependence structures.

Stochastic frontier models and copulas

There are seldom efforts in the literature related to the stochastic frontier models based on copulas. Smith (2008) was one of the first scholars who proposed copula technique in SFA. Then Carta and Steel (2012) used copulas to introduce a new methodology for multi-output production frontiers. El Mehdi and Hafner (2013) and Amsler et al. (2014) are among the few who used copulas in SFA.

In this part of our overview, we will explain the main relation between copulas and SFA. Let's consider the

traditional stochastic frontier model proposed by Aigner et al. (1977) and Meeusen and Van Den Broeck (1977),

$$\ln y_i = f(x_i; \beta) + \varepsilon_i = \beta_0 + \sum \beta_n \ln x_{ni} + n \varepsilon_i \quad (2.1)$$

where  $y_i$  is the observed scalar output and  $x_i$  is a vector of  $N$  inputs used by the producer  $i$  and  $\beta$  is a vector of technology parameters to be estimated.  $\varepsilon_i = v_i - u_i$  and  $i = 1, \dots, I$  denotes firms.  $v_i$  is the noise component, which we almost always consider as a normal distributed variable, and  $u_i$  is the non-negative technical inefficiency component. They constitute a compound error term, with a specific distribution to be determined, hence the name of composed error model is often referred. Common choices for  $v_i$  include the exponential, the half-Normal, the Truncated Normal and the Gamma distributions. For  $u_i$  the Normal distribution is typically selected. More researchers assume that error terms  $u_i$  and  $v_i$  are independent. Smith (2008), however, proposed the potential dependence between  $u_i$  and  $v_i$ . He used copulas to model this dependence and then estimated the SFA models. Assume that there is potential dependence between  $u_i$  and  $v_i$ .  $u_i$  (and  $v_i$ ) are also independent over  $i$  (where  $i = 1, \dots, I$ ). Let  $G_1$  and  $G_2$  denote the distribution functions of  $u_i$  and  $v_i$  respectively and  $H$  be joint distribution function of  $u_i$  and  $v_i$ . Then by the Sklar Theorem, there is copula  $C_\theta$  which satisfies in relation (2.2),

$$H(u,v) = C_\theta(G_1(u), G_2(v)) \quad (2.2)$$

so its joint density function is as follows,

$$h(u,v) = g_1(u)g_2(v)c_\theta(G_1(u), G_2(v)). \quad (2.3)$$

As  $\varepsilon = v - u$ , by marginal distribution of  $h$  we get

$$h(\varepsilon) = \int_0^{+\infty} g_1(u)g_2(u + \varepsilon)c_\theta(G_1(u), G_2(u + \varepsilon))du. \quad (2.4)$$

Using  $\varepsilon = \ln y - f(x; \beta)$  in the (2.4) gives density of  $y$ . Maximum likelihood estimator (MLE) is a way to obtain more efficient estimator of stochastic frontier models. Clearly, copulas allow us to model marginal distributions separately from their dependence structure, so we have a flexible joint distribution function, whose marginals are specified by the researcher. After estimating stochastic frontier models we desire to calculate technical efficiency of DMUs. This technical efficiency is conditional on expected value as follows

$$TE = E(\exp\{-u\}|\varepsilon). \quad (2.5)$$

By using (2.3) and (2.4) we get

$$TE = \frac{1}{h(\varepsilon)} \int_{+R} \exp\{-u\}h(u,\varepsilon)du, \quad (2.6)$$

For more details see Smith (2008), El Mehdi and Hafner (2013). In this study we use loglinear Cobb-Douglas form and we assume that  $u \sim N^+(0, \sigma_u^2)$ ,  $u \geq 0$  and  $v \sim N(0, \sigma_v^2)$ . Clearly  $E(u) = \sigma_u \sqrt{2/\pi}$  and  $Var(u) = ((\pi - 2)/\pi)\sigma_u^2$ . If we assume that MLE of parameters  $\vartheta = (\sigma_u, \sigma_v, \theta, \beta)$  in (2.4) are  $\vartheta_{ML} = (\hat{\sigma}_u, \hat{\sigma}_v, \hat{\theta}, \hat{\beta})$  then by replacing these estimators in (2.6) we get to  $TE_{ML}$  which is the MLE of  $TE$ . 2.2.2. Data Envelopment Analysis



Data envelopment analysis (DEA) is a nonparametric method for evaluating the relative efficiency of decision-making units (DMUs) on the basis of multiple inputs and outputs. In recent years DEA has had a significant role in practical studies in many fields such as energy (Alp and Sözen, 2011; Sözen et al., 2011), banking (Mercan et al., 2003), sport (Anderson and Sharp, 1997; Alp, 2006; Najjari et al., 2016) etc. The first introduction on DEA was practiced by Charnes et al. (1978), who proposed CCR model, also called as Constant Return to Scale (CRS). The CCR model evaluates both technical and scale efficiencies via optimal value of the ratio form. The modified version of the CCR model, BCC model, also known as variable returns to scale, was initially proposed by Banker et al. (1984). This model is used to estimate the pure technical efficiency of DMUs by reference to the efficiency frontier. The primal form of CCR (CRS) model for the efficiency score of DMU<sub>k</sub> is as follows:

$$\begin{aligned} & \max \sum_{r=1}^s u_r y_{rk} \\ & \text{Subject to} \\ & \sum_{i=1}^m u_i x_{ik} = 1 \\ & \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} - \sum_{r=1}^s u_r y_{rj} \geq 0; \quad j = 1, 2, \dots, n, \\ & v_i, u_r \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad r = 1, 2, \dots, s, \end{aligned} \tag{2.7}$$

where  $n$  is number of DMUs with  $s$  outputs denoted by  $y_{rk}, r = 1, \dots, s$  and  $m$  inputs denoted by  $x_{ik}, i = 1, \dots, m$ . And  $u_r, v_i$  are the weights of output  $r$  and input  $i$ , respectively.

The primal form of input-oriented BCC (VRS) model is considered in this paper, given as follows

$$\begin{aligned} & \min \theta_o \\ & \text{subject to} \\ & \theta_o x_{io} - \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} \geq 0 \\ & \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - y_{ro} \geq 0 \\ & \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \\ & \lambda_j \geq 0 \\ & i = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, \\ & n, \quad r = 1, \dots, s \end{aligned} \tag{2.8}$$

where  $\theta_o$  is efficiency score of DMU<sub>o</sub> and  $x_{io}, y_{ro}$  (all nonnegative) are  $i$ 'th input and  $r$ 'th output of the DMU<sub>o</sub> respectively, and  $\lambda_j$  is intensity of DMU<sub>j</sub>. When the  $\theta_o$  is equal to one, then DMU<sub>o</sub> is called an efficient DMU.

**Kourosh and Arash Model (KAM)**

This method has been recently presented by Khezrimotlagh et al. (2013) aimed at improving foundation of DEA and its first definitions. The method tries to increase DEA's power to distinguish DMUs by multiple inputs and outputs with controllable, non-

controllable, real and integer data. Unlike current DEA models, KAM provides a methodology based on an introduced epsilon which is able to measure the efficiency score of DMUs where the weights are available or unknown. For more reading on this model, see Khezrimotlagh et al. (2013).

Let DMUs (DMU<sub>i</sub>,  $i = 1, 2, \dots, n$ ) consist of  $m$  non-negative inputs ( $x_{ij}, j = 1, 2, \dots, m$ ) and  $p$  non-negative outputs ( $y_{ik}, k = 1, 2, \dots, p$ ) such that, at least one of the inputs and one of the outputs of each DMUs are not zero. Consider an epsilon vector  $\epsilon = (\epsilon^-, \epsilon^+)$  in  $R^{(m+p)+}$ , where  $\epsilon^-$  is  $(\epsilon_1^-, \epsilon_2^-, \dots, \epsilon_m^-)$  and  $\epsilon^+$  is  $(\epsilon_1^+, \epsilon_2^+, \dots, \epsilon_p^+)$ . The linear  $\epsilon$ -KAM, while DMU<sub>l</sub> ( $l = 1, 2, \dots, n$ ) is under evaluation, is as follows,

$$\begin{aligned} & \max \sum_{j=1}^m w_j^- s_j^- + \sum_{k=1}^p w_k^+ s_k^+ \\ & \text{subject to} \\ & \sum_{i=1}^n \lambda_i x_{ij} + s_j^- = x_{lj} + \epsilon_j^-, \quad j = 1, 2, \dots, m, \\ & \sum_{i=1}^n \lambda_i y_{ik} - s_k^+ = y_{lk} - \epsilon_k^+, \quad k = 1, 2, \dots, p, \\ & x_{ij} - s_j^- \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m, \\ & y_{lk} + s_k^+ - 2\epsilon_k^+ \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, p, \\ & \lambda_i \geq 0, s_j^- \geq 0, s_k^+ \geq 0 \\ & j = 1, 2, \dots, m, \quad k = 1, 2, \dots, p, \quad i = 1, 2, \dots, n, \end{aligned} \tag{2.9}$$

where  $w_j^-$  and  $w_k^+$  are the user-specified weights obtained through values judgments,  $\lambda_i$ : multipliers used for computing linear combinations of DMUs' inputs and outputs.  $s_j^-$  and  $s_k^+$  are non-negative slacks, for  $j = 1, 2, \dots, m$  and  $k = 1, 2, \dots, p$ .

Note that when epsilon is zero, linear KAM is the same as the weighted additive model proposed by Charnes et al. (1985).

**3.APPLICATION**

The main aim of this study is to apply some of the most important efficiency factors in order to indicate the priority among thirty Turkish cities in terms of their suitability for building solar plant. Of course expensiveness of the Solar power plant has important role in selecting these factors. In order to get the best place it is better to consider different conditions and variables like pests (flood, earthquake, hail, etc) and analyzing them carefully. Although, some variables like convection, transportation, price of the land are very important factors to determine. In this study we rely on Sözen et al. (2015) .

**Table 1.** Thirty candidate Turkish cities with selected parameters

	Land cost	Distance	Earthquakes	Flood	Hail	Snow	Storm	Adversity	Losses	Solar
Bolu	50	5	197	41	23	5	8	6	3	463
Canakkale	300	5	200	202	48	66	141	40	28	355
Ankara	700	13	79	205	116	29	40	25	23	515
Manisa	500	34	303	111	60	38	20	63	21	359
Afyon	100	6	248	100	75	71	73	28	17	359
Kayseri	195	10	16	95	45	40	69	18	15	925
Malatya	75	99	139	91	67	38	35	19	19	660
Icel	120	5	51	84	73	30	37	12	16	1246
Hatay	80	6	87	124	22	12	37	19	14	640
Kayseri	120	83	16	95	45	40	69	18	15	619
Rize	400	6	10	67	3	13	25	9	13	409
Artvin	125	45	75	68	16	39	17	21	11	306
Mugla	130	5	324	96	40	20	55	20	8	220
Hakkari	30	79	93	29	10	12	12	4	4	1403
Sanliurfa	150	28	17	48	56	7	11	7	4	889
Uzak	35	120	371	19	14	5	2	4	5	906
Kastamonu	20	214	72	112	66	17	21	10	17	417
Erzurum	75	116	204	119	63	41	42	15	20	622
Elazig	80	50	131	80	54	34	24	10	8	1454
Amasya	275	40	68	71	53	9	6	2	13	511
Gaziantep	70	24	48	43	36	3	6	10	7	678
Tunceli	50	6	206	55	28	22	26	20	12	1080
Nigde	75	110	15	10	18	19	30	1	2	1204
Agri	100	47	115	56	23	30	33	8	8	799
Konya	125	5	30	189	117	148	141	78	26	977
Karaman	50	90	12	23	14	30	26	14	6	834
Diyarbakir	150	14	81	48	44	9	28	9	7	1406
Sanliurfa	70	61	17	48	56	7	11	7	4	1060
Antalya	80	90	180	212	103	43	109	28	21	955
Adana	35	18	126	145	64	28	31	14	24	1396

**Table 2.** Details of the selected copula families in this study

Family	Generator	$\tau$	$\lambda_L$	$\lambda_U$	$\theta$ interval
Clayton	$\frac{1}{\theta} \left( \frac{1}{t^\theta} - 1 \right)$	$\frac{\theta}{\theta + 2}$	$2^{-\frac{1}{\theta}}$	0	$(0, \infty)$
A12	$\left( \frac{1}{t} - 1 \right) \theta$	$\left( 1 - \frac{2}{3\theta} \right)$	$2^{-\frac{1}{\theta}}$	$2 - 2^{-\frac{1}{\theta}}$	$[1, \infty)$
coth-copula	$\text{coth}(\theta t) - \text{coth}(\theta)$	$1 + \frac{2}{\theta^2} - \frac{2}{\theta} \text{coth}(\theta)$	$\frac{1}{2}$	0	$[1, \infty)$
csch-copula	$\text{csch}(t^\theta) - \text{csch}(1)$	$\frac{\theta}{\theta + 2}$	$2^{-\frac{1}{\theta}}$	0	$(0, \infty)$
Product	$-lnt$	0	0	0	-

Note:  $\tau$  means usual Kendall's tau to measure dependence or association between variables and A12 family numbered as 4.2.12 in Table 4.1 Nelsen's book that analyzes these parameters and final factors consisting of nine inputs and one output as follows,

Inputs:

1. Distance to power distribution networks (km).
2. Land cost (Turkish Lira).
3. The frequency/probability of earthquakes.
4. The frequency of flooding rains.
5. The frequency of severe hails.
6. The regularity of Snow and blizzard.
7. The recurrence of storms and severe hurricanes.
8. The adversity.
9. Human and financial losses.

Output:

Monthly average solar radiation (h): The primary index for locating solar plants is monthly average solar radiation, which is equal to solar global radiation multiplied by solar duration and divided by the month days. This factor is shown for the selected thirty Turkish cities in Table 1.

In calculations, Matlab software has been used. `fminsearchbnd` command in Matlab have had an important role in calculating SFA models.

The final decision relies on the results from the CCR, BCC, SFA and KAM methods. In order to provide SFA model for the mentioned Turkish cities in this study, the standard SFA model together with five copula families are used. Details of these families are summarized in Table 2. As stated before, there are two new Archimedean families with hyperbolic generators, namely coth-copula

(2013) respectively. These new families show more flexibility in modeling dependence structures. Moreover, technical efficiency of standard CCR, BCC and KAM models are provided for these data to compare their results by the other models.

In the rest of this article, standard SFA model will be called "Frontier" and SFA with Clayton, A12, coth and csch copulas are called only by copulas names.

Table 3 shows SFA model parameters estimated by using copulas and standard SFA model. Table 4 demonstrates efficiency scores of the mentioned cities by applying different methods, and Table 5 shows correlations between the results from those models. As can be seen in Table 3, dependence parameter  $\theta$  has different values for families. This value evidences the dependence between  $u$  and  $v$ . As an example, for the Clayton family, this parameter is  $\theta = 1.5389$ , and so  $\tau = \frac{\theta}{\theta+2} = 0.4348$ . Namely, there is 43.48% dependence between  $u$  and  $v$ . Similarly, for the A12 family this parameter is  $\theta = 0.5285$  and  $\tau = 0.5638$ . The maximum dependence is also shown in A12 family and the minimum dependence belongs to the coth copula, which it is  $\tau = 0.4189$ . However, last column in the Table 3 shows that all mentioned copula families confirm the dependence between  $u$  and  $v$ .

Table 4 and Table 5 confirms that CCR, BCC and KAM ( $\epsilon = 0.0001$ ) models support each other's results. There is 94.67% correlation between CCR and KAM, and 84.96% correlation between CCR and BCC, while the correlation between KAM and BCC is only 76.49%. This means that results from applying KAM model is very close to CCR results. On the other side, Frontier model and SFA-copulas model will lead to mutually supportive results. In this situation, the maximum correlation

**Table 3.** The estimated parameters of the SFA models

Family	$\sigma_u$	$\sigma_v$	$\theta$	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
Clayton	0.2197	0.2323	1.5389	9.7806	-0.3149	0.0091	-0.1044
A12	0.2149	0.2796	1.5285	10.8491	-0.4477	-0.0913	-0.1559
coth	0.2091	0.2410	1.5336	11.0316	-0.4129	-0.0388	-0.1816
csch	0.2082	0.2118	1.6173	9.6370	-0.3206	0.0175	-0.0762
Product	0.2250	0.1887	-	8.5309	-0.2883	-0.0421	-0.1183
Frontier	0.2132	0.2053	-	10.6964	-0.4528	-0.2100	-0.1698
	$\beta_4$	$\beta_5$	$\beta_6$	$\beta_7$	$\beta_8$	$\beta_9$	$\tau$
Clayton	-0.5143	0.3710	0.0862	0.1554	-0.3154	0.0275	0.4348
A12	-0.5414	0.4475	0.0975	-0.0014	-0.3267	0.2461	0.5638
coth	-0.4017	0.2262	0.0558	-0.0148	-0.1337	0.0545	0.4189
csch	-0.4657	0.3357	0.0538	0.1528	-0.2529	-0.0165	0.4471
Product	0.1109	0.2240	-0.0320	0.2157	-0.3089	-0.2334	-
Frontier	-0.4405	0.4406	0.2070	0.0856	-0.1735	-0.1012	-

and csch-copula families, recently presented to the literature by Najjari et al. (2014), and Bal and Najjari

between results from the SFA, using Clayton, and csch copulas is 97.06%. There is also high correlation of

92.97% between results of the SFA using coth and csch copulas. Results of the Frontier model has the highest correlation of 80.16% with SFA by using A12 copula and also it has the lowest correlation, 73.13%, with SFA by using csch copula.

discussed by Sözen et al. (2015) as important parameters in selecting location of solar plants. As can be seen in

**Table 4.** Efficiency scores of thirty Turkish cities by several methods

DMU	CCR	BCC	KAM(0.0001)	Frontier	Clayton	A12	Product	coth	csch
Bolu	1.0000	1.0000	0.9994	0.2499	0.3478	0.2948	0.2796	0.2584	0.3241
Canakkale	0.3312	1.0000	0.1330	0.5042	0.7087	0.7217	0.4527	0.6896	0.6829
Ankara	0.3135	0.5535	0.1875	0.9123	0.9999	0.9551	0.6765	1.0000	0.9999
Manisa	0.2518	0.4279	0.1208	1.0000	0.9261	1.0000	0.9889	0.8086	0.8833
Afyon	0.2760	0.8333	0.1814	0.1876	0.2976	0.2622	0.3106	0.3055	0.3047
Kayseri	1.0000	1.0000	0.9999	0.5791	0.8081	0.7184	0.6807	0.6925	0.8418
Malatya	0.2968	0.5691	0.1774	0.5711	0.4392	0.4550	0.5985	0.4780	0.4861
Icel	1.0000	1.0000	1.0000	0.5298	0.7681	0.5845	0.8200	0.7436	0.8693
Hatay	0.8471	1.0000	0.4119	0.6703	0.8545	0.7674	0.5468	0.6199	0.8594
Kayseri	0.5294	0.8110	0.2343	0.4851	0.4422	0.4693	0.4329	0.4117	0.4646
Rize	1.0000	1.0000	1.000	1.0000	0.9981	0.9949	0.6128	0.5729	0.9994
Artvin	0.2713	0.9520	0.1289	0.4288	0.4182	0.4280	0.4370	0.3010	0.4110
Mugla	0.2732	1.0000	0.1322	0.1966	0.2879	0.2929	0.1876	0.2626	0.2555
Hakkari	1.0000	1.0000	1.0000	0.9047	0.6783	0.7340	0.8366	0.5779	0.6866
Sanli	1.0000	1.0000	1.0000	0.5194	0.5697	0.5129	0.5053	0.4618	0.5558
Usak	1.0000	1.0000	1.0000	0.8850	0.4649	0.4607	0.9921	0.4105	0.5214
Kastamonu	0.4458	1.0000	0.1736	0.2511	0.1663	0.1563	0.2105	0.1673	0.2001
Erzurum	0.2253	0.4849	0.1435	0.6421	0.4552	0.4982	0.5302	0.5295	0.4969
Elazig	0.9496	1.0000	0.7339	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Amasya	0.7284	1.0000	0.3857	0.5913	0.3460	0.3044	0.4119	0.4084	0.4211
Gaziantep	1.0000	1.0000	0.9999	0.5299	0.4638	0.3933	0.5480	0.3449	0.5035
Tunceli	1.0000	1.0000	1.0000	0.6007	0.8196	0.6904	0.9974	0.6721	0.8684
Nigde	1.0000	1.0000	1.0000	0.2750	0.1939	0.2296	0.3480	0.2562	0.2019
Agri	0.5935	0.8370	0.3410	0.7019	0.6006	0.6729	0.6290	0.6059	0.5958
Konya	1.0000	1.0000	0.9994	0.4183	0.9795	0.7569	0.7911	0.7825	1.0000
Karaman	1.0000	1.0000	0.9935	0.3840	0.3707	0.3818	0.6105	0.2759	0.3847
Diyarbakir	1.0000	1.0000	1.0000	0.9975	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Sanliurfa	1.0000	1.0000	1.0000	0.5165	0.5102	0.4668	0.4997	0.4143	0.5120
Antalya	0.3821	0.5166	0.1943	1.0000	0.8647	0.9995	0.6793	1.0000	0.8688
Adana	1.0000	1.0000	1.0000	0.7702	0.8402	0.6667	0.8764	0.7957	0.9998

correlation of 80.16% with SFA by using A12 copula and also it has the lowest correlation, 73.13%, with SFA by using csch copula.

**4. RESULTS AND CONCLUSION**

In selecting location of solar plants, we relied on the results from applying CCR, BCC, KAM and SFA models. For these models nine factors as inputs and one factor as output were used. These factors have been

Table 4 and Table 5 the results from CCR, BCC, KAM models by the SFA models are different. Namely, there are not high dependence between the outcomes of the CCR, BCC, KAM models and the SFA models. The CCR, BCC and KAM models show that Usak, Diyarbakir and Rize as the best cities, while the Frontier and SFA with copulas models concur on Elazig and Diyarbakir cities in selecting location of solar plants. Diyarbakir is the best candidate if only one city desired

## DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS

The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

## REFERENCES

- [1] Aigner, D.J., Lovell, C.A.K., Schmidt, P., "Formulation and estimation of stochastic frontier production functions", *Journal of Econometrics*, 6: 21–37 (1977).
- [2] Amsler, C., Prokhorov, A., Schmidt, P., "Using copulas to model time dependence in stochastic frontier models", *Econometric Reviews*, 33: 497–522, (2014).
- [3] Amy H. I. Lee , He-Yau Kang, Chun-Yu Lin and Kuan-Chin Shen., "An Integrated Decision-Making Model for the Location of a PV Solar Plant", *Sustainability*, 7: 13522-13541, (2015).
- [4] Bal, H., Najjari, V., "Archimedean copulas family via hyperbolic generator", *Gazi University Journal of Science*, 26: 195–200, (2013).
- [5] Carta, A., Steel, M. F. J., "Modelling multi-output stochastic frontiers using copulas", *Computational Statistics and Data Analysis*, 56: 3757–3773, (2012).
- [6] Charnes, A., Cooper, W. W., Lewin, A. Y., Morey, R. C., Rousseau, J., "Sensitivity and stability analysis in DEA", *Annals of Operations Research*, 2: 139–156, (1985).
- [7] Dehghani, E., Jabalameli, M. S., Pishvae, M. S., Jabarzadeh, A., "Integrating information of the efficient and anti-efficient frontiers in DEA analysis to assess location of solar plants", *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 11: 163-179 (2018).
- [8] El Mehdi, R., Hafner, C.M., "Inferences in stochastic frontier analysis with dependent error terms", *Mathematics and computers in simulation*, (2013).
- [9] Huaimo, Y., Hong, F., Wang, X., Siran, F., "Environmental Efficiency of Photovoltaic Power Plants in China—A Comparative Study of Different Economic Zones and Plant Types", *Sustainability*, (2018).
- [10] Khezrimotlagh, D., Salleh, S., Mohsenpour, Z., "A new method for evaluating decision making units in DEA", *Journal of the Operational Research Society*, 65(1): 694–707, (2013).
- [11] KINACI, H., NAJJARI, V., ALP, İ., "Using Data Envelopment Analysis and Stochastic Frontier Analysis Methods to Evaluate Efficiency of Hydroelectricity Centers", *Gazi University Journal of Science*, 29(1): 167-176, (2016).
- [12] Lutz, B. J., Massier, Philipp., Sommerfeld, K., Lösche, A., "Drivers of Energy Efficiency in German Manufacturing:A Firm-level Stochastic Frontier Analysis", *Centre for European Economic Research*, (2017).
- [13] Meeusen, W., Van Den Broeck, J., "Efficiency estimation from CobbDouglas production functions with composed error", *International Economic Review*, 18: 435–444, (1977).
- [14] Najjari, V., Bacigal, T., Bal, H., "An Archimedean copula family with hyperbolic cotangent generator", *IJUFKS*, (2014).
- [15] Najjari, V., Bal, H., Öztürk, F., Alp, I., "Stochastic Frontier Models By Copulas And An Application", *U.P.B. Sci. Bull, Series A*, (2016).
- [16] Sklar, A., "Fonctions de repartition an dimensions et leurs marges", *Publ.Inst. Statist. Univ*, 229–231, (1959).
- [17] Smith, M. D., "Stochastic frontier models with dependent error components", *The Econometrics Journal*, 11: 172–192, (2008).
- [18] Sözen, A., Mirzapour, A., Tarik Cakir, M. "Selection of best location for solar plants by the DEA approach in turkish cities", *The Renewable Energy*, 26(4):52-63, (2015).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Autonomous operation of microgrid and minimization of fault in case of failure in high-voltage lines

## *Yüksek gerilim hatlarındaki arızalarda mikroşebekenin otonom çalışması ve arızanın minimizasyonu*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Furkan ÜSTÜNŞOY<sup>1</sup>, Sadık YILDIZ<sup>2</sup>, Ercan Nurcan YILMAZ<sup>3</sup>, H.Hüseyin SAYAN<sup>4</sup>, Mustafa BURUNKAYA<sup>5</sup>, Cemal YILMAZ<sup>6</sup>, Mithat BULUT<sup>7</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-3087-895X

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0003-4733-4684

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0001-9859-1600

ORCID<sup>4</sup>: 0000-0002-0692-172X

ORCID<sup>5</sup>: 0000-0002-3971-0590

ORCID<sup>6</sup>: 0000-0003-2053-052X

ORCID<sup>7</sup>: 0000-0001-8927-3045

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(To cite to this article):** Üstünsoy F., Yıldız S., Yılmaz E. N., Sayan H. H., Burunkaya M., Yılmaz C. and Bulut M. “Autonomous operation of microgrid and minimization of fault in case of failure in high-voltage lines”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1371-1377, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.681807



# Autonomous Operation of Microgrid and Minimization of Fault in Case of Failure in High-Voltage Lines

## Highlights

- ❖ The algorithms that make autonomous maneuver management to the grid have been developed in case of symmetrical and asymmetrical faults in high voltage lines.
- ❖ The autonomous islanding mode operation has been carried out during the faults in order to prevent the consumers from being affected by faults.
- ❖ The energy management has been made according to the energy production amount of the distributed generation resources, when the designed microgrid started operating in islanding mode in the fault case.
- ❖ The SFCL has been designed to prevent damage to the loads and other components in the microgrid while the current characteristics of PV power supply change in case of faults during entry-exit to island mode.

## Graphical Abstract

Fault detection, autonomous maneuver management, division of loads into islands and Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) have been studied against symmetrical and asymmetrical faults in high voltage lines.

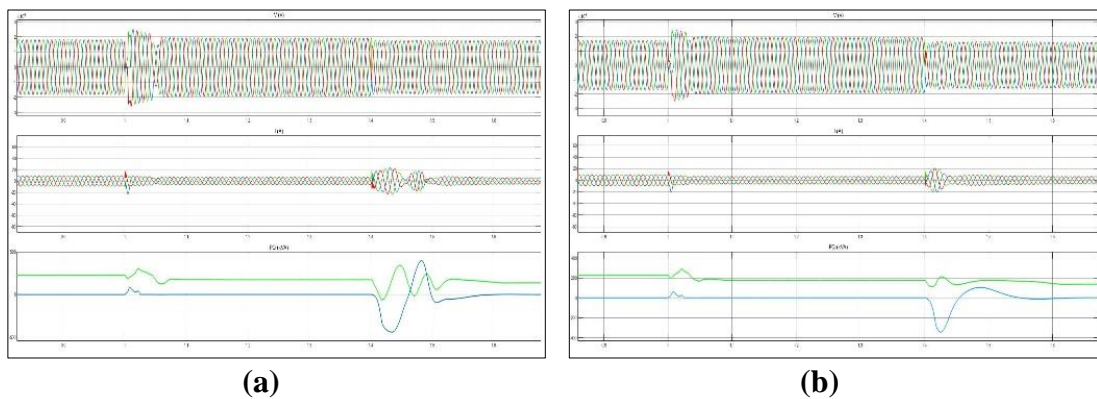


Figure. The simulation results a) without protection methods b) with protection methods

## Aim

The aim is to minimize the damage on loads, grid and components of symmetrical and asymmetrical faults in high voltage lines

## Design & Methodology

Simulation has been done in Matlab Simulink program with discrete time analysis method.

## Originality

All protection methods have been integrated with smart management algorithms. In addition, the effectiveness of SFCL has been studied on the microgrid.

## Findings

Simulation results have shown that the designed smart protection methods protect the grid and critical loads.

## Conclusion

Symmetrical and asymmetrical faults were detected in the simulation, failure time was shortened and power fluctuations were largely suppressed with autonomous protection methods.

## Declaration of Ethical Standards

The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Autonomous Operation of Microgrid and Minimization of Fault in Case of Failure in High-Voltage Lines

*Research Article /Araştırma Makalesi*

**Furkan ÜSTÜNŞOY<sup>1\*</sup>, Sadık YILDIZ<sup>1</sup>, Ercan Nurcan YILMAZ<sup>2</sup>, H.Hüseyin SAYAN<sup>2</sup>, Mustafa BURUNKAYA<sup>2</sup>, Cemal YILMAZ<sup>2</sup>, Mithat BULUT<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Gazi University, Institute of Natural and Applied Sciences, Ankara, Turkey

<sup>2</sup>Faculty of Technology, Gazi University, Ankara, Turkey

(Geliş/Received : 29.01.2020 ; Kabul/Accepted : 04.03.2020)

## ABSTRACT

The manual reaction approach to faults is exhibited in conventional grid. Manual operations are slow in many cases and resulting in big fault and power cut. Turkey has experienced it by living on March 31, 2015. The switching to smart grids is inevitable in order to minimize human errors and avoid big failures. It is a solution to turn the appropriate zones back to the island mode, especially in case of emergency load shedding due to the basic frequency. However, large power fluctuations occur in the microgrids when switching to the island mode or connecting to the grid. Therefore, In Matlab / Simulink, a microgrid is designed that can operate in island mode in accordance with the smart grid structure to minimize the damage of symmetrical and asymmetrical of high voltage lines on loads, grid and its components in this study. Also the effects of Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) have been studied to limit power fluctuations in the microgrid when switching to island mode and exit island mode. In addition, autonomous maneuver management has been carried out on the designed high voltage line to prevent faults resulting in long term power cut.

**Keywords:** Smart grid, microgrid, island mode, SFCL.

## Yüksek Gerilim Hatlarındaki Arızalarda Mikroşebekenin Otonom Çalışması ve Arızanın Minimizasyonu

### ÖZ

Konvansiyonel şebekelerde arızalara manuel reaksiyonel yaklaşım sergilenmektedir. Manuel operasyonlar bir çok durumda yavaş kalmakta ve bunun sonucunda büyük arıza ve kesintiler meydana gelebilmektedir. Türkiye 31 Mart 2015 tarihinde bunu yaşayarak tecrübe etmiştir. İnsan kaynaklı hataların aza indirilmesi ve büyük arızaların yaşanmaması için akıllı şebekelere geçiş kaçınılmazdır. Özellikle temel frekansa bağlı acil yük atma durumlarında uygun bölgelerin ada moda döndürülmesi bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak, mikroşebekelerde ada moda geçerken veya şebekeye bağlanırken büyük güç dalgalanmaları gerçekleşmektedir. Bundan dolayı bu çalışmada, yüksek gerilim hatlarında meydana gelebilecek simetrik ve asimetrik arızaların yüklere ve iletim hatları ile bileşenlerine verebileceği zararları minimize etmek için Matlab/Simulink ortamında akıllı şebeke yapısına uygun olarak ada modlu çalışabilen bir mikroşebeke tasarlanmıştır. Ayrıca ada durumuna geçişte ve çıkışta mikroşebekedeki güç dalgalanmalarını sınırlandırmak için Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) etkileri de incelenmiştir. Bununla beraber meydana gelen arızaların, uzun süreli kesintilere sebebiyet vermemesi için tasarlanan yüksek gerilim hattında otonom manevra yönetimi yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Akıllı şebeke, mikroşebeke, ada mod, SFCL.

### 1. INTRODUCTION

Today, the increase in the frequency of faults is observed in power systems due to the increasing energy demand and the increase in the use of renewable energy sources and new power plants [1][2]. An autonomous smart grid architecture that can make quick and effective decisions should be designed in order to minimize the financial damage and to minimize the affect of failures on the routine life of people [3][4]. The Conventional distribution power systems have a radial structure in which power flows from the substation to the loads in one direction. Primarily, protection schemes should be

created with correct protection coordination in order to transition to smart grid architecture. Protection schemes should isolate power systems as quickly as possible and provide maneuver management in case of failure [5] [6]. Another important matter in smart grid architecture is the strategy of protecting the grid and loads in case of failure by operating the zones in island mode. At this point, the concept of microgrid becomes important. Microgrid technology has been proposed to ensure efficient integration of distributed energy sources. While ensuring this, the microgrid needs to be controlled with an accurate energy management. It is very important to ensure the safety and stability of the microgrid under short circuit failures [7][8]. In other words, the power fluctuations that may occur during the transition of the microgrid to the

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : ustunsoy.furkan@gmail.com

island mode and the connection to the grid should be controlled. Microgrids are expected to switch stably between grid and island modes. The error signals can be different for each microgrid in these modes [9]. Despite extensive research on microgrid control and operation, microgrid specific relay has not been produced to date [10]. The SFCL is one of the methods used to control power fluctuations of micro grids in case of failure. In SFCL, there is no power loss during normal sensing time and provides rapid limiting operation within a quarter cycle without additional sensing device [11].

In order to minimize the damage caused by symmetrical and asymmetrical faults that may occur in power systems to loads, transmission lines and its components, the smart grid architecture that can operate in island mode with correct protection schemes is required. Here it is critical to suppress power surges at the micro grid-grid connection point.

### 1.1. Related Works

In recent years, many researchers have carried out important studies on failure analysis and precautions that can occur in power systems. Some of the important studies on grid protection schemes, microgrid and SFCL are presented below. In one study, a central specific strategy has been presented to protect medium voltage microgrids [12]. Another study presents a detailed review of the protection plans for renewable integrated power grids, including transmission, distribution and microgrid systems [13]. In another study, protection coordination has been studied to prevent possible failure [5]. In another study, ultra-high-speed pilot protection of transmission lines has been presented based on the directional comparison of transient energy [14]. In another study on protection schemes, a complementary fault identification scheme has been proposed for three-supply high-voltage transmission lines [15]. Digital impedance protection of transmission lines is a deficiency known not only as a principle but also as an application. In this study, a new application of wavelet-based artificial neural networks that overcome this shortcoming is presented [16]. In another study on SFCL, a stochastic approach is presented for evaluating transient recovery voltages induced along the Circuit Breaker poles of the simple test line equipped with SFCL [17]. In a similar study, a method has been proposed that uses the voltage component as the effective parameter of the overcurrent protection relay to protect the power distribution system with SFCL [11]. In a study to analyze the effectiveness of SFCL, the applicability of different SFCLs in the voltage source converter based DC system according to the transient characteristics of the dc failure has been analyzed [18]. In another SFCL application, SFCL application has been performed in order to increase the performance of DC microgrids to which wind turbines have been connected under failure conditions [19]. In another similar study, resistant type SFCL application has been applied to protect the DC microgrid system [7].

### 1.2. Our Contributions

It is anticipated that this designed autonomous smart grid operation can make the following contributions;

- Firstly the fault was identified in order to minimize the damages of symmetrical and asymmetrical faults that may occur in high voltage lines to the loads, transmission lines and its components. Subsequently, algorithms that will make autonomous maneuver management to the grid have been developed by isolating the fault point.
- It is envisaged to separate the loads into microgrids in order to prevent the consumers from being affected by faults. An autonomous island mode operation has been carried out during the faults.
- The energy management has been made according to the energy production amount of the distributed generation resources, when the designed micro grid starts operating in island mode in the faultier case.
- The SFCL has been designed to prevent damage to the loads and other components in the microgrid while the current characteristics of PV power supply change in case of faults during entry-exit to island mode.

The fault detection, autonomous maneuver management, operation of loads in island mode and intelligent energy management in microgrids have been realized by considering the designed system as a whole. Therefore, this system is a complete example of smart grid architecture and it is thought that it will inspire researchers.

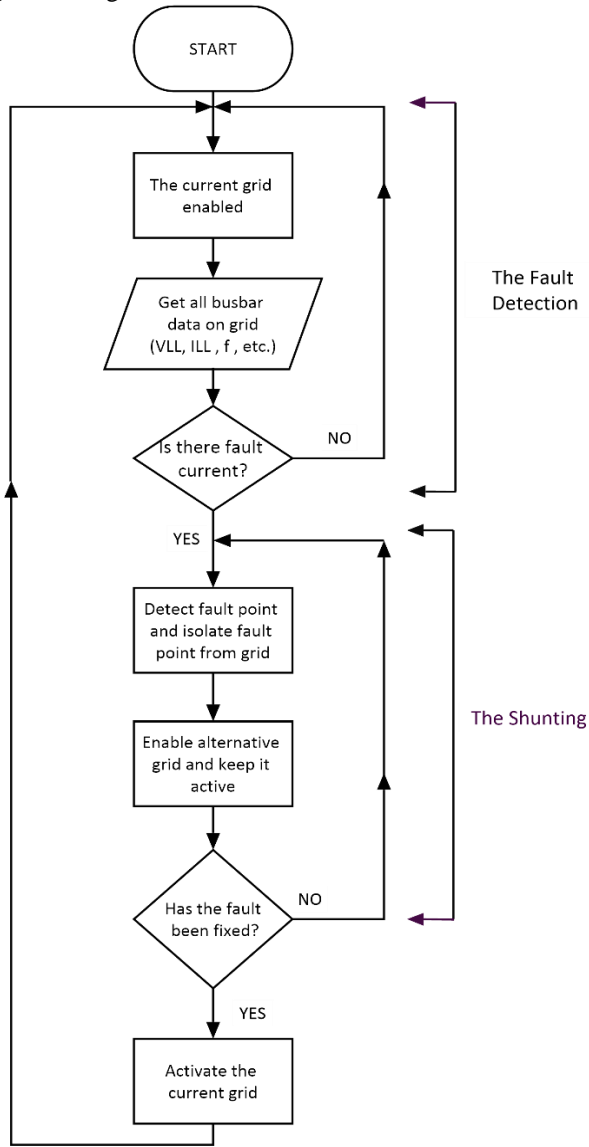
## 2. DESIGN OF SYSTEM

The simulation studies in grid design provide great convenience and simplify the study of designers. The simulation studies increase the reliability of the system and enable the necessary optimizations to be made in advance. Thus the designed smart grid architecture is modeled and simulated in a matlab/simulink environment.

The ring distribution grid model is designed with 5 busbar in simulink model. In the model, 120 kV energy power supply was used. This voltage is reduced to 25 kV with transformers for distribution. The transmission line has been designed according to the  $\pi$  circuit model. In addition, a micro grid with 400 kW power level PV power supply has been designed and connected to the grid. Also, a symmetrical fault has been created between the two busbars (B4-B5) to see the network behavior. Finally, the necessary control software has been developed for isolating the fault area, maneuvering, switching to island mode and energy management, in the event of a fault. What that a suitable SFCL model has been developed, which is required to suppress the power oscillations of the microgrid both during failure and when entering and leaving the grid.

**2.1. The Autonomous Maneuver Management Design**

The switching under high voltage is called maneuvering. Generally, the maneuvering process is called opening the load, separating the contacts and safely grounding the system. In this study, when the fault occurs in the grid, the fault has been detected and the point where the fault occurred has been isolated from the line and the backup line has been activated. The maneuvering algorithm is given in Figure 1.

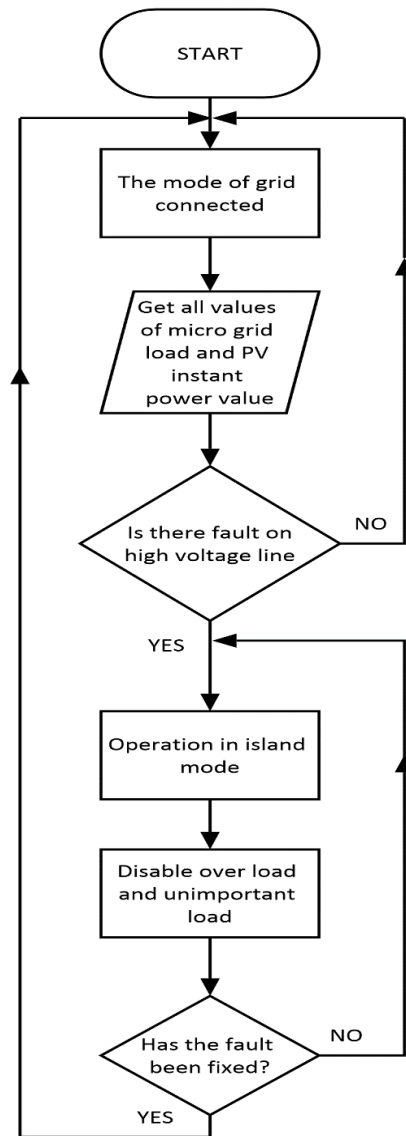


**Figure 1.** The Maneuver Algorithm

**2.2. The Microgrid and Energy Management**

The separating regions into microgrids is a solution proposal so that the consumers and grid components are not affected by faults. For this reason, the autonomous operation of microgrids in island mode becomes important in case of failure. The microgrid technology is recommended to ensure efficient integration of distributed renewable energy sources and it is very important to ensure the safety and stability of the microgrid under short circuit failures [20].

Therefore, in order to minimize the damage that may occur on the line, the micro grid was autonomously put into island mode. Meanwhile, the total power that the PV plant can feed is kept in the circuit and the load that is noninferiority and extra has been automatically disengaged by measuring the instantaneous power consumption values of the loads connected to the microgrid. In the event of a fault, the working algorithm of the microgrid and energy management has been given in Figure 2.



**Figure 2.** The Algorithm of Island Mode and Energy Management

**2.3. The Design of SFCL**

In case of failure in the grid, the precautions must be taken to avoid damaging the loads and other components in the microgrid, since the current characteristics of renewable power plants change during entry-exit to island mode. At this point, the first solution that comes to mind is to control the power with the semiconductor technology architecture. However, since the mentioned

areas are very large loads and there is no semiconductor material to control such large loads, this option does not provide a definitive solution. The most effective solution here is to connect microgrids to the grid with the SFCL. Although SFCL technology is an expensive technology today, it is thought to be one of the indispensable components of smartgrid architectures in the future.

The SFCL is a grid element that performs power limitation quickly within a quarter cycle without power loss during normal sensing time and without additional sensing device. This circuit element limits the fault current without adding impedance to the circuit during normal operation, unlike reactors or high impedance transformers. The working principle of SFCL is based on the ability to phase change between the superconductivity state and the non-superconductor state of the superconducting material. Superconductors are materials that automatically change their resistor to a value higher than zero when a certain critical current value is exceeded. Since the working principle of SFCL was originally based on superconducting materials that can operate at very low temperatures, the widespread use of superconductor fault current limiters in electrical installations was much more expensive. The cooling problem has been greatly reduced with the discovery of high temperature superconductors (HTS). These new HTS materials can be operated at much higher temperatures and can be easily cooled using liquid nitrogen [20]. The superconductive damping behavior in the application model of SFCL is defined as adding a high resistance to the system at high currents. The resistance of the superconductor is a function of current density, temperature and magnetic field. A shunt resistor is required in parallel with the superconductor to deflect most of the overcurrent after quenching to prevent overheating. As long as the current density, temperature and magnetic field parameters are below critical levels in the model, the resistance will remain in a

superconducting state. However, when these parameters begin to exceed the critical threshold, the superconductor starts the damping process and increases its resistance [21].The designed SFCL in the Simulink environment was modeled according to the resistance change approach due to overcurrent. This design model was made according to the formulation given in Equation-1 and Equation-2.

$$I_L = \frac{V_L}{R_{SFCL} + Z_L} \tag{1}$$

Here, the  $I_L$  is line current, the  $V_L$  is nominal voltage of the line, the  $Z_L$  is line impedance, and the  $R_{SFCL}$  represents shunt-connected ohmic SFCL resistance

$$R_{SFCL} \leftrightarrow \begin{cases} R_{SFCL} \cong 0, & I_L < I_{CRT} \\ R_{SFCL} = R_{max}(1 - e^{-t/\tau}), & I_L \geq I_{CRT} \end{cases} \tag{2}$$

$R_{max}$  is the maximum shunt resistance, which will eliminate the error and  $I_{CRT}$  is the critical current threshold value determined in the designed model. If the line current exceeds this current value, the  $R_{SFCL}$  resistance change is given in Equation 2.

### 3. THE SIMULATION MODEL AND RESULTS

The 5 busbar ring type grid has been constructed in the designed model. The energy source has been selected at 3Φ 120 kV level and unlimited power. Energy flow to the distribution line is provided by 120 kV / 25 kV lowering transformers. The distribution line is constructed according to the π circuit model. Also two loads of 15 MVA and 20 MVA power have been added to the grid. In addition, a micro grid with a 400 kW PV power supply and a load of 460 kW was connected to the ring grid. The designed SFCL was added to model to minimize the fluctuations that will occur during the connection of this microgrid to the grid. The designed simulink model is given in Figure 3.

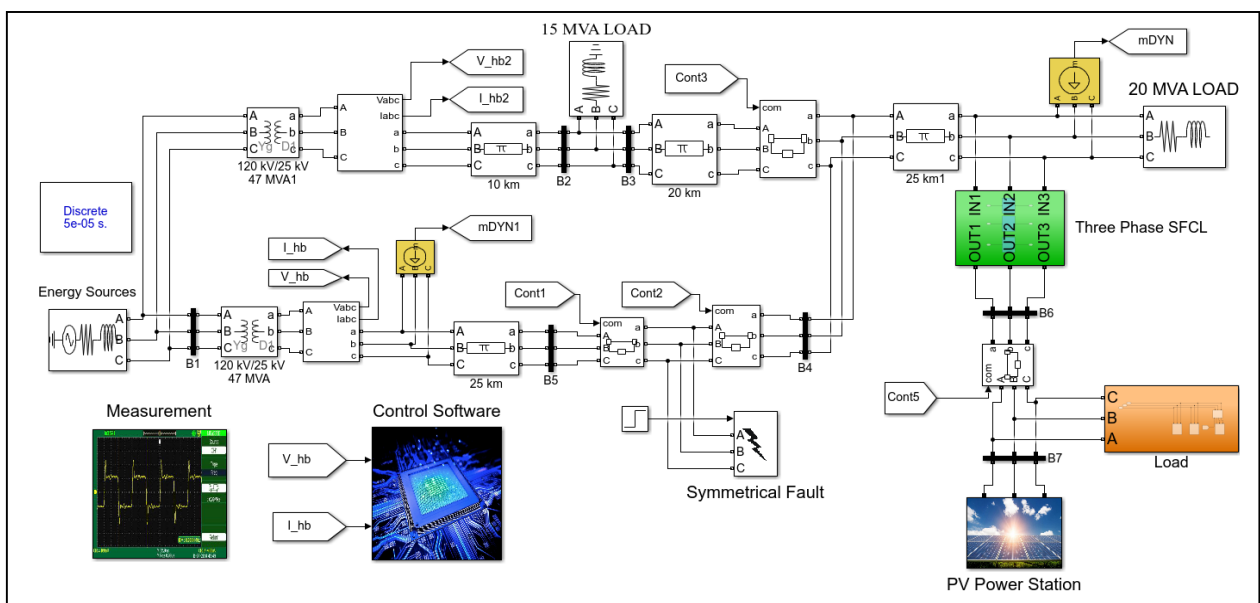
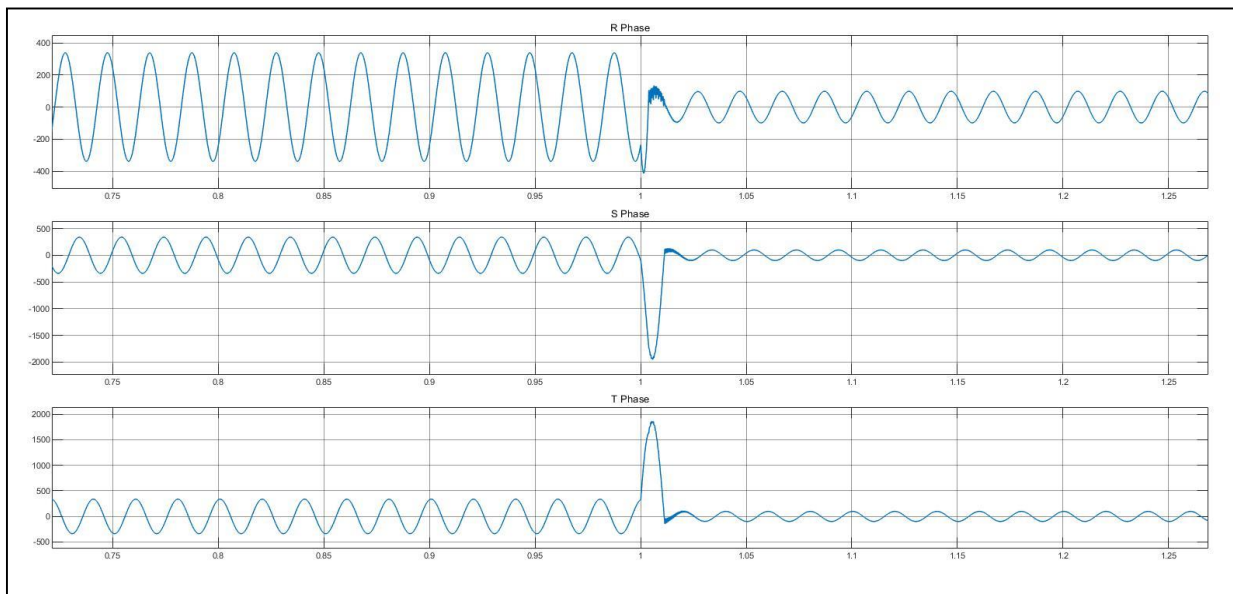


Figure 3. The Simulink Model

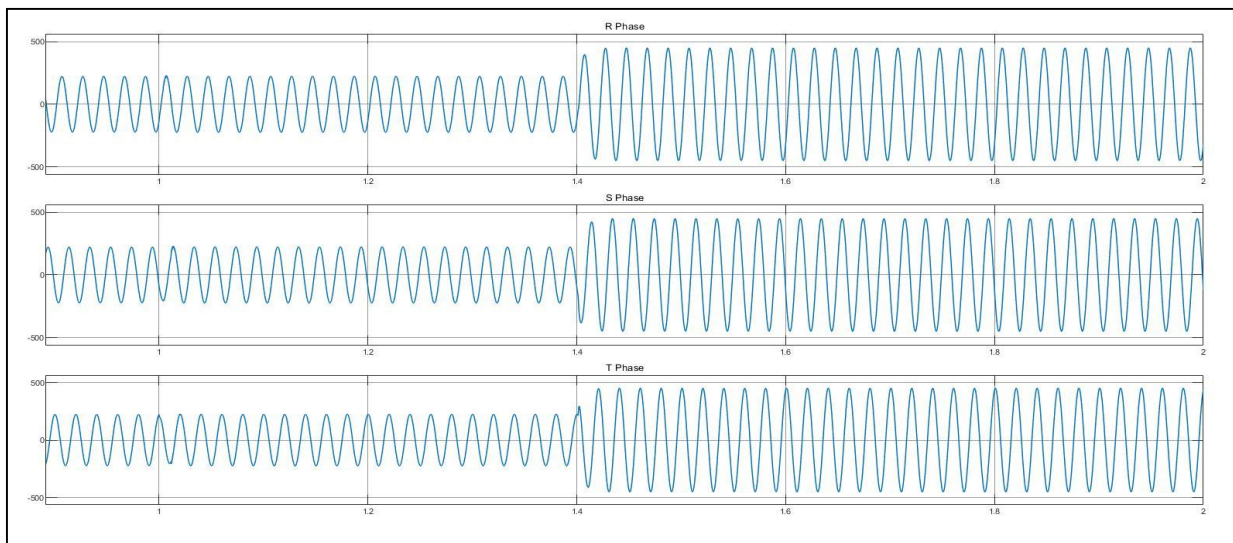


When the Simulink model has been run, the region where the fault is located has been isolated from the line in a very short time (half cycle) with the designed smart grid

control algorithm after the symmetrical fault between the B4 and B5 busbars at  $t = 1$  second. The 3-phase current changes have been given before and after the fault on the lines with busbar B1 and B2 in Figure 4 and Figure 5.



**Figure 4.** The B1 Busbar 3 Phase Current Graph



**Figure 5.** The B2 Busbar 3 Phase Current Graph

When the current graphs of busbars B1 and B2 have been analyzed, it is understood that the fault occurred after  $t = 1$  second and the fault area has been isolated. Only The loads which before the fault zone has been continued to supply on the line with busbar B1.

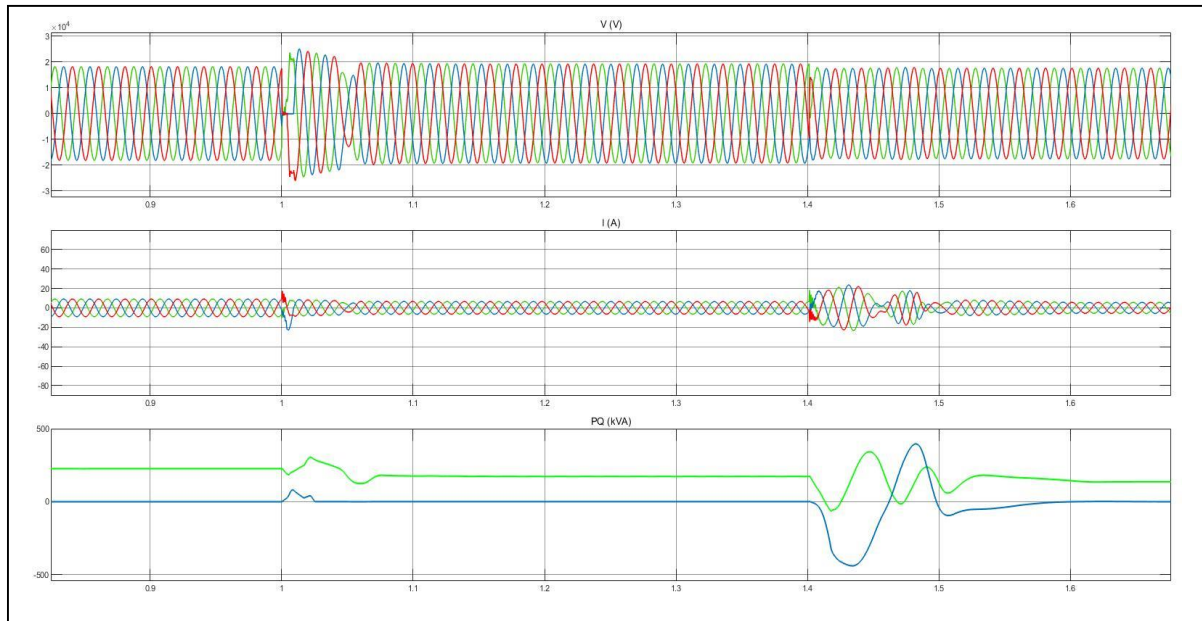
After isolating the fault zone ( $t = 1.4$  sec), the necessary maneuvering has been performed and the load with 20 MVA power has started to be fed from the line where B2 busbar has been located.

However, until the fault occurred and the fault zone has been isolated from the line ( $t = 1-1.4$ sec), the microgrid has been separated from the ring grid. In this time

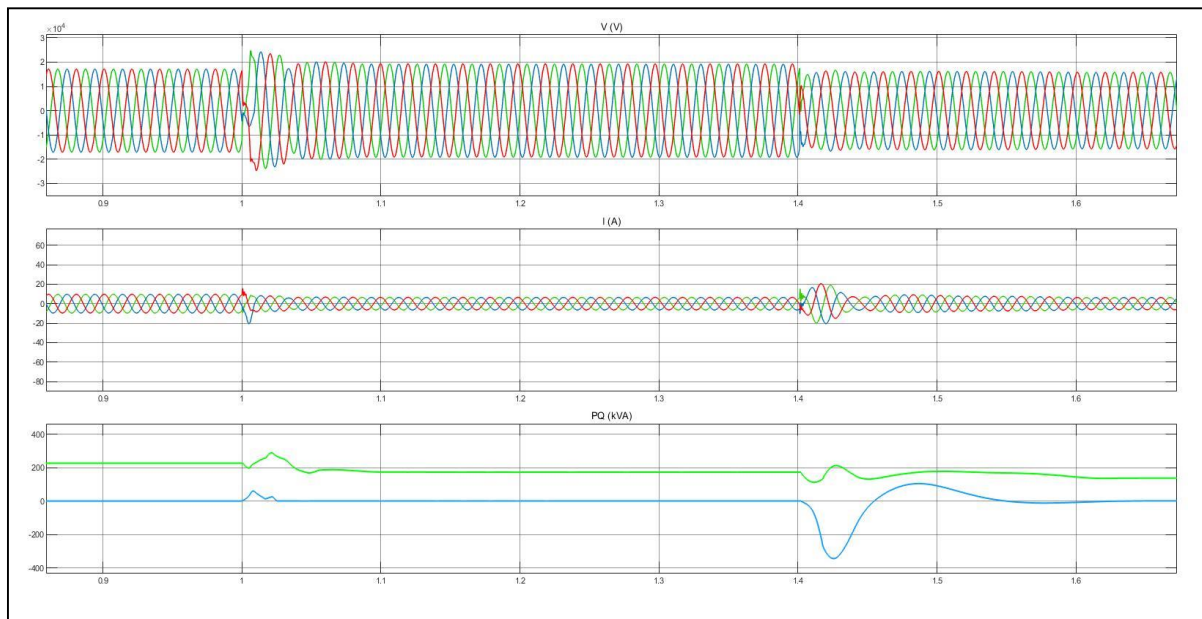
interval, energy management has been carried out in order to provide energy flow to the priority loads that the PV power supply could feed alone. For this reason, it has been ensured that the micro grid works steadily by throwing the load that is noninferiority and extra.

It has been observed that large power fluctuations occurred during the entrance and exit of the microgrid to the island mode and it has been given in Figure 6. The designed SFCL has been added to the simulink model so that the active and reactive power fluctuations do not damage the loads and the grid components. Simulation results using SFCL element are given in Figure 7.





**Figure 6.** The Simulation Result without SFCL



**Figure 7.** The Simulation Result with SFCL

When the graphs are analyzed, it is seen that the micro grid operates in island mode from the moment the fault occurs ( $t = 1$  sec) until the moment the fault is eliminated ( $t = 1.4$ ). It is seen that the designed SFCL element suppresses active and reactive power fluctuations both during the transition to island mode and connection to the network. Also, it has been observed that it reaches more stable and faster nominal operating values after network connection. According to simulation results, it is observed that active-reactive power fluctuations were suppressed and the frequency response of the system increases with SFCL.

At this point, even though there are SFCL elements, small power fluctuations can affect adjacent relay, breaker etc. line components. Therefore, the relay coordination should be done taking this situation into account in the designed network architecture. In this context, before applying, it is necessary to adapt the appropriate relay coordination to the designed network by making simulations of this type

#### 4. CONCLUSION

The quality and continuity of energy are essential for customer satisfaction. It is predicted that the rapid

increase in energy consumption and the fact that electric vehicles (EVs) will enter our lives in the future will cause the existing network architecture to be insufficient. Therefore, transition to smart grids is inevitable. An ideal smart grid architecture is envisaged with this study and supported by simulation results.

As a result of the simulation study, the fault point has been determined. Subsequently, the most optimum maneuver management has been carried out and the existing loads have been fed. In addition, it is envisaged that the regions will be separated into micro grids for the continuity of energy flow and network frequency stability. In the designed network model, the region where the PV plant is located has been operated in island mode. Also, designed SFCL has been added to the system to limit the transient overcurrents occurring during the transition and exit, and the power fluctuations have been suppressed in the system.

#### DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS

The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

#### REFERENCES

1. Yıldız S. and Burunkaya M., "Web Based Smart Meter for General Purpose Smart Home Systems with ESP8266", *2019 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, Ankara, Turkey, (2019).
2. Üstünsoy F. and Sayan H. H., "Sample Laboratory Work for Energy Management with SCADA Supported by PLC", *Journal of Polytechnic*, 21: 1007-1014, (2018).
3. Li Z., Shahidepour M., Aminifar F., Alabdulwahab A. and Al-Turki Y., "Networked Microgrids for Enhancing the Power System Resilience", *Proceedings of the IEEE*, 105: 1289-1310, (2017).
4. Venkata S. and Hatziargyriou N., "Grid resilience: Elasticity is needed when facing catastrophes", *IEEE Power Energy Mag.*, 13: 16-23, (2015).
5. Saleh A. K., Zeineldin H. H. and El-Saadany F. E., "Optimal Protection Coordination for Microgrids Considering N-1 Contingency", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 13: 2270-2278, (2017).
6. Blackburn J. L. and Domin T. J., "Protective Relaying: Principles and Applications",; *CRC Press*, Boca Raton, FL, USA, (2015).
7. Chen L., Chen H., Li G., Xu Y., Ren L. and Tang Y., "Application of a Resistive Type Superconducting Fault Current Limiter for a DC Microgrid System", *2018 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD)*, Tianjin, China, (2018).
8. Bayindir R., Hossain E., Kabalci E. and Perez R., "A Comprehensive Study on Microgrid Technology", *International Journal of Renewable Energy Research-IJRER*, 4: 1094-1107, (2014).
9. Hatziargyriou N., "Microgrids: Architectures and Control. West Sussex", *Wiley*, 4, U.K., (2014).
10. Hooshyar A. and Iravani R., "A New Directional Element for Microgrid Protection", *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9: 6862-6876, (2018).
11. Lim S. and Lim S., "Analysis on Coordination of Over-Current Relay Using Voltage Component in a Power Distribution System With a SFCL", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 29: 5, (2019).
12. Monadi M., Gavriluta C., Luna A., Candela I. J. and Rodriguez P., "Centralized Protection Strategy for Medium Voltage DC Microgrids", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32: 430-440, (2017).
13. Telukunta V., Pradhan J., Agrawal A., Singh M. and Garudachar S. S., "Protection Challenges Under Bulk Penetration of Renewable Energy Resources in Power Systems:A Review", *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 3: 365-379, (2017).
14. Kong Y., Zhang B. and Hao Z., "Study of Ultra-High-Speed Protection of Transmission Lines Using a Directional Comparison Scheme of Transient Energy", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30: 1317-1322, (2015).
15. Zaki I. M., Sehiemy R. A. El., Amer M. G. and Enin F. M. A. El., "Sensitive/stable complementary fault identification scheme for overhead transmission lines", *IET Generation, Transmission & Distribution*, 13: 3252-3263, (2019).
16. Abdullah A., "Ultrafast Transmission Line Fault Detection Using a DWT-Based ANN", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54: 1182-1193, (2017)
17. Mohseni A., Yami M. S. and Akmal S. A. A., "Sensitivity Analysis and Stochastic Approach in Study of Transient Recovery Voltage with Presence of Superconducting FCL", *2011 IEEE Electrical Power and Energy Conference*, Winnipeg, MB, Canada, (2011).
18. Li B. and He J., "Studies on the Application of R-SFCL in the VSC-Based DC Distribution System", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26: 3, (2016).
19. Yehia M. D., Mansour A. D. and Yuan W., "Fault Ride-Through Enhancement of PMSG Wind Turbines With DC Microgrids Using Resistive-Type SFCL", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 28: 4, (2018).
20. Lawal O. K., Umar I., Abubakar B. and Mahmood M. K., "Performance Analysis of Surge Current Protection Using Superconductors", *European Scientific Journal, Edition*, 10: 19, (2014).
21. Langston J., Steurer M., Woodruff S., Baldwin T. and Tang J., "A Generic Real-Time Computer Simulation Model for Superconducting Fault Current Limiters and Its Application in System Protection Studies", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 15: 2090-2093, (2005)



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Finite element analysis of the inductance and magnetic field in the permanent magnet spherical motor

*Yazar(lar) (Author(s)): Sibel AKKAYA OY<sup>1</sup>, Osman GÜRDAL<sup>2</sup>, Serdal ARSLAN<sup>3</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-1209-920X*

*ORCID<sup>2</sup>: 0000-0001-8315-7342*

*ORCID<sup>3</sup>: 0000-0002-1187-5633*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Akkaya Oy S., Gürdal S., Arslan S., “Finite element analysis of the inductance and magnetic field in the permanent magnet spherical motor”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1387-1394, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.597962

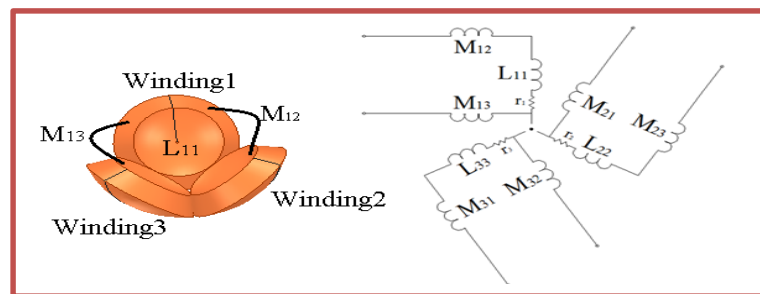
# Finite Element Analysis of the Inductance and Magnetic Field in the Permanent Magnet Spherical Motor

## Highlights

- ❖ Spherical motor's windings
- ❖ Mutual inductance
- ❖ Self inductance
- ❖ Curve fitting method
- ❖ Torque change

## Graphical Abstract

In this study, an air core spherical motor which has rotor and stator winding arrangement is described.



**Figure.** Winding inductance relationship and equivalent circuit model

## Aim

Mutual inductance and self-inductance change were examined according to  $r=4, 20, 40$  and  $60$  mm radius and the change in the number of stator winding for the spherical motor.

## Design & Methodology

Stator poles on the stator were placed at specified angles. Stator poles were placed with an angle of  $45^\circ$  to  $x$  axis and with an angle of  $120^\circ$  to  $z$  axis.

## Originality

It has never worked in the literature with a spherical motor of this size before.

## Findings

This study examined mutual inductance and self-inductance change according to  $r=4, 20, 40$  and  $60$  mm radius and the change in the number of coils for a spherical motor. Changes in inductance were found through curve fitting method with the coefficients of cubic equations.

## Conclusion

With the change of size (scale change) in the analyzed spherical motor, the torque increases, but the torque density decreases.

## Declaration of Ethical Standards

The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Finite Element Analysis of the Inductance and Magnetic Field in the Permanent Magnet Spherical Motor

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Sibel AKKAYA OY<sup>1\*</sup>, Osman GÜRDAL<sup>2</sup>, Serdal ARSLAN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Marine Science and Technology Engineering, Faculty of Marine Sciences, Ordu University, Turkey,

<sup>2</sup>Department of Electrical Engineering, Faculty of Technology, Gazi University, Turkey

<sup>3</sup>Birecik Vocational Higher School, Harran University, Şanlıurfa, Turkey

(Geliş/Received :29.04.2019 ; Kabul/Accepted : 29.04.2020)

## ABSTRACT

Today, many applications requiring mass manufacturing are shifting to robotic applications through automation systems. The actuators used in these robotic systems should be designed according to needs. In this study, an air core spherical motor which has rotor and stator winding arrangement is described. The spherical motor's windings are optimally positioned on the stator made of delrin. Mutual inductance and self-inductance change were examined according to  $r=4, 20, 40$  and  $60$  mm radius and the change in the number of stator winding for the spherical motor. Changes in inductance were found through curve fitting method with the coefficients of cubic equations. Equivalent circuit with winding inductance model is also given. Torque change according to magnet change was also investigated. Magnetic flux density change of N52 M magnet 3 winding 2-pole model was examined and the effect of the increase in overall size on torque was evaluated.

**Anahtar Kelimeler:** Spherical motor, curve fitting, permanent magnet, torque.

## 1. INTRODUCTION

In industrial and robotic applications, multi-free rotational motion is very important. While normal electrical motors can rotate around a fixed axis, spherical motor can rotate every direction around a specific point. This way, it has an important advantage over electric motors which can rotate. A spherical actuator has a compact structure, high energy density, low moment of inertia and rapid response[1]. The spherical motors are used in security and personal cameras, articulation points of robots, laser cutters, telescopes, solar panels, exoskeletons and applications which require multi-axis motion. It has even been considered to be used as energy harvester [2] and generator [3] recently.

As is known, the first examples of application on spherical machines are induction motor simulations in terms of working principles. Diversification of magnet materials over time has led to the development of permanent magnet spherical motors. Magnet array of other permanent motors (Halbach array [4,5], surface magnet radial array [6-10] and axial array [11-13]) can also be adapted to these motors. Rotors of permanent magnet spherical motors are also spherical. When the spherical motors' degree of freedom of movement is considered, 3D analysis method is required instead of 2D numerical analysis method. In particular, 2D analysis can be performed with the spherical motor simulation of rotor surface radial flux motor [9-10]. Xia et al. proposed the torque calculation method based on the 2-D conversion

model in order to avoid the complicated torque calculation process under 3-D magnetic field and thus reduce the computational burden and it was found that the torque values of the model proposed which was transformed to 2D from 3D were very close to each other [14]. Magnet can be combined in different ways to acquire the shape of sphere. Air gap flux density, size and wave form can vary. According to obtaining a spherical rotor by increasing the number of magnets in the form of pieces rotor position change, magnetic flux can approach sinusoidal wave [15]. However, due to high magnet costs, application of special magnet shapes can increase production costs [15]. Considering torque equality [16]; the amount and change of flux density in air gap is important according to position change of the motors. In addition, the type of magnet on the rotor affects torque size of the motor significantly [17]. Zhang [8] analyzed the air core 24/8 spherical motor using the finite element method. By using the finite element method, the magnet thickness and air gap change of spherical motor torque [18]. Qian et al. [19] showed that axial magnet array showed higher flux density than radial array. Using iron core can produce about 4.9 times more torque when compared with air core. The increase in the air gap between stator and rotor linearly decreases the produced torque significantly. In addition, they showed that maximum torque was close to each other in the same ampere winding and volume between cylindrical magnet and conic magnet (with cylindrical magnets of different diameters in a row) of rotor magnet geometry [19]. For this reason, studies on spherical motors with cylindrical magnets on rotor surfaces have increased recently in terms of ease of production.

\*Sorumlu yazar(Corresponding Author)  
e-posta : sibelakkayaoy@gmail.com

With each current pulse of the spherical motor, the shaft of the motor moves by an angle. The current pulses sent to the motor must be in a certain order considering the rotation axis. As is known, each motor winding has a certain inductance and resistance value. Since the stator windings contain inductance and resistance, the Is current echospectically increases with the L / R time constant of the winding. In general, smaller motors rotate faster due to low inductance and low rotor inertia. At higher rotational speeds, torque drop may occur because the winding inductance limits the rate of change of the current, so that the current cannot reach its full value at each step. Most of the studies in literature have focused on magnetic flux density, torque change and control in addition to traditional and new spherical motor studies.

It is very important to determine the parameters of permanent magnet motors. Especially motor parameter changes can cause incorrect determination of rotor and speed position in sensorless control methods and incorrect determination of motor flux in direct moment control [20]. For parameter estimation of permanent magnet motors, extended kalman filter [21], recursive least squares method [22], model reference adaptive system [23], finite elements method, artificial neural networks [24] and adaptive prediction methods [25] have been proposed.

Since magnetic flux primarily flows through the iron core with high permeability, a core-type spherical motor shows the advantage of low-leakage magnetic flux. On the contrary, because of not having an iron core within the winding, this slotless spherical motor has the disadvantage of a high leakage of magnetic flux. However, considering the absence of a reluctance difference between the stator and rotor, this motor has the advantage of position control [26].

Akkaya proposed a slotless spherical motor model with a two-pole permanent magnet rotor of 8 mm diameter and a stator consisting of 3 independent windings [16,27]. By examining the results of analytical and numerical analysis on the engine, he stated in the experimental study that 360 ° rotation freedom was obtained in the z axis and 44 ° rotation freedom was obtained upward-downward. In another study [27], she compared the torque size analytical and simulation results of a three-coil spherical motor. This study examined mutual inductance and self-inductance change according to r=4, 20, 40 and 60 mm radius and the change in the number of coils for a spherical motor. Changes in inductance were found through curve fitting method with the coefficients of cubic equations. In this context, first the structure of the spherical motor was introduced, and then numerical analysis was performed with Ansys Maxwell 3D software. Magnetic flux and torque changes were investigated. Basic equations were given for inductance calculations. Inductance change was examined in section 3. Finally, the results were evaluated in the last section.

## 2. DESIGN AND MATERIALS

Stator poles on the stator were placed at specified angles. Stator poles were placed with an angle of 45° to x axis and with an angle of 120° to z axis. Figure 1 shows the windings at the designed stator.

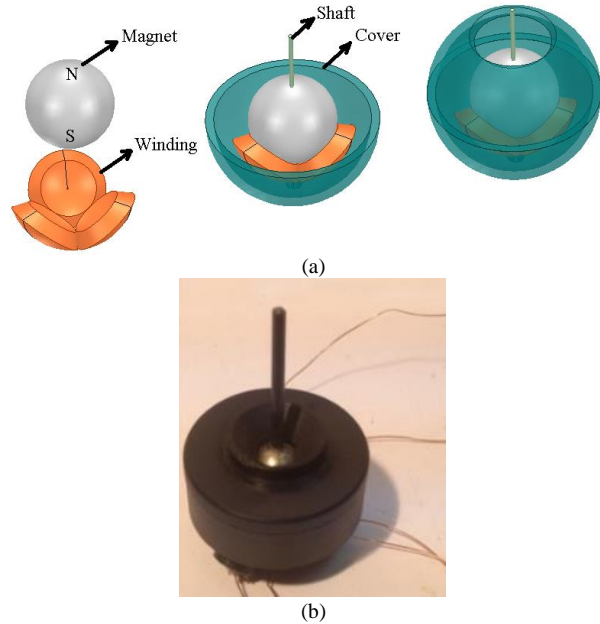


Figure 1. a) Designed stator, windings and general appearance of the spherical motor, b)Prototype motor

By designing stator windings spherically, the aim was to use the structure of the spherical actuator in the most effective way.

Table 1. The properties of this model

Properties	Value
The number of stator windings	3
The number of rotor poles	2
Stator radius	5.7 (mm)
Rotor radius	4 (mm)

Figure 2 shows the air core winding used in spherical actuator/motor. R0 is the radius of rotor, R1 is the distance of the inner surface of winding to the centre, R2 is the distance of the outer surface of winding to the centre, ζ0 is the angular diameter of air core, and ζ1 is the angular diameter of winding [28,29].

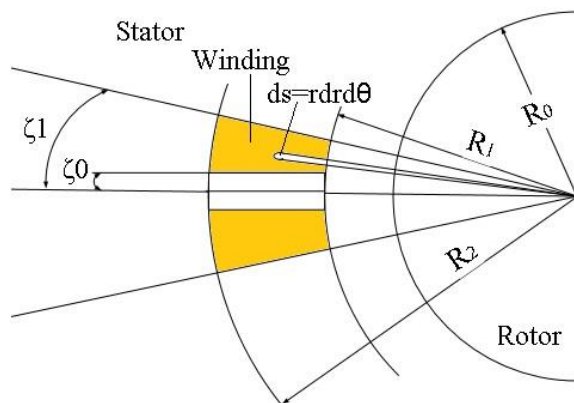


Figure 2. Winding with air core winding.



Stator winding length;

$$Lc = R2 - R1 \quad (1)$$

According to the winding parameters given in Figure 2, since the amount of amperage increases in constant current as small  $\zeta_1$  angle of the  $\zeta_0$  angle enlarges, torque will increase. Similarly, with the outer diameter increasing as the inner diameter remains constant, the torque size will increase. However, decreasing flux amount as it moves away from the rotor limits the length of the outer diameter of the winding. Similarly, increasing the inner angle by considering the outer angle of the winding constant decreases the torque magnitude [17].

Eq. 2 was used to find out the physical rotation capacity of the rotor based on the stator winding numbers of stator. This rotation capacity expresses the angle of rotor shaft touching the windings. Here,  $\theta=135^\circ$ .

$$\theta_r = \theta - \zeta_1 \quad (2)$$

**Table 2.** Changes in winding outer angle and movement angle according to the number of windings

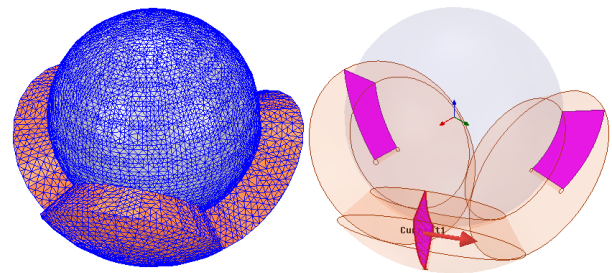
Number of windings	Winding outer angle	Movement angle
6	20,7°	114,3°
5	24,55°	110,45°
4	30°	105°
3	37,76	97,24°
2	45°	90°

### 3. FINITE ELEMENTS MODEL

With the complexity of the spherical motor structure and the difficulty of analytical calculation, in order to obtain more accurate results, the finite element method (FEM) is widely used in the analysis of the electromagnetic characteristics of the motor.

In Ansys Maxwell, which is widely preferred in the literature, first the dimension to be designed for machine geometry is selected. Machine geometry is created according to the calculated geometry data. Magnetostatic analysis is selected for the drawn model. As model parameters; the boundary conditions are given in AmperTurn (Figure 3). The designed machine is made ready for analysis. Although it may seem small in the program algorithm, Mesh identification is very important for the machine to provide sufficient solution. Unknown magnitudes (potential, electric field,...) in each network region are represented by scalar or vectorial partial differential equations. Therefore, increasing the number of networks increases the accuracy of the obtained sizes. According to the analysis algorithm, first the system to be modeled is divided into four-sided elements and a finite element network is formed (Figure 3). During the

solution process, networks are improved through iterations and errors are reduced. Before starting the field solution, the conduction current in the conductors is simulated and the field solution starts. The magnetic field strength (H) at the midpoints of the edges of each four-sided element in the finite element network is calculated by using the current density. In case of the magnetic core material not being linear, the Newton-Raphson method uses magnetic field strength. In addition, the B-H curve of the material is used to solve a nonlinear problem with a linear approach. With this approach, close results are obtained for the nonlinear solution of H. The solver writes down the completed solution in a file and performs error analysis. With adaptive analysis, the solver minimizes the faultiest quadratic elements and continues the solution until the specified error criterion is met. As a result, inductance values are calculated, current density, magnetic field strength, magnetic flux density and forces are obtained [30]. Since the spherical motor has three-dimensional geometry, 3D simulations require a large amount of computing time [31].



**Figure 3.** Mesh structure and excitation current

Total number of elements is 168131. Winding excitation currents are shown. The finite element analysis software is used to calculate the magnetic field and torque of the motor. Under the condition of steady magnetic field, the Maxwell equation is:

$$\nabla \times H(x, y, z) = J(x, y, z) \quad (3)$$

$$\nabla \cdot B(x, y, z) = 0 \quad (4)$$

In order to obtain the value of flux density components in the spherical coordinate system, conversion is made from the cartesian coordinate system (Equation 5).

$$\begin{bmatrix} B_{1r} \\ B_{1\theta} \\ B_{1\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta \cos\varphi & \sin\theta \sin\varphi & \cos\theta \\ \cos\theta \cos\varphi & \cos\theta \sin\varphi & -\sin\theta \\ -\sin\varphi & \cos\varphi & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

where  $r, \theta, \varphi$  are the three components of the air-gap flux density in the spherical coordinate system.

Lorentz force law is very useful if there is a torque or force generated by a conductor carrying current in a magnetic field produced by a permanent magnet.

$$dF = I_w dl \times B \tag{6}$$

In Eq. 6, dl is the differential length of the part. A torque is generated on the rotor due to the interaction between the stator windings passing through it and the magnetic field of the rotor [32].

$$T = - \int_v r(J \cdot B) dv \tag{7}$$

Here; v is the volume of the conductor carrying the current. According to torque equation given in Eq. 8, torque size is influenced by the changes in size given in Figure 2. If integral is taken over the entire winding volume, the torque equation is written as in eq. 5[16-17,27].

$$T_c = -J \int_{R_1}^{R_2} \int_{\zeta_0}^{\zeta_1} \left\{ \int_c r B_{Tr}(r, \theta, \phi) dl \right\} r dr d\zeta \tag{8}$$

Here  $B_{Tr}(r, \theta, \phi)$  is the magnetic flux density in spherical coordinates and J is the flux density. As shown in Equation 8; torque is influenced by current, magnetic flux density and winding dimensions. Although there is sufficient amperage to the windings, the characteristic of the magnet material changes the torque size. Using NdFeB35 or SmCo28 permanent magnets in rotor structure of spherical motor would increase torque and power density values up [33]. NdFeB52 magnet which have the best performance permanent magnets with 406 kJ/m<sup>3</sup> maximum energy multiply are made by Neodymium-Ferrite-Boron material [34]. For this reason, torque variation was investigated for NdFeB type materials.

**3.1. Torque Change of Magnet Change**

In Figures 4 and 5, torque was examined according to exchange of NdFeB type magnets and Ansys Maxwell 3D model with continuous state analysis.

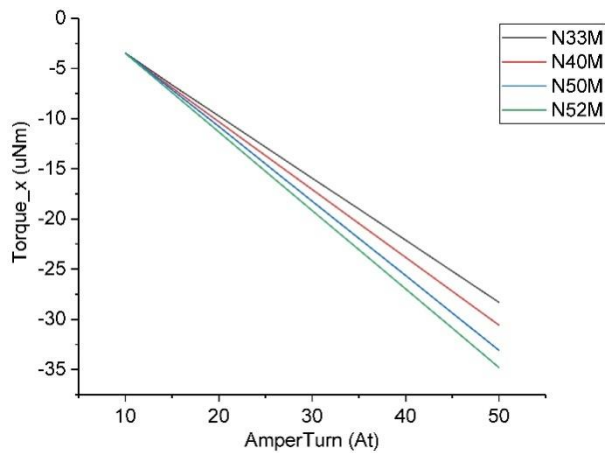


Figure 4. Torque change in x component according to magnet types

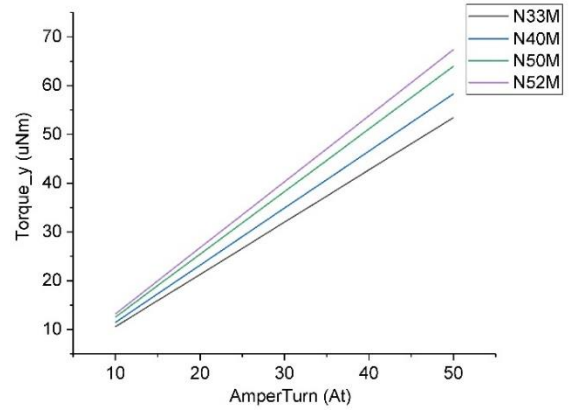


Figure 5. Torque change in y component according to magnet types

As a result of the excitation current applied to the winding, x and y rotate in their axis. The torque increased linearly as the magnet flux density increased. The Residual Flux Density (Br) of the N52M is 1.3063 T, while the N33M Br is 1.034 T. The Br value of N52M magnet is higher than other magnet types. As shown in Figures 4 and 5, the torque value increased by the amount of Br increase.

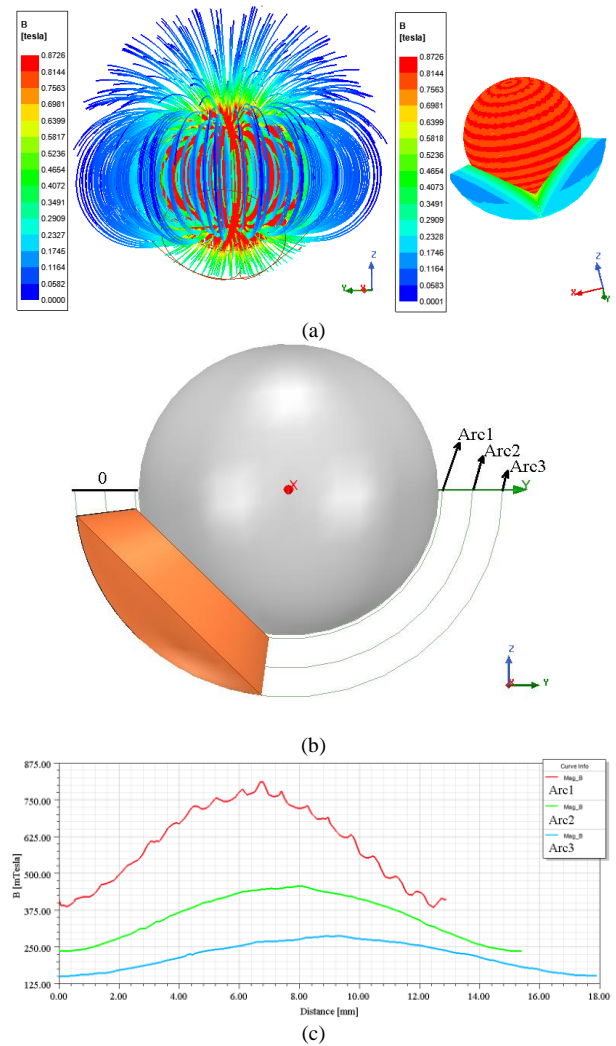


Figure 6. a) Model magnetic flux density distribution, b) Display of springs along the single winding of the model, c) Magnetic field change along the springs

As shown in Figure 6, the distribution of the area is uniform due to the air core. The area density in the winding surface region is about 0.8 T. The increase in the field distribution as the magnet approaches and the decrease in the points where the polarity changes are the expected results. Flux density decreased approximately twice as the polarity shift limit was approached. The torque change according to the increase in the size of the spherical motor is examined in Figure 7. Scale 1 here is the size of the model that is discussed and prototyped. Scale increase is in the form of dimension-fold.

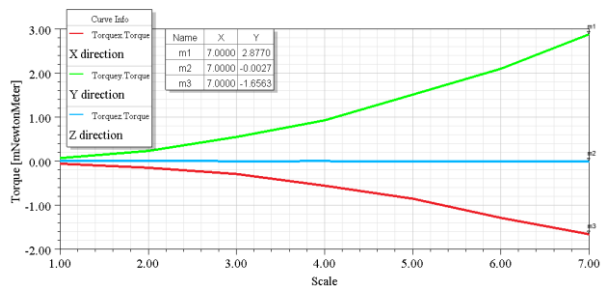


Figure 7. Torque change according to total size ratio change

When the scale is 1, the outer radius is 5.7 mm and when the scale is 7, the outer radius is 39.9 mm. Since no change in flux density is observed as the scale increases, it was not given in a graph. However, according to the calculations, the torque per volume (Torque / Volume) decreases as the scale ratio increases. This has to be taken into consideration when designing permanent magnet spherical motors in large diameters.

**3.2. Analysis of Spherical Motor Inductance Changes**

Magnetostatic solver gives inductance and coupling values in matrix form. As is known, inductance is the difficulty of flux against the change of time. The inductance matrix shows the relationship between current and total flux for three independent current cycles. Let’s consider three windings placed on the sphere in Figure 8a. The axes of the coils passing through the center of the sphere, the currents passing through winding 1, winding 2 and winding 3 will affect each other. This interaction between coils is called mutual inductance. Figure 8b shows the inductance and mutual inductance of three winding with 120° difference between and equivalent circuit.

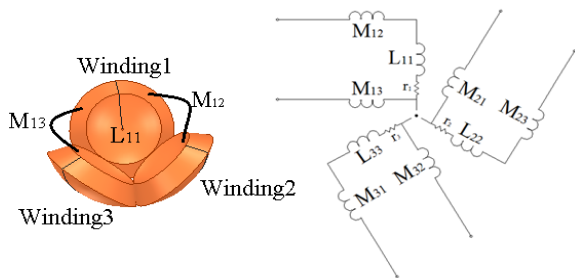


Figure 8. Winding inductance relationship and equivalent circuit model

The rate of change in the flux of circle per unit change in the current is called the inductance of winding [35]. We can show the inductance of first winding with L11, the mutual inductance of the first winding due to the flux generated by the second winding with M12 and the mutual inductance of the first winding due to the flux generated by the third winding with M13. Self inductance and mutual inductance values for rotor diameters of different values for two-winding, three-winding, four-winding, five-winding and six-winding were found by using Ansoft (Ansys) Maxwell 3D. Self-inductance curve for r=4, 20, 40 and 60 mm radius in terms of the number of winding is shown in Figure 9.

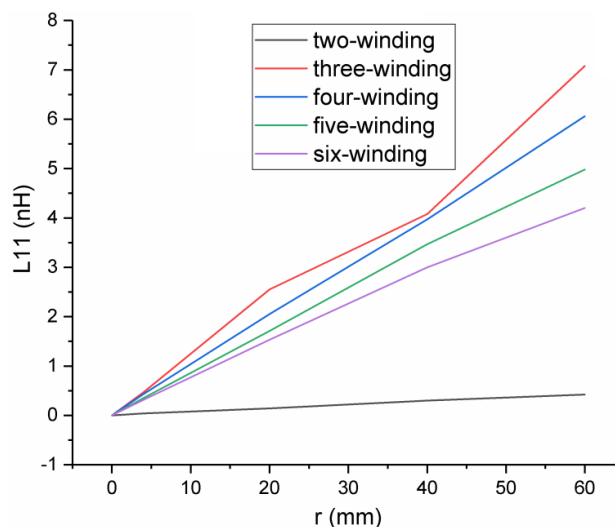


Figure 9. Self-inductance graph of the first winding for the number of winding

As can be seen in Figure 9, as the radius length of the spherical motor increases, self inductance also increases. Each winding inductance change was examined to be able to estimate inductance values of different radius. According to this graph, separate curve fitting processes were conducted according to L11 self-inductance value found as a result of analysis. According to the result of this operation, inductance equation was written down by using f(x) function. These functions are given in Eq. 9.

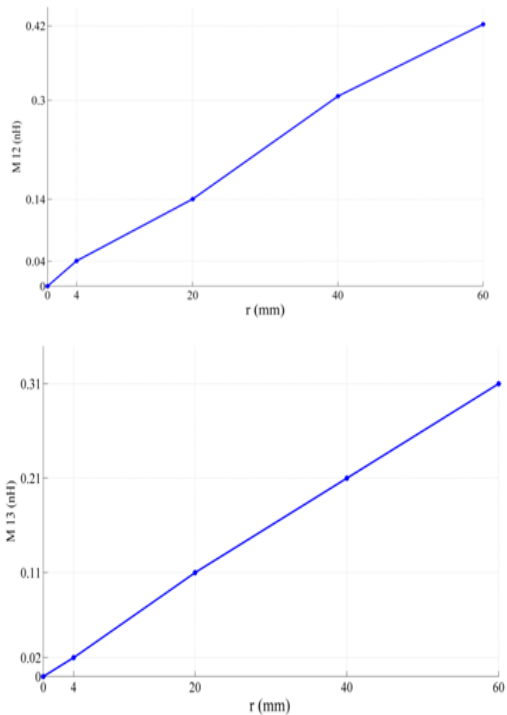
$$f(x) = p_1 x^3 + p_2 x^2 + p_3 x + p_4 \tag{9}$$

Here, p1, p2, p3 and p4 constants. x expresses r radius.

**Table 3.** Function coefficients according to the number of winding

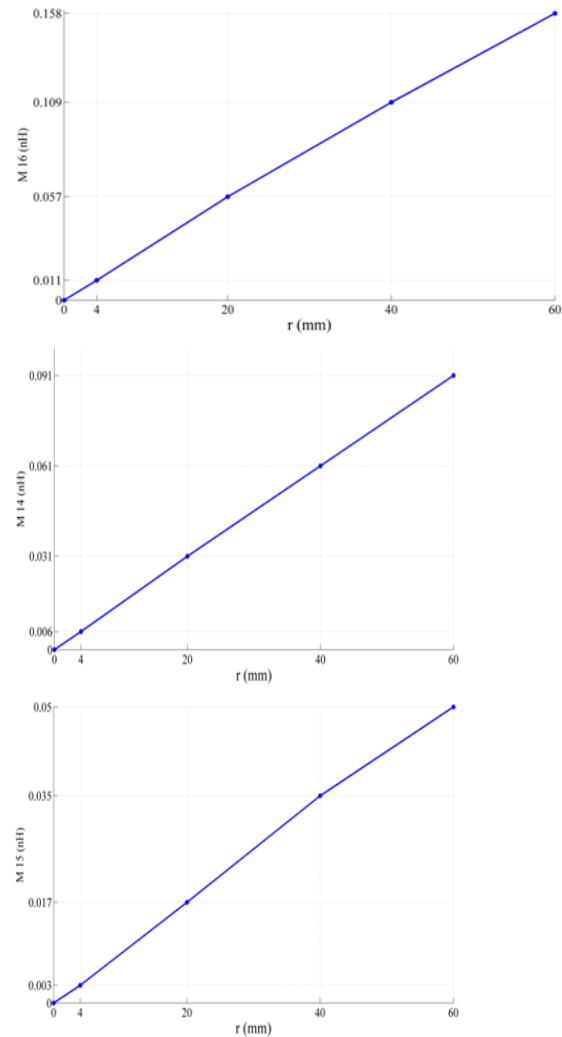
Number of winding	F(x)	Self-inductance
2	$p_1 = -4,971 \times 10^{-5}$ $p_2 = 0,004565$ $p_3 = 0,03331$ $p_4 = 0,5882$	$L_{11}$
3	$p_1 = 5,947 \times 10^{-5}$ $p_2 = -0,005296$ $p_3 = 0,2276$ $p_4 = -0,3573$	$L_{11}$
4	$p_1 = 6,667 \times 10^{-6}$ $p_2 = -0,000586$ $p_3 = 0,1124$ $p_4 = -0,007806$	$L_{11}$
5	$p_1 = -6,906 \times 10^{-6}$ $p_2 = 0,000518$ $p_3 = 0,07614$ $p_4 = 0,03868$	$L_{11}$
6	$p_1 = -4,595 \times 10^{-6}$ $p_2 = 0,0002184$ $p_3 = 0,07316$ $p_4 = 0,01948$	$L_{11}$

Figure 10-11 shows the mutual inductance curve according to two and three-winding and for r=4, 20, 40 and 60 mm radius.



**Figure 10.** Mutual inductance graph of the first winding for two and three winding

In Figure 10, the mutual inductance graph of the first winding from the flux generated by four, five and six winding  $M_{14} - M_{15} - M_{16}$  curve according to r values was drawn with Matlab.



**Figure 11.** Mutual inductance graph of the first winding for four, five and six winding

As can be seen in Figure 10 and 11, common inductance values also increase as the radius length of the spherical motor increases. Each winding inductance change was examined to be able to estimate inductance values of different radius. Equation 9 was used for the calculation of self inductance coefficients. Common inductance coefficients based on winding numbers are given in Table 4.

**Table 4.** Function coefficients according to the number of winding

Number of winding	F(x)	Mutual inductance
2	$p_1 = -2,132 \times 10^{-6}$ $p_2 = 1,936 \times 10^{-4}$ $p_3 = 0,002648$ $p_4 = 0,02715$	$M_{12}$
3	$p_1 = 3,836 \times 10^{-7}$ $p_2 = -4,653 \times 10^{-5}$ $p_3 = 0,006783$ $p_4 = -0,005211$	$M_{13}$
4	$p_1 = 8,172 \times 10^{-8}$ $p_2 = -8,807 \times 10^{-6}$ $p_3 = 0,001765$ $p_4 = -0,0005226$	$M_{14}$
5	$p_1 = -3,757 \times 10^{-8}$ $p_2 = 1,884 \times 10^{-6}$ $p_3 = 0,0008672$ $p_4 = 0,0001036$	$M_{15}$
6	$p_1 = 7,155 \times 10^{-8}$ $p_2 = -1,246 \times 10^{-5}$ $p_3 = 0,003157$ $p_4 = -0,001135$	$M_{16}$

#### 4. CONCLUSION

In this study, the numerical analysis of the 3-winding 2-pole spherical motor was carried out with Ansys Maxwell using the finite element method. Spherical structure was determined for the effective location of the windings. In addition, to examine the control and reaction time,

inductance changes according to the number of winding and winding radius of the spherical motor to be designed were calculated. Inductance value increased as the winding radius increased. According to these simulation results, and by considering the physical limitations of the motor and the radius of the magnet to be used as rotor, a spherical motor with three winding was applied. The stator windings were designed in a spherical manner, thus the rotor was surrounded and the existing space was used effectively. Static magnetic analysis of spherical motor with permanent magnet rotor was performed. It was found that torque increases as magnet flux increases. This increase is proportional to the increase in Br. The best performance for air core spherical motor model was seen in N52 magnet type. Choosing this magnet and characteristics with high Cuire temperature values (M, SH and UH) can increase production costs. With the change of size (scale change) in the analyzed spherical motor, the torque increases, but the torque density decreases. Future studies can focus on the open or close cycle dynamic control of the spherical actuator and numerical analysis of torque changes can be conducted by adding soft iron.

#### DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS

The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

#### REFERENCES

- [1] Bai S., Li X. and Angeles J., "A review of spherical motion generation using either spherical parallel manipulators or spherical motors", *Mechanism and Machine Theory*, 140: 377-388, (2019).
- [2] He J., Fan X., Mu J., Wang C., Qian J., Li X. and Chou X., "3D full-space triboelectric-electromagnetic hybrid nanogenerator for high-efficient mechanical energy harvesting in vibration system", *Energy*, 116871, (2020).
- [3] Li X., Liu J., Chen W. and Bai S., "Integrated design, modeling and analysis of a novel spherical motion generator driven by electromagnetic principle", *Robotics and Autonomous Systems*, 106: 69-81, (2018).
- [4] Xia C., Li H. and Shi T., "3-D magnetic field and torque analysis of a novel Halbach array permanent-magnet spherical motor", *IEEE Transactions on Magnetics*, 44(8): 2016-2020, (2008).
- [5] Li H. and Li T., "End-effect magnetic field analysis of the Halbach array permanent magnet spherical motor", *IEEE Transactions on Magnetics*, 54(4): 1-9, (2018).
- [6] Li Z. and Wang Y., "Finite element analysis and structural optimization of a permanent magnet spherical actuator", *Elektronika ir Elektrotechnika*, 114(8): 67-72, (2011).
- [7] Wang W., Wang J., Jewell, G. W. and Howe D., "Design and control of a novel spherical permanent magnet actuator with three degrees of freedom", *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, 8(4): 457-468, (2003).
- [8] Zhang L., Yan L., Chen W. and Liu J., "Current optimization of 3-DOF permanent magnet spherical motor", *In 2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Beijing, China, 1111-1116, (2011).



- [9] Yan L., Liu Y. and Jiao Z., "Electromagnetic Modeling and Structure Optimization of a Spherical Force Sensing System", *Sensors*, 19(3): 552, (2019).
- [10] Chai F., Gan L., Pei Y. and Yuan L., "Design and Analysis of a Novel Multi-DOF PM Spherical Motor", *In 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Harbin, China, 1-6, (2019).
- [11] Gan L., Pei Y. and Chai F., "Tilting torque calculation of a novel tiered type permanent magnet spherical motor", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(1): 421-431, (2019).
- [12] Park H. J., Lee H. J., Cho S. Y., Ahn H. W., Lee K. D., Park C. Y., and Lee, J., "A performance study on a permanent magnet spherical motor", *IEEE transactions on magnetics*, 49(5): 2307-2310, (2013).
- [13] Wiak S., Napieralska Juszcak E., Ikejiri S., Hirata K. and Maeda S., "Proposal of electromagnetic spherical actuator with 3-DOF", *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 29(4): 994-1003, (2010).
- [14] Xia C., Song P., Li H., Li B. and Shi T., "Research on torque calculation method of permanent-magnet spherical motor based on the finite-element method", *IEEE Transactions on Magnetism*, 45(4): 2015-2022, (2009).
- [15] Öner Y., "A permanent magnet spherical rotor design and three dimensional static magnetic analysis", *Sensors and Actuators A: Physical*, 137(2): 200-208, (2007).
- [16] Akkaya Oy S., "Robotik sistemler için sabit mıknatıslı küresel motor, sürücü tasarımı ve uygulaması", *Doktora tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2014).
- [17] Dalcalı A., "Küresel Eyleyicinin Rotor Mıknatıs Malzemesi Ve Stator Sargı Geometrisinin Eyleyici Torkuna Etkisi", *Journal Of Engineering Sciences*, 7(1): 145-151, (2019).
- [18] Kim H.Y., Kim Y., Gweon D.G. and Jeong J., "Development of a Novel Spherical Actuator with Two Degrees of Freedom", *Transaction on Magnetism*, 20(2): 532-540, (2015).
- [19] Qian Z., Wang Q., Li G., Guo X., Hu C. and Yan H., "Design and analysis of permanent magnetic spherical motor with cylindrical poles", *In 2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Busan, South Korea, 644-649, (2013).
- [20] Kürüm H. Y. and Akın E., " Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Parametre Tespit", *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(1): 183-191, (2018).
- [21] Shi Y. C., Sun K., Huang L. P. and Li Y., "Online identification of permanent magnet flux based on extended Kalman filter for IPMSM drive with position sensorless control", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 59(11): 4169-4178, (2012).
- [22] Liu Q. and Hameyer K., "A fast online full parameter estimation of a PMSM with sinusoidal signal injection", *Proc. IEEE Energy Convers. Congr. Expo*, 4091-4096, (2015)
- [23] Thierry B., Nicolas L., Babak N. M. and Farid M. T., "Online identification of PMSM parameters: Parameter identifiability and estimator comparative study," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 47(4): 944-1957, ( 2011).
- [24] Polat M., Öksüztepe E., Kürüm H., "Switched reluctance motor control without position sensor by using data obtained from finite element method in artificial neural network", *Electrical Engineering* , 98(1): 43-54, (2016).
- [25] Öksüztepe E, Omac Z., Polat M., Celik H., Selcuk A.H., Hasan K. , "Sensorless field oriented control of nonsinusoidal flux-distribution permanent magnet synchronous motor with a FEM based ANN observer", *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences* , 24(4): 2994-3010, (2016).
- [26] Cho S., Lee H. J. and Lee, J., "Study on Multi-DOF Actuator for Improving Power Density", *Energies*, 12(21), 4204, (2019).
- [27] Akkaya Oy S. and Gürdal O., "Design and Application of a Two Pole Spherical Permanent Magnet Motor", *TEM Journal*, 7(1): 53-58, (2018).
- [28] Yan L., Chen IM., Lim C.K., Yang G. and Lee KM., "Torque Modeling. In: Design, Modeling and Experiments of 3-DOF Electromagnetic Spherical Actuators", *Mechanisms and Machine Science*, 4. Springer, Dordrecht, (2011).
- [29] Yan Liang, Chen I.M., Lim C.K., Yang G., Lin W. and Lee K.M., "Design and analysis of a permanent magnet spherical actuator", *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, 13(2): 239-248, (2008).
- [30] Fenercioğlu A. and Tarimer İ., "Bir manyetik sistemin Maxwell 3D alan simülâtörü ile statik manyetik analizinin çözüm süreçleri", *Journal of Selcuk-Technic*, 6(3): 221-240, (2007).
- [31] Gürdal O. and Yusuf Ö., "Sabit Mıknatıslı Demir Nüveli Küresel Eyleyicinin Bilgisayar Destekli 3 Boyutlu Statik Manyetik Analizi Ve Uygulaması", *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20(4): 433-442, (2005).
- [32] Wang J., Jewell G.W. and Howe D., " Analysis, design and control of a novel spherical permanent-magnet actuator", *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, 145(1): 61-71, (1998).
- [33] Tarimer İ. and Dalcalı A., "Effects of Permanent Magnets on Torque and Power Density of Spherical Motors", *TEM Technics Technologies Education Management*, 10(2): 144-149, (2015).
- [34] <https://www.arnoldmagnetics.com/products/neodymium-iron-boron-magnets/>, online available:12.07.2019
- [35] Gürdal O., "Elektromanyetik Alan Teorisi", Seçkin Yayıncılık, Ankara, (2007).





POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Ti6Al4V alaşımı üzerine sol-jel yöntemi ile yapılan hidroksiapatit kaplamalarda oksalik asitin korozyon dayanımına etkisi

## *The Effect of oxalic acid on corrosion resistance of hydroxyapatite sol-gel coated Ti6Al4V alloys*

*Yazar(lar) (Author(s)): Canser GÜL<sup>1</sup>, Serhat MUTAF<sup>2</sup>, Hülya DURMUŞ<sup>3</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-1339-936X*

*ORCID<sup>2</sup>: 0000-0003-0502-7176*

*ORCID<sup>3</sup>: 0000-0002-7270-562X*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Gül C., Mutaf S ve Durmuş H, "Ti6Al4V alaşımı üzerine sol-jel yöntemi ile yapılan hidroksiapatit kaplamalarda oksalik asitin korozyon dayanımına etkisi", *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1395-1402, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.713353

# Ti6Al4V Alaşımı Üzerine Sol-Jel Yöntemi ile Yapılan Hidroksiapatit Kaplamalarda Oksalik Asitin Korozyon Dayanımına Etkisi

## The Effect of Oxalic Acid on Corrosion Resistance of Hydroxyapatite Sol-Gel Coated Ti6Al4V Alloys

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Ti6Al4V alaşımının oksalik asit katkılı hidroksiapatit kaplanması / Coating of Ti6Al4V alloy with oxalic acid added hydroxyapatite.
- ❖ Oksalik asitin kaplamaların morfolojisine ve korozyon dayanımına etkisinin incelenmesi / Investigation of the effect of oxalic acid on the morphology and corrosion resistance of coatings.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Ti6Al4V alaşımı numuneler sol-jel yöntemi kullanılarak farklı miktarlarda oksalik asit katkılı olacak şekilde hidroksiapatit kaplanmış ve korozyon dayanımları incelenmiştir. / Ti6Al4V alloy samples were coated with hydroxyapatite with different amounts of oxalic acid by using sol-gel method and their corrosion resistance was investigated.



**Şekil.** Numune üretimi akış şeması / **Figure.** Sample production flow chart

### Amaç (Aim)

Bu çalışmada biyomalzeme uygulamalarında kullanılmak üzere etkili bir biyomalzeme geliştirilmesi amaçlanmıştır. / In this study, it was aimed to develop an effective biomaterial for use in biomaterial applications.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Hidroksiapatit çözeltilerine farklı oranlarda oksalik asit eklenmiş ve Ti6Al4V alaşımı numunelerinin kaplama morfolojisinde ve korozyon dayanımlarında oluşturduğu değişimler incelenmiştir. / Different ratios of oxalic acid were added to the prepared hydroxyapatite solutions, and the changes in the coating morphology and the corrosion resistance of Ti6Al4V alloys were examined.

### Özgünlük (Originality)

Ti6Al4V alaşımı sol-jel yöntemi ile oksalik asit katkılı hidroksiapatit kaplanmıştır. / Oxalic acid added hydroxyapatite was coated on the Ti6Al4V alloy via sol-gel method.

### Bulgular (Findings)

OA katkı oranının artması ile kaplama adacıkları arasındaki mesafelerin kapandığı, morfolojide gözlemlenen çatlakların azaldığı ve korozyon dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. / With the increase of the OA contribution rate, the distances between the coating islets were closed, the cracks observed in morphology were decreased and corrosion resistance were increased.

### Sonuç (Conclusion)

Maksimum katkılı numunelerde korozyon hızının diğer katkılı numunelere göre 10 kat ve katkısız numuneye göre ise 5 kat daha az olduğu gözlemlenmiştir. / The corrosion rate in max additive samples were 10 times less than that of other additives and 5 times less than the samples without additives.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Ti6Al4V Alaşımı Üzerine Sol-Jel Yöntemi ile Yapılan Hidroksiapatit Kaplamalarda Oksalik Asitin Korozyon Dayanımına Etkisi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Canser GÜL\*, Serhat MUTAF, Hülya DURMUŞ**

Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, Türkiye

(Geliş/Received : 03.04.2020 ; Kabul/Accepted : 07.05.2020)

## ÖZ

Bu çalışmada biyomalzeme uygulamalarında kullanılmak üzere etkili bir biyomalzeme geliştirilmesi amaçlanmış ve sol-jel yöntemi kullanılarak Ti6Al4V altlık malzemeler üzerine hidroksiapatit kaplamalar yapılmıştır. Sol-jel yöntemi ile biyoaktifliği ve korozyon dayanımı yüksek, çatlaksız bir kaplama tabakası elde etmek amaçlanmıştır. Bu amaçla, hazırlanan hidroksiapatit çözeltilerine farklı oranlarda oksalik asit (OA, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) eklenmiş ve OA'nın kaplama morfolojisinde oluşturduğu değişimler incelenmiştir. Analizlerde, enerji dispersif spektrumlu taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDS) ve X-Işını kırınımı (XRD) kullanılmıştır. Kaplama yapılmış numunelerin korozyon özelliklerinde meydana gelen değişimler ise hazırlanan yapay vücut sıvısı içinde üç elektrotlu sistem kullanılarak gerçekleştirilen elektrokimyasal-potansiyodinamik korozyon testleri ile incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda OA katkı oranının artması ile kaplama adacıkları arasındaki mesafelerin kapandığı, morfolojide gözlemlenen çatlakların azaldığı ve büyük ölçüde engellendiği gözlemlenmiştir. Korozyon hızları kıyaslandığında ise OA miktarının ağırlıkça % 0,001 olduğu ve 0,015 olduğu numunelerde korozyon hızının diğer katkılı numunelere göre 10 kat ve katkısız numuneye göre ise 5 kat daha az olduğu gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Ti6Al4V, sol-jel kaplama, biyomalzemeler, hidroksiapatit, oksalik asit.

## The Effect of Oxalic Acid on Corrosion Resistance of Hydroxyapatite Sol-Gel Coated Ti6Al4V Alloys

### ABSTRACT

In this study, it was aimed to develop an effective biomaterial for use in biomaterial applications, and hydroxyapatite coatings were made on Ti6Al4V substrate materials using the sol-gel method. With the sol-gel method, it was aimed to obtain a crack-free coating layer with high bioactivity and corrosion resistance. For this purpose, different ratios of oxalic acid (OA, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) were added to the prepared hydroxyapatite solutions, and the changes in the coating morphology of this chemical were examined. Scanning electron microscopy with energy dispersive spectrum (SEM-EDS) and X-Ray diffraction (XRD) were used for analyzes. The changes in the corrosion properties of the samples were investigated by electrochemical-potentiodynamic corrosion tests carried out using a three-electrode system in the prepared simulated body fluid. As a result of the study, it was observed that with the increase of the OA contribution rate, the distances between the coating islets were closed, the cracks observed in morphology were decreased and largely prevented. When the corrosion rates were compared, it was observed that in the samples where the amount of OA was 0.001 % by weight and 0.015, the corrosion rate was 10 times less than that of other additives and 5 times less than the samples without additives.

**Keywords:** Ti6Al4V, sol-gel coating, biomaterials, hydroxyapatite, oxalic acid.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Biyomalzemelerin vücut sıvısı içerisinde yüksek korozyon direncine, yüksek mukavemet ve düşük elastiklik modülüne, yüksek yorulma ve aşınma direncine sahip olması gerekmektedir. Bu gerekliliklerin yanı sıra uzun ömürlü olabilmesi ve sitotoksitesite oluşmaması için biyoyumluluk özelliklerinin geliştirilmesi de önemlidir. Biyomalzemeler içerisinde seramikler yüksek sertlik ve aşınma direnci gereken bölgelerde kullanılmaktadır. Polimerik malzemeler de kararlılıkları ve esneklikleri nedeni ile kullanılmaktadır [1].

Titanyum yüksek mukavemete, iyi biyoyumluluğa ve korozyon direncine sahiptir [2]. Genel olarak titanyum saf halde (tip 2) veya Ti6Al4V (tip 5) alaşımı biyomalzeme uygulamalarında, sert dokuya sahip bölgelerdeki yapay kemiklerde kullanılır. Yüzeyindeki oksit tabakası pasivasyon işlemlerinde kendiliğinden oluşmaktadır ve bu oksit tabakası titanyum ve alaşımlarına korozyon direnci sağlamaktadır. Saf titanyumun uygulama alanı kısıtlı mekanik özellikleri dolayısıyla sınırlı kalırken, daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu için kalça implantları, diz implantları, kemik vidaları gibi bölgeler için Ti6Al4V alaşımı kullanılmaktadır. Titanyum ve alaşım implantlarının başarısız olma durumları ise bu malzemelerin bulunduğu bölgelerde yüksek sürtünme katsayısına sahip metalin

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : canser.gul@cbu.edu.tr

aşınma durumunda belirli süre sonunda kalıntılar ortaya çıkarması ve bu kalıntıların ise iltihaplanma ile sonuçlanan kemik erimesi gibi sorunlara yol açmasıdır. Bu yüzden yenisi ile değiştirilmesi veya iyileşme sağlanmış ise ikincil operasyonlar ile vücuttan çıkarılması gerekmektedir [1].

Bütün metaller ve alaşımları vücut sıvısında korozyona uğramaktadır. Bu sırada alaşım bileşenleri iyonik formlarına oksitlenir ve çözünmüş oksijen hidroksit iyonlarına indirgenir. Titanyum ve alaşımları yüzeyindeki doğal tabaka ile buna karşı dirence sahiptir. Fakat bu tabaka lineer olmadığı için düşük tribolojik özellikler ve genel olarak yüzeye yakın olan bölgenin mukavemeti, sertlik ve aşınma direnci artırılması için yüzey işlemleri gerçekleştirilmektedir [3]. Bunun için genellikle yüzey işlemlerine ihtiyaç duyulur. Yapılan yüzey işlemleri ya doğal oksit tabakasını kalınlaştırmaya veya farklılaştırmaya yöneliktir ya da tamamen farklı malzeme ile yüzeyin kaplanmasını içerir. Yüzey oksidasyonu ve yüzeyde fiziksel biriktirme gibi yollar ile yüzeyde istenen kalınlıkta ve lineerlikte tabakalar elde edilir [1, 4-6].

Hidroksiapatit (HA,  $(Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2)$ ), memeli kemiklerinden ve mercanlardan [7] elde edilebilmesinin yanında laboratuvar ortamında gerekli reaksiyonlar sağlanarak da elde edilebilir [8]. Bu yöntemler birlikte çökeltme, hidrotermal veya sol-jel olarak nitelendirilebilir. HA'nın Ca/P stokiyometrik mol oranı 1.67 olup, hegzagonal ve monoklinik yapılar da bulunduğu bilinmektedir. Fakat bu yapılar laboratuvar ortamındaki şartlara göre, özellikle sol-jel metodunda kullanılan öncülerin miktarlarına ve türlerine göre değişiklik gösterebilmektedir [7]. Ca/P molar oranının 1.5 olması durumunda trikalsiyum fosfat oluşumu gözlemlenebilirken, 2 olması durumunda tetrakalsiyum fosfat yapısı gözlemlenebilmektedir [9]

HA, titanyum ve alaşımları gibi biyomalzemeler üzerine kaplandığında, implant ve çevre doku ile arasındaki uyumun arttığı görülmüştür. Dikici ve ark. (2017), hidroksiapatit kullanımının doku-implant arasındaki uyumu güçlendirdiği ve daha aktif bir bağ oluşturduğunu vurgulamıştır. Bu durumda iyileşme süresinin kısaldığını belirtmiştir [10]. Bunun sebebi HA ile çevre doku ile arasındaki bağın daha kolay kurulabilmesidir [11].

Kaplama yöntemi içerisinde hidroksiapatit (HA) kaplama oldukça yaygın kullanılmaktadır. HA, kalsiyum fosfat seramiklerindedir. Kalsiyum fosfat üzerine yapılan çalışmalar içerisinde Levitt ve ark. (1969), HA'nın veya florapatitin kalsiyum fosfat seramik malzemeler olarak kemik ve diş implantlarında kullanılmasını önermişlerdir [12]. HA'nın kullanımının geliştirilmesine yönelik bu amaçla günümüze kadar farklı çalışmalar yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda, uygulamalarda kemik kusurlarının onarımı, dental ve ortopedik implantlardaki kaplamalar kabul görmüştür. HA titanyum ve alaşımlarına kaplama yapıldığında metal yüzeye biyoaktif özellik kazandırmakta ve bahsedilen

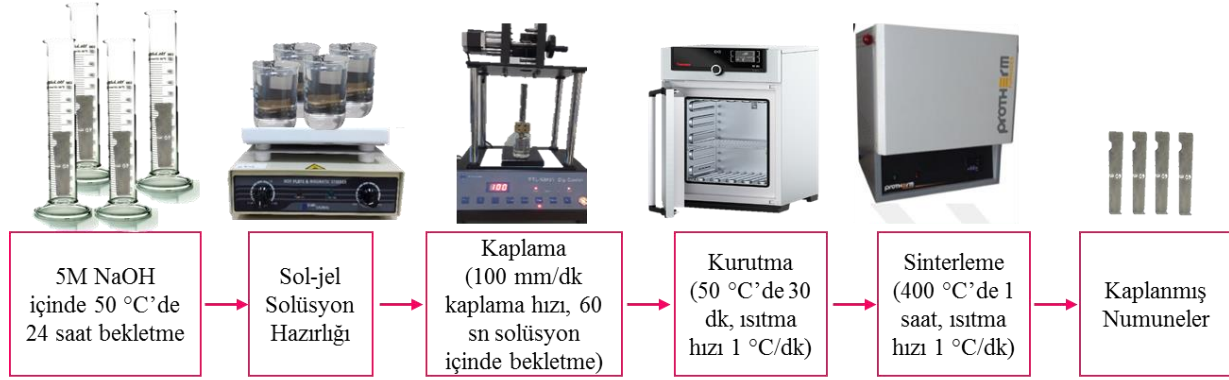
ikincil operasyonların çok büyük bir bölümünün önüne geçilmektedir [13].

Sol-jel daldırma metodu kullanılarak elde edilen ıslak jele uygulanan yaşlandırma, kurutma ve sinterleme gibi işlemler sırasında oluşan iç ve dış yüzey stres farklılıkları sebebiyle çatlaklar meydana gelmektedir. Bunun sebebi yapıdaki çözücü ve su gibi uçucu bileşenleri hızlı şekilde uzaklaşması ve oluşan kapiler etkidir [14]. Bunu düşürmek amacı ile ilgili temel prensip yapıya su ve alkole göre daha yüksek sıcaklıklarda buharlaşan bileşenlerin eklenmesidir [15]. Bu yüzden yüzey etken maddeler ve kurutma kontrol kimyasalları olarak adlandırılan maddeler kontrollü kurutma işlemlerine izin vermektedir. Ayrıca daha büyük ve birbirini tekrar eden gözenek yapısının elde edilmesini sağlamaktadır [14]. Hench (1990), yaptığı bir çalışmada buharlaşma hızını kontrol etmek için kurutma kimyasalı katkısı olan formamidi etanol ile ön başlatıcı solüsyonuna ekleyerek kullanmıştır. Formamid düşük buhar basıncına ve yüksek kaynama sıcaklığına sahip olduğu için uçucu bileşenlerin yapıdan uzaklaşması sırasında oluşabilecek lineer olmayan stresi düşürmüştür [15]. OA ise diğer bir DCCA olan daha dar ve geniş gözenek dağılımı elde etmek için kullanılmaktadır. Formamid kullanımına göre daha küçük gözenekler elde edilmektedir [14].

Yapılan bu çalışmada, Ti6Al4V alaşım numunelerinin üzerine sol-jel yöntemi kullanılarak hidroksiapatit kaplamalar oluşturulmuştur. Sol-jel yönteminde oluşması muhtemel çatlaklı yapıların azaltılabilmesi için hazırlanan solüsyona ağırlıkça % 0,001; 0,005; 0,01; 0,015 oranlarında OA ( $C_2H_2O_4$ ) eklenmiştir. Numuneler eklenen OA miktarına göre OA1, OA2, OA3 ve OA4 olarak ve katkısız kaplanmış olan numune ise S olarak adlandırılmıştır. Toplamda 5 farklı oranda kimyasal içeren, farklı hidroksiapatit çözeltileri kullanılarak kaplamalar yapılmıştır. Bu solüsyonların, kaplama morfolojilerine etkileri taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDS) ve X-Işını Kırınımı (XRD) kullanılarak incelenmiştir. Vücut içinde kullanıldığında implantın korozyon dayanımını da geliştirmesi beklenen bu kaplamalar, karakterize edildikten sonra elektrokimyasal-potansiyodinamik korozyon testlerine de tabi tutulmuş ve simüle edilmiş insan vücudu içinde in-vitro ortamda korozyon dayanımları incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Ti6Al4V alaşımı altlıklar hassas kesme cihazı kullanılarak  $30 \times 10 \times 2 \text{ mm}^3$  boyutlarında kesilmiş ve yüzeyleri 180 grid SiC zımparalar ile zımparalanmıştır. Yıkandıktan sonra hazırlanan 5M NaOH çözeltisi içinde  $50^\circ \text{C}$  etüv içine konulmuş ve yüzeylerinde oluşan oksit tabakasının kırılması için solüsyon içinde bu sıcaklıkta 24 saat bekletilmiştir. Daha sonra Şekil 1'de gösterilen solüsyon hazırlama ve kaplama aşamalarına geçilmiştir.



Şekil 1. Numune üretimi akış şeması (Sample production flow chart)

HA çözeltisi Kalsiyum öncüsü olarak seçilen kalsiyum nitrat tetrahidrat ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) ve fosfor öncüsü olan di-fosfor pentaoksit ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) kullanılarak hazırlanmıştır. Öncüler, ayrı ayrı etanol içinde 15 dk çözdürülmüştür ve kalsiyum içerikli solüsyon fosfor içerikli solüsyon içine damla damla eklenmiştir. Oda sıcaklığında 1 saat karıştırıldıktan sonra HA solüsyonu OA eklemeleri yapılması amacı ile farklı cam kaplara bölünmüştür. Çizelge 1'de de görüldüğü gibi, katkı maddesi içermeyen solüsyon S olarak isimlendirilirken, sırasıyla ağırlıkça % 0,001; 0,005; 0,01; 0,015 oranlarında OA ( $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$ ) içeren solüsyonlar ise OA1, OA2, OA3 ve OA4 şeklinde isimlendirilmiştir. Hazırlanan tüm solüsyonlar oda sıcaklığında 5 saat karıştırıldıktan sonra saydam şeffaf renkte gözlemlenmiş, oda sıcaklığında 48 saat yaşlandırmaya bırakılmış ve bu süre sonunda kaplanmaya hazır hale gelmiştir.

Çizelge 1. Kaplama içerikleri ve numune isimlendirilmesi (Coating contents and sample naming)

Numune Adı	OA miktarı (% ağı.)
S	0
OA1	0,001
OA2	0,005
OA3	0,01
OA4	0,015

Kaplanmamış ve farklı oranlarda DEA içeren hidroksiapatit solüsyonları ile kaplanmış Ti6Al4V numunelerin yüzey morfolojileri ZEISS Gemini 500 taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve bu cihaza ait enerji dağılımı spektrometresi (EDS) ile noktasal ve bölgesel EDS analizleri yapılmış ve böylece kaplamaların kimyasal değişimleri bu şekilde gözlemlenmiştir. Görüntüleme sırasında 5 kV ve EDS analizi sırasında 20 kV hızlandırma gerilimleri kullanılmıştır.

Kaplamaların yapısal analizlerinin gerçekleştirilmesi için yapılan X-ışını analizleri Bruker D8 Advance marka X-ışını Difraktometresi (XRD) kullanılarak saniyede  $0,03^\circ$  derece tarama hızında gerçekleştirilmiştir. Taramalar,

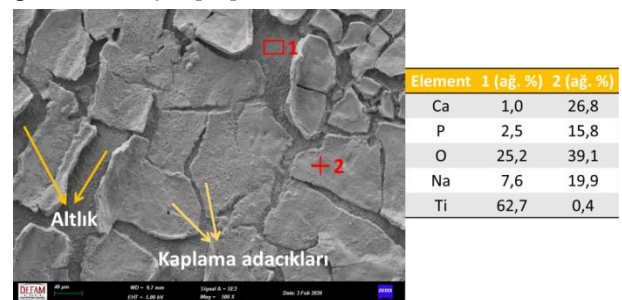
$\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda=1,5418 \text{ \AA}$ ) ışını ile 30 mA akım ve 40 V ile  $30-90^\circ$  aralığında yapılmıştır.

Numunelerin korozyon analizleri, Metrohm marka galvanostat/potansiyotat kullanılarak  $1 \text{ cm}^2$  kaplanmış yüzey alanına sahip olacak şekilde geri kalan kısımları yalıtılmış çalışma elektrodu numuneler kullanılarak SBF içinde gerçekleştirilmiştir. Hücre içinde çalışma elektrodu, grafit karşıt elektrot ve doymuş kalomel referans elektrot bulunmaktadır. Vücut sıvısı  $37^\circ \text{C}$  sıcaklığa ve 7,4 pH değerine ayarlanmış ve bu solüsyon içinde önce 1 dakika açık devre potansiyeli ölçülmüş, sonra numuneler  $-800 \text{ mV}$  ve  $1000 \text{ mV}$  aralığında  $1 \text{ mV/s}$  hız ile taranmıştır.

SBF hazırlanırken, Pasinli ve ark. (2010), yapmış olduğu çalışmada elde ettikleri çözeltinin oranları kullanılmıştır [17]. Son bileşenin ilave edilip tamamen çözündürülmesinin ardından pH, hazırlanan 1 M HCl çözeltisi kullanılarak 7,4'e ayarlanmıştır. Böylece, vücut içinde mevcut bileşime en yakın bileşim elde edilmiştir.

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

DCCA içermeyen solüsyon ile elde edilen kaplamaya ilişkin SEM-EDS analizinden elde edilen veriler göz önüne alındığında (Şekil 2), kaplamada yoğun çatlaklar meydana gelmiştir. Bu çatlaklı yapı Albayrak ve ark. (2017), yaptıkları çalışmada, sol-jel yöntemi ile benzer bir yol izlenerek yapılan ve AZ91 Mg alaşımı üzerine kaplanan DCCA katkısız HA kaplamalarda da gözlemlenmiştir [18].



Şekil 2. Sadece HA içeren, katkısız S numunesinin SEM-EDS görüntüsü (SEM-EDS image of pure S sample containing HA only)

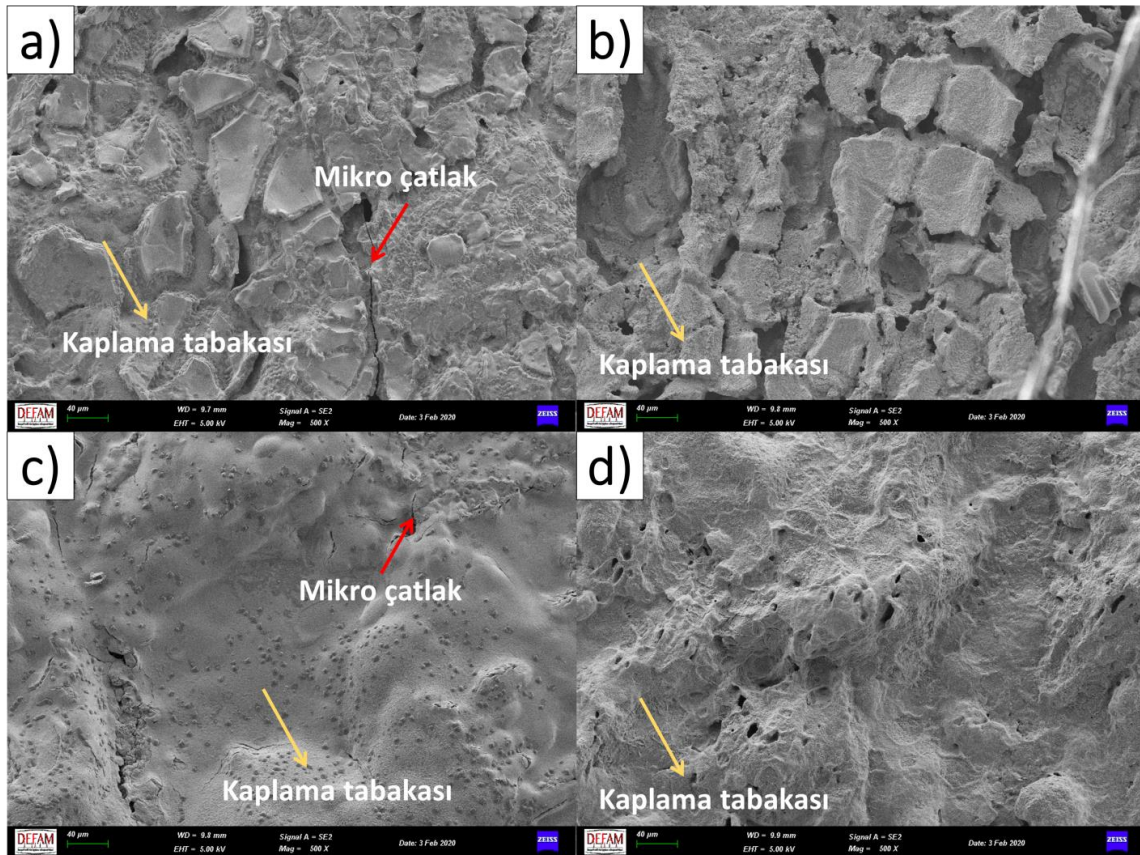


Bu çatlakların sebebi olarak Brinker ve ark. (1985) ve Schmidt (1988), yaptıkları çalışmalarda sol-jel yöntemi ile ürettikleri SiO<sub>2</sub> kaplamalarda kurutma sırasında artan termal gerilmeler nedeni ile kaplama tabakalarından çatlak oluşumlarının başladığını vurgulamıştır [19, 20]. Diğer bir yandan 2 ayrı bölgeden alınan EDS analiz verilerine göre kaplamaya ait noktada HA'nın başlıca içerdiği Ca, P ve O elementlerine, ayrıca bunun yanında Na elementine rastlanmıştır. Yüzey aktifleştirme işlemi için altlık malzemenin 1 gün süre ile NaOH çözeltisi içerisinde bekletilmesi ve daha sonra kaplama yapılmasından dolayı yapıda belirli oranda Na elementi görülmüştür. Kaplama adacığın olarak düşünülen bölgelerde ise, altlığa ait Ti elementi çok düşük oranlarda bulunmaktadır. Kaplama adacıklarının bazı bölgelerde altlık ile iyi bağ kuramadığı ve bu nedenle bu kısımlarda dökülmeler olduğu gözlemlenmiştir. Bu adacıkların aralarındaki bölgelerden alınan EDS analizinde ise beklendiği gibi yüksek oranda Ti elementine rastlanmıştır. Yüzey aktifleştirme işlemi ile daha da aktif olan yüzeylerin kaplanmayan bölgelerinde, sıcaklığın da etkisi ile hava ile temas etmesi sonucu TiO<sub>2</sub> oluşmuş ve bu nedenle O elementi de yapıda görülmüştür.

Belirli oranlarda OA içeren kaplama işlemi gerçekleştirilmiş numunelere ait SEM görüntülerine bakıldığında Şekil 3.a'da HA kaplama tabakasından oluşan bir katman görülmüştür. Fakat bu katmanın

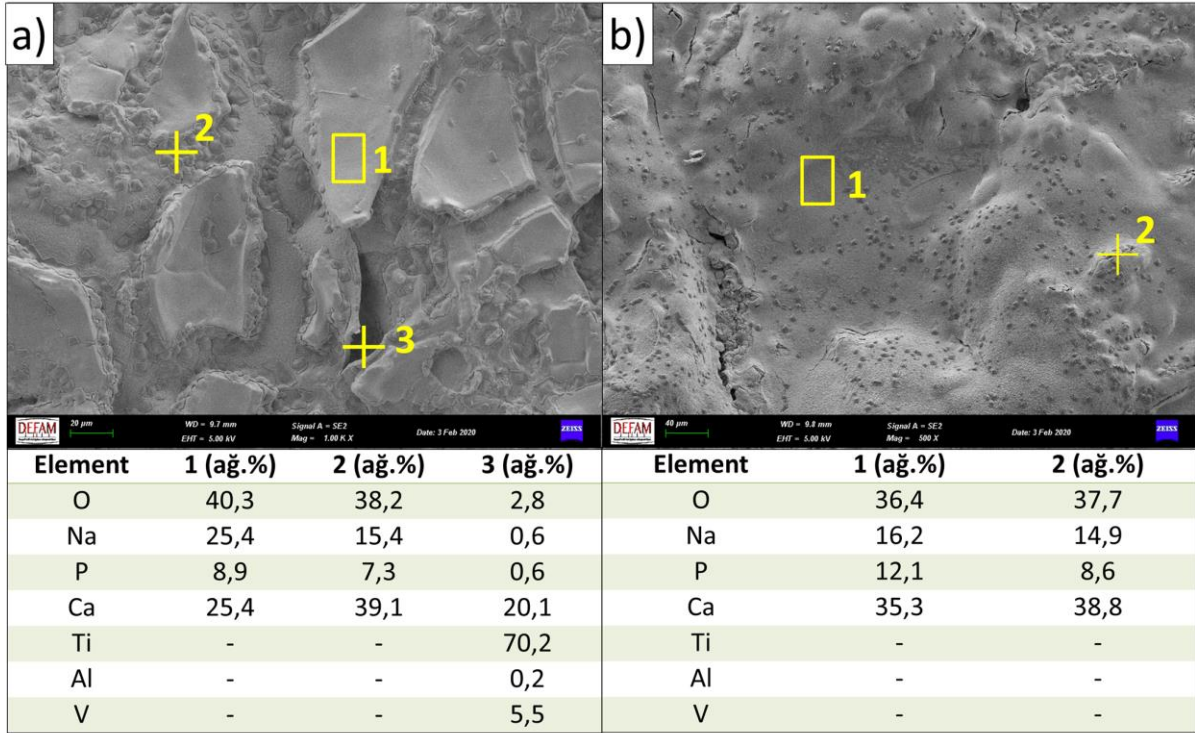
üzerindeki bölgede, her ne kadar altlık malzemesine ulaşan çatlak miktarı az olsa da, çatlaklı bir yapı gözlemlenmiştir. Bu durum OA oranının en düşük olduğu bu numunede sinterleme işlemi sırasında meydana gelen ısı artışının dengelenememesi ve altlık malzeme ile kaplama tabakası arasında oluşan anlık gerilmelerin çatlamlara neden olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca diğer numunelere ait görüntüler incelendiğinde OA miktarının artması ile bu çatlakların ortadan kalktığı görülmektedir. Şekil 3.c'de çatlakların yok olması ile birlikte yüzeyde oluşan tepelikler ve bunların üzerinde noktasal kalıntılar olduğu ve Şekil 3.d ile birlikte tepeliklerin hala kaldığı fakat kaplama yüzeyinin bazı bölgelerinde noktasal kalıntıların yerini ağsı yapıların olduğu gözlemlenmiştir. Gül (2019), yapmış olduğu çalışmada sol-jel yöntemi ile Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> kaplamalar yapmış ve kurutma kontrol kimyasalı kullanmıştır. Kaplamaların yüzeyinde çatlak kısımların azaldığı ve kimyasalın, ağsı ve iğnemsı bir morfoloji oluşturduğu gözlemlenmiştir [21].

Şekil 4'te verilmiş olan OA1 ve OA3 numunelerine ait EDS analizleri karşılaştırıldığında Şekil 4.a'da ilk kaplama katmanına, çatlak kısımları dolduran fakat farklılık gösteren bölgeye ve çukurlara ait 3 noktadan elde edilen analiz sonuçları verilmiştir. Şekil 4.a.2'de %38,8 Ca, %37,7 O ve %8,6 P elementlerine ait oranlar HA oluşumunu doğrulamaktadır ve altlık malzemeye ait



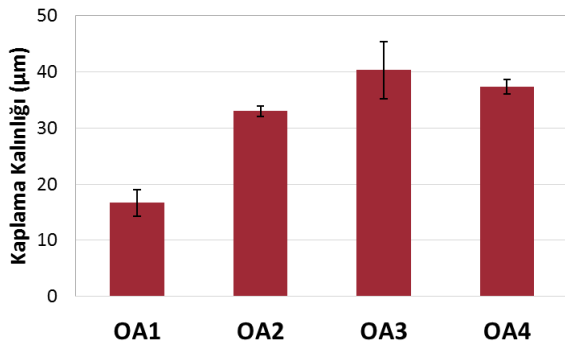
Şekil 3. Sırasıyla ağırlıkça % 0,001; 0,005; 0,01; 0,015 oranlarında oksalik asit (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) içeren, a) OA1, b) OA2, c) OA3 ve d) OA4 numunelerine ait SEM görüntüleri (SEM images of a) OA1, b) OA2, c) OA3 and d) OA4 samples containing 0.001, 0.005, 0.01, 0.015 % by weight oxalic acid (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), respectively.





Şekil 4. a) OA1 ve b) OA3 numunelerine ait EDS analizleri (EDS analysis of a)OA1 and b) OA3 samples)

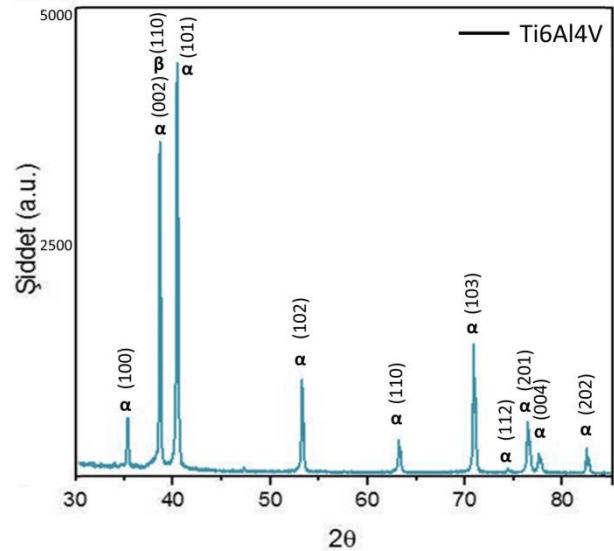
hiç sinyal olmamasından dolayı yapıda bulunan O elementinin tamamının HA'ya ait olduğu söylenebilir. Şekil 4.a'da 1 ve 2 noktaları birbirine yakın değerler gösterirken çukur bölgeden alınan verilerde yüksek oranda altlık malzemeye ait elementlere rastlanmıştır. Bu durum bu kısımda bir süreksizlik olduğunu göstermektedir. OA3 numunesine ait SEM-EDS görüntülerinde 2 ayrı noktadan alınan bilgiler sonucunda kaplama tabakasına ait Şekil 4b'deki 1 noktası yüksek oranda HA bileşenleri içermesinin yanında bu bölgede altlık malzemeyi gösteren herhangi bir bulguya rastlanmamıştır.



Şekil 5. Kaplama kalınlıklarındaki değişim (Change in coating thicknesses)

Gerçekleştirilen kaplama kalınlığı analizine ait veriler Şekil 5'te verilmiştir. Grafikte de görüldüğü gibi en düşük OA oranına sahip OA1 numunesinin diğer numunelere göre yaklaşık iki kat daha az kaplama

kalınlığına sahip olduğu görülmüştür. OA2, OA3 ve OA4 numuneleri kendi aralarında karşılaştırıldığında ise anlamlı bir farklılık gözlemlenmemiştir. Bu durumda bir miktar OA eklenmesi, kaplama kalınlığını bir miktar arttırmıştır, fakat bu miktardaki artış kaplama kalınlığını fazla etkilememiştir denilebilir. SEM görüntülerinde de görüldüğü gibi, OA miktarındaki artış, numunelerde kaplama kalınlıklarını arttırmaktan ziyade, kaplamalarda ağısı bir görüntü oluşturmuş ve bütünlüğü sağlamaya yönelik rol oynamıştır.

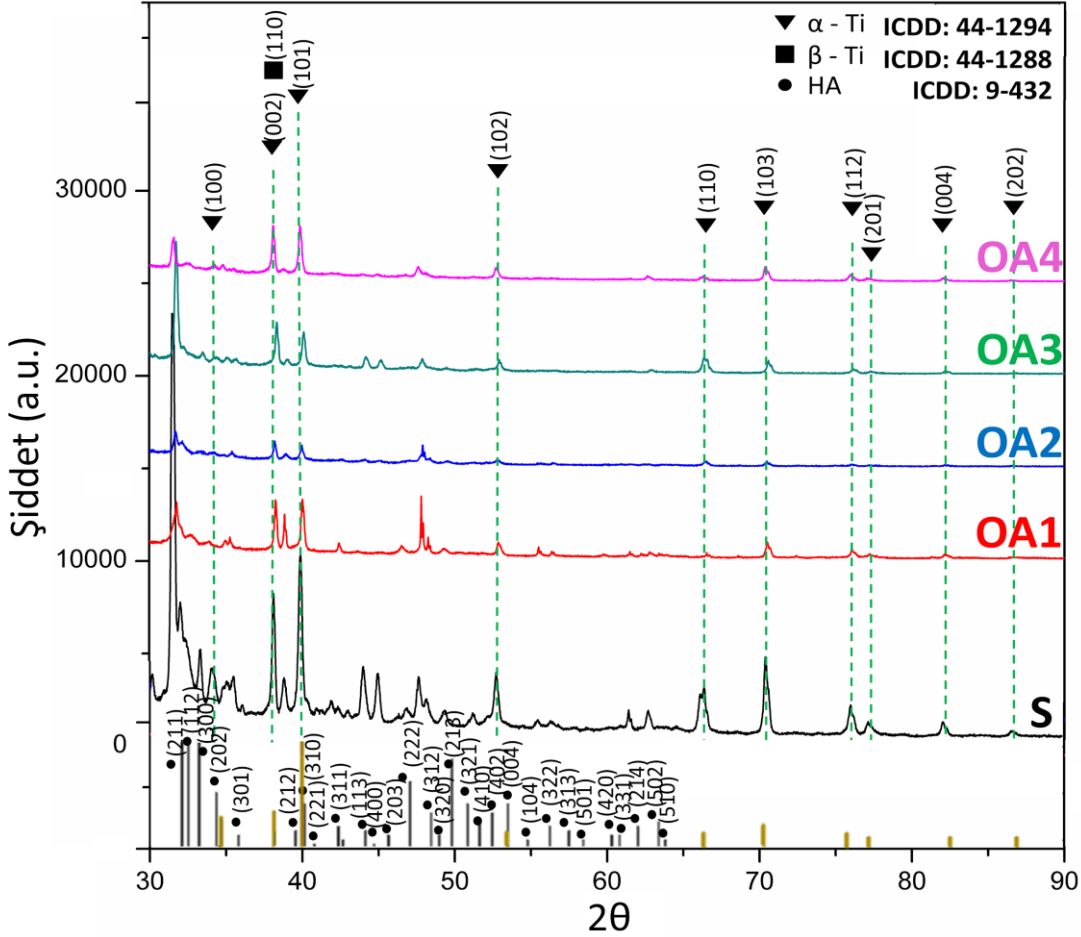


Şekil 6. Kaplanmamış Ti6Al4V altlık malzemesinin XRD grafiği (XRD plot of uncoated Ti6Al4V substrate material)

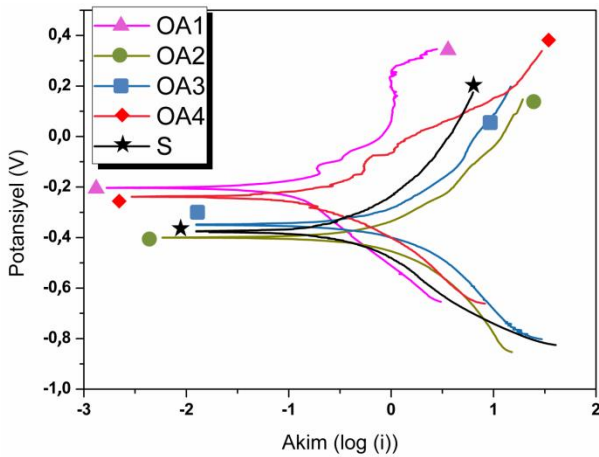
Ti6Al4V altlık malzemesine ait XRD grafiği Şekil 6'da verilmiştir. Bu piklere ait fazlar 44-1294 ICDD kart numarasına sahip  $\alpha$ -Ti ve 44-1288 ICDD kart numarasına sahip  $\beta$ -Ti şeklindedir.

Kaplanmış S, OA1, OA2, OA3 ve OA4 numunelerine ait XRD grafikleri ise Şekil 7'de gösterilmiştir. Elde edilen HA, 9-432 ICDD kart numaralı HA ile uyumludur.

HA piki haricinde yapıda altlık malzemesinden gelen  $\alpha$ -Ti ve  $\beta$ -Ti fazlarına ait pikler gözlemlenmiştir.  $38^\circ$ ,  $40^\circ$ ,



Şekil 7. Kaplanmış numunelerin XRD grafikleri (XRD graphs of coated samples)



Şekil 8. Tafel eğrileri (Tafel plots)

$53^\circ$ ,  $67^\circ$  ve  $70^\circ$   $2\theta$  değerlerindeki pikler incelendiğinde katkısız HA kaplı S numunesinde, Ti6Al4V alaşımına ait gözlemlenen pik şiddetlerinin, OA katkılı numunelerde azaldığı ve artan OA miktarı ile bu pik şiddetlerinin azalmaya devam ettiği gözlemlenmiştir. Bu durum yapıda çatlakların olduğu numunede daha çok altlıktan pik alınması ve çatlaklı yapı azaldıkça bu pik şiddetlerinin azalması ile ilişkilendirilebilir. Titanyum yüzeyinin aktif olması sebebi ile çok çabuk oksitlenebilen bir metaldir [22]. Bu nedenle kaplama işlemi öncesi NaOH çözeltisinde bekletilmekte ve bu oksit tabakası kırılmaktadır. Guleryuz ve ark. (2009), yaptıkları çalışmada Ti6Al4V oksitlenme davranışını incelemişlerdir. Kullanılan Ti6Al4V altlık malzemelerinin XRD pikleri bu çalışmadaki altlık malzemeler ile de tutarlılık göstermekte olup, Guleryuz ve ark. (2009), çalışmalarında gözlemlenen oksit fazları ise kaplanmış numunelerde gözlemlenmemiştir [23].

**Çizelge 2.** Tafel ekstrapolasyon sonuçları (Tafel extrapolation results)

Numune Adı	Ecorr (mV)	Ba (mV)	Bc (mV)	Rp (Ohm)	Icorr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Korozyon hızı (mm/yıl)
S	-0,421	0,266	0,569	132,558	0,598	0,0529
OA1	-0,210	0,337	0,283	517,294	0,129	0,0114
OA2	-0,376	0,451	0,427	62,850	1,516	0,134
OA3	-0,336	0,414	0,539	60,098	1,695	0,150
OA4	-0,1730	0,277	0,201	257,781	0,191	0,017

SBF içinde yapılan elektrokimyasal potansiyodinamik polarizasyon sonucu elde edilen Tafel eğrileri Şekil 8’de ve Tafel ekstrapolasyonu verileri ise **Çizelge 2**’de verilmiştir. Bu veriler incelendiğinde, OA içermeyen S numunesi ile OA2 ve OA3 numunelerinde yakın sonuçlar ve en iyi sonucun da OA1 ve OA4 numunelerinde olduğu görülmüştür. Her iki numune için de korozyon hızı yaklaşık 0,01 mm/ yıl şeklinde hesaplanmıştır. OA1 ve OA4 katkılı numunelerin korozyon hızlarının, katkısız halde kaplanan numuneye göre yaklaşık 5 kat ve OA2 ve OA3 numunelerine göre ise yaklaşık 10 kat daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Her iki numunenin de Ecorr değerinin pozitif olduğu bölgede yani tafel eğrisinin anodik kolunda lokalize olmuş çukurcuk korozyonu belirtileri gözlemlenmiştir. Ayrıca tüm numuneler incelendiğinde anodik akım yoğunluğundaki azalma, katodik akım yoğunluğundaki azalmayı baskılayarak Ecorr’un artmasına neden olur. Bu durum ise OA1 ve OA4 numunelerinde belirgindir. Diğer numunelere kıyasla kaplama tabakasının tamamen çözünmesi yerine bazı bölgelerden çukurcuk şeklinde çözünerek altlık malzeme ile vücut sıvılarının minimum temasının sağlanması hem korozyon hızını düşürmesi hem de Ecorr değerini arttırması nedeni ile daha olumludur şeklinde yorumlanabilir. Bu durum Khalajabadi ve ark. (2017), yaptıkları çalışmada çukurcuk korozyonunun, yüzeydeki boşluk bulunan bölgelere nüfuz eden SBF solüsyonundan kaynaklandığını ayrıca bununla birlikte baloncuk şeklindeki hidrojen gazının ve çatlak yoğunlaşmasının kaplamadaki CaP bileşenlerini yok edici etki yarattığından ve koruyuculuğu bozduğundan bahsetmiştir [24].

## 6. SONUÇ (CONCLUSION)

Yapılan çalışmada Ti6Al4V alaşımı üzerine sol-jel yöntemi ile katkısız ve ağırlıkça % 0,001; 0,005; 0,01; 0,015 oranlarında OA katkılı HA kaplamalar yapılmış ve bu kaplamaların yüzey morfolojileri ile korozyon performanslarındaki değişim incelenmiştir. Elde edilen bulgular ise özetle şu şekildedir:

- Katkısız kaplanmış numune yüzeyinde çatlaklı yapıda HA ve altlık malzeme gözlemlenirken OA katkılı numunelerde çatlak miktarı artan katkı miktarı ile azalmıştır. SEM görüntülerinde daha homojen ve çatlaksız bir yapı gözlemlenmiştir. Ayrıca yapılan

XRD analizleri ile artan OA miktarı ile altlık malzemesine ait piklerde azalma gözlemlenmiştir.

- Katkı miktarının artması kaplama kalınlığını önce bir miktar arttırmış, fakat fazla miktarda eklenen OA ile kaplama kalınlığı sabit kalmıştır.
- OA miktarının ağırlıkça % 0,001 olduğu ve 0,015 olduğu numunelerde korozyon hızının diğer katkılı numunelere göre 10 kat ve katkısız numuneye göre ise 5 kat daha az olduğu gözlemlenmiştir.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma MCBÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 2020-016 nolu proje ile desteklenmiştir.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] De Viteri, V. S. ve Fuentes, E., “Titanium and Titanium Alloys as Biomaterials” *Tribology - Fundamentals and Advancements*, **InTech Publishing**, Rijeka, (2013).
- [2] Wang, K. “The use of titanium for medical applications in the USA” *Materials Science and Engineering: A*, 213(1-2): 134–137, (1996).
- [3] Landolt, D., “Corrosion and Surface Chemistry of Metals”, **EPFL Press**, Lausanne Switzerland, (2007).
- [4] Shukla, A. K., Balasubramaniam, R., ve Bhargava, S., “Properties of passive film formed on CP titanium, Ti–6Al–4V and Ti–13.4Al–29Nb alloys in simulated human body conditions” *Intermetallics*, 13(6): 631–637, (2005).
- [5] Suetsugu Y ve Tateishi T. “Chapter 6, Implants and biomaterials (hydroxyapatite)”, **World Scientific Publishing Co Pvt Ltd**, Singapore, (2008).
- [6] Massaro, C., Baker, M. A., Cosentino, F., Ramires, P. A., Klose, S., ve Milella, E. “Surface and biological evaluation of hydroxyapatite-based coatings on titanium deposited by different techniques”, *Journal of Biomedical Materials Research*, 58(6): 651–657, (2001).
- [7] Guzmán Vázquez C., Piña Barba, C. ve Munguía, N., “Stoichiometric hydroxyapatite obtained by precipitation

- and sol gel processes”, *Revista Mexicana de Fisica*, 51(3):284–293, (2005).
- [8] Rao, R.R., Roopa, H.N. ve Kannan, T.S., “Solid state synthesis and thermal stability of HAP and HAP –  $\beta$ -TCP composite ceramic powders”, *Journal of Materials Science Materials in Medicine*, 8(8): 511–518, (1997).
- [9] Yılmaz, B., Alshemary, A. Z. ve Evis, Z., “Co-doped hydroxyapatites as potential materials for biomedical applications”, *Microchemical Journal*, 144: 443-453, (2019). doi: 10.1016/j.microc.2018.10.007
- [10] Dikici, B., Topuz, M., Koç, S., Yılmaz, H., Niinomi, M. ve Nakai, M., “Zirkonya Takviyeli Hidroksiapatit (HA) Bazlı Biyoaktif Hibrid Kaplamaların Korozyon Duyarlılıkları”, *Engineering Sciences*, 12(1): 66-77, (2017). doi: 10.12739/NWSA.2017.12.1.1A0374
- [11] Liu, D.-M., Yang, Q., ve Troczynski, T. “Sol-gel hydroxyapatite coatings on stainless steel substrates”, *Biomaterials*, 23(3):691–698, (2002).
- [12] Levitt, S.R., Crayton, P.H., Monroe, E.A. ve Condrate, R.A. “Forming method for apatite prostheses”, *Journal of Biomedical Materials Research*, 3(4): 683–684, (1969).
- [13] LeGeros, R.Z. “Properties of Osteoconductive Biomaterials: Calcium Phosphates”. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 395: 81–98, (2002).
- [14] Brinker, C.J. ve Scherer, G.W. “Sol-Gel Science”, The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing, *Academic Press*, Oxford, (1990).
- [15] Brook, R., “Sol-Gel Technology for Thin Films, Fibers, Preforms, Electronics and Specialty Shapes”, *Advanced Materials*, *Verlag GmbH & Co. KGaA*, Weinheim, (1988).
- [16] Hench, L.L., ve West, J.K., “The sol-gel process”, *Chemical Reviews*, 90(1): 33–72, (1990).
- [17] Pasinli, A., Yuksel, M., Celik, E., Sener, S., ve Tas, A. C., “A new approach in biomimetic synthesis of calcium phosphate coatings using lactic acid-Na lactate buffered body fluid solution”, *Acta Biomaterialia*, 6(6):2282–2288, (2010).
- [18] Albayrak, S., Çinici, H., Çalın, H., Cömert, C., “AZ91 magnezyum alaşımının sol-jel yöntemiyle hidroksiapatit kaplanması”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(8): 954-956, (2017).
- [19] Schmidt, H., “Chemistry of Materials Preparation by the Sol-Gel Process”, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 100:51–64, (1988).
- [20] Brinker, C. J., Scherer, G. W. ve Roth, E. P., “Sol  $\rightarrow$  gel  $\rightarrow$  glass: II. Physical and structural evolution during constant heating rate experiments”, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 72(2-3): 345-368, (1985).
- [21] Gül C, “TM yöntemiyle üretilen AZ91 magnezyum alaşımının sol-jel yöntemiyle Ta2O5 kaplanması ve karakterizasyonu”, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2019).
- [22] Textor, M., Sittig, C., Frauchiger, V., Tosatti, S. ve Brunette, D. M., “Properties and Biological Significance of Natural Oxide Films on Titanium and Its Alloys”, *Titanium in Medicine*, 171–230, *Springer*, Berlin, (2001).
- [23] Guleryuz, H. ve Cimenoglu, H., “Oxidation of Ti–6Al–4V alloy”, *Journal of Alloys and Compounds*, 472(1-2): 241–246, (2009).
- [24] Khalajabadi, S.Z., Yajid, M.A. M., Haji Abu, A.B., Ahmad, N., Redzuan, N., Ismail, A.F., Asadi S., Noshadi, I., “In vitro biocorrosion, antibacterial and mechanical properties of silicon-containing coatings on the magnesium-hydroxyapatite nanocomposite for implant applications”, *Materials Chemistry and Physics*, 214: 449–463, (2018)



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# A note on nearly hyperbolic cosymplectic manifolds

*Nearly hiperbolik kosimplektik manifoldlar üzerine bir not*

*Yazar(lar) (Author(s)): Müge KARADAĞ*

*ORCID: 0000-0002-5722-5441*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Karadağ M., “A note on nearly hyperbolic cosymplectic manifolds”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1403-1406, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.765076

# A Note on Nearly Hyperbolic Cosymplectic Manifolds

## Highlights

- ❖ Sub manifolds of nearly hyperbolic cosymplectic manifolds were investigated.
- ❖ Distributions of Sub manifolds were defined.
- ❖ Integrability conditions were investigated.
- ❖ Integrability conditions were determined for the distributions of these sub manifolds.
- ❖ A pseudo submanifold  $M$  of a nearly  $\tilde{M}$  hyperbolic cosymplectic manifold which is totally geodesic,  $D_\theta, D_\mu$  distributions with  $D_\mu \oplus \langle \xi \rangle$  and  $D_\theta \oplus D_\mu$  are proved integrable but  $D_\theta \oplus \langle \xi \rangle$  or not.

## Graphical Abstract

$$\varphi^2 X = X + \eta(X)\xi$$

$$g(X, \xi) = \eta(X), \quad \eta(\xi) = -1$$

$$\varphi(\xi) = 0, \quad \eta \circ \varphi = 0$$

$$g(\varphi X, \varphi Y) = g(X, Y) - \eta(X)\eta(Y)$$

$$i-) TM = D_\theta \oplus D_\mu \oplus \langle \xi \rangle,$$

$$ii-) D_\theta \text{ is slant distribution with slant angle } \theta \neq \frac{\pi}{2},$$

$$iii-) D_\mu \text{ is anti-invariant, that is; } \varphi D_\mu \subseteq T^\perp M.$$

It is shown that  $[X, Y] \in D_\theta \oplus D_\mu$  for any vector fields  $X, Y$  in  $D_\theta \oplus D_\mu$ . On the other hand,

$$(\bar{\nabla}_X g)(Y, \xi) = \bar{\nabla}_X g(Y, \xi) - g(\bar{\nabla}_X Y, \xi) - g(Y, \bar{\nabla}_X \xi) = 0$$

and from the last equation;

$$g(\bar{\nabla}_X Y, \xi) = 0$$

for any vector fields  $X, Y$  in  $D_\theta \oplus D_\mu$ . In the same way, it can be written,

$$g(\bar{\nabla}_Y X, \xi) = 0$$

for any vector fields  $X$  and  $Y$  in  $D_\theta \oplus D_\mu$ . If (3.14) and (3.15) use, it can be defined by

$$g([X, Y], \xi) = 0$$

for any vector fields  $X, Y$  in  $D_\theta \oplus D_\mu$ . In this case, the proof is complete.

## Aim

Determine the integrability requirements of the distribution for the sub manifolds of the Nearly Hyperbolic Cosymplectic Manifolds.

## Design & Methodology

Definition, theorem and proof method are used.

## Originality

Setting the distribution integrability requirements for the sub manifolds of Nearly Hyperbolic Cosymplectic Manifolds.

## Findings

A pseudo submanifold  $M$  of a nearly hyperbolic cosymplectic manifold  $\tilde{M}$  which is totally geodesic,  $D_\theta, D_\mu$  distributions with  $D_\mu \oplus \langle \xi \rangle$  and  $D_\theta \oplus D_\mu$  are proved integrable but  $D_\theta \oplus \langle \xi \rangle$  or not.

## Conclusion

It is think that, the results which are obtained in this study are important for differential geometers who are dealing with nearly hyperbolic cosymplectic metric manifolds, the results which are stated in this study can be handled in different form.

## Declaration of Ethical Standards

The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.



# Nearly Hiperbolik Kosimplektik Manifoldlar Üzerine Bir Not

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Müge KARADAG\*

Faculty of Arts and Sciences, Department of Mathematics, Inonu University, Turkey

(Geliş/Received : 06.07.2020 ; Kabul/Accepted : 20.07.2020)

## ÖZ

Son yıllarda hiperbolik kosimplektik manifoldlara olan ilgi artmaktadır. Bu çalışmada bir nearly hiperbolik kosimplektik manifoldun pseudo-slant altmanifoldları derinlemesine araştırılıp incelenmiştir. Özellikle bu tip manifoldların distribusyonlarının integrallenebilirlik koşulları araştırılmıştır. Böylece total geodezik bir nearly hiperbolik kosimplektik  $\tilde{M}$  manifoldunun pseudo slant  $M$  altmanifoldu için  $D_\theta$  ve  $D_\mu$  distribusyonları ile  $D_\mu \oplus \langle \xi \rangle$  ve  $D_\theta \oplus D_\mu$  nın integrallenebilir olduğu,  $D_\theta \oplus \langle \xi \rangle$  nın integrallenebilir olmadığı ispatlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Pseudo slant altmanifold, nearly hiperbolik kosimplektik manifold, integrallenebilirlik şartları.

# A Note on Nearly Hyperbolic Cosymplectic Manifolds

## ABSTRACT

Interest in hyperbolic cosymplectic manifolds has increased in recent years. In this paper, pseudo slant submanifolds of a nearly hyperbolic cosymplectic manifold have been explored deeply. In particular, the integrability conditions of distributions on such manifolds have been investigated. So, for a pseudo slant submanifold  $M$  of a nearly hyperbolic cosymplectic manifold  $\tilde{M}$  which is totally geodesic,  $D_\theta, D_\mu$  distributions with  $D_\mu \oplus \langle \xi \rangle$  and  $D_\theta \oplus D_\mu$  are proved integrable but  $D_\theta \oplus \langle \xi \rangle$  or not.

**Keywords:** Pseudo slant submanifold, nearly hyperbolic cosymplectic manifold, integrability condition.

## 1. INTRODUCTION

Upadhyay and Dube [1] have investigated and described almost hyperbolic metric  $(\phi, \xi, \eta, g)$  structure. Joshi and Dube [2] have explored semi invariant submanifolds of an almost  $r$ -contact hyperbolic submanifold. Dogan and Karadag [3] have researched on slant submanifolds of an almost hyperbolic contact metric manifolds. Uddin, Wong and Mustafa [4] have surveyed on warped product pseudo slant submanifolds of a nearly cosymplectic manifold. Ahmad and Ali [5] have introduced the notion of semi invariant submanifolds of a nearly hyperbolic cosymplectic manifold. In addition ; Ahmad and Ali [6] have studied CR-submanifolds of a nearly hyperbolic cosymplectic manifold. Pseudo-slant submanifolds of a Sasakian manifold is studied by Khan and Khan [7]. De and Sarkar [8] have studied pseudo-slant submanifolds of trans-sasakian manifold. Blair [9] has been working on geometry of contact and symplectic manifolds for a long time. Fujumoto and Olszak [10,11] have many studies on cosymplectic manifolds. In [12] and [13] have studied contact metric manifolds. Endo, Yano and Goldberg have studied on almost cosymplectic manifolds [14,15]. Pseudo slant submanifolds of a nearly hyperbolic cosymplectic manifold have been explored and then a solution has been tried to find on a pseudo submanifold of a nearly hyperbolic cosymplectic manifold has been evaluated and determined. In this study, pseudo slant

submanifolds of nearly hyperbolic cosymplectic manifold have been examined and some results have been obtained on this manifolds. In particular, the integrability conditions of the distributions of these manifolds have been investigated. Firstly,  $n$ -dimensional almost hyperbolic contact metric manifold  $\tilde{M}$  which is given with almost hyperbolic contact metric structure  $(\phi, \xi, \eta, g)$  has been defined. Also, it is obtained some interesting results for integrability of a nearly hyperbolic cosymplectic manifold.

## 2. MATERIAL AND METHOD

### 2. 1. Preliminaries

The aim of this study was redefined and studied for nearly cosymplectic metric manifolds based on [1], [2] and [4]. Now, it can give a brief description and some results on distribution of nearly hyperbolic cosymplectic manifolds. Let  $\tilde{M}$  be an  $(2n + 1)$ -dimensional almost hyperbolic contact metric manifold with almost hyperbolic contact metric structure  $(\phi, \xi, \eta, g)$ . Here  $\phi$  is a tensor of type  $(1,1)$ ,  $\xi$  is a vector field called structure vector field and  $\eta$  is the 1-form which are satisfying the followings

$$\phi^2 X = X + \eta(X)\xi \quad (1)$$

$$g(X, \xi) = \eta(X), \quad \eta(\xi) = -1 \quad (2)$$

$$\phi(\xi) = 0, \quad \eta \circ \phi = 0 \quad (3)$$

$$g(\phi X, \phi Y) = g(X, Y) - \eta(X)\eta(Y) \quad (4)$$

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : muge.karadag@inonu.edu.tr

for any vector fields  $X$  and  $Y$  in  $TM$ . Also, it is showed that

$$g(\varphi X, Y) = -g(X, \varphi Y) \tag{5}$$

An almost hyperbolic contact metric manifold with almost hyperbolic contact metric structure  $(\varphi, \xi, \eta, g)$  is said to be nearly hyperbolic cosymplectic manifold [4] if

$$(\bar{\nabla}_X \varphi)Y + \varphi(\bar{\nabla}_Y X) = 0 \tag{6}$$

$$\bar{\nabla}_X \xi = 0 \tag{7}$$

for all  $X, Y \in TM$ .

Let  $M$  be submanifold of a nearly hyperbolic cosymplectic manifold  $\tilde{M}$  with induced metric  $g$  and if  $\nabla$  and  $\nabla^\perp$  are the induced connections on the tangent bundle  $TM$  and the normal bundle  $T^\perp M$  of  $M$ , respectively, then Gauss and Weingarten formulae are given by

$$\bar{\nabla}_X Y = \nabla_X Y + h(X, Y) \tag{8}$$

and

$$\bar{\nabla}_X N = -A_N X + \nabla_X^\perp N \tag{9}$$

For all  $X, Y$  in  $TM$  and  $N \in T^\perp M$ , where  $h$  and  $A_N$  are the second fundamental form and the shape operator, respectively. Also, it is showed that:

$$g(h(X, Y), N) = g(A_N X, Y) \tag{10}$$

where  $g$  denotes the Riemannian metric on  $M$  as well as induced on  $\tilde{M}$ . For any vector field  $X$  in  $TM$ , let

$$\varphi X = PX + FX, \tag{11}$$

where  $PX$  is the tangential component and  $FX$  is the normal component of  $\varphi X$ , respectively. Similarly, for any  $N \in T^\perp M$ , let

$$\varphi N = tN + fN, \tag{12}$$

where  $tN$  is the tangential component and  $fN$  is the normal component of  $\varphi N$ , respectively.

A submanifold  $M$  of a nearly hyperbolic cosymplectic manifold  $\tilde{M}$  is said to be a pseudo slant submanifold if there exist two orthogonal complementary distributions  $D_\theta$  and  $D_\mu$  satisfy such that [4] ;

i-)  $TM = D_\theta \oplus D_\mu \oplus \langle \xi \rangle,$

ii-)  $D_\theta$  is slant distribution with slant angle  $\theta \neq \frac{\pi}{2},$

iii-)  $D_\mu$  is anti-invariant, that is;  $\varphi D_\mu \subseteq T^\perp M.$

A pseudo slant submanifold  $M$  of a nearly hyperbolic cosymplectic manifold  $\tilde{M}$  is totally geodesic if

$$h(X, Y) = 0 \tag{13}$$

for any vector fields  $X, Y$  in  $TM$ .

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1. Integrability Conditions

In this section, it works out integrability conditions of distributions on these manifolds as [7] and also, obtain a few interesting results of this setting.

Let  $M$  be a pseudo slant submanifold of a nearly hyperbolic cosymplectic manifold  $\tilde{M}$  and  $D_\theta, D_\mu$  be distributions and  $\xi$  be the vector field. Thus, it can be given following theorems:

**Theorem 1** Let  $M$  be a pseudo slant submanifold of a nearly hyperbolic cosymplectic manifold  $\tilde{M}$ . If  $M$  is total geodesic, then  $D_\mu$  is integrable.

**Proof.** It is assume that  $M$  be a pseudo slant submanifold of a nearly hyperbolic cosymplectic manifold  $\tilde{M}$ . From Eq. 6, it can show

$$(\bar{\nabla}_Z \varphi)W + \varphi(\bar{\nabla}_W Z) = 0 \tag{14}$$

$$(\bar{\nabla}_Z \varphi)W - \varphi(\bar{\nabla}_Z W) + \varphi(\bar{\nabla}_W Z) = 0 \tag{15}$$

$$(\bar{\nabla}_Z \varphi)W = \varphi[Z, W] \tag{16}$$

for any vector fields  $Z, W$  in  $D_\mu$ .

Now, if takes scalar product

$(\bar{\nabla}_Z \varphi)W$  and  $X$  in  $TM$ , from Eq. 9, it is obtained

$$g(\bar{\nabla}_Z \varphi W, X) = -g(A_{\varphi W} Z, X) + g(\nabla_Z^\perp \varphi W, X) \tag{17}$$

$$g(\bar{\nabla}_Z \varphi W, X) = -g(h(Z, X), \varphi W) \tag{18}$$

for any vector fields  $Z, W$  in  $D_\mu$  and  $X \in TM$ .

Since  $M$  is totally geodesic and  $g$  is non degenerate it is obtained

$$g(\bar{\nabla}_Z \varphi W, X) = 0. \tag{19}$$

Thus, equation can be defined as  $\bar{\nabla}_Z \varphi W \in T^\perp M$ . From (16), it is seen that  $[Z, W] \in D_\mu$ . Hence  $D_\mu$  is integrable.

**Theorem 2** Let  $M$  be a pseudo slant submanifold of a nearly hyperbolic cosymplectic manifold  $\tilde{M}$ . Then the slant distribution  $D_\theta$  is integrable.

**Proof.** It is shown that  $[X, Y] \in D_\theta$  for any vector field  $X, Y \in D_\theta$ . Since  $M$  is nearly hyperbolic cosymplectic manifold, from Eq. 6; for any vector field  $X, Y \in D_\theta$

$$(\bar{\nabla}_X \varphi)Y + \varphi(\bar{\nabla}_Y X) = 0. \tag{20}$$

In this case, it is obtained for  $X, Y \in D_\theta$

$$\bar{\nabla}_X \varphi Y - \varphi \bar{\nabla}_X Y + \varphi \bar{\nabla}_Y X = 0 \tag{21}$$

and

$$\bar{\nabla}_X \varphi Y = \varphi[X, Y]. \tag{22}$$

If it uses Eq.11 in Eq. 22, it can get

$$\bar{\nabla}_X P Y + \bar{\nabla}_X F Y = P[X, Y] + F[X, Y] \tag{23}$$

for any vector fields  $X, Y \in D_\theta$ . If it uses Eq. 8 and Eq. 9 in Eq. 23 and it can be considered tangent and normal component, it can be obtained

$$\nabla_X P Y - A_{FY} X = P[X, Y] \tag{24}$$

and

$$h(X, P Y) + \nabla_X^\perp F Y = F[X, Y] \tag{25}$$

for any vector fields  $X, Y \in D_\theta$ .

Let  $\theta$  be an angle between  $P[X, Y]$  and  $\varphi[X, Y]$ . It is shown that  $\theta$  is constant. It can be defined,

$$\cos\theta = \frac{g(P[X,Y],\varphi[X,Y])}{\|P[X,Y]\|\|\varphi[X,Y]\|} \quad (26)$$

for any vector fields  $X, Y \in D_\theta$ . From equations 8, 9, 11, 22 and 24, it is shown that

$$\begin{aligned} \cos\theta &= \frac{g(P[X,Y],\bar{\nabla}_X\varphi Y)}{\|P[X,Y]\|\|\varphi[X,Y]\|}, \\ &= \frac{g(P[X,Y],\bar{\nabla}_X P Y)}{\|P[X,Y]\|\|\varphi[X,Y]\|} + \frac{g(P[X,Y],\bar{\nabla}_X F Y)}{\|P[X,Y]\|\|\varphi[X,Y]\|}, \\ &= \frac{g(P[X,Y],\bar{\nabla}_X P Y)}{\|P[X,Y]\|\|\varphi[X,Y]\|} + \frac{g(P[X,Y],-A_{F Y} X)}{\|P[X,Y]\|\|\varphi[X,Y]\|}, \\ &= \frac{g(P[X,Y],P[X,Y])}{\|P[X,Y]\|\|\varphi[X,Y]\|}, \\ &= \frac{\|P[X,Y]\|}{\|\varphi[X,Y]\|} = \text{constant}, \end{aligned} \quad (27)$$

then  $\theta$  is constant. In this case, it is seen that  $[X, Y] \in D_\theta$ . Thus,  $D_\theta$  is integrable.

**Theorem 3** Let  $M$  be a pseudo slant submanifold of a nearly hyperbolic cosymplectic manifold  $\tilde{M}$ . In this case  $D_\mu \oplus \langle \xi \rangle$  is integrable.

**Proof.** Let  $M$  be a pseudo slant submanifold of a nearly hyperbolic cosymplectic manifold  $\tilde{M}$ . If  $M$  is totally geodesic, then  $D_\mu$  is integrable.

It can be shown that  $[X, \xi] \in D_\mu$ , for any vector field  $X$  in  $D_\mu$ , and  $\varphi[X, \xi] \in T^\perp M$ , for a vector field  $Y$  in  $TM$ , from Eq. 7, it can be defined by

$$g(\varphi[X, \xi], Y) = g(\varphi\bar{\nabla}_X \xi, Y) - g(\varphi\bar{\nabla}_\xi X, Y), \quad (28)$$

$$\begin{aligned} g(\varphi[X, \xi], Y) &= -g(\varphi\bar{\nabla}_\xi X, Y), \\ &= g((\bar{\nabla}_\xi \varphi)X - \bar{\nabla}_\xi \varphi X, Y), \end{aligned} \quad (29)$$

for any vector field  $X$  in  $D_\mu$ .

From Eq. 6 and 7, it can be seen that

$$(\bar{\nabla}_\xi \varphi)X + \varphi\bar{\nabla}_X \xi = 0 \quad (30)$$

$$(\bar{\nabla}_\xi \varphi)X = 0 \quad (31)$$

for any vector field  $X$  in  $D_\mu$ . From Eq.7, it can be defined by

$$\nabla_Y \xi = 0 \quad (32)$$

$$h(Y, \xi) = 0 \quad (33)$$

for any vector field  $Y$  in  $TM$ . If it uses Eq. 31 in Eq. 29, it can be get

$$g(\varphi[X, \xi], Y) = -g(\bar{\nabla}_\xi \varphi X, Y) \quad (34)$$

and from Eq. 9, 10 and 33.

$$\begin{aligned} g(\varphi[X, \xi], Y) &= -g(A_{\varphi X} \xi + \nabla_\xi^\perp \varphi X, Y) \\ &= g(A_{\varphi X} \xi, Y) = g(h(Y, \xi), \varphi X) = 0 \end{aligned} \quad (35)$$

Then,  $[X, \xi] \in D_\mu$  and in addition to  $[X, \xi] \in D_\mu \oplus \langle \xi \rangle$ . In this case,  $D_\mu \oplus \langle \xi \rangle$  is always integrable.

**Theorem 4** Let  $M$  be a pseudo slant submanifold of a nearly hyperbolic cosymplectic manifold  $\tilde{M}$ . In this case  $D_\theta \oplus \langle \xi \rangle$  is not integrable.

**Proof.** Let us assume  $M$  be a pseudo slant submanifold of a nearly hyperbolic cosymplectic manifold  $\tilde{M}$ . We must show that  $[X, \xi] \in D_\theta$  for any vector field  $X$  in  $D_\theta$ .

Let  $\theta$  be an angle between  $P[X, \xi]$  and  $\varphi[X, \xi]$ . Then, it can be written as

$$\cos\theta = \frac{g(P[X,\xi],\varphi[X,\xi])}{\|P[X,\xi]\|\|\varphi[X,\xi]\|} \quad (36)$$

for a vector field  $X$  in  $D_\theta$ . From (2.6),

$$(\bar{\nabla}_X \varphi)Y + \varphi\bar{\nabla}_Y X = 0 \quad (37)$$

$$\bar{\nabla}_X \varphi Y - \varphi\bar{\nabla}_X Y + \varphi\bar{\nabla}_Y X = 0 \quad (38)$$

$$\bar{\nabla}_X \varphi Y = \varphi[X, Y] \quad (39)$$

for any vector field  $Y$  in  $TM$  and from this last above equation,

$$\varphi[X, \xi] = \bar{\nabla}_X \varphi \xi = 0 \quad (40)$$

for a vector field  $X$  in  $D_\theta$ . If equation 36 in Eq. 40 use, it can be defined by

$$\cos\theta = 0, \quad (41)$$

thus  $\theta = \left(\frac{\pi}{2}\right) + 2k\pi, (k \in \mathbb{Z})$  ( $\theta$  is not equal to  $\left(\frac{\pi}{2}\right)$ ).

As a result of the definition of a pseudo slant submanifold of a nearly hyperbolic cosymplectic manifold; then it can be said that  $D_\theta \oplus \langle \xi \rangle$  isn't integrable.

**Theorem 5** Let  $M$  be a pseudo slant submanifold of a nearly hyperbolic cosymplectic manifold  $\tilde{M}$ . Then  $D_\theta \oplus D_\mu$  is integrable.

**Proof.** It is shown that  $[X, Y] \in D_\theta \oplus D_\mu$  for any vector fields  $X, Y$  in  $D_\theta \oplus D_\mu$ . On the other hand,

$$\begin{aligned} (\bar{\nabla}_X g)(Y, \xi) &= \bar{\nabla}_X g(Y, \xi) - g(\bar{\nabla}_X Y, \xi) - g(Y, \bar{\nabla}_X \xi) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (42)$$

and from the last equation;

$$g(\bar{\nabla}_X Y, \xi) = 0 \quad (43)$$

for any vector fields  $X, Y$  in  $D_\theta \oplus D_\mu$ . In the same way, it can be written,

$$g(\bar{\nabla}_Y X, \xi) = 0 \quad (44)$$

for any vector fields  $X$  and  $Y$  in  $D_\theta \oplus D_\mu$ . If (43) and (44) use, it can be defined by

$$g([X, Y], \xi) = 0 \quad (45)$$

for any vector fields  $X, Y$  in  $D_\theta \oplus D_\mu$ . In this case, the proof is complete.

#### 4. CONCLUSION

In the recent years, the geometry of the contact metric manifolds were studied. So the notion of pseudo slant submanifold on a nearly hyperbolic cosymplectic manifold were introduced. A lot of mathematicians with I have obtained some results on slant submanifolds on it. In this study, I have given some conditions for a slant submanifold of a nearly hyperbolic cosymplectic manifolds. It can be think that, the results which are obtained in this study are important for differential geometers which are dealing with nearly hyperbolic

cosymplectic metric manifolds, the results which are stated in this study can be handled in different form.

#### DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS

The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

#### REFERENCES

- [1] Upadhyay M.D., Dube K.K., “Almost contact hyperbolic  $(f, g, \eta, \xi)$ -structure”. *Acta Math. Acad. Sci. Hungary*, 28(1-2): 1–4, (1976).
- [2] Joshi N. K., Dube K. K., “Semi-invariant submanifold of an almost  $r$ -contact hyperbolic metric manifold”. *Demonstratio Math.*, 34(1): 135–143, (2001).
- [3] Dogan S., Karadag, M., “Slant submanifolds of an almost hyperbolic contact metric manifolds”. *Journal of Mathematics and System Science*, 4: 285–288, (2014).
- [4] Uddin S., Wong B. R., Mustafa A. A., “Warped product pseudo slant submanifolds of a nearly cosymplectic manifold”. *Abstr. Appl. Anal.*, Art. ID 420890, 1-13, (2012).
- [5] Ahmad M., Ali K., “Semi-invariant Submanifolds of Nearly Hyperbolic Cosymplectic Manifolds”. *Global Journal of Science Frontier Research Mathematics and Decision Sciences*, 13(4), 73–81, (2013).
- [6] Ahmad M., Ali K., “CR-submanifolds of a nearly hyperbolic cosymplectic manifold”. *IOSR Journal of Mathematics (IOSR-JM)*, 6(3): 74–77, (2013).
- [7] Khan V. A., Khan M. A., “Pseudo Slant Submanifolds of a Sasakian Manifold”. *Indian J. Pure Appl. Math.*, 38(1): 31–42, (2007).
- [8] De U. C., Sarkar A., “On pseudo slant submanifolds of Trans-Sasakian Manifolds”. *Proc. Est. Acad. Sci.*, 60(1): 1–11, (2011).
- [9] Blair D.E., “Riemannian Geometry of contact and symplectic manifolds”, *Progress in Mathematics*, 203. *Birkhauser Boston*, Inc., Boston, MA, 2002
- [10] Fujimoto A., Muto H., “On Cosymplectic manifolds”, *Tensor N.S.*, 28:43-52,(1974).
- [11] Olszak Z., “On almost Cosymplectic manifolds”. *Kodai Math. J.*, 4:239-250,(1981),
- [12] Koufogiorgos Th., Tsiclias C., “On the existense of a new class of contact metric manifolds”. *Canad. Math. Bull.*, 43:440-447,(2000).
- [13] Baikoussis C., Koufogiorgos T., “On a type of contact manifolds”. *J. Geom.* 46:1-9,(1993).
- [14] Endo H., “On some properties of almost Cosymplectic manifolds”, *An Ştiint.Univ. ‘Al.I.Cuza’ Iasi, Math.*42: 79-94, (1996).
- [15] Goldberg S.I., Yano K., “Integrability of almost cosymplectic structures”. *Pasific J.Math.*31: 373-382, (1969).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Investigation of bonding performance of polyurethane (pur) based adhesives to different climate conditions

*Yazar(lar) (Author(s)):* İhsan KÜRELİ<sup>1</sup>, Mustafa ALTINOK<sup>2</sup>

*ORCID<sup>1</sup>:* 0000-0003-3674-2930

*ORCID<sup>2</sup>:* 0000-0002-2048-1994

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Kürelİ İ., Altınok M., “Investigation of bonding performance of polyurethane (pur) based adhesives to different climate conditions”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1407-1412, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.778692

# Investigation of Bonding Performance of Polyurethane (Pur) Based Adhesives in Different Climate Conditions

## Highlights

- ❖ Contrary to many studies, it was found that Scotch pine has a higher adhesion resistance than oak.
- ❖ PA 301 glue is better than PA 300 glue in all performances, namely (bonding strength, Modulus of Elasticity (MOE), and extension at break.
- ❖ Oak performs better than Scotch pine in the Modulus of Elasticity.
- ❖ In extension at break, Scotch pine has better performance than oak
- ❖ The best climatic condition for extension at break is found as 65/90.

## Graphical Abstract

The adhesion resistance, MOE and extension amounts of PA 300 and PA 301 glued Scotch pine and oak samples were determined in different climatic conditions.

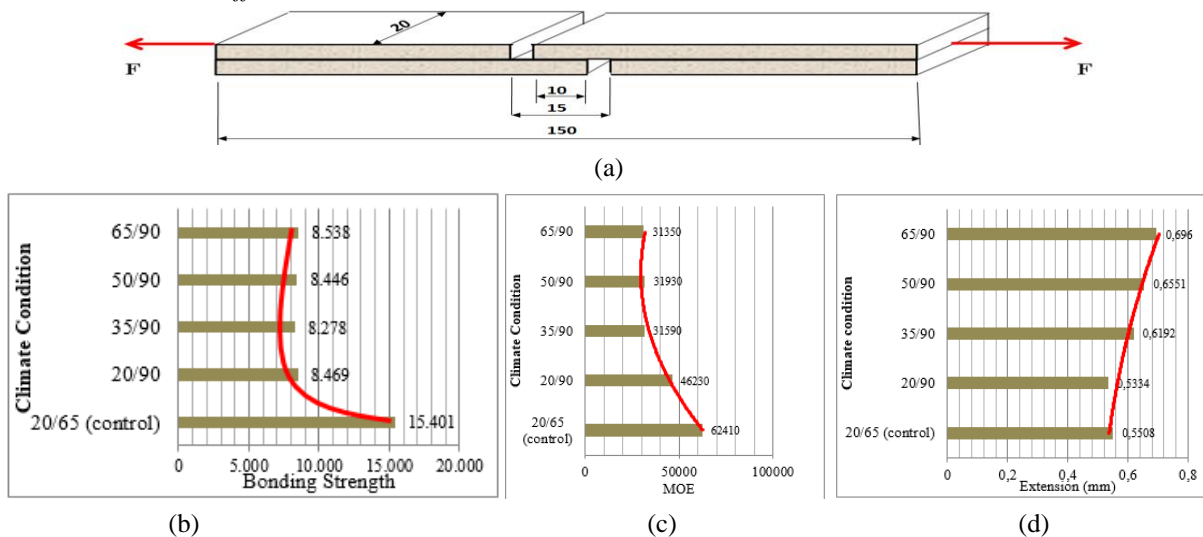


Figure. Sample (a), graphics of bonding strength (b), MOE (c), and extension (d)

## Aim

Determination of adhesion performance of polyurethane (PUR) based adhesives in different climatic conditions.

## Design & Methodology

The experimental samples were first tested in 20/65 climatic condition and then in other climatic conditions (20/90-35/90-50/90-65/90).

## Originality

It has been determined that it would be better to use Scotch pine and PA 301 glue in different climatic conditions.

## Findings

The highest adhesion resistance was found to be 10.59 N/mm<sup>2</sup> in Scotch pine and 9.064 N/mm<sup>2</sup> in oak.

## Conclusion

There is a loss of around 50% in the adhesion resistance and MOE against temperature and humidity increase.

## Declaration of Ethical Standards

The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.



# Investigation of Bonding Performance of Polyurethane (Pur) Based Adhesives in Different Climate Conditions

*Araştırma Makalesi / Research Article*

İhsan KÜRELİ\*, Mustafa ALTINOK

Gazi University, Industrial Wood Products Engineering Department, Ankara, Turkey

(Geliş/Received : 26.12.2019 ; Kabul/Accepted : 17.03.2020)

## ABSTRACT

This study was carried out to determine suitable wood type and glue to be used in humid and warm environments (in the construction of saunas, baths and various marine vehicles), to determine the changes in adhesion performance at variable temperatures and sequential and individual processes by keeping the relative humidity constant in these areas. For this purpose, as wood material, Scotch pine (*Pinus sylvestris* Lipsky) and stemless oak (*Quercus petraea* spp.), glue as polyurethane based PA300 and PA301 adhesives were preferred. Wood material was supplied by random method.

Test results in terms of bonding strength; sequential process adversely affected and decreased by 7 percent compared to the individual process. As wood type, 14 percent higher resistance was obtained in pine than oak.

In terms of modulus of elasticity(MOE); sequential process negatively affected and decreased by 1.4 percent compared to the individual process. As wood type, it was 10.5 percent with respect to oak, and 32.6 percent with higher elasticity than PA300 glue as glue type. In terms of elongation deformation in glue line; the sequential process adversely affected and reduced by about 19 percent compared to the individual process.

**Keywords:** Wood, oak, scotch pine, adhesion, climatic conditions, PUR-based adhesives.

## 1. INTRODUCTION

Most of the research in the field of wood adhesives has been in the form of adhesion performance and resistance to various climatic environments (especially wet climatic environment) and the development of new adhesives. It is known that the performance and behavior of wood adhesives, the smoothness and humidity of the adhesion surfaces, the extracts it contains, the pH of the glue and the viscosity of the glue [1]. Wood glue is a substance that crosses the surface of two wood materials in a liquid state and establishes cross bonds between them and can hold them together rigidly after hardening. The bonding of the adhesive to the wood substrate includes weaker forces or mechanical coupling, such as covalent bonding, van der Waals forces and hydrogen bonding [2, 3].

Wood structural elements are used for structural shaping of indoor and outdoor. In this embodiment, the formed and processed wood pieces are combined with various methods. It is supported with glue to ensure that the mechanical connection methods used in some parts become more reliable and to establish the stiffness. At this point, wood adhesives have increased in character and new adhesives continue to be developed. The areas where wood adhesives will be used are designated as dry, moist, high humidity and completely wet areas and glues are classified accordingly [4].

In this study, it has been determined whether there is any change in the adhesion performance of Scotch pine and oak from the native wood material adhered with

polyurethane based PUR Marine Glue (PA300) and Express PU Adhesive (PA301) glues under different climatic conditions.

Synthetic-based urea, phenol, melamine-formaldehyde and resorcinol glue, which are developed for internal and external climatic environments and have good results, have long been used in the production of wooden components [5, 6, 7]. However, some of them are sensitive to water [8, 9] and some of them need to be hot pressed [10] and this increases the cost.

Thus, research scientists continue to develop new adhesives to eliminate these constraints [11, 12].

These are polyurethane based wood adhesives (PU). The base material of the adhesive is a polyurethane flexible polymer class [13]. It was found that PU adhesives exhibit reliability and high performance especially in the use of wood marine vehicles and in outdoor use [14].

The development of the cross-bond strength between the adhesive and the wood has been tried to be determined by means of tests.

Desmodur-VTKA glue, Scotch pine (*Pinus sylvestris* Lipsky) and T-CBC impregnation solution in the research used, impregnated material Desmodur-VTKA adhesive has been reported to reduce the bond bonding resistance [15]

Uzun et al. (2016), Beech (*Carpinus betulus* L.) lamella glued with melamine formaldehyde (MF), polyurethane (PUR) and polyvinyl acetate (PVAc-D4) adhesives of three hours of heat treatment. In their research on adhesion strength, they determined that the adhesion strength of the heat treated samples decreased with the

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

temperature of the heat treatment and that the adhesive strength of the PUR adhesive was higher than MF and PVAc-D4 [16].

It was observed that the adhesion (slip) resistances of the glue joints were changed in different climatic atmospheres in the Scotsch pine (*Pinus sylvestris* Lipsky) and oak (*Quercus petrea* spp.) wood material affixed with Desmodur-VTKA glue.

## 2. MATERIAL AND METHODS

### 2.1- Wood materials:

The woods of Scotch pine with 0.52 g/cm<sup>3</sup> density, and oak with 0.69 g/cm<sup>3</sup> density were chosen randomly from timber merchants of Ankara, Turkey. A special emphasis was put on the selection of the wood materials. Accordingly, no deficient, proper, knotless, normally grown (without zone line, reaction wood, decay, insect and fungal infections) wood materials were selected.

### 2.2- Adhesives:

PUR Marine Glue (PA300) - Express PU adhesive (PA301); both glues have the same technical properties, PA300 with honey color and PA301 is transparent. Technical specifications of the both glues are given below.

Description: PUR Marin/Express PU adhesive is single component polyurethane based wood glue and solvent free. It cures and bonds with the humid in the air and materials. It has low viscosity and easy to apply. It cures fast and resistant against water and chemical corrosion. According to DIN EN 204 standards, the adhesive is D4 water resistant [17]. It also can be used on humid surfaces as a gap filling material. It is resistant to high temperature and does not lose its bonding strength. It is applicable bonding the rigid materials such as processed lumber, ceramic and wooden panel products to metal, stone, concrete, some synthetic materials and laminated surfaces.

The application surface shall be cleaned from all sorts of dust, oil and dirt. The surface and environment temperature shall be over +5°C during bonding. It is most important that one of surfaces must be rigid for a good bonding. The adhesive must be applied for one or both surfaces evenly as a thin layer. Materials to be bonded shall stucked together within 10 minutes and be pressed at least 15-20 minutes. Final curing is completed in 24 hours. It was supplied from the manufacturer.

PUR Marin/Express Adhesive was applied under cold conditions. Its density was 1.1 g/cm<sup>3</sup>, pH was 7, and viscosity was 3300–4000 cP at 25°C. At 20°C and 65 percent relative humidity, it solidifies in 30 min. It was recommended that PA300 adhesive should be applied to both surfaces at 150 g/m<sup>2</sup> [18].

### 2.3- Preparation of Test Samples:

The thickness of the sample draft pieces made of Scotch pine and sessile oak were cut to the dimensions specified in BS EN 205 standard, glue was applied between two wooden components on a 150 g/m<sup>2</sup> basis and pressed under 2 N/mm<sup>2</sup> pressure and 20°C temperature. Standard size samples were cut from the draft pieces that were kept in the press for 24 hours and glued and marked according to the wood type and test procedures.

### 2.4- Test Method:

Both types of wood and varieties of glue in different climatic conditions, performance changes were examined in two processes.

**The first of these:** 20°C ±2°C temperature and 65±5 percent relative humidity for each variable prepared in each of the experimental samples (50 pieces) in each climatic condition, 10 pieces of tested, one week sequentially waiting, constant relative humidity and determining performance values such as bonding strength, modulus of elasticity and extension in increasing temperature environments (20/90, 35/90, 50/90, 65/90).

**Table 1.** Sequential performance determination process

	DETERMINATION OF SEQUENTIAL PROCESS PERFORMANCE				
	CLIMATIC CONDITION				
	20/65 (control)	20/90	35/90	50/90	65/90
	→ → → → →				
Hold in climate condition.	bonding strength (50 pieces)	bonding strength (40 pieces)	bonding strength (30 pieces)	bonding strength (20 pieces)	bonding strength (10 pieces)
<b>Determination /testing</b>	10 pieces ↓	10 pieces ↓	10 pieces ↓	10 pieces ↓	10 pieces ↓
Hold in climate condition.	MOE (50 pieces)	MOE (40 pieces)	MOE (30 pieces)	MOE (20 pieces)	MOE (10 pieces)
<b>Determination /testing</b>	10 pieces ↓	10 pieces ↓	10 pieces ↓	10 pieces ↓	10 pieces ↓
Hold in climate condition.	Extension (50 pieces)	Extension (40 pieces)	Extension (30 pieces)	Extension (20 pieces)	Extension (10 pieces)
<b>Determination /testing</b>	10 pieces ↓	10 pieces ↓	10 pieces ↓	10 pieces ↓	10 pieces ↓
Note: Samples of each type of wood and glue were kept in the climatic conditions above 1 week (Kägi, A.; Niemz, P, 2006) [19] in sequentially and technical characteristics were determined					

**Second:** 20°C ±2°C temperature and 65±5 percent relative humidity of the experimental samples prepared individually, the constant relative humidity and increasing temperature environments (20/90, 35/90, 50/90, 65/90) density. Determination of performance values such as bonding strength, modulus of elasticity and extension.

*These environments represent wet and hot bath and sauna environments.* The processes of holding and testing in both methods are given in Table 1 and Table 2.

significant difference between the groups, then, Duncan test was applied.

**3. RESULTS AND DISCUSSION**

In this study, it was examined whether the Bonding Strength, elasticity modulus and extension values changed with the effect of four different variables (process, wood type, glue type and climate condition).

**Bonding Strength Change:**

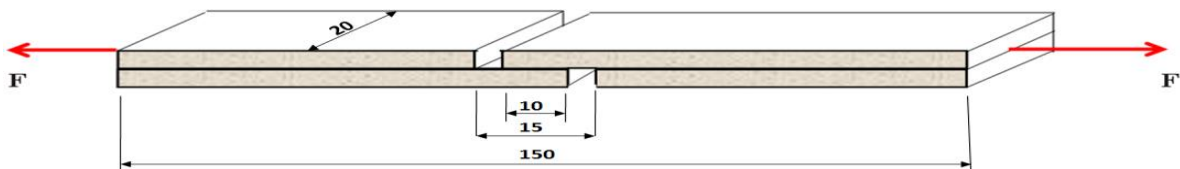
In adhesion performance change; the highest adhesion

**Table 2.** Individual performance determination process

	DETERMINATION OF INDIVIDUAL PROCESS PERFORMANCE				
	CLIMATIC CONDITION				
	20/65 (control)	20/90	35/90	50/90	65/90
Hold in climate condition.	bonding strength (10 pieces)	bonding strength (10 pieces)	bonding strength (10 pieces)	bonding strength (10 pieces)	bonding strength (10 pieces)
<b>Determination / testing</b>	10 pieces	10 pieces	10 pieces	10 pieces	10 pieces
Hold in climate condition.	MOE (10 pieces)	MOE (10 pieces)	MOE (10 pieces)	MOE (10 pieces)	MOE (10 pieces)
<b>Determination / testing</b>	10 pieces	10 pieces	10 pieces	10 pieces	10 pieces
Hold in climate condition.	Extension (10 pieces)	Extension (10 pieces)	Extension (10 pieces)	Extension (10 pieces)	Extension (10 pieces)
<b>Determination / testing</b>	10 pieces	10 pieces	10 pieces	10 pieces	10 pieces
Note: Each of the experimental samples from each variation in individual climatic condition for one week after waiting for the technical characteristics was determined.					

Each technical specification is determined according to the relevant standards. Bonding strength test sample is given in Figure 1.

resistance was found to be 10.200 N/mm<sup>2</sup> in the individual process and 9.454 N/mm<sup>2</sup> in the sequential process. It has been found that the sequential process



**Figure 1.** Test sample of bonding strength (mm)

Gazi University - Faculty of Technology - Wood Technology Laboratory with a Universal test device in accordance with the BS EN 205 standard tensile test is applied to determine the Bonding Strength [20]. The loading speed was 50 mm/min.

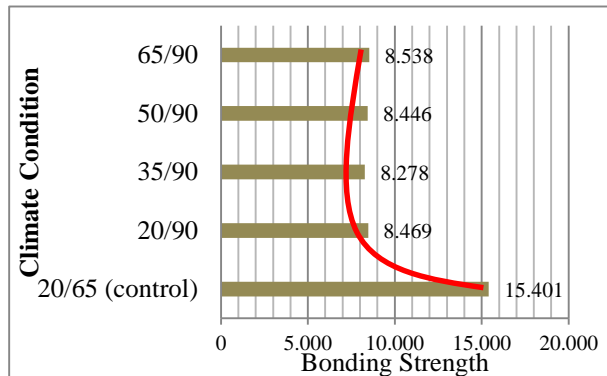
**2.5-Data analysis**

By using five different Climatic condition 20/65 (control), 20/90, 35/90, 50/90, 65/90 and two different kinds of wood, two different kinds of adhesive, two process (Sequential-Individual) species as parameters, a total of 240 samples were prepared, using 10 samples for each parameter. Multiple variance analysis has been performed. To determine the differences between density, bonding strength, modulus of elasticity and extension of the prepared samples. Should there be a

reduces the adhesion performance. The reason for this can be said that the change of the climatic environment at four different temperatures successive results from the weakening of the glue bonds. The highest adhesion resistance was found to be 10.59 N/mm<sup>2</sup> in Scotch pine and 9.064 N/mm<sup>2</sup> in oak. The reason for this can be said that Scotch pine is more permeable to hot moisture than oak. Contrary to many studies, it was found that a higher adhesion resistance occurred in Scotch pine than oak.

**Table 3.** Bonding Strength.

Process (A)	Average	HG
Sequential	9.454	B
Individual	10.20	A
LSD:0.1608		
Wood (B)	Average	HG
Scotch pine	10.59	A
Oak	9.064	B
LSD: 0.1608		
Climatic Condition (D)	Average	HG
20/65 (control)	15.40	A
20/90	8.469	BC
35/90	8.278	C
50/90	8.446	BC
65/90	8.538	B
LSD: 0.2542		

**Figure 2.** Bonding Strength graph

Adhesion resistance was found to be 15.401 N/mm<sup>2</sup> in the control samples at the highest 20/65 climatic conditions and very low in the samples under the other climatic conditions (20/90-35/90-50/90-65/90). It can be said that this is due to the weakening of the glue bond with increasing temperature and humidity (Table 3, Figure 2).

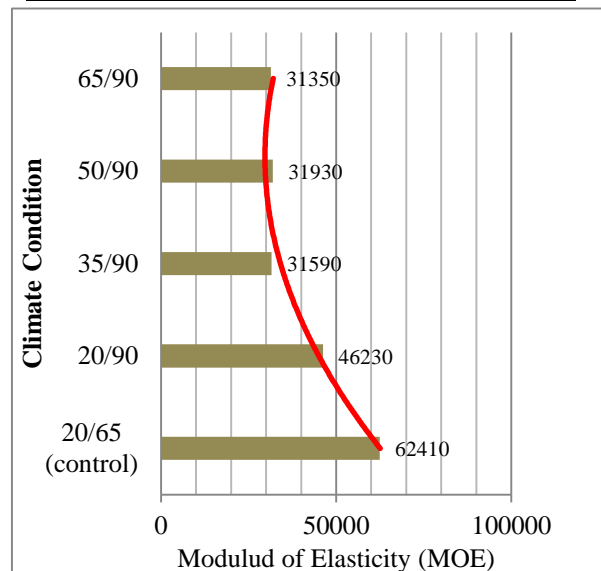
#### Modulus of Elasticity (MOE) Change:

In adhesion MOE change; the highest MOE was found to be 40980 N/mm<sup>2</sup> in the individual process and 40420 N/mm<sup>2</sup> in the sequential process. It has been found that the sequential process reduces the adhesion performance. This may be because the samples are kept in four different climatic conditions (all in succession) in the sequential process, reducing the elasticity of the glue joint. In adhesion MOE change, the highest MOE value was found to be 42950 N/mm<sup>2</sup> in the oak and 38450 N/mm<sup>2</sup> in the Scotch pine. This may be because the oak

is less permeable than the pine, the negative effect of climate change is less transmitted, and that the oak has more force absorbing ability.

**Table 4.** Modulus of Elasticity (MOE)

Process (A)	Average	HG
Sequential	40420	B
Individual	40980	A
LSD:430.3		
Wood (B)	Average	HG
Scotch pine	38450	B
Oak	42950	A
LSD: 430.3		
Glue (C)	Average	HG
PA300	32780	B
PA301	48620	A
LSD:430.3		
Climate condition (D)	Average	HG
20/65 (control)	62410	A
20/90	46230	B
35/90	31590	C
50/90	31930	C
65/90	31350	C
LSD:680.4		

**Figure 3.** Elasticity Modulus graph

In terms of the effect of glue type; the highest elasticity modulus was obtained from PA301 glue samples at 48620 N/mm<sup>2</sup> with the lowest PA300 glue samples at 32780 N/mm<sup>2</sup>. This is because PA301 glue is a more effective adhesive against high temperatures.

In terms of the effect of climatic condition; when the result of the control samples is set aside, the highest elastic modulus is determined in the condition of 20/90 under the condition of the lowest 65/90. It is seen that increasing the temperature of climatic condition negatively affects modulus of elasticity (Table 4 and Figure 3).

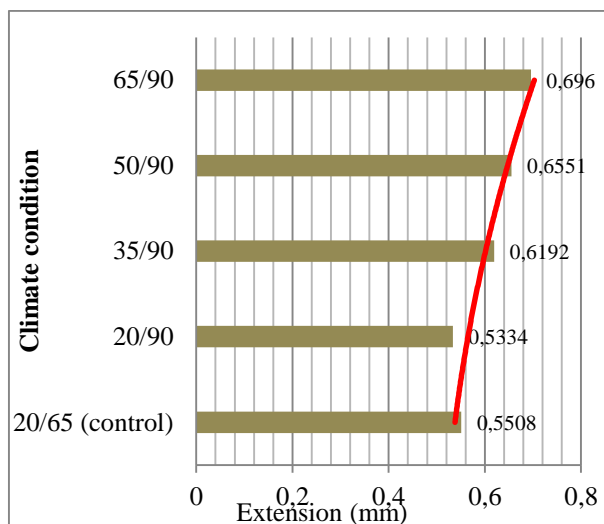
**Extension at break:**

The highest extension was observed in the samples kept in the individual process (0.6457 mm) and the smallest in the samples kept in the sequential process (0.5761 mm). In terms of the effect of the wood type variable; the highest extension was observed in the Scotch pine samples (0.7139 mm) and the smallest in the oak samples (0.5080 mm). In terms of the effect of the glue variable; the maximum extension amount was determined as 0.7131 mm in PA301 glue samples and 0.5087 mm in the glue samples with PA300 glue (Table 5).

Table 5. Extension at the breaking.

**Table 5.** Extension at break

Process A	Average	HG
Sequential	0.5761	B
Individual	0.6457	A
LSD: 0.01243		
Wood type B	Average	HG
Scotch pine	0.7139	A
Oak	0.5080	B
LSD: 0.01243		
Glue type C	Average	HG
PA300	0.5087	B
PA301	0.7131	A
LSD:0.01243		
Climate condition D	Average	HG
20/65 (control)	0.5508	D
20/90	0.5334	D
35/90	0.6192	C
50/90	0.6551	B
65/90	0.6960	A
LSD: 0.01966		



**Figure 4.** Extension at breack graph

In terms of the climate condition; when the values of the control samples were left aside, the highest extension was obtained as 0.6960 mm in the samples kept under the 65/90 climate condition and 0.5334 mm in the samples kept under the climate condition of the minimum of 20/90. The samples kept in the remaining climatic conditions changed parabolically gradually (Figure 4).

**Moisture Change:**

Moisture levels in climatic environments; it was determined as 10.78% in 20/65, 21.82% in 20/90, 23.42% in 35/90, 18.23% in 50/90 and 17.52% in 65/90 temperature and relative humidity.

**4. CONCLUSIONS**

In this study, the adhesion performance (strength) of the four variable factors (glue type, wood type, process and climatic condition), MOE in adhesion and extension in adhesion were briefly affected as follows:

1) *Process variable*; The sequential process decreased the adhesion strength by 7.31 percent, the MOE by 1.37 percent and the adhesion elongation by 10.78 percent according to the individual process. It is recommended that these reduction amounts must be considered in the system (product) design stage required for successively variable wet-hot spaces such as bathrooms and saunas.

2) *Wood type variable*; according to the oak, the pine wood adhesion strength was increased by 16.84 percent, decreased MOE by 10.48 percent and the extension at break was increased by 40.53 percent. The reason for the increase in adhesion strength and extension at break. It can be said that the pine wood is due to its smooth surface and good adhesion and consequently it has more elastic glue joint.

3) *Glue type*; there was no difference in the adhesion strength of both glue types. It was found that PA300 glue increased MOE by 48.32 percent and PA301 glue increased extension at break rate by 40.18 percent. This is because both glues have elastic glue joint.

4) *Climate condition variable*; leaving the 20/65 ambient air conditioner where the samples were developed, the relative humidity remained constant at 90 percent in all four climatic conditions and the temperature of the environment was increased by 15<sup>0</sup>C compared to the previous one. In this case, compared to the control environment, all four climatic condition decreased the average adhesion strength by 50 percent and MOE by 43.4 percent and the extension at break was increased by 13.64 percent. The reason for this can be said that the high relative humidity and temperature increase and weakening of the glue bond are due to the increase of ductility in the glue joint.

As a result, PA300 and PA301 adhesives are reported to be developed for use in humid and hot environments. However, as a result of this research, it has been found that there is a loss of adhesion resistance and MOE around 50 percent against the increase of temperature and humidity. Based on these results, it can be said that it is beneficial for designers to take this loss amount into consideration when using adhesive.

#### DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS

The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

#### REFERENCES

- [1] Pizzi, A., "Wood adhesives: chemistry and technology", *1st ed.*; Marcel Dekker, New York, Vol. 12. (1983).
- [2] Skeist, I., "Handbook of adhesives", *1st ed.*; Van Nostrand Reinhold, New York, 669, (1962).
- [3] Packham, D., E., "Handbook of adhesives", *1st ed.*; Longman, London, 407, (1992).
- [4] Ors, Y., Ozcifci, A., and Atar, M., "Bonding Strengths of Klebit 303, Kleiberit 305.0 and Super-Lackleim 308" *Adhesives*, Turk Journal Agriculture, 23, 757, (1999).
- [5] White, J., T., "Market trends for wood adhesives", *Adhesives Age*, 19, 454, (1981).
- [6] Myers, G., E., "New technological and materials for bonding wood products", *Adhesive Age*, 26, 747, (1988).
- [7] Ebewe, R., O., River, B., H., and Myers, G., E., "Urea-formaldehyde (UF) adhesive resins of wood", *Adhesive Age*, 49, 229, (1993).
- [8] Freeman, G., G., Krebich, K., "Estimating durability of wood adhesives in Vitro", *Forest Products Journal*, 18, 39, (1968).
- [9] Tranghton G., E., and Chow, S., "Accelerated aging of glue-wood bonds", *Journal of the Institute of Wood Science*, 21, 29, (1968).
- [10] Dinwoodie J., M., "The properties and performance of particleboard Adhesives", *Journal of the Institute of Wood Science*, 8:59, (1978).
- [11] John, N., Joseph, R., "Rubber solution adhesives for wood to wood bonding", *Journal Applied Polymer Science*, 68(7): 1185, (1998).
- [12] Osrekar, U., Malavasic, T., "Adhesion and adhesives", *International Journal of Adhesion and Adhesives* 112, 38, (1992).
- [13] Oertel, G., "Polyurethane", *Polyurethane Handbook*, Hanser Publishers: New York, Vick, C.B. and Okkonen, E.A. (1998) Strength and Durability of One-Part Polyurethane Adhesive Bonds to Wood. Forest Products Journal 48.
- [14] Vick, C., B., and Okkonen, E., A., "Strength and durability of one-part polyurethane adhesive bonds to wood" *Forest Products Journal*, 48, 71, (1998).
- [15] Sandip, D., D., Petal, J., V., and Sinha, V., K., "Adhesion and adhesives", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 23, 393, (2003).
- [16] Uzun et al., "Bonding strength of some adhesives in heat-treated hornbeam (*Carpinus betulus* L.) wood used for interior and exterior decoration", *BioResources*, 11(3): 7686-7696, (2016)
- [17] DIN EN 204, "Classification of thermoplastic wood adhesives for non-structural applications", (2016).
- [18] <http://www.apeltutkal.com/betakimya.com.tr/>. (Retrieved: 28.01.2019).
- [19] Kägi, A.; Niemz, P.; Mandallaz, D.: Einfluss der Holzfeuchte und ausgewählter technologischer Parameter auf die Verklebung mit 1K-PUR Klebstoffen unter extremen klimatischen Bedingungen. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 64: 261–268, (2006).
- [20] BS EN 205, "Adhesives. Wood Adhesives for non-structural applications. Determination of tensile shear strength of lap joints", (2016).





POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Endüstriyel sandalye tasarımında estetiklik ve dayanıklılık optimizasyonu

## *Aestheticity and durability optimization in industrial chair design*

*Yazar(lar) (Author(s)): İhsan KÜRELİ<sup>1</sup>, Mustafa ALTINOK<sup>2</sup>, Elif Rabia UYSAL<sup>3</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-3674-2930*

*ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-2048-1994*

*ORCID<sup>3</sup>: 0000-0003-4552-6025*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Küreli İ., Altınok M., Uysal E. R., “Endüstriyel sandalye tasarımında estetiklik ve dayanıklılık optimizasyonu”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1413-1421, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.680989

# Endüstriyel Sandalye Tasarımında Estetiklik ve Dayanıklılık Optimizasyonu

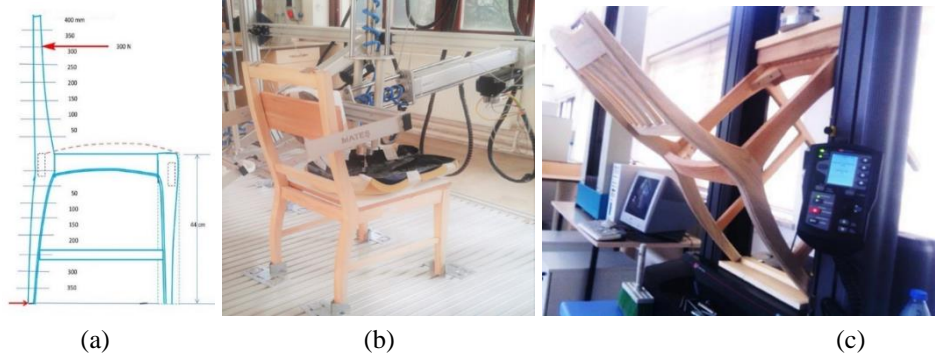
## Aestheticity and Durability Optimization in Industrial Chair Design

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Endüstriyel sandalye tasarımı yapılmış ve üretilmiştir. / Industrial chairs are designed and produced.
- ❖ Tasarım sandalyelere benzer sandalyeler piyasadan temin edilmiştir. / Chairs similar to the designed chairs were obtained from the market.
- ❖ Sandalyelerde estetiklik ve dayanıklılık optimizasyonu yapılmıştır. The aestheticity and durability of the chairs have been optimized.
- ❖ Sandalyelerde tasarım sorunları giderilmeye çalışılmıştır. / Design problems were tried to be eliminated in the chair.
- ❖ Sandalye endüstrisi için öneriler getirilmeye çalışılmıştır. / Suggestions were made for the chair industry.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Sandalyelerin teorik analize dayalı estetik tasarımı, üretimi ve testleri yapılmıştır (Aesthetic design based on theoretical analysis, manufacturing and testing of the chairs were carried out)



Şekil. Sandalyelerde tasarım (a), oturma yeri ve arkalık (b), diyagonal testler (c) /  
Figure. Design of chairs (a), seat and backrest (b), diagonal tests (c)

### Amaç (Aim)

Piyasada üretilen sandalyeler ile tasarım sandalyelerin birbirleriyle karşılaştırmasını yapmaktır. / Comparison of chairs produced in the market and designed chairs.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Çam, Doğu kayını ve meşeden üretilen piyasa ve tasarım sandalyeleri test edilmiştir. / Market-based and designed chairs made of pine, oriental beech and oak were tested.

### Özgünlük (Originality)

Deneylerde kullanılan tasarım sandalyeler 1/1 ölçeğinde üretilmiştir. / Designed chairs for experiments were produced in 1/1 scale.

### Bulgular (Findings)

Tasarım sandalyeler aynı zorlanmalar karşısında piyasa sandalyelerine göre daha az deforme olmuştur. / Designed chairs were less deformed than market chairs under same stresses.

### Sonuç (Conclusion)

Tasarım sandalyelerinin piyasa sandalyelerine göre daha dayanıklı olduğu görülmüştür. / Designed chairs were found to be more durable than market chairs.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Endüstriyel Sandalye Tasarımında Estetiklik ve Dayanıklılık Optimizasyonu

*Research Article /Araştırma Makalesi*

**İhsan KÜRELİ\***, Mustafa ALTINOK, Elif Rabia UYSAL

Gazi Üniversitesi Ağaççileri Endüstri Mühendisliği Teknikokullar / ANKARA

(Geliş/Received : 17.08.2019 ; Kabul/Accepted : 15.11.2019)

## ÖZ

Sandalye, yaygın olarak kullanılan ve piyasada çeşit ve türü çok fazla olan bir mobilyadır. Mobilya piyasasındaki çoğu firma, sandalyeyi fabrikasyon olarak üretmektedir. Bu seri ve yığın halinde üretilen sandalyelerin büyük çoğunluğu mühendislik hesaplarına ve estetik gerekliliklere dayalı değildir. Bu nedenle çalışmanın amacı endüstriyel sandalye tasarımında estetiklik ve dayanıklılık optimizasyonu üzerinedir. Çalışmada yöntem olarak dayanıklılık analizine dayalı olarak eleman boyutları ve birleşme yerleri belirlenmiş ve bu analizin izin verdiği kısımlarda estetiklik optimizasyonu yapılmış 9 adet tasarım (çam, meşe ve Doğu kayını) sandalye örnekleri üretilmiştir. Aynı zamanda mobilya pazarlama piyasasından rastgele yöntemle belirlenmiş firmalardan 9 adet endüstriyel (çam, meşe ve Doğu kayını) sandalye temin edilmiştir. Bu sandalyelere TS EN 1728 ve TS EN 1729-2'ye uygun sağlamlık testi uygulanmıştır. Bu testlerin sonucunda, bu iki grup sandalyelere uygulanan testler ile belirlenen sandalye dayanıklılık değerleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucu piyasadaki alınan sandalyelerin sağlamlığı tasarım sandalyelerin sağlamlığından daha az olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, endüstriyel sandalyelerde ergonomik form ve ölçülere önem verilmediği görülmüştür. Tasarım sandalyelerde bu sorunlar düzeltilerek, endüstri kurumlarına öneri olarak sunulmuştur

**Anahtar Kelimeler:** Ahşap sandalye, endüstriyel tasarım, dayanıklılık, estetiklik, dayanıklılık testi.

# Aestheticity and Durability Optimization in Industrial Chair Design

## ABSTRACT

The chair of this furniture is widely used and there is a lot of variety and type in the market. Most companies in the furniture market produce the chair by default. The majority of these series and stacked chairs are not based on engineering calculations and aesthetic requirements. Therefore, the aim of the study is on aesthetics and durability optimization in industrial chair design. In the study, element sizes and joints were determined based on the strength analysis as a method, and 9 design (pine, oak and oriental beech) chair samples were produced with aesthetics optimization in the parts allowed by this analysis. At the same time, 9 industrial (pine, oak and oriental beech) chairs samples were obtained from randomly selected companies from the furniture marketing market. These chairs were subjected to rigidity test in accordance with TS EN 1728 and TS EN 1729-2. As a result of these tests, the chair durability values determined with the tests applied to these two groups of chairs were compared with each other. As a result of the comparison, the strength of the chairs obtained from the market was found to be less than the strength of the design chairs. In addition, ergonomic forms and measurements were not given importance in industrial chairs. These problems were corrected in the design chairs and presented to the industry institutions as suggestions.

**Keywords:** Wood chair, industrial design, durability, aesthetics, endurance test.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Endüstriyel olarak üretilen ve yaygın olarak kullanılan, aynı zamanda önemli bir dış ticaret ürünü olan mobilyanın estetik değerler ve mühendislik hesaplarına göre tasarımı önemli bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır.

Geleneksel ve endüstriyel yöntemlerle üretilen genelde tüm ürünlerin, özelde de mobilya ve sandalyenin tasarım ve üretimine tek yanlı yaklaşımlarla yoğunlaştığında; kullanımı sorunlu, özellikle sandalye oturma eylemine uygun olmayan ergonomik bozukluklar sunmaktadır. Endüstriyel ürünler kısaca, hangi yaklaşımla tasarlanıp üretilmişse, karşı yaklaşım karakterinden yoksun ve tek yönlü ortaya çıkmakta, bu da müşteriye hem memnuniyetsizlik hem de yeni bir ürün-eşya arayışına

sebeptir. Yani bir tatminsizlik yaratmaktadır. Bu arayış ve tatminsizliğin temelinde bakıldığında hem sağlamlık hem de estetiklik ve güzellik unsurlarının birlikte yüklendiği ürün/sandalyenin piyasada yer almamasından kaynaklandığı ortaya çıkmaktadır.

Genelde mobilya endüstrisinde, özelde ise sandalye imalat alanında ulaşılan yeni teknik, teknolojik ve materyal ile ilgili gelişmelere bakıldığında, yukarıda aranan sağlamlık-estetik ve güzellik kavramlarına uygun ürün tasarlayıp geliştirmenin ve üretmenin mümkün olduğu görülmektedir. Bunun için, tasarımcının insan ve oturma ergonomisini bilmesi ve oturma eylemini iyi analiz etmesi, bu sırada ortaya çıkacak verileri ürün (sandalye) tasarım ve şekillendirmesine aktarması yeterli olacaktır.

Bu noktadan hareketle çalışmada; sandalye taşıyıcı elemanlarında dayanım gerekliliğini olumsuz etkilemeyecek estetik (sanatsal şekillendirme) ve

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

hareketlilik uygulaması ile dayanıklılık ve estetik arasında en uygun (optimum) yapıyı tespit etmek amaçlanmıştır.

Sandalyenin insan hayatının birçok alanında kullanımı söz konusudur. Bu nedenle sandalyenin sadece sağlamlığını inceleyen pek çok çalışma bulunmaktadır. Ancak estetikliğini konu edinen araştırmalara fazla rastlanmamaktadır. Sandalyede estetiklik ve güzellik unsurlarının irdelenmesinin ihmal edildiği görülmektedir.

Altınok (1987), endüstriyel mobilya üretiminde mobilyanın tasarımı aşamasında nelerin önemli olduğunu ortaya koymuş ve bir tasarımcının endüstriyel mobilya tasarımında bu faktörlere dikkat etmesi gerektiğini belirtmiştir [1].

Altınok (1995), masif ahşaptan üretilen sandalyenin tasarımında mukavemet elemanlarının boyutlandırılmasını ele almıştır. Bunun sonucunda kritik oturma pozisyonundaki sandalyenin performansında birinci sırada önemli kriter çerçeve düğüm noktalarının h boyutu ve zıvanaların tutkallı bağlantı sağlamlığı, ikinci sırada önemli kriter ise çerçeve elemanlarının ve çerçeve uzantısı ayak alt ve üst kısımlarının kesit boyutları olarak belirlenmiştir [2].

Yılmaz ve Güntekin (2012), Doğu kayınından olan farklı ara kayıt konumlarına göre üretilmiş sandalyelerin kritik oturma pozisyonlarında ve ara kayıt elemanlarının yer değiştirildiğinde sandalye elemanlarına etki eden uç kuvvetler ve momentleri bularak, gerilme ve deformasyonların en fazla ara kayıtsız modellerde meydana geldiğini belirtmişlerdir [3].

Tankut ve Sözen (2015), kayın odunundan ve metal birleştirmeli sandalye iskeletlerinde yorulma performanslarını belirlemiştir. Yorulma testlerinin sonucu olarak ara-kayıt birleştirmelerindeki metal birleştirme elemanları istenilen seviyeye ulaşamaz iken sandalyenin arkalık kısımlarında kabul seviyelerini tamamladığı belirtilmiştir [4].

Likos (2013), sandalye köşe birleştirmelerinde uygulanan farklı zıvana kesit formlarının sandalye mukavemetine etkisi incelenerek elde edilen sonuçlar yapısal analiz programıyla karşılaştırmıştır. Sonuç olarak Yapılan T-tipi köşe birleştirme deneylerinde zıvana kesit formuna bağlı olarak 3 değişik zıvana boyunda farklı sonuçlar elde edilmiş; yapısal analiz programından elde edilen moment değerleri ile deneyler sonucundaki değerler karşılaştırılmış ve %92,3 yakınlık derecesinde tutarlılık belirlenmiştir [5].

Kürelî (1988); sandalyedeki ayak-kayıt birleştirmelerinde kullanılan düz zıvanalı, kavelalı ve kavelalı-zıvanalı birleştirmelerin mukavemeti karşılaştırılmıştır. Bunun sonucunda sandalyede ön ve arka ayak kayıtlarında kavelalı birleştirme, yan kayıt ve ayaklarında ise zıvanalı birleştirmenin uygulanması vurgulanmıştır [6].

Güntekin (2017), Birleştirmelerin özellikleri eleman özelliklerinden daha önemli olduğunu belirtmiştir. Mobilyada elemanların estetik tasarımı çoğu zaman diğer

faktörlerin önüne geçtiği için mobilya elemanlarının gereğinden fazla büyük yapılabildiğini belirtmiştir [7].

Uçmak (2016), Türkiye Mobilya Endüstrisinde faaliyet gösteren, çok çeşitli sandalye modellerini üreten bir üretici firmada demonte olarak üretilen çeşitli tiplerdeki ev içi kullanım sandalyelerinin, ürün mühendisliği yöntemleri uygulanarak mukavemet özelliklerinin geliştirilmesi ve optimizasyonu yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, orijinal modellerle ve yapısal analiz sonuçları ile karşılaştırılmış değerlendirilmiş ve yeterli mukavemete gelmediği tespit edilen sandalyeler için alternatif optimizasyonlara göre istenilen mukavemet değerlerine ulaşıncaya kadar bu aşama devam ettirilmiştir [8].

Aksu'nun (2012), bu çalışmada kent mobilyalarının genel tanımlamalarını yapılmıştır. Kent mobilyalarını tasarlarken diğerlerinden ayıracak; işlev, estetik, biçim, malzeme, renk, doku ve algılana bilirlilik ölçütleri üzerinde durulmuş ve günümüz kent mobilyaları tasarım örnekleri ile değerlendirilmiştir. Aksu, özgün ve yaratıcı kent mobilyaları tasarımlarının, yer aldıkları mekânlarda hem kullanım kalitesini hem de görsel kaliteyi artırarak, kent kimliğini ve kullanıcıların psikolojik durumlarını olumlu yönde etkileyebildiğini savunmuştur [9].

Kuşkun (2013); ahşap sandalyelerin ürün mühendisliği yöntemleriyle tasarım ve analizi, aynı sandalyelerin performans test ekipman ve prosedürleriyle ölçümü ve son olarak testlerden elde edilen sonuçların bilgisayar destekli analiz verileriyle karşılaştırılmasını çalışmıştır. Bu deneyler sonuçlarına göre, birleştirmelerinin elastikiyetinde zıvana genişliğinin, moment taşıma kapasitesinde zıvana uzunluğunun etkili olduğu anlaşılmıştır. Sonuç olarak sonlu elemanlar metoduyla yapılan üç boyutlu yapısal analizlerin, sandalyenin genel mukavemeti açısından kabul edilebilir tahmini değerler sağladığı görülmüştür [10].

Kasal, Yüksel, Kılıç, Ergün ve Özcan (2015c); oturma mobilyalarının tasarımında, ergonomik kriterlerin belirlenmesi için bir "insan odaklı ürün geliştirme" yazılımının kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda, ürün geliştirme yazılımından alınan veriler, anketlerden alınan veriler ile tutarlı çıkmış, insan odaklı ürün geliştirme yazılımının, tasarlanacak mobilyaların ergonomik olarak belirlenmesinde kullanılabilir olduğu ortaya koyulmuştur [11].

Diler (2013), bu tezinde Türkiye Mobilya Sektöründe üretilen sandalyelerin performanslarının belirlenmesini ve sandalyelerin performanslarına göre sınıflandırılabilmesi için gerekli sayısal veri tabanının oluşturulmasını çalışmıştır. Deney sonuçlarında, sandalye modelleri arasında mukavemet açısından büyük farklılıklar olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, sandalye performans değerleri için zayıf, orta ve yüksek olarak kabul edilebilir tasarım yük değerleri tespit edilmiş ve ALA standardında verilen hafif, orta ve ağır kullanım yükleri ile tutarlı olduğu belirlenmiştir [12].

Eckelman (2003), bu çalışmada mobilya mühendisliğinde son adımın birleştirme noktalarının

tasarlanması olduğunu savunmuştur. Buna göre birleştirme yerlerinin tasarımı aşamasında, her bir birleştirmenin, kullanımı sırasında maruz kalabileceği yükün şiddeti ve tipinin doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Daha sonra analizler yapılarak gerekli optimizasyonlar gerçekleştirilmelidir. Sonuç olarak, mobilya birleştirmeleri her zaman bir mobilyanın en zayıf yerleridir [13].

Bu çalışmada, piyasada ticari kaygılar ile üretilip satışa sunulan sandalyeler ile dayanıklılık analizine dayalı olarak eleman boyutları ve birleşme yerleri belirlenmiş ve bu analizin izin verdiği kısımlarda estetiklik optimizasyonu yapılmış tasarım sandalyelerin birbirleri ile karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu karşılaştırmada belirlenecek temel verilerin endüstriyel tasarımcılar ve üreticiler paylaşarak, sektörde bir optimizasyon sağlanacaktır.

## 2. MALZEME VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1. Malzeme (Material)

#### 2.1.1. Ahşap malzeme (Wood material)

Araştırma materyali; deney örneği ve prototip sandalyeleri hazırlanmasında kullanılacak I. Sınıf Sarıçam (*Pinus sylvestris* L.), Doğu kayını (*Fagus orientalis* L.) ve Sapsız meşe (*Quercus petraea* spp.) keresteler Ankara Mobilyacılar Sitesi'nden rastgele

sağlanır ve iyi bir tutuculuk kazanır [14]. Poliüretan tutkalının yoğunluğu 1,1 g/cm<sup>3</sup>, pH 7 ve viskozitesi 25 °C'de 3300-4000 cP idi. 20 °C'de ve yüzde 65 bağıl nemde 30 dakikada katılaştır. Yapıştırıcının her iki yüzeye de 150 g/m<sup>2</sup> olarak uygulanır [15].

### 2.2. Yöntem (Method)

Ahşap sandalye bir oturma mobilyası olduğundan oturma eylemi incelenip oturma eylemi sırasında mobilyanın zorlanma eşikleri belirlenmiştir. Sandalye kullanımı sırasındaki zorlanmalara göre statik analizin kurguları oluşturulmuştur, bu kurgulara göre ve estetiklik sağlayacak şekillendirmeyi hedefleyen (sandalye ana taşıyıcısı olan çerçevenin elemanlarının konikleştirme, eğmeçli olarak şekillendirilmesi gibi hususları) mukavemet analizi ile belirlenip, teorik olarak sandalyenin konstrüksiyonu tayin edilmiştir.

#### 2.2.1. Teorik analiz (Theoretical analysis)

Mühendislik analizleri bakımından, TS EN 1728 [16] ve TS EN 1729-2 [17] standartlarında öngörülen dayanıklılık ve performans özellikleri incelenmiştir. Bu özelliklerin statik analizler yapılmıştır: Böylece, sandalyenin kullanım sırasında veya testler sırasında zorlayıcı iç kuvvetlerin (normal kuvvetler-N, kesme kuvvetleri-T ve momentler-M) sandalyenin hangi kısımlarında yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Statik analizlerde "kesme yöntemi" uygulanmıştır.

Statik analizlerde zorlayıcı iç kuvvetlerin belirlenmesinden sonra, bu kuvvetlere karşılık gelecek

**Çizelge 1.** Ahşap türlerine ait emniyet gerilmeleri (Safety stresses of wood types)

Ahşap Türü	I. Sınıf Ahşap Malzemelerin Emniyet Gerilmeleri (Kg/cm <sup>2</sup> )				
	Eğilme	EMO	Basınç	Kesme	Yapışma
Sarıçam	13	100	110	27	9
Doğu kayını	14	110	120	36	12
Sapsız meşe	14	120	120	36	12
EMO: Eğilmede Elastiklik Modülü					

yöntemle belirlenmiş ve temin edilmiştir. Tedarik ve satın alma sürecinden sonra kerestelerin kaba ölçülerinde (taslak ölçülerde) kesilerek iç gerilmelerinin alınması ve kuruması sağlanmıştır. Kurutma işlemi için kesilmiş taslak parçalar 20°C sıcaklık ve %65 bağıl nem içeren iklimlendirme odasına istif edilerek imalat işleminin başlamasına kadar bekletilmiştir.

#### 2.1.2. Tutkal (Glue)

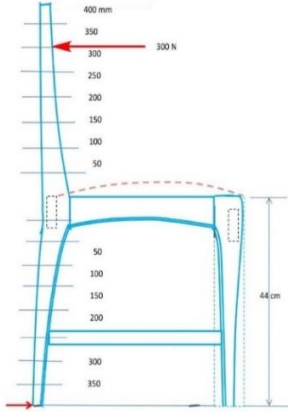
Örnek sandalyelerin üretiminde poliüretan tutkalı kullanılmıştır. Poliüretan tutkalı, uygun izosiyanat ve çift bağılı alkolden elde edilir. Oldukça elastik olup, kaynar suya, kimyasal maddelere, yağlara ve mikroorganizmalara dayanımı mükemmeldir. Ahşap malzemeyi farklı türdeki malzemeler ile yapıştırmak için de idealdir. DIN EN 204 standartlarına göre D4 normundadır. Solvent içermeyen ürün 2 saat preslendikten sonra malzemeyi zımparalanabilir ve tıraşlanabilir hale sokar. 24 saat sonra tam kürlenme

olan sandalye taşıyıcı sistem elemanlarının boyutlandırması yapılmıştır. Bu süreçte; çalışmada kullanılacak birinci sınıf Sarıçam, Doğu kayını ve Sapsız meşe'nin emniyet gerilmelerinden yararlanılmıştır (Çizelge 1).

#### Kesme metodu ile sandalyenin statik analizi (Static analysis of the chair by cutting method)

Teorik analizde sandalye taşıyıcı çerçeve sisteminin ve çerçeve elemanlarında dağılan iç kuvvetler belirlendikten sonra bu kuvvetleri karşılamak üzere gerekli olan eleman en kesitleri (dolu en kesit) mukavemet analizi ile belirlenmiştir. Daha sonra bu elemanlara açılacak kavala deliği ve/veya zıvana yuvası gibi eleman en kesitini zayıflatıcı boşluklar dikkate alınarak, elemanın delik veya zıvana kısmında yeniden boyutlandırma yapılarak, sandalye taşıyıcı çerçeve sisteminin dayanıklılığını

oluşturan birleşme noktalarında gerekli dayanıklılık sağlanmıştır (Şekil 1).



**Şekil 1.** Arka ve ön ayakta teorik analize dayalı estetik şekillendirme (Aesthetic shaping on the back and front feet based on theoretical analysis)

Teorik analiz kısmında belirlenen iç kuvvet denklem ve formülleri:

Moment denklemi:

$$(M1 - (303 \cdot X1) = 0 \text{ (Nmm)} \quad (1)$$

Direnç denklemi:

$$\sigma = \frac{M}{W} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (2)$$

kullanılarak, Şekil 1'de görülen arka ayak üst ve alt kısmındaki ve ön ayaktaki eğim, kavis ve koniklik, yan kayıtlardaki kavislerin her bir 50 mm'lik kesitlerde yeterlilikleri hesaplanarak sandalyeye estetiklik kazandıran arka-ayak üst kısmı ve alt kısmı kavislerinden oluşan hareketli kısımlar belirlenmiştir. Buna göre, arka ayak kalınlık 25 mm sabit olmak kaydıyla, gerekli eleman en-kesit genişliği (yukarıdan aşağıya doğru) Çizelge 2'de verilmiştir.

**Çizelge 2.** Sandalye arka ayak kesim yerlerindeki momente göre gerekli en-kesit (h) ölçüleri (Necessary cross-sectional (h) dimensions according to the moment at the back of the chair)

Kesim yeri (mm)	Moment (Nmm)	Gerekli "h" (mm)	Kesim yeri (mm)	Moment (Nmm)	Gerekli "h" (mm)
300	M <sub>1</sub> = 15150	16	150	M <sub>4</sub> = 60600	32
250	M <sub>2</sub> = 30300	23	100	M <sub>5</sub> = 75750	36
200	M <sub>3</sub> = 45450	28	50	M <sub>6</sub> = 90900	40

Belirlenen en-kesit boyutları insan bel eğrisine paralellik oluşturacak bir kavis üzerine aktarılarak sandalye arka ayak alt ve üst kısmı ve ön ayak bir şablon üzerinde çizilmiş ve böylece estetiklik kazandırılmıştır. Mühendislik hesaplarına göre elemanların birleşme

yerlerinin konstrüksiyon tayini yapılmış sonra tasarımı tamamlanan sandalyenin gerçek ölçü ve biçime sahip prototip teknik resmi çizilmiştir.

Statik ve mukavemet analiz süreçlerinde belirlenen eleman en kesit ve birleşme yeri gerekliliklerinin dışında kalan (taşıyıcı sistemde kuvvet ve gerilme yoğunlaşması olmayan) kısımlara estetiklik kazandırmak üzere sanatsal şekillendirme uygulanan sandalyeler tasarlanıp her üç ahşap türünden olmak üzere üretilmiştir.

Bu araştırmada, tasarım sandalyeler ve aynı ahşap türlerinden olmak üzere piyasa şartlarında tasarlanmış ve üretilmiş olan piyasadan temin edilen sandalyeler üzerinde çalışılmıştır. Üretilen tasarım sandalyelerde; sandalye arka ve ön ayaklarında, arkalık elemanında sanatsal estetiklik kazandırılmak üzere şekillendirmede tek bir kavis belirlenerek kullanılmıştır. Tek kavis ve kullanımı kalıp imalatında ve sandalye elemanlarının seri olarak üretiminde zaman ve malzeme tasarrufu sağlamıştır. Bu durum, üretim verimliliği düşünülerek tasarlanmıştır.

## 2.2.2. Deneysel örneklerinin hazırlanması (Preparation of test samples)

Endüstriyel tasarımı tamamlanmış ve gerçek boyutlarda teknik resmi çizilmiş olan prototip sandalyelerin (her üç ahşap türünden birer adet olmak üzere) öncelikle; kazandırılmış estetiklik biçimine uygun olarak arka ayak, yan kayıt, ön ayak ve arkalık elemanları için üretim kalıpları hazırlanmıştır. Hazırlanan kalıplar yardımcı ile kavisli hatlara sahip arka ve ön ayaklar, yan, ön ve yaslanma yeri kayıtları kaba kesimleri yapılmış, daha sonra kavisli yüzeyler yine kalıplar yardımı ile freze makinesinde gerçek ölçü ve kavise göre temizlenmiştir. Tüm elemanlara delik, zıvana, oluk vb. işlemler açılmış ve sandalyelerin önce ikileme (bir yan taşıyıcı çerçevenin birleştirilmesi) işlemi ve daha sonra dörtleme (ikilenmiş çerçevelerin ara kayıtlar ile birleştirilmesi) işlemi gerçekleştirilmiştir (Resim 1).





**Resim 1.** Deney için üretilen endüstriyel (a) ve tasarım (b) sandalyeler (manufactured industrial (a) and design (b) chairs for experiments)

İkileme ve dörtleme işlemindeki tutkallama süreçlerinde yapıştırıcı; elemanların hem zıvanasına ve hem de eşlenik kısmına (yuvasına)  $150 \text{ g/m}^2$  sürülmüş, sıkıştırma kancası ile (tüm işlemlerde aynı sayıda döndürerek yaklaşık  $2 \text{ N/mm}^2$  lik basınçla) preslenmiştir. Sandalyeler presleme işleminde 24 saat bekletilmiştir. Endüstriyel sandalyeler ise üreticiler arasından rastgele yöntemle belirlenmiş üreticiden, yine aynı yöntemle temin edilmiştir.

Bu iki aşamalı sandalye hazırlanma işleminin tamamlanmasından sonra sandalyeler  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  sıcaklık ve  $\%65 \pm \%5$  bağıl neme sahip iklim şartlarında değişmez ağırlığa ulaşmaya kadar bekletilmiştir.

### 2.2.3. Ölçüm ve deney yöntemi uygulamaları (Measurement and test method applications)

Deney örneği Tasarım (3x9 adet çam, meşe ve Doğu kayını) Sandalye ve Endüstriyel (3x9 adet çam, meşe ve Doğu kayını) Sandalyelere standartların (TS EN 1728 [16] ve TS EN 1729-2) [17] ön gördüğü ‘Oturma Yeri ve Arkalık Statik Yük Testi’ ve ‘Diyagonal Sağlamlık Testi’ uygulanmıştır (Resim 2, Resim 3). Önce tüm örnekler 10 mm/dak hız ile oturma yeri ve arkalık testi uygulanmış, daha sonra bir önceki testi başaran örnek

sandalyelere universal test cihazında aynı hız ile diyagonal test uygulanmış ve sandalyelerin taşıyabileceği en büyük kuvvet tespit edilmiştir.

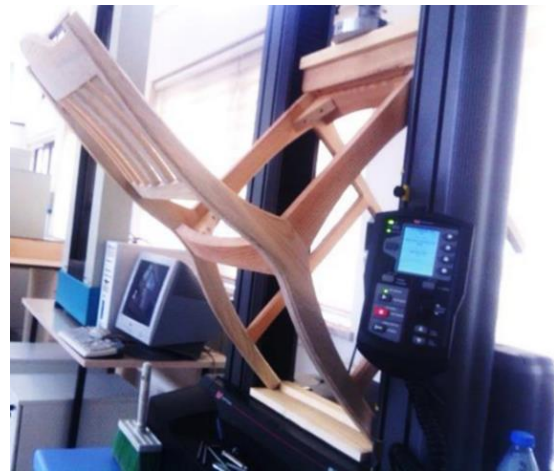
Tasarım Sandalyelerde ve Endüstriyel Sandalyelerde test öncesi ve test sonrası arkalık eğimi ölçüm ve tespitleri yapılarak değerler kaydedilmiştir. Daha sonra bu değerler birbirleri ile karşılaştırılarak, test sırasında birleşme yeri zıvanalarında bir açılma olup olmadığı belirlenmiştir (Resim 4).



**Resim 4.** Sandalyede arkalık açıklık “a” ölçümü (Backrest clearance “a” measurement in the chair)



**Resim 2.** Oturma yeri ve arkalık statik yük testi uygulaması (Seating and back rest static load test application)



**Resim 3.** Diyagonal test uygulaması (Diagonal test application)

TS 9215 [18] standardı diyagonal sağlamlık testinde; sandalye taşıyıcı çerçevesine uygulanacak 800 N'luk kuvvete, herhangi bir deformasyon meydana gelmeden dayanması durumunda, test başarılı sayılmaktadır. Bu durumda, Endüstriyel Sandalyelerde elde edilen maksimum kuvvette zıvanalarda önemli miktarda açılma meydana geldiği için bu standarda göre başarılı sayılmayacağı söylenebilir. Tasarım Sandalyelerde elde edilen maksimum kuvvet 800 N'dan en az 2,5 kat fazla olduğundan ve ancak bu düzeyde zıvana açıklığı az miktarda meydana gelebildiğinden, tasarım sandalyeler 2,5 kat daha sağlamdır denebilir.

### 2.3. İstatistiksel Değerlendirme (Statistical Evaluation)

Üç ayrı ahşap türü (Sarıçam, Doğu kayını ve sapsız meşe) ve iki tip (Endüstriyel ve Tasarım) sandalyede arkalık ve

arkalık açıklık ölçümü ("a" ölçüsü) değerleri, oturma yeri ve arkalık statik sağlamlık testi sonuçları ve diyagonal sağlamlık testi sonuçları ortalama değerleri hesaplanarak istatistiksel değerlendirme yapılmış ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Araştırma konusu örnek ve değerlerin sayısı az olduğu için bunlara varyans analizi uygulanmamıştır.

### 3. BULGULAR (FINDING)

#### 3.1. Arkalık Açıklık Ölçüm Sonuçları (Back Clearance Measurement Results)

Tasarım ve Endüstriyel Sandalyelerde oturma yeri ve arkalık statik sağlamlık testinden önce ve sonra arkalık açıklık ölçümü yapılmış, ölçüm değerleri ve ortalamaları Çizelge 3' de verilmiştir.

Çizelge 3. Sandalye arkalık sağlamlık testinde zıvana açıklık miktarı ve ortalamaları (Amount and average of tenon opening in chair backrest strength test)

Sandalye ve Malzeme Türü	Testten önceki "a <sub>1</sub> " ölçüsü (mm)	Testten sonraki "a <sub>2</sub> " ölçüsü (mm)	a <sub>2</sub> -a <sub>1</sub> = fark	Arka Ayak zıvana açıklığı (mm)
ES-Çam	84,02	99,62	15,62	6,64
	85,86	96,64	10,78	6,44
	84,66	99,33	14,67	6,62
<b>Ortalama</b>	<b>84,84</b>	<b>98,53</b>	<b>13,69</b>	<b>6,56</b>
ES-Kayın	81,08	90,62	9,54	5,12
	81,14	89,56	8,42	5,06
	82,55	88,52	5,97	5,00
<b>Ortalama</b>	<b>81,59</b>	<b>89,56</b>	<b>7,97</b>	<b>5,06</b>
ES-Meşe	83,12	90,30	7,18	5,44
	82,42	89,32	6,92	5,26
	82,88	93,29	8,41	5,62
<b>Ortalama</b>	<b>82,06</b>	<b>90,97</b>	<b>7,50</b>	<b>5,44</b>
TS-Çam	79,01	80,3	1,31	2,22
	70,04	71,20	1,16	2,46
	79,32	80,63	1,31	2,28
<b>Ortalama</b>	<b>76,12</b>	<b>77,38</b>	<b>1,26</b>	<b>2,32</b>
TS-Kayın	80,15	81,48	1,33	1,22
	79,78	81,10	1,32	1,08
	81,49	82,84	1,35	1,12
<b>Ortalama</b>	<b>80,47</b>	<b>81,81</b>	<b>1,33</b>	<b>1,14</b>
TS-Meşe	81,51	82,86	1,35	1,46
	79,46	80,77	1,31	1,58
	81,49	82,84	1,35	1,46
<b>Ortalama</b>	<b>80,82</b>	<b>82,15</b>	<b>1,34</b>	<b>1,51</b>

Not: ES: Endüstriyel Sandalye, TS: Tasarım Sandalye, Kayın: Doğu kayını

Çizelge 3'e göre, deney öncesi her bir ahşap türü "a" değerleri sandalyelerin montajı sırasındaki orijinal halin değeri olup farklı olarak elde edilmiştir. Endüstriyel sandalyelerden en büyük fark ortalaması çam örnekte 13,69 mm, daha sonra sırasıyla Doğu kayınında 7,97 mm ve meşede 7,50 mm olarak gerçekleşmiştir. Çam örnekte diğer malzemeden örneklere göre iki kat daha fazla açıklık oluşturmuştur. Bu değerler tasarım sandalyede en büyük meşede 1,34 mm, Doğu kayınında 1,33 mm ve çamda 1,26 mm şeklinde olmuştur. Tasarım sandalyedeki deney sonrası açıklık fark değerleri birbirine çok yakın çıkmıştır. Tasarım sandalye açıklık ölçüsü farkları endüstriyel sandalyeye göre tüm ahşap örneklerde %9,2 ile %17,8 arasında kalmıştır. Yani tasarım sandalyeler aynı zorlamalar karşısında daha az deforme olmuş, daha fazla kararlılık ve dayanım göstermiştir.

### 3.2. Diyagonal Sağlamlık Testi ve Ölçüm Sonuçları (Diagonal Strength Test and Measurement Results)

Bu test 6 sandalyeye uygulanmış ve bunlara ait değerler Çizelge 4' de verilmiştir.

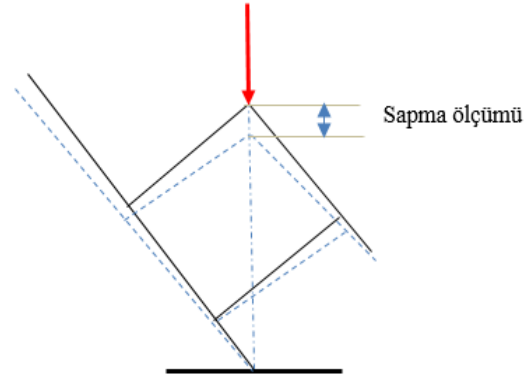
Çizelge 4. Diyagonal sağlamlık deneyi sonuçları (Diagonal strength test results)

Sandalye ve Malzeme Türü	Max. Kuvvet (N)	Max. Sapma (mm)	$\frac{Sapma}{Kuvvet}$
ES-Çam	1594,41	18,25	0,011
ES-Kayın	1586,65	19,95	0,012
ES-Meşe	1049,88	20,68	0,019
TS-Çam	2062,61	19,04	0,009
TS-Kayın	6012,37	34,81	0,005
TS-Meşe	3705,37	15,43	0,004

Çizelge 4'e göre Endüstriyel Sandalyelerin taşıdığı maksimum diyagonal test kuvveti; en büyük Çam Sandalyede 1594,41 N, ikinci sırada Doğu Kayını Sandalyede 1586,65 N ve en küçük Meşe Sandalyede 1049,88 N olarak bulunmuştur. Bu Kuvvetlere karşılık sandalye taşıyıcı çerçevelerinde meydana gelen maksimum sapma (kuvvet karşısında taşıyıcı çerçevenin yamulması) miktarı: en büyük Meşe Sandalyede 20,68 mm, ikinci sırada Doğu Kayını Sandalyede 19,95 mm ve en küçük Çam Sandalyede 18,25 mm olarak tespit edilmiştir.

Endüstriyel sandalyelerde taşıyıcı elemanların kuvvetin etkisi yönündeki atalet momentleri düşük olduğundan

(elemanların genişliği az, kalınlığı fazla); elemanlarda birim kuvvet başına düşen sapma miktarı ters orantılı olarak gerçekleşmiştir. Rijitliği en düşük olan çamda en büyük kuvvet karşısında en küçük sapma (0,011 mm/N birim deformasyon), rijitliği yüksek olan Doğu kayını ve meşede en küçük kuvvet karşısında en büyük sapma (0,012 mm/N ve 0,019 mm/N) meydana gelmiştir. Rijitliği düşük olan çam elemanlar kuvveti yutulmuş, deformasyonu azaltmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Diyagonal Sağlamlık testinde sapma ölçümü  
(Deviation measurement in Diagonal Strength test)

Çizelge 4'e göre tasarım sandalyede taşıdığı kuvvete göre sapma miktarı endüstriyel sandalyelere göre yaklaşık on kat daha az olduğu görülmektedir.

## 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Ahşap Malzeme Bakımından: Testlerin sonucu dikkate alındığında; sandalye yapımında Doğu kayını ve Sapsız meşe çok uygun iken, Sarıçam malzemenin de kullanılabilirliği ortaya çıkmıştır. Ancak, bunun mühendislik hesaplarına göre tasarlanması ile mümkün olabileceği söylenebilir. Bu durum birçok referans çalışma sonucu ile örtüşmektedir (Altunok, 1995- Eckelman, 2003). Çamın yoğunluğu düşük ve tekstürünün kaba olması ve bunlara bağlı olarak yapılaşma direncinin düşük olması sandalye gibi çok devingen kullanılan bir mobilya için ikinci sırada tercih edilmesi önerilebilir.

Sandalye Tipi (endüstriyel-tasarım farklılığı) Bakımından: Tasarım sandalyelerin daha yüksek kuvvete dayanmasının gerekçesi; sandalye taşıyıcı çerçeve elemanlarının zıvana bölgesinde kuvvet tarafından zorlanma yönündeki en-kesitlerinin (25x67mm) mühendislik hesabı gereği endüstriyel sandalyeninkinden (20x50mm) daha büyük olup, taşıyıcı elemanların oluşturduğu atalet momentlerinin daha yüksek (rijiditesinin daha yüksek) olmasından kaynaklandığı söylenebilir (Resim 5). Hâlbuki bu ölçüler piyasa üretiminde rastgele ve kereste minimizasyonu esasına göre takdir edilmektedir.



**Resim 5.** Endüstriyel ve tasarım sandalyede ayak-kayıt birleştirme ve zıvana farkı (rail to leg joints and tenon difference in industrial and design chairs)

Her iki tip sandalyenin zıvana açıklık ortalamalarının sağlamlık düzeyi endüstriyel sandalyeye/tasarım sandalye oransal ilişkisinde; çam sandalyede 2,8 kat, Doğu kayını sandalyede 4,4 kat ve meşe sandalyede ise 3,6 kat daha sağlam çıkmıştır

Görsellik ve Estetik Bakımından: Piyasadan temin edilen

- Tasarım sandalyede taşıyıcı çerçeveyi oluşturan arka-ayak yan-kayıtlar ve ön-ayak yüzeylerinin kenarına iç kavis profil açılarak geniş yüzeylerdeki yeknesaklık bozulmuş ve paralel çizgisellik oluşturularak, hareketlilik kazandırılmıştır.



**Resim 6.** Endüstriyel (a) ve tasarım (b) sandalyede görünüşleri (Industrial (a) and design (b) chair views)

endüstriyel sandalyeler ve tasarım sandalyeler görsel olarak incelenip değerlendirildiğinde (Resim 6):

- Endüstriyel sandalyede tüm çizgisel hatlar ve çerçeve elemanları düz, sadece çok az kısmının kavislendirilmiş ve yaslanma eğiminin gereğinden fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu durum oturan kişinin dikkatinin dağılmasına ve vücudun öne doğru kaymasına sebep olur.
- Tasarım sandalyede tüm çizgisel hatlar ve çerçeve elemanlarının yatay ve düşey düzlemde insan antropometrik ölçü ve biçimine uygun kavis ve eğmeçlerde tasarlanmıştır.

Resim 6'ya göre tüm çizgisel hatlar ve sandalye çerçeve elemanlarının düz, sadece arka ayağın üst kısmının düşey düzlemde gereğinden fazla ve alt kısmının da az eğmeçli olduğu görülmektedir.

Sandalye arka ayak üst kısmının (arkalık) geriye doğru fazla eğik olmasının (Resim 6.a. endüstriyel sandalyede 11,5 cm) önemli iki sakıncasından söz edilebilir. *Bunlardan birisi oturma eylemi bakımından;* yaslanma açısının fazla olacağından, oturan kişinin dikkatinin dağılmasına ve vücudun öne doğru kaymasına sebep olur. *İkincisi konstrüksiyon bakımından;* özellikle masif (tek parça ahşaptan) malzemeden üretilen sandalyede



boyuna liflerin kesintiye uğraması nedeniyle eleman atalet zayıflamasına neden olur.

Tasarım sandalyede (Resim 6.b) arka ayak üst kısmının (arkalık) geriye doğru eğikliği diğeri gibi fazla değil (örnek sandalyede orta eksen üzerinde 7,5 cm) ve söz konusu sakıncaları da ortadan kaldırmıştır.

Bu araştırma, *Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Merkezi* tarafından bir proje kapsamında desteklenerek gerçekleştirilmiştir.

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Altınok, M., “Mobilya üretiminde endüstriyel tasarım”, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (1987).
- [2] Altunok, M., “Sandalye tasarımında gerilme analizine göre mukavemet elemanlarının boyutlandırılması”, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (1995).
- [3] Yılmaz, T. ve Güntekin, E., “Sandalye çerçevelerinin sonlu elemanlar analizi”, *Faculty of Forestry Journal*, 13:134-139, (2012).
- [4] Tankut, N. ve Sözen, E., “Metal birleştirme elemanı ve kavelalı birleştirme kullanılarak elde edilen masif sandalye iskeletlerinin yorulma performanslarının belirlenmesi”, *Selçuk-Teknik Dergisi*, 14 (2), 369-381, (2015).
- [5] Likos, E., “Zıvanalı birleştirmelerde kesit formunun sandalye mukavemetine etkisi”, *Doktora Tezi*, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2013).
- [6] Küreli, İ., “Sandalyelerde kullanılan önemli ahşap birleştirmelerin mekanik özellikleri”, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (1988).
- [7] Güntekin, E., “Ahşap mobilya tasarımında ebatları etkileyen faktörler”, Süleyman Demirel Üniversitesi, Orman Fakültesi, Isparta, (2017).
- [8] Uçmak, U., “Demonte Olarak Üretilmiş Çeşitli Tiplerdeki Ev Sandalyelerinin Mukavemet Özelliklerinin Geliştirilmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla, (2016).
- [9] Aksu, Ö., V., “Kent mobilyaları tasarımında özgün yaklaşımlar”, *Inonu University, Journal of Art and Design*, ISSN: 1309-9876 E-ISSN: 1309-9884 Cilt/Vol. 2 Sayı/No. 6 373-386 Yıllık Özel Sayı/Annual Special Issue , (2012).
- [10] Kuşkun, T., “Zıvana ölçülerinin ve analizi sonuçlarıyla karşılaştırılması”, *Yüksek Lisans Tezi*, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2013).
- [11] Kasal, A., Yüksel, M., Kılıç, H., Ergün, M. E. ve Özcan, C., “Oturma Mobilyası Tasarımında Bilgisayar Destekli Ergonomik Analiz”, *3. Ulusal Mobilya Kongresi*, Konya, (2015).
- [12] Diler, H., “Mühendislik Tasarımı Yaklaşımı ile Farklı Tiplerdeki Ev Sandalyelerinin Mekanik Performanslarının Değerlendirilmesi”, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2013).
- [13] Eckelman, C., A., “Textbook of product engineering and strength design of furniture”, *Text Book*, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA, (2003).
- [14] <https://apeltutkal.com/tr/urun/38/apel-marin-tutkali>, (2016).
- [15] <http://www.apeltutkal.com/betakimya.com.tr/>. (Retrieved: 28.01.2019).
- [16] TS EN 1728, “Ev mobilyası-Oturma elemanları-mukavemet ve dayanıklılığın tayini için deney metotları”, (2013).
- [17] TS EN 1729-2, “Mobilya – Eğitim kurumları için sandalyeler ve masalar – Bölüm 2: Emniyet gerekleri ve deney”, (2016).
- [18] TS 9215, “Ahşap mobilya- Mukavemet ve denge deneyleri”, (2005).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Doğal yaşlanmış ağaç malzemeye uygulanan bazı verniklerin parlaklık değerlerinin belirlenmesi

*Determination of the gloss values of some varnishes applied on the natural aged wood*

*Yazar(lar) (Author(s)): Kenan KILIÇ<sup>1</sup>, Cevdet SÖĞÜTLÜ<sup>2</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-1607-9545*

*ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-9359-1633*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Kılıç K, Söğütlü C., “Doğal yaşlanmış ağaç malzemeye uygulanan bazı verniklerin parlaklık değerlerinin belirlenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1422-1431, (2020).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.764261



# Doğal Yaşlanmış Ağaç Malzemeye Uygulanan Bazı Verniklerin Parlaklık Değerlerinin Belirlenmesi (TR)

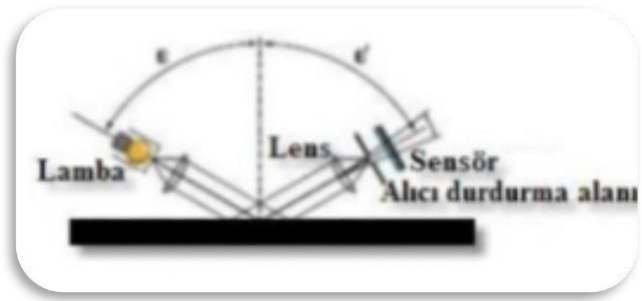
## The Determination of Gloss Values of Some Varnishes Applied on the Natural Aged Wood (EN)

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Bu çalışmada, doğal yaşlanmış ve yeni ağaç malzemenin yüzeyine uygulanan bazı verniklerin parlaklık değerleri (Gloss) araştırılmıştır (TR). / In this study, the gloss values of some varnishes that are naturally aged and applied on new woods were investigated (EN).
- ❖ Sonuç olarak, yüzey parlaklığı; yeni ağaç malzemede (37,14) doğal yaşlanmış ağaç malzemeden (36,45) yüksek bulunmuştur (TR). / According to the test results, the surface gloss was found higher in natural wood (37.14) than natural aged wood (36.45) (EN).

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Doğal yaşlanmış ve yeni ağaç malzemelere uygulan verniklerin parlaklık değerleri belirlenmiştir.



Şekil. Yüzey parlaklık ölçümleri / Figure. Surface gloss measurements

### Amaç (Aim)

Doğal yaşlanmış ağaç odunlarında yüzey parlaklık değerlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır (TR). / It is aimed to determine the surface brightness values in natural aged wood. (EN).

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Glossmetre ile 360 adet deney örneğinde yüzey parlaklık değerleri belirlenmiştir (TR). / Surface gloss values were determined in 360 experimental samples with glossmeter (EN).

### Özgünlük (Originality)

Çalışmada, ilgili ulusal ve uluslararası standartlara uygun olarak deneysel araştırmalar sonucunda elde edilen veriler kullanılmıştır (TR). / In the study, the data obtained as a result of experimental studies in accordance with the relevant national and international standards were used (EN).

### Bulgular (Findings)

Yeni ağaç malzeme (37,14) doğal yaşlanmış ağaç malzemeye (36,45) göre daha yüksek yüzey parlaklık değeri vermiştir (TR). Fresh wood (37,14) gave higher surface brightness value than natural aged wood (36,45) (EN).

### Sonuç (Conclusion)

Doğal yaşlanmış ağaç malzeme yüzeyine uygulanan vernikler, yeni ağaç malzemeye uygulanan verniklere göre daha düşük parlaklık değeri vermiştir (TR). / Varnishes applied on naturally aged woods gave a lower gloss value than varnishes applied on fresh woods. (EN).

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Doğal Yaşlanmış Ağaç Malzemeye Uygulanan Bazı Verniklerin Parlaklık Değerlerinin Belirlenmesi

(Bu çalışmada, Kenan KILIÇ'ın Yüksek Lisans tezindeki deney sonuçları kullanılmıştır. / In this study, the experimental results were used of Kenan KILIÇ master degree thesis.)

**Araştırma Makalesi / Research Article**

**Kenan KILIÇ<sup>1</sup>, Cevdet SÖĞÜTLÜ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Yozgat Bozok Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Malzeme ve Malzeme İşleme Teknolojileri, Yozgat, Türkiye

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Ağaççileri Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

(Geliş/Received : 05.09.2019 ; Kabul/Accepted : 26.01.2020)

## ÖZ

Bu çalışmada, doğal yaşlanmış ve yeni ağaç malzemeler üzerine uygulanan bazı verniklerin yüzey parlaklık değerleri araştırılmıştır. Her bir ağaç türü (3), kesit yönü (2), yaş periyodu (2) ve vernik çeşidi (3) deneme desenine göre 10'ar adet tekrerrör olmak üzere toplam 360 adet deney örneği hazırlanmıştır. Doğal yaşlanmış ve yeni sarıçam (*Pinus sylvestris* L.), sapsız meşe (*Quercus petraea* L.) ve kestane (*Castanea sativa* M.) odunlarından hazırlanan deney örneklerine, ASTM-D 3023 standardı esaslarına göre, iki kat dolgu ve iki kat son kat vernik olmak üzere ipek mat su bazlı, ipek-mat poliüretan ve ipek-mat akrilik vernikler püskürtme tabancası ile uygulanmıştır. Örneklerin yüzey parlaklıkları, TS EN ISO 2813 standardındaki esaslara uygun olarak belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre, yüzey parlaklığı yeni ağaç malzeme (37,14) doğal yaşlanmış ağaç malzemedeki (36,45) yüksek bulunmuştur. Ağaç türü düzeyinde, en yüksek parlaklık değeri sarıçamda (38,46) elde edilirken, sapsız meşe (35,89) ile kestane (36,04) arasındaki farklar istatistiksel olarak önemsiz çıkmıştır. Vernik çeşidi düzeyinde en yüksek parlaklık değeri poliüretan vernikte (39,88) elde edilmiş, bunu sırasıyla akrilik vernik (37,20) ve su-bazlı vernik (33,32) takip etmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Ağaç malzeme, parlaklık, doğal yaşlanma, vernik.

## Determination of the Gloss Values of Some Varnishes Applied on the Natural Aged Wood

### ABSTRACT

In this study, the surface gloss values of some varnishes that are naturally aged and applied on new woods were investigated. A total of 360 test samples was prepared, each with 10 repetitions according to the test pattern of each wood type (3), section direction (2), age period (2) and varnish type (3). According to the principles of ASTM-D 3023, two layers of filler and two layers of topcoat varnish for the samples of natural aged and fresh scotch pine (*Pinus sylvestris* L.), sessile oak (*Quercus petraea* L.) and chestnut (*Castanea sativa* M.) wood. applied on silk mat water based, silk mat polyurethane and silk-matte acrylic varnishes with spray gun. The surface gloss of the samples was determined in accordance with the principles in TS EN ISO 2813 standard. According to the test results, the surface gloss was found higher in natural wood (37,14) than natural aged wood (36,45). At the wood species level, the highest was obtained in scotch pine (38.46), while the difference between sessile oak (35.89) and chestnut (36.04) has been insignificant. The highest gloss value at the varnish type level was obtained in the polyurethane varnish (39.88), followed by acrylic varnish (37.20) and water-based varnish (33.32), respectively.

**Keywords:** Wood material, gloss, natural aging, varnish.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Parlaklık; tamamen geçirgen olmayan bir yüzeyin ışığı speküler (aynamsı) doğrultuda ne kadar iyi yansıttığını belirten bir optik özellik olarak tanımlanabilmektedir. Diğer bir tanımla; bir cismin yüzeyinden yansıyan ışık yoğunluğunun, yüzeye gelen ışık yoğunluğuna oranı olarak ifade edilebilir. Parlaklık, aşağıdaki 3 faktörün birleşiminden oluşmaktadır. Parlaklık ölçümleri, içlerinde sahip olduğu ışık kaynağından çıkan aydınlatma, yüzeyden belirli bir açı ile (20,60 ve 85

derece gibi) yansır ve Glossmetrenin diğer tarafındaki sensörlere ulaşır. Bu sırada, yüzeyde yansıyan ışığın miktarı, cihaz kaynağından gelen ışığın miktarına olan oranı ölçülür. Sonuçta çıkan sayısal değer bir parlaklık birimi olan Gloss Unit (G.U.) değerine çevrilerek ifade edilir [1].

Doğal yaşlanma; bir malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerinin geri dönüşümsüz değişimi olarak tanımlanabilir. Ağaç malzeme yaşlanma sonucunda fiziksel, kimyasal ve biyolojik bozunumlar gerçekleşmektedir.

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

Ağaç malzeme biyolojik özellikli bir malzeme olduğundan dolayı korumalı ya da korumasız halde, açık hava iklim şartlarına maruz kaldığında ısı, ışık, rutubet (yağmur, kar, nem, çığ), mekanik etkiler (rüzgâr, kum, kir), biyolojik zararlıların etkisi vb. etkilere karşı uzun süre dayanıklı kalamamakta olup, deformasyona ve yapısal bozunuma uğramaktadır [2-4]. Ağaç malzemenin sahip olduğu; anizotrop yapısı, tekstürü, yıllık halka yapısı, diri odunu, öz odunu, reaksiyon odunu gibi özellikleri nedeni ile makroskopik ölçekte uzun süre dış hava koşullarının etkisine maruz kaldığında bozunumlar meydana gelmektedir [5].

Açık hava iklim koşulları, ağaç malzeme yüzeyinde güneş ışınlarının etkisi ile öncelikle odun rengi çok hızlı bir şekilde değişmekte; sertlik, parlaklık ve mekanik özelliklerinde azalma meydana gelmektedir. Ağaç malzemede, fiziksel ve mekanik özelliklerindeki yaşlanmaya bağlı olarak meydana gelen değişiklikler, mikro yapıdaki kimyasal bileşenlerde meydana değişikliklerden kaynaklanmaktadır [3, 6-12].

Ağaç malzemeden üretilen mobilya ve çeşitli yapı elemanlarının dış etkilere korunması gerekmektedir. Doğal halde harici etkilere açık bırakılan ahşap eşyanın dayanımı sınırlıdır. Kullanma koşulları ve harici etkiler ahşap malzemeyi zamanla yıkımlar ve deformasyona uğratar. Dolayısıyla ahşap malzemeden üretilen ürün ve yapıların yüzeylerinin koruyucu katman ile kaplanması gerekmektedir [13].

Sarıçam, Doğu kayını, dişbudak ve sapsız meşe kullanılarak yapılan bir çalışmada, çeşitli kimyasallarla renk açma işleminden sonra akrilik, sentetik, poliüretan ve asit katalizörlü verniklerle uygulanmış, bu yüzeylerde bu kimyasalların yüzey parlaklık değerine etkileri araştırılmıştır. Araştırma sonucunda; çeşitli kimyasallarla rengi açılmış yüzeyin yüzey parlaklığına etkisinin bulunmadığı, vernik çeşidi ve ağaç türünün yüzey parlaklık değeri üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. Kullanılan verniklerden en parlak yüzeyi; akrilik vernik verirken en az parlak yüzeyi asit katalizörlü verniğin verdiği bildirilmiştir [14].

Yapılan literatür çalışmaları sonucunda, doğal yaşlanmış ağaç malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerini inceleyen çalışmaların mevcut olduğu, buna karşın doğal yaşlanmış ağaç malzemede yüzey parlaklık değerlerine ilişkin araştırmalara rastlanmamıştır. Bu çalışmada, doğal yaşlanmış ağaç malzemede uygulanan bazı verniklerin yüzey parlaklık değerlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaca uygun olarak, kullanım yerinde doğal olarak yaşlanmış sarıçam, sapsız meşe ve kestane odunlarından hazırlanan örneklerin yüzeylerine su-bazlı, poliüretan ve akrilik vernik ile uygulandıktan sonra yüzey parlaklık değerleri belirlenmiştir.

## 2. MALZEME VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1. Ağaç Malzeme (Wood Material)

Bu çalışmada, ağaçları endüstrisinde yaygın olarak kullanılan geniş yapraklı ağaçlardan sapsız meşe

(*Quercus petrea* L.) ve kestane (*Castanea sativa* M.), iğne yapraklı ağaçlardan ise sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) deney malzemesi olarak kullanılmıştır.

Ağaç malzeme seçiminde; kereste renginin doğal, liflerinin düzgün, budaksız, ardaksız, normal büyüme göstermiş, reaksiyon odunu bulunmayan, mantar ve böcek zararlarına uğramamış olmasına dikkat edilerek TS 2470'de belirtilen esaslara uyulmuştur [15]. Deneylerde kullanılan doğal yaşlanmış kestane Kocaeli İli Karamürsel İlçesinden, sapsız meşe Yozgat İli Sorgun İlçesinden, sarıçam ise Ankara İl merkezinden temin edilmiştir. Yeni ağaç malzemeler, Ankara Mobilyacılar Sitesinden rastgele seçim yöntemiyle temin edilmiştir.

### 2.2. Vernik (Varnish)

Deney örneklerinin verniklenmesinde su-bazlı ipek mat, poliüretan ipek mat ve akrilik ipek mat vernik kullanılmıştır.

### 2.3 Deney Örneklerinin Hazırlanması (Preparation of the Test Samples)

Hava kuru rutubet değerindeki ağaç malzemeler 110×110×12 mm ölçülerinde taslak olarak daha sonra ise nihai ölçü olan 100×100×10 mm boyutlarında ve kerestelerin diri odun kısımlarından, ağaç türü (3), kesit yönü (2), yaş periyodu (2) ve vernik çeşidi (3) deneme desenine göre her bir örnekten 10'ar tekrar olmak üzere toplam 360 (3x2x2x3x10) adet deney örneği hazırlanmıştır. Hazırlanan örnekler, 20±2 °C sıcaklık ve %65±5 bağıl nem şartlarında ağırlıkça değişmez hâle gelinceye kadar bekletilmişlerdir. Ön kontrolde ortalama rutubet miktarı, rasgele seçilen 20 örnekte %12 olarak belirlenmiştir.

#### Rutubet miktarı (Moisture content)

TS 2471 esaslarına uyularak yapılmıştır [16]. Bu maksatla, örneklerin ağırlıkları ( $M_r$ ), ±0,01 g duyarlılıkla ölçüm yapabilen analitik terazide tartıldıktan sonra havalandırılabilen etüvde 103±2 °C sıcaklıkta değişmez ağırlığa ulaşmaya kadar kurutulmuştur. Bu durumda, kurutma dolabından alınan örnekler, içerisinde fosfor pentoksit ( $P_2O_5$ ) bulunan desikatörde soğutulduktan sonra tam kuru haldeki ağırlıkları ( $M_o$ ) tartılmıştır. Bunlara göre rutubet ( $R$ );

$$R = \frac{M_r - M_o}{M_o} \quad \begin{array}{l} M_r : \text{Rutubetli ağırlık} \\ M_o : \text{Tam kuru ağırlık} \end{array} \quad (1)$$

#### Yoğunluk (Density)

Yoğunluk değerleri, TS 2472'de belirtilen esaslara uyularak belirlenmiştir [17]. Hava kuru yoğunluk deney örnekleri 20±2 °C sıcaklık ve %65±5 bağıl nemdeki iklimlendirme dolabında değişmez ağırlığa ulaşmaya kadar, tam kuru yoğunluk örnekleri ise havalandırılabilen kurutma dolabında 103±2 °C sıcaklıkta ağırlığı değişmez hale gelinceye kadar bekletilmişlerdir. Bu durumda, ağırlıkları ±0,01 g duyarlılıklı analitik terazide tartılarak ( $M$ ), boyutları ±0,01 mm duyarlılıklı mikrometrik dijital kumpasla belirlendikten sonra hacimleri ( $V$ ) hesaplanmıştır. Bu değerlere göre, hava kuru yoğunluk ( $\delta_{12}$ ) değerleri 2

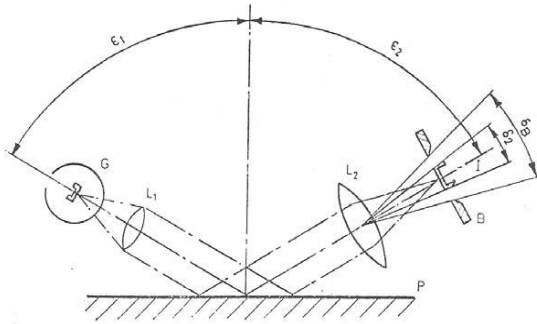
nolu eşitlik, tam kuru yoğunluk ( $\delta_0$ ) değerleri ise 3 nolu eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\delta_{12} = \frac{M_{12}}{V_{12}} \quad \begin{array}{l} M_{12} : \text{Hava kuru ağırlık} \\ V_{12} : \text{Hava kuru hacim} \end{array} \quad (2)$$

$$\delta_0 = \frac{M_0}{V_0} \quad \begin{array}{l} M_0 : \text{Tam kuru ağırlık} \\ V_0 : \text{Tam kuru hacim} \end{array} \quad (3)$$

Deney numunelerinin verniklenmesi (Varnishing of test samples)

Deney numunelerinin verniklenmesinde ASTM-D 3023 standardı esaslarına uyulmuştur [18]. Verniklerin uygulamaya hazır hale getirilmesinde, karışım oranları katman performansını olumsuz yönde etkilemeyecek şekilde ve üretici firmaların önerileri doğrultusunda



Şekil 1. Glossmetrenin ölçme prensibi [22] (Measuring principle of glossmeter)

yapılmıştır. Viskozite ölçümleri, 4 mm delik çaplı flow-cup ile  $20 \pm 2$  °C sıcaklık ve  $\%65 \pm 5$  bağıl nem ortamında yapılarak 18 saniye (98-100 cp) olarak belirlenmiştir.

Dolgu verniği ve son kat vernik uygulaması, hava basıncı 2 bar (28 atü) ve tabanca uç açıklığı 1,4 mm olan üstten depolu püskürtme tabancası ile örnek yüzeyinden 20 cm yüksekte, önce liflere dik daha sonra liflere paralel yönde normal çapraz kat uygulaması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Her kat arası 24 saat süre ile kurumaya bırakılmıştır. Kurutulan örneklerin 400 numara zımpara ile hafifçe zımparalanarak bir sonraki katman için uygun hale getirilmiştir. Uygulama iki kat dolgu verniği ve iki kat son kat vernik için tekrarlanmıştır.

Katı madde miktarı tayini (Determination of the solid content)

Verniklerin katı miktarları, TS EN ISO 3251'de belirtilen esaslara uygun olarak belirlenmiştir [19]. Vernik, darası önceden alınan Ø 6 cm'lik konkav saat camına 5 g olacak şekilde damlalık ile konulmuş, daha sonra etüvde 60 °C'de ağırlıkça sabit hale gelene kadar bekletilmiştir. Bu süre sonunda çözücüler tamamen buharlaştırılmış ve yeniden tartımları yapılarak katı madde miktarı ( $K_m$ );

$$V_u = G - D \quad \text{Ç}_b = G - E \quad \% K_m = \frac{V_u - \text{Ç}_b}{V_u} \times 100 \quad (4)$$

$V_u$  : Uygulanan vernik  
 $G$  : Yaş ağırlık  
 $K_m$  : Katı madde  
 $\text{Ç}_b$  : Buharlaştıran çözücü  
 $D$  : Dara  
 $E$  : Kuru ağırlık

Kuru film kalınlığı tayini (Dry film thickness determination)

Deneylerden önce, örnek yüzeyinde tam kuruması gerçekleşen vernik katmanının kuru film kalınlıkları, 5 µm hassasiyetle ölçüm yapabilen komperatörle ASTM D-1005-95 esaslarına uyularak belirlenmiştir [20].

**2.3. Parlaklık Değerinin Belirlenmesi** (Determination of Gloss Value)

Deney örneklerinin parlaklık değerleri, TS EN ISO 2813'den faydalanılarak parlaklık ölçer (Glossmetre) ile belirlenmiştir [21].

Deney cihazı, bir ışık kaynağı ile paralel veya birbirine yaklaşan ışık demetini deney alanına yönelten mercek sistemi, fotosel ve yansıyan ışık konisini alan alıcıdan meydana gelmiştir, Şekil 1'de verilmiştir.

$G$ : Lamba

$L_1, L_2$ : Mercekler

$B$ : Alıcı pencere

$P$ : Örnek yüzeyi

$E_1 = E_2 : 60 \pm 2^\circ$

$\delta_B$ : Alıcı açıklığı  $4,4 \pm 0,1^\circ$

$\delta_2$ : Kaynak görüntü açısı  $0,75 \pm 0,25^\circ$

$I$ : Filament görüntüsü

Ölçümlerde  $60 \pm 2^\circ$  de ölçüm yapan, parlaklık ölçme cihazı her işlemden önce kalibre edilmiştir. Günlük kalibrasyonda iyi cilalanmış ve düzgün yüzeyli, kırılma indisi 1.567 olan ve parlaklığı her geometri için 100 olarak belirlenmiş siyah cam kullanılmıştır [23, 24]. Örnek yüzeylerinde, liflere dik ve paralel yönde ölçüm yapılmış ve bu ölçümlerin aritmetik ortalamaları parlaklık değeri olarak kaydedilmiştir.

Parlaklık ölçme işlemi, yaygın olarak  $20^\circ$ 'de,  $60^\circ$ 'de ve  $85^\circ$ 'de ışık ışınları göndermek ve aynı derecelerde dönen ışık şiddeti oranını ölçmek biçiminde yapılmaktadır.

$60^\circ$ 'de yapılan parlaklık ölçümlerine göre yüzeyler mat, yarı mat, yarı parlak, parlak ve çok parlak gibi sınıflandırılmaktadır. Parlaklık değerlerinin sınıflandırılması Çizelge 1'de verilmiştir.

**Çizelge 1.** Parlaklık değerlerinin sınıflandırılması [1] (Classification of brightness values)

60°'de Ölçülen Parlaklık	Parlaklık Sınıfı
20'nin altı	Mat
25-30 Yarı mat	Yarı mat
35-45 İpek mat	İpek mat
55-65 Yarı parlak	Yarı parlak
70-80 Parlak	Parlak
80'in üzeri Çok parlak	Çok parlak

**İstatistiksel Değerlendirme (Statistical Analysis)**

Her bir ağaç türü (3), kesit yönü (2), yaş periyodu (2) ve

**3.3. Parlaklık Değerleri (Gloss Values)**

Parlaklık değerleri Çizelge 4'te verilmiştir.

**Çizelge 4.** Parlaklık değerleri (Gloss values)

Ağaç Türü/Yaş Periyodu	Vernik Çeşidi / Kesit Yönü											
	Su-bazlı				Poliüretan				Akrilik			
	Radyal		Teğet		Radyal		Teğet		Radyal		Teğet	
	$\bar{X}$	<i>s</i>	$\bar{X}$	<i>s</i>	$\bar{X}$	<i>s</i>	$\bar{X}$	<i>s</i>	$\bar{X}$	<i>s</i>	$\bar{X}$	<i>s</i>
Y. Sarıçam	36,05	0,72	36,43	0,66	39,53	4,00	35,67	2,67	45,05	1,50	40,70	1,59
DY. Sarıçam	35,48	1,17	35,49	0,47	44,11	2,91	42,42	3,15	34,93	3,17	35,67	2,56
Y. Meşe	29,78	1,31	30,07	0,89	40,18	3,52	38,93	3,81	34,61	1,32	35,61	1,05
DY. Meşe	31,67	2,81	33,64	0,92	44,03	2,85	38,82	2,38	36,76	1,59	36,58	3,44
Y. Kestane	32,79	1,23	31,09	1,98	39,31	2,44	40,64	4,17	35,3	1,33	34,39	1,37
DY. Kestane	33,7	0,84	33,64	1,21	38,82	0,80	36,06	2,46	38,53	2,45	38,25	2,83

$\bar{X}$  : Aritmetik ortalama      *s*: Standart sapma      Y: Yeni      DY: Doğal Yaşlanmış

vernük çeşidi (3) deneme desenine göre 10'ar adet olmak üzere toplam 360 adet deney örneğinden elde edilen yüzey parlaklık değerleri arasındaki farklılığı belirlemek için çoklu varyans analizi (MANOVA) yapılmıştır. Gruplar arası fark önemli çıktığında, Duncan testi ile ortalama değerler arasındaki farklar karşılaştırılmıştır. Böylece, denemeye alınan faktörlerin birbirleri arasındaki başarı sıralamaları homojenlik gruplarına ayrılmak suretiyle belirlenmiştir.

**3. BULGULAR (RESULTS)****3.1. Vernüklerin Katı Madde Miktarı ve Kuru Film Kalınlığı (Percentage of Solid Content and Dry Film Thickness)**

Deneylerde kullanılan vernüklerin katı madde oranları ve örnek yüzeylerinde ölçülen kuru film kalınlıklarına ilişkin aritmetik ortalamalar Çizelge 2'de verilmiştir.

**Çizelge 2.** Vernüklerin katı madde oranı ve kuru film kalınlığı (Solid content and dry film thickness of varnishes)

Vernük Çeşidi	Katı Madde Oranı (%)		Kuru Film Kalınlığı (µm)
	Dolgu verniği	Son kat vernik	
Su-bazlı	35	35	120
Poliüretan	40	40	130
Akrilik	25	30	120

**3.2. Ağaç Malzemelerin Yoğunluğu (Density)**

Ağaç malzemelerin hava kurusu ve tam kuru yoğunluk değerleri Çizelge 3'te verilmiştir.

**Çizelge 3.** Hava kurusu ve tam kuru yoğunluk değerleri (Air-dry and dry density values)

Yaş periyodu	Yoğunluk Değerleri (g/cm <sup>3</sup> )					
	Sarıçam		Meşe		Kestane	
	R <sub>12</sub>	R <sub>0</sub>	R <sub>12</sub>	R <sub>0</sub>	R <sub>12</sub>	R <sub>0</sub>
Yeni	0,55	0,51	0,77	0,73	0,62	0,58
D. Yaşlanmış	0,48	0,46	0,70	0,66	0,58	0,54

R<sub>12</sub> : Hava kurusu      R<sub>0</sub> : Tam kuru

Tam kuru haldeki yeni ağaç malzemelerin yoğunluk değerleri, doğal yaşlanmış ağaç malzemeye göre daha yüksek çıkmıştır.

Parlaklık değeri ağaç türü, yaş periyodu, kesit yönü ve vernük çeşidine ait Varyans analizi sonuçları Çizelge 5'te verilmiştir.

Parlaklık değerlerine ağaç türü, kesit yönü, ağaç türü-yaş periyodu, kesit yönü, ağaç türü-yaş periyodu-kesit yönü, vernük çeşidi, ağaç türü-vernük çeşidi, yaş periyodu-vernük çeşidi, ağaç türü-yaş periyodu-vernük çeşidi, kesit yönü-vernük çeşidi, ağaç türü-kesit yönü- vernük çeşidi, yaş periyodu-kesit yönü-vernük çeşidi, ağaç türü-yaş periyodu-kesit yönü-vernük çeşidi etkileşimi istatistiksel olarak önemli bulunmuştur ( $\alpha \leq 0,05$ ).

Yüzey Parlaklık değeri ağaç türü düzeyinde Duncan testi sonuçları Çizelge 6'da verilmiştir.

**Çizelge 5.** Ağaç türü, yaş periyodu, kesit yönü ve vernik çeşidine ait Varyans analizi sonuçları (Variance analysis results for wood type, age period, section direction and varnish type)

Faktörler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Değeri	P ≤0.05
Ağaç Türü (A)	2	499,080	249,540	47,2954	0,0000*
Yaş Periyodu (B)	1	43,195	43,195	8,1867	0,0045*
Etkileşim (AB)	2	131,990	65,995	12,5081	0,0000*
Kesit Yönü (C)	1	75,900	75,900	14,3854	0,0002*
Etkileşim (AC)	2	13,701	6,851	1,2984	0,2744**
Etkileşim (BC)	1	0,720	0,720	0,1365	NS
Etkileşim (ABC)	2	51,577	25,788	4,8877	0,0081*
Vernik Çeşidi (D)	2	2 608,888	1 304,444	247,2317	0,0000*
Etkileşim (AD)	4	241,742	60,436	11,4544	0,0000*
Etkileşim (BD)	2	106,232	53,116	10,0671	0,0001*
Etkileşim (ABD)	4	972,708	243,177	46,0894	0,0000*
Etkileşim (CD)	2	88,488	44,244	8,3856	0,0003*
Etkileşim (ACD)	4	67,053	16,763	3,1771	0,0140*
Etkileşim (BCD)	2	52,520	26,260	4,9771	0,0074*
Etkileşim (ABCD)	4	71,345	17,836	3,3805	0,0100*
Hata	324	1 709,489	5,276		
Toplam	359	6 734,628			

\*: Fark, 0,05' e göre anlamlı \*\* : Fark, 0,05' e göre anlamsız NS (Nonsignificant): Önemsiz

**Çizelge 6.** Ağaç türü düzeyinde Duncan testi sonuçları (Duncan test results for wood type)

Ağaç Türü					
Sarıçam		Meşe		Kestane	
$\bar{X}$	HG	$\bar{X}$	HG	$\bar{X}$	HG
38,46	A*	35,89	B**	36,04	B
LSD ± 0,5832					
X: Aritmetik ort. HG: Homojenlik Grubu *: En yüksek parlaklık değeri **: En düşük parlaklık değeri					

Parlaklık değeri yaş periyodu düzeyinde Duncan testi sonuçları Çizelge 7'de verilmiştir.

**Çizelge 7.** Yaş periyodu düzeyinde Duncan testi sonuçları (Duncan test results for age period)

Ağaç Malzeme Yaş Periyodu			
Yeni		Doğal Yaşlanmış	
$\bar{X}$	HG	$\bar{X}$	HG
37,14	A*	36,45	B**
LSD ± 0,4762			

Parlaklık değeri Ağaç türü-yaş periyodu düzeyinde Duncan testi sonuçları Çizelge 8'de verilmiştir.

**Çizelge 8.** Ağaç türü-yaş periyodu düzeyinde Duncan testi sonuçları (Duncan test results for wood type-age period)

Yaş periyodu	Ağaç Türü					
	Sarıçam		Meşe		Kestane	
	$\bar{X}$	HG	$\bar{X}$	HG	$\bar{X}$	HG
Yeni	8,90	A*	34,86	D**	35,59	D
D. Yaşlanmış	8,02	B	36,92	C	36,50	C
LSD ± 0,8247						

Yeni ve doğal yaşlanmış meşe, kestane türleri arasındaki parlaklık değeri farkı istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur. Yeni ve doğal yaşlanmış sarıçam ağaç malzemelerde, yeni ve doğal yaşlanmış meşe ve kestane ağaç malzemeye göre daha yüksek parlaklık değeri bulunmuştur.

Parlaklık değeri kesit yönü düzeyinde Duncan testi sonuçları Çizelge 9'da verilmiştir.

**Çizelge 9.** Kesit yönü düzeyinde Duncan testi sonuçları (Duncan test results for section direction)

Kesit Yönü			
Radyal		Teğet	
$\bar{X}$	HG	$\bar{X}$	HG
37,26	A*	36,34	B**
LSD ± 0,4762			



Parlaklık değeri, radyal kesitte teğet kesiteen daha yüksek bulunmuştur. Parlaklık değeri ağaç türü-yaş periyodu-kesit yönü düzeyinde Duncan testi sonuçları Çizelge 10'da verilmiştir.

**Çizelge 10.** Ağaç türü-yaş periyodu-kesit yönü düzeyinde Duncan testi sonuçları (Duncan test results for wood type-age period-section direction)

Ağaç Türü	Kesit Yönü	Ağaç Malzeme Yaş Periyodu			
		Yeni		Doğal Yaşlanmış	
		$\bar{X}$	HG	$\bar{X}$	HG
Sarıçam	Radyal	40,21	A*	38,17	B
	Teğet	37,60	BC	37,86	B
Meşe	Radyal	34,86	F**	37,49	BC
	Teğet	34,87	F	36,35	CDE
Kestane	Radyal	35,80	DEF	37,02	BCD
	Teğet	35,37	EF	35,98	DEF
LSD ± 1,166					

Parlaklık değeri vernik çeşidi düzeyinde Duncan testi sonuçları Çizelge 11'de verilmiştir.

**Çizelge 11.** Vernik çeşidi düzeyinde Duncan test sonuçları (Duncan test results for varnish)

Vernik Çeşidi					
Su-bazlı		Poliüretan		Akrilik	
$\bar{X}$	HG	$\bar{X}$	HG	$\bar{X}$	HG
33,32	C**	39,88	A*	37,20	B
LSD ± 0,5832					

Parlaklık değeri ağaç türü-vernik çeşidi düzeyinde Duncan testi sonuçları Çizelge 12'de verilmiştir.

**Çizelge 12.** Ağaç türü-vernik çeşidi düzeyinde Duncan testi sonuçları (Duncan test results for wood type-varnish)

Vernik Çeşidi	Ağaç Türü					
	Sarıçam		Meşe		Kestane	
	$\bar{X}$	HG	$\bar{X}$	HG	$\bar{X}$	HG
Su-bazlı	35,86	C	31,29	E**	32,81	D
Poliüretan	40,43	A	40,49	A*	38,71	B
Akrilik	39,09	B	35,89	C	36,62	C
LSD ± 1,010						

Sarıçam-akrilik vernik ve kestane-poliüretan vernik arasındaki fark istatistiksel olarak önemsiz çıkmıştır. Sarıçam-su-bazlı, meşe-akrilik ve kestane-akrilik vernik arasındaki fark istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur.

Parlaklık değeri yaş periyodu-vernik çeşidi düzeyinde Duncan testi sonuçları Çizelge 13'te verilmiştir.

**Çizelge 13.** Yaş periyodu-vernik çeşidi düzeyinde Duncan testi sonuçları (Duncan test results for age period-varnish)

Yaş periyodu	Vernik Çeşidi					
	Sarıçam		Meşe		Kestane	
	$\bar{X}$	HG	$\bar{X}$	HG	$\bar{X}$	HG
Yeni	32,7	E**	39,0	B	37,6	C
D. Yaşlanmış	33,9	D	40,7	A*	36,8	C
LSD ± 0,8247						

Yeni ve doğal yaşlanmış ağaç malzemeler-akrilik vernik arasındaki fark istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur.

Parlaklık değeri ağaç türü-yaş periyodu-vernik çeşidi düzeyinde Duncan testi sonuçları Çizelge 14'te verilmiştir.

**Çizelge 14.** Ağaç türü-yaş periyodu-vernik çeşidi düzeyinde Duncan testi sonuçları (Duncan test results for wood type-age period-varnish)

Ağaç Türü	Vernik Çeşidi	Ağaç Malzeme Yaş Periyodu			
		Yeni		D. Yaşlanmış	
		$\bar{X}$	HG	$\bar{X}$	HG
Sarıçam	Su-bazlı	36,24	FGH	35,49	GH
	Poliüretan	37,60	EF	43,26	A*
	Akrilik	42,88	A	35,30	GH
Meşe	Su-bazlı	29,92	L**	32,65	JK
	Poliüretan	39,56	CD	41,42	B
	Akrilik	35,11	GHI	36,67	FG
Kestane	Su-bazlı	31,94	K	33,67	IJ
	Poliüretan	39,97	C	37,44	EF
	Akrilik	34,85	HI	38,39	DE
LSD ± 1,428					

Yeni sarıçam-akrilik ve doğal yaşlanmış sarıçam arasındaki fark istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur. Yeni sarıçam ve doğal yaşlanmış kestane poliüretan vernikte arasındaki fark istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur. Doğal yaşlanmış sarıçam su-bazlı ve akrilik vernik arasındaki fark istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur.

Parlaklık değeri yaş periyodu-vernik çeşidi düzeyinde Duncan testi sonuçları (LSD±0,8247) Çizelge 15'te verilmiştir.

**Çizelge 15.** Yaş periyodu-vernik çeşidi düzeyinde Duncan testi sonuçları (Duncan test results for age period-varnish)

Kesit Yönü	Vernik Çeşidi					
	Su-bazlı		Poliüretan		Akrilik	
	$\bar{X}$	HG	$\bar{X}$	HG	$\bar{X}$	HG
Radyal	33,24	D**	41,00	A*	37,53	C
Teğet	33,39	D	38,76	B	36,87	C

Radyal ve teğet kesit yönünde akrilik vernik arasındaki fark istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur.

Parlaklık değeri ağaç türü-kesit yönü-vernük çeşidi düzeyinde Duncan testi sonuçları Çizelge 16'da verilmiştir.

**Çizelge 16.** Ağaç türü-kesit yönü-vernük çeşidi düzeyinde Duncan testi sonuçları (Duncan test results for wood type-section direction-varnish)

Ağaç Türü	Vernük Çeşidi	Kesit Yönü			
		Radyal		Teğet	
		$\bar{X}$	HG	$\bar{X}$	HG
Sarıçam	Su-bazlı	35,76	E	35,96	E
	Poliüretan	41,82	A	39,04	BC
	Akrilik	39,99	B	38,19	CD
Meşe	Su-bazlı	30,73	G**	31,85	FG
	Poliüretan	42,10	A*	38,88	BC
	Akrilik	35,69	E	63,10	E
Kestane	Su-bazlı	33,24	F	32,37	F
	Poliüretan	39,06	BC	38,35	CD
	Akrilik	36,92	DE	36,32	E
LSD $\pm$ 1,428					

Sarıçam ve meşe radyal kesit yönünde poliüretan vernük çeşitleri arasındaki fark istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur.

Parlaklık değeri yaş periyodu-kesit yönü-vernük çeşidi düzeyinde Duncan testi sonuçları Çizelge 17'de verilmiştir.

**Çizelge 17.** Yaş periyodu-kesit yönü-vernük çeşidi düzeyinde Duncan testi sonuçları (Duncan test results for age period-section direction-varnish)

Vernük Çeşidi	Kesit Yönü	Ağaç Malzeme Yaş Periyodu			
		Yeni		Doğal Yaşlanmış	
		$\bar{X}$	HG	$\bar{X}$	HG
Su-bazlı	Radyal	32,87	F	33,62	EF
	Teğet	32,53	F**	34,26	E
Poliüretan	Radyal	39,67	B	42,32	A*
	Teğet	38,41	C	39,10	BC
Akrilik	Radyal	38,32	C	36,74	D
	Teğet	36,90	D	36,83	D
LSD $\pm$ 1,166					

Akrilik vernük uygulanmış, teğet kesit yönünde yeni ve doğal yaşlanmış ağaç malzemeler arasındaki fark önemsiz bulunmuştur.

Parlaklık değeri ağaç türü-yaş periyodu-kesit yönü-vernük çeşidi düzeyinde Duncan testi sonuçları Çizelge 18'de verilmiştir.

**Çizelge 18.** Ağaç türü-yaş periyodu-kesit yönü-vernük çeşidi düzeyinde Duncan testi sonuçları (Duncan test results for wood type-age period-section direction-varnish)

Ağaç Türü	Yaş Periyodu	Vernük Çeşidi	Kesit Yönü			
			Radyal		Teğet	
			$\bar{X}$	HG	$\bar{X}$	HG
Sarıçam	Yeni	Su-bazlı	36,05	IJK	36,43	HIJ
		Poliüretan	39,53	DE	35,67	JK
		Akrilik	45,05	A*	40,70	CD
	Doğal Yaşlanmış	Su-bazlı	35,48	JK	35,49	JK
		Poliüretan	44,11	AB	42,42	BC
		Akrilik	34,93	JKL	35,67	JK
Meşe	Yeni	Su-bazlı	29,78	O**	30,07	O
		Poliüretan	40,48	DE	38,93	DEF
		Akrilik	34,61	JKL	35,61	DJK
	Doğal Yaşlanmış	Su-bazlı	31,67	MNO	33,64	KLM
		Poliüretan	44,03	AB	38,82	DEFG
		Akrilik	36,76	FGHIJ	36,58	GHIJ
Kestane	Yeni	Su-bazlı	32,79	LMN	31,09	NO
		Poliüretan	39,31	DE	40,64	CD
		Akrilik	35,30	JK	34,39	JKL
	Doğal Yaşlanmış	Su-bazlı	33,70	KLM	33,64	KLM
		Poliüretan	38,82	DEFG	36,06	IJK
		Akrilik	38,53	DEFGH	38,25	EFGHI
LSD $\pm$ 2,020						

#### 4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER (CONCLUSIONS and SUGGESTIONS)

Ağaç türü bakımından, aralarındaki fark istatistiksel olarak önemli olmamakla beraber meşede (35,89) ve kestane (36,04) bulunmuştur. Sarıçamda ise meşe ve kestane göre daha yüksek (38,46) yüzey parlaklık değeri elde edilmiştir. Yeni ağaç malzemeler (37,14) doğal yaşlanmış ağaç malzemelere (36,45) göre daha yüksek parlaklık değeri sonucunu vermiştir. Doğal yaşlanmış ağaç malzemelerin düşük parlaklık değerinde olması, ağaç malzemedeki yaşlanmaya bağlı olarak kimyasal yapısındaki bozunumlardan kaynaklanmış olabilir.

Ağaç türü-yaş periyodu düzeyinde, en yüksek değer yeni sarıçamda (38,90), en düşük değerler ise yeni meşede (34,86) ve yeni kestane (35,59) bulunmuştur. Kesit yönü düzeyinde, radyal kesit yönü (37,26), teğet kesit yönüne (36,04) göre daha yüksek parlaklık değeri vermiştir. Ağaç türü-yaş periyodu-vernük çeşidi düzeyinde yeni sarıçam-radyal kesit yönünde (40,26), en düşük ise yeni meşe-radyal kesit yönünde (34,86) ve yeni meşe teğet kesit yönünde (34,87) bulunmuştur. Vernük

çeşidi düzeyinde parlaklık değeri poliüretan vernikte 39,88, akrilik vernikte 37,20 ve su-bazlı vernikte 33,32 bulunmuştur. Ağaç türü-vernük çeşidi düzeyinde en yüksek parlaklık değeri meşe-poliüretan vernikte (40,49) ve sarıçam-poliüretan vernikte (40,43), en düşük ise meşe-su-bazlı vernikte (31,29) bulunmuştur.

Yaş periyodu-vernük çeşidi düzeyinde en yüksek parlaklık değeri doğal yaşlanmış ağaç malzemeler-poliüretan vernikte (40,71) bulunmuş, en düşük ise yeni ağaç malzemeler-su-bazlı vernikte (32,70) bulunmuştur. Ağaç türü-yaş periyodu-vernük çeşidi düzeyinde en yüksek doğal yaşlanmış sarıçam-poliüretan vernikte (43,26) ve yeni sarıçam-akrilik vernük (42,88), en düşük ise yeni meşe-su-bazlı vernikte (29,92) bulunmuştur. Yaş periyodu-vernük çeşidi düzeyinde en yüksek parlaklık değeri radyal kesit yönü poliüretan vernikte (41,00), en düşük ise radyal kesit yönü-su-bazlı vernük (33,24) ve teğet kesit yönü su-bazlı vernikte (33,39) bulunmuştur. Ağaç türü-kesit yönü-vernük çeşidi düzeyinde, meşe-radyal kesit yönü-poliüretan vernük (42,10) ve sarıçam-poliüretan vernikte en yüksek (41,82), meşe-radyal kesit yönü- su-bazlı vernikte en düşük (30,73) bulunmuştur. Yaş periyodu-kesit yönü-vernük çeşidi düzeyinde doğal yaşlanmış ağaç malzemeler radyal kesit yönü poliüretan vernikte en yüksek (42,32), yeni ağaç malzemeler teğet kesit yönü su- bazlı vernikte (32,53) ve yeni ağaç malzemeler su-bazlı vernikte (32,87) en düşük parlaklık değerleri bulunmuştur. Ağaç türü-yaş periyodu-kesit yönü-vernük çeşidi düzeyinde yeni sarıçam-radyal kesit yönü-akrilik vernikte (45,05), en düşük ise yeni meşe-radyal kesit yönü-su-bazlı vernikte (29,78) bulunmuştur.

Sonuç olarak, yaş periyodu bakımından doğal yaşlanmış ağaç malzemeler yeni ağaç malzemelere göre daha düşük yüzey parlaklık değeri saptanmıştır. Bu durumun nedeni; ağaç malzemenin fotokimyasal reaksiyonunu başlatan elektromanyetik radyasyonun bütün dalga boylarını absorbe ederek önemli bileşenlerden ligninin kimyasal yapısındaki bozulmalara yol açılmasıdır [25]. Bu bozulmalar, ağaç malzemenin yüzey parlaklık değerini düşürücü etki yapmakta, üzerine uygulanan vernüklerinde parlaklık değerini düşürmektedir.

Parlaklık değerinin önemli olduğu durumlarda, ağaç malzemenin radyal kesit yönünün tercih edilmesi ve poliüretan veya akrilik vernük kullanılması önerilebilir.

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Tunçgenç, M., Genel Boya Bilgileri, *Teknik Bülten*, Akzo Nobel Kemipol A.Ş., (2004).
- [2] Budakçı, M., Atar M. "Açık Hava Koşullarında Bırakılmış Sarıçam (Pinus sylvestris L.) Odununda Renk Açma İşleminin Sertlik ve Parlaklığa Etkisi", *Tr.J.of Agriculture and Forestry*, 25, 201-207, (2001).
- [3] Kılıç, A., Hafizoğlu, H., "Açık hava koşullarının ağaç malzemenin kimyasal yapısında meydana getirdiği değişimler ve alacak önlemler", *Süleyman Demirel Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 2, 175-183, (2007).
- [4] Williams, R.S., "Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites", *Weathering of Wood*, Chapter 7, 139-185, (2005).
- [5] Bucur, V., "Delamination in Wood, Wood Products and Wood-Based Composites", ISBN 978-90-481-9549-7, 401s, Springer, Chapter 6-9, London New York, (2011).
- [6] Feist, W.C., "Outdoor Wood Weathering and Protection", *American Chemical Society*, Chapter 11, 263-298, (1990).
- [7] Budakçı, M., "Effect of Outdoor Exposure and Bleaching on Surface Color and Chemical Structure of Scots Pine". *Progress in Organic Coatings*, 56, 46-52, (2006).
- [8] Anderson, E.L., Pawlak Z., Owen, N.L. Feist, W.C., "Infrared Studies of Wood Weathering", *Society for Applied Spectroscopy*, 45(4): 641- 647, (1991).
- [9] Aydemir, D., Sivrikaya H., Hafizoğlu H., Yasav, A., "Natural weathering of oak (*Quercus petraea*) and Chesnut (*Castanea sativa*) coated with various finishes", *COLOR Research and Application*, 36(1): 72-78, (2011).
- [10] Fengel, D., "Aging and fossilization of wood and its components", *Wood Science and Technology*, 25(3): 153-177, (1991).
- [11] Sönmez, A. ve Söğütü, C., "Biçme İşleminde Kesik Yönü ve Daire Testere Diş Sayısının Ağaç Malzeme Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi", *Politeknik Dergisi*, 12(1): (2009).
- [12] Söğütü, C., Nzokou, P., Koc, I., Tutgun, R., Döngel, N., "The effects of surface roughness on varnish adhesion strength of wood materials", *Journal of Coatings Technology and Research*, 13(5): 863-870, (2016).
- [13] Ulay, G. ve Çakıcıer, N., "Yat ve Tekne İmalatında Kullanılan Ağaç Türlerinde Uygulanan Hızlandırılmış Yaşlandırma (QUV) İşleminin Koruyucu Katman Üzerine Etkisi" *İleri Teknoloji Bilim Dergisi*, 6(3): 212-218, (2017).
- [14] Özçifci, A., Atar, M., ve Uysal, B., "The effects of wood bleaching chemicals on the surface gloss and the adhesion strength of varnishes", *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 23(Ek3): 763-770 (1999).
- [15] TS 2470, "Odunda Fiziksel ve Mekaniksel Deneyle İçin Numune Alma Metotları", (1976).
- [16] TS 2471, "Odunda Fiziksel ve Mekaniksel Deneyle İçin Rutubet Miktarı Tayini", (1976).
- [17] TS 2472, "Odunda Fiziksel ve Mekaniksel Deneyle İçin Birim Hacim Ağırlığının Tayini", (1976).
- [18] ASTM D 3023, "Determination of Resistance of Factory Applied Coatings on Wood Products of Stain and Reagents", (1981).
- [19] TS EN ISO 3251, "Boyalar ve Vernükler, Boya, Vernük ve Bağlayıcılarda Uçucu Olmayan Madde Tayini", (2012).
- [20] ASTM D 1005, "Standard Test Method for Measurement of Dry-Film Thickness of Organic Coatings Using Mikrometers", (2001).

- [21] TSE EN ISO 2813, “Boyalar ve vernikler-Metalik olmayan boya filmlerinin 20, 60 ve 85 açılarda parlaklık tayini”, (2014).
- [22] Sönmez, A., Ağaçtan Yapılmış Mobilya Üst Yüzeylerinde Kullanılan Verniklerin Önemli Mekanik Fiziksel ve Kimyasal Etkilere Karşı Dayanıklılıkları, **Doktora tezi**, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (1989).
- [23] TS EN 311, “Ahşap esaslı levhalar-Yüzey sağlamlığı-Deney metodu”, (2005).
- [24] McCormick, K., and Tas, P., “Application 1.0 Portable Gloss Measurement”, *Cihaz Kullanım Klavuzu*, (1999).
- [25] Tolvaj, L., Faix, O., “Artificial Ageing of Wood Monitored by DRIFT Spectroscopy and CIEL\*a\*b\* Color Measurements”, 1. Effect of UV Light”, **Holzforschung**, Cilt 49, 397–404 (1995)