

MÜHENDİS VE MAKİNA

ENGINEER AND MACHINERY

ISSN 1300-3402 E-ISSN 2667-7520



tmmob makina mühendisleri odası yayın organı

www.mmo.org.tr/muhendismakina

ADVISOR PROGRAMIYLA HİBRİT ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA BATARYA ANALİZİ

SANTRİFÜJ POMPA TASARIMINDA SAYISAL YÖNTEMLERİN (HAD/CFD) KULLANIMI

SANDVIÇ KOMPOZİT VE METAL PLAKALAR İLE OLUŞTURULAN TEK BİNDİRMELİ YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL VE NÜMERİK YAKLAŞIM İLE BELİRLENMESİ

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA PROSESİ İLE ELDE EDİLEN YÜZEY METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİ GELİŞTİREN ÇOKLU MEKANİZMALAR

FARKLI SAÇAK TİPLERİNE SAHİP YARI KÜRESEL ÇATILAR ÜZERİNDE BASINÇ DAĞILIMLARININ İNCELENMESİ

MODELING STUDY AND PERFORMANCE INVESTIGATION OF A THERMOELECTRIC REFRIGERATOR

BİYOKÖMÜR-SOMA KÖMÜR KARIŞIMLARININ OKSİYANMA KOŞULLARINDA BİRLİKTE YAKILMASININ DENEYSEL İNCELENMESİ VE EMİSYONLAR ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

DEMİRYOLU TAŞITLARINDA KULLANILAN FREN DİSKLERİNİN ISI VE MALZEME YÖNÜNDEN DEĞERLENDİRİLMESİ

SİCP/A356 KOMPOZİTİNİN AŞINMA DİRENCİNE ULTRASONİK DÖVME İŞLEMİNİN VE YAŞLANDIRMA SERTLEŞMESİNİN ETKİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

KISITLI MÜHENDİSLİK PROBLEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI AĞIRLIK VE MALİYET OPTİMİZASYONU

YANGIN SÖNDÜRME İÇİN ALTERNATİF BİR TASARIM: AKILLI YANGIN SÖNDÜRME BOMBASI

HELİKOPTERLERDE KULLANILAN BİR PİSTON-PROP MOTORUN ENERJİ, EKSERJİ, TERMOEKOLOJİK, SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK, TERMOEKONOMİK VE EKSERGOEKONOMİK PERFORMANS ANALİZLERİ

EFFECT OF HUMIDITY AND TEMPERATURE ON COMPOSITE PLATES WITH DIFFERENT FIBER ORIENTATIONS



tmmob makina mühendisleri odası
uctea chamber of mechanical engineers

www.mmo.org.tr/muhendismakina

Mühendis ve Makina

Engineer and Machinery

Cilt 62

Volume 62

Sayı 705

Number 705

Ekim-Aralık 2021

October-December 2021

TMMOB MAKİNA MÜHENDİSLERİ ODASI

Yerel Süreli Yayın, Üç Ayda Bir Yayımlanır
Local Periodical - Quarterly

Ekim-Aralık /October-December 2021

Cilt / Vol: 62 Sayı / No: 705

Yönetim Yeri / Head Office

Meşrutiyet Cad. No: 19/6 Kızılay - ANKARA
Tel: (+90 312) 425 21 41 Fax: (+90 312) 417 86 21
E-posta: yayin@mmo.org.tr www.mmo.org.tr

MMO Adına Sahibi

Publisher
Yunus YENER

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü

Executive Editor
Yunus YENER

Yayın Sekreteri

Editorial Secretary
Ceren YILMAZ ARAS

Editör / Editorial in Chief

Prof. Dr. Harun Kemal ÖZTÜRK

Editör Yardımcıları / Associate Editors

Prof. Dr. L. Berrin ERBAY - *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi / Eskişehir Osmangazi University*
Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ - *Çankaya Üniversitesi / Çankaya University*

Yayın Danışma Kurulu / Editorial Advisory Board

- Prof. Dr. C. Erdem İMRAK - *İstanbul Teknik Üniversitesi / Istanbul Technical University, İstanbul*
Prof. Dr. Erdiñç KALUÇ - *Kocaeli Üniversitesi / Kocaeli University, İzmit*
Prof. Dr. Ali GÜNGÖR - *Ege Üniversitesi / Ege University, İzmir*
Prof. Dr. Hikmet RENDE - *Akdeniz Üniversitesi / Akdeniz University, Antalya*
Prof. Dr. Ali PINARBAŞI - *Yıldız Teknik Üniversitesi / Yıldız Technical University, Antalya*
Prof. Dr. Sedat BAYSEÇ - *Gaziantep Üniversitesi / Gaziantep University, Gaziantep*
Prof. Dr. E. İlhan KONUKSEVEN - *Orta Doğu Teknik Üniversitesi / Middle East Technical University, Ankara*
Prof. Dr. Erol KILIÇKAP - *Dicle Üniversitesi / Dicle University, Diyarbakır*
Prof. Dr. Mustafa YURDAKUL - *Gazi Üniversitesi / Gazi University, Ankara*
Prof. Dr. Atilla BIYIKOĞLU - *Gazi Üniversitesi / Gazi University, Ankara*
Prof. Dr. Mirosław BONEK - *Silesian University of Technology, Poland*
Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU - *Karadeniz Teknik Üniversitesi / Karadeniz Technical University, Trabzon*
Prof. Dr. Leszek A. DOBRZANSKI - *Silesian University of Technology, Poland*
Prof. Dr. Ö. Altan DOMBAYCI - *Pamukkale Üniversitesi / Pamukkale University, Denizli*
Prof. Dr. Halim GÜRGENCI - *Queensland Üniversitesi / The University of Queensland, Australia*
Prof. Dr. Hyung-Man Kim - *Power System and Sustainable Energy Laboratory (PSSEL), South Korea*
Prof. Dr. Basim AL-NAJJAR - *Linnaeus University, Sweden*
Prof. Dr. Barış ÖZERDEM - *İzmir Ekonomi Üniversitesi / Izmir University of Economics, İzmir*
Prof. Dr. Melih Cemal KUŞHAN - *ESOGÜ / Eskişehir Osmangazi University, Eskişehir*
Doç. Dr. Tunç APATAY - *Gazi Üniversitesi / Gazi University, Ankara*
Doç. Dr. Yiğit TAŞCIOĞLU - *TED Üniversitesi / TED University, Ankara*
Dr. Öğr. Üye. Nurdan BİLGİN - *Ondokuz Mayıs Üniversitesi / Ondokuz Mayıs University, Samsun*
Dr. Öğr. Üye. Kutluk Bilge ARIKAN - *TED Üniversitesi / TED University, Ankara*
Dr. Varlık ÖZERCİYES - *AIRBUS, UK*

Yayın Kurulu / Editorial Board

- Prof. Dr. Metin AKKÖK - *Orta Doğu Teknik Üniversitesi / Middle East Technical University, Ankara*
Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ - *Çankaya Üniversitesi / Cankaya University, Ankara*
Prof. Dr. L. Berrin ERBAY - *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi / Eskişehir Osmangazi University, Eskişehir*
Prof. Dr. Cemal MERAN - *Pamukkale Üniversitesi / Pamukkale University, Denizli*
Prof. Dr. Harun Kemal ÖZTÜRK - *Pamukkale Üniversitesi / Pamukkale University, Denizli*
Prof. Dr. Semiha ÖZTUNA - *Trakya Üniversitesi / Trakya University, Edirne*
Dr. Öğr. Üye. Gurbet ÖRÇEN - *Dicle Üniversitesi / Dicle University, Diyarbakır*

Kapak ve Sayfa Tasarımı

Cover and Page Design
Muazzez POLAT

Teknik Sorumlu

Technical Manager
Mehmet AYDIN

Baskı

Printed by
Ankamat Matbaacılık Sanayi Ltd. Şti.
30. Cadde 538. Sokak No: 60 İvedik Organize Sanayi - Ankara
Tel: (+90 312) 394 54 94
Basım Tarihi: 25 Eylül 2021
Baskı Sayısı: 1.000

Mühendis ve Makina

Engineer and Machinery

Cilt 62

Sayı 705

Ekim-Aralık 2021

Volume 62

Number 705

October-December 2021

İÇİNDEKİLER/CONTENTS

Araştırma/Research

- Advisor Programıyla Hibrit Elektrikli Taşıtlarda Batarya Analizi** 637
Battery Analysis in Hybrid Electric Vehicles With ADVISOR Program
Şule KUŞDOĞAN, Büşra ÖZEN

Araştırma/Research

- Santrifüj Pompa Tasarımında Sayısal Yöntemlerin (HAD/CFD) Kullanımı** 654
The Usage of Numerical Methods (HAD/CFD) in The Design of Centrifugal Pumps
İsmail OVALI, Öner ATALAY, Ege YILMAZ

Araştırma/Research

- Sandviç Kompozit ve Metal Plakalar ile Oluşturulan Tek Bindirmeli Yapıştırma** 665
Bağlantılarının Mekanik Özelliklerinin Deneysel ve Nümerik
Yaklaşım ile Belirlenmesi
Determination of Mechanical Properties of Single Lap Joints Having Sandwich
Composite and Metal Adherend by Experimental and Numerical Approach
Engin ERBAYRAK

Araştırma/Research

- Sürtünme Karıştırma Prosesi ile Elde Edilen Yüzey Metal Matrisli** 681
Kompozitlerin Mekanik Özelliklerini Geliştiren Çoklu Mekanizmalar
Multiple Mechanisms Improving The Mechanical Properties Of Surface Metal
Matrix Composites Obtained By Friction Stir Processing
Gökçe Mehmet GENÇER

Araştırma/Research

- Farklı Saçak Tiplerine Sahip Yarı Küresel Çatılar Üzerinde Basınç** 702
Dağılımlarının İncelenmesi
Investigation of Pressure Distributions on Hemispherical Roofs With Different Eave Types
Tekmile CÜREBAL, Aleyna AĞIRMAN KALCA, Yücel ÖZMEN

Araştırma/Research

- PModeling Study and Performance Investigation of a Thermoelectric Refrigerator** 715
Termoelektrik Soğutucunun Modelleme Çalışması ve Performans İncelemesi
Haydar KEPEKÇİ, Ergin KOSA, Cüneyt EZGİ

- Biyokömür-Soma Kömür Karışımlarının Oksijenlenme Koşullarında Birlikte Yakılmasının Deneysel İncelenmesi ve Emisyonlar Üzerindeki Etkileri** 731
Experimental Investigation of Co-combustion of Biocoal with Soma Lignite in Air and The Oxygen-enriched Air Atmospheres and Its Effects on Emissions
Babak KEİVANİ, Hayati OLGUN, Aysel T. ATİMTAY

- Demiryolu Taşıtlarında Kullanılan Fren Disklerinin Isı ve Malzeme Yönünden Değerlendirilmesi** 750
Assessment of Brake Discs Used Railway Vehicles in terms of Heat and Material
Beytullah BAŞEĞMEZ

- SiCP/A356 Kompozitinin Aşınma Direncine Ultrasonik Dövme İşleminin ve Yaşlandırma Sertleşmesinin Etkilerinin Karşılaştırılması** 768
Comparison Of The Effects Of Ultrasonic Impact Treatment and Age Hardening On Wear Resistance Of SiCp/A356 Composite
Gökçe Mehmet GENÇER, Coşkun YOLCU, Fatih KAHRAMAN, Melih BELEVİ

- Kısıtlı Mühendislik Problemlerinin Karşılaştırmalı Ağırlık ve Maliyet Optimizasyonu** 784
Comparative Weight and Cost Optimzation of Constrained Engineering Problems
Aybike ÖZYÜKSEL ÇİFTÇİOĞLU

- Yangın Söndürme İçin Alternatif Bir Tasarım: Akıllı Yangın Söndürme Bombası** 806
An Alternative Design for Fire Extinguishing: Smart Fire Extinguishing Bomb
Murat TOPTAŞ, Mehmet YILMAZ

- Helikopterlerde Kullanılan Bir Piston-Prop Motorun Enerji, Ekserji, Termoeolojik, Sürdürülebilirlik, Termoekonomik ve Eksergoekonomik Performans Analizleri** 830
Energy, Exergy, Thermoeological, Sustainability, Thermoeconomic and Exergoeconomic Performance Analyses of A Piston-Prop Engine Used in Helicopters
Halil Yalçın AKDENİZ

- Effect of Humidity and Temperature on Composite Plates With Different Fiber Orientations** 845
Farklı Fiber Dizilimlerine Sahip Kompozit Levhalar Üzerinde Nem ve Sıcaklık Etkisi
Gurbet ÖRÇEN, Engin KOYUN

TMMOB Makina Mühendisleri Odası Yayın Organı olan Mühendis ve Makina dergisi TMMOB Makina Mühendisleri Odası üyelerine ücretsiz olarak gönderilir. 1957 yılından beri yayımlanan dergimiz, **hakemli** bir dergidir. Dergimizle ilgili detaylı bilgi almak için www.mmo.org.tr genel ağ adresinden yararlanabilirsiniz. Telefon, faks veya e-posta aracılığıyla da bize ulaşabilirsiniz.

Dergimizin yer aldığı veritabanları



SUNUŞ

Değerli Meslektaşlarımız Merhaba,

Mühendis ve Makina dergimizin bu sayısındaki ilk makale **Şule Kuşdoğan, Büşra Özen**'in "Advisor Programıyla Hibrit Elektrikli Taşıtlarda Batarya Analizi" başlıklı makalesidir. Dünyada daha verimli, sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynağı arayışı her geçen gün artmaktadır. Doğal olarak otomobil endüstrisi yeniden elektrikli taşıtlara yönelmiştir. Elektrikli taşıtların tekrardan üretilmeye başlaması ve piyasada bu taşıtlara talebin artması bilimsel çalışmaları beraberinde getirmiştir. Elektrikli taşıtlardaki en önemli parametrelerden biri olan batarya sistemleri bu çalışmalardan bir tanesidir. Bir taşıtta bataryanın oluşturulmasından önce sistemsal olarak analizinin yapılması maliyet ve güvenlik açısından çok önemlidir. Bu çalışmada hibrit elektrikli taşıtlarda kullanılan batarya sistemlerinin ADVISOR programı aracılığıyla analizi yapılmıştır. Seçilen farklı türde bataryalar seri ve paralel hibrit elektrikli taşıtlarda simüle edilerek ortaya çıkan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar çalışmada içerisinde paylaşılmıştır.

İkinci makalemiz, **İsmail Ovalı, Öner Atalay, Ege Yılmaz**'ın "Santrifüj Pompa Tasarımında Sayısal Yöntemlerin (HAD/CFD) Kullanımı" adlı çalışmasıdır. Santrifüj pompalar mühendislik alanında yaygın olarak kullanılan ürünlerdir. Kullanım alanlarına göre çok farklı parametre içermektedir. Tasarım aşamasında ise farklı debiler, basma yükseklikleri için birçok dizayn parametresi oluşturulması gerekmektedir. Teknolojinin gelişmesi ile birlikte bilgisayar destekli programların tasarım sürecinde kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu sayede hem zamandan tasarruf sağlanmakta hem de maliyet azaltılmaktadır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) veya yabancı dilden alıştığımız şekliyle CFD analizleri pompa tasarımında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Ürün tasarımı yapıldıktan ve katı model oluşturulduktan sonra analiz programları kullanılarak pompa içindeki sayısal analizler yapılabilir. Burada deneysel metotlara göre en önemli olan avantaj ise parametrelerin sınırsız sayıda değiştirilebilir olmasıdır. İstenilen değerler elde edilinceye kadar süreç devam ettirilebilir. Bilgisayar yardımıyla elde edilen bilgiler ışığında üretim ve kullanım süreçlerine geçilebilir. Bu çalışmada örnek bir santrifüj pompa ele alınarak sayısal analiz adımları sırasıyla açıklanmıştır. Program içinde kullanılan yöntem ve kabuller genel literatür bilgisine göre ele alınmıştır. Uygulanacak yöntemler sınırsız olup istenildiği takdirde farklı yollar ile çözüm ağları genişletilebilir.

Üçüncü makalemiz, **Engin Erbayrak**'ın "Sandviç Kompozit ve Metal Plakalar ile Oluşturulan Tek Bindirmeli Yapıştırma Bağlantılarının Mekanik Özelliklerinin Deneysel ve Nümerik Yaklaşım ile Belirlenmesi" adlı çalışmasıdır. Bu çalışmada, farklı malzemeler kullanılarak oluşturulan tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının mekanik özellikleri deneysel ve nümerik yaklaşım ile belirlenmiştir. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarında plaka malzemesi olarak çelik, alüminyum ve alüminyum sandviç kompozit malzeme, yapıştırıcı olarak ise Araldite 2015 epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır. Aynı malzemeye sahip plakalar kullanılarak elde edilen yapıştırma bağlantılarının yanı sıra, farklı malzemelere sahip plakalardan oluşan yapıştırma bağlantıları da bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Deneysel yaklaşımda çekme testleri 1 mm/dak çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Deneysel yaklaşım sonunda her bir yapıştırma bağlantısının gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri belirlenmiştir. Ayrıca, plaka malzemesi olarak kullanılan alüminyum sandviç kompozit malzeme de yer alan polietilen polimerinin XRD testi ile karakterizasyonu yapılmıştır. Nümerik yaklaşımda, deneysel yaklaşımda kullanılan tek bindirmeli yapıştırma bağlantı geometrisi Ansys sonlu elemanlar programında oluşturulmuştur. Model oluşturulurken yapıştırıcı ile plakalar arasında non-linearer kontak kurulmuş ve deney şartlarını karşılayan sınır şartları uygulanmıştır. Bindirme bağlantılarının non-linearer modellenmesi, doğru sınır koşullarının uygulanması ve doğru temas tipinin seçilmesi nedeniyle nümerik sonuçların deneysel sonuçlarla benzer bir eğilim gösterdiği görülmüştür.

Dördüncü makalemiz, **Gökçe Mehmet Genç**'in "Sürtünme Karıştırma Prosesi ile Elde Edilen Yüzey Metal Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerini Geliştiren Çoklu Mekanizmalar" adlı makalesidir. Sürtünme karıştırma prosesi (SKP), sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) yöntemi esaslı olup, metalik

malzemelerin özelliklerini iyileştirmek için geliştirilmiş bir katı hal yöntemidir. Yöntem ile sert ikincil faz partiküllerin matris yapısına dağıtılarak eklenebilme (yerleştirilebilme) imkanı, yöntemin sonradan yüzey metal matrisli kompozit (YMMK) üretiminde de yaygın şekilde kullanılmasını sağlamıştır. Basit, çevreci ve düşük maliyetli bir katı hal yöntemi olması, yüzey kompoziti üretiminde kullanılan birçok sıvı ve gaz hal yöntemlerine göre daha ön plana çıkmasını sağlamıştır. Sürünme karıştırma prosesiyle yüzey metal matrisli kompozit elde ederken malzemenin mikroyapısının ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde birçok farklı mekanizma birlikte rol oynamaktadır. Matris yapısında elde edilen bu mukavemet artırıcı mekanizmalar, yöntemin işlem gören malzemeye kazandırdığı kendine has özellikler ile kullanılan sert ikincil faz partiküllerin matris yapısına dağılmasıyla gelişen özelliklerin melezlenmesi ile sağlanmaktadır. Çalışmada SKP ile elde edilen YMMK'lerin mekanik özelliklerindeki gelişmede sert ikincil faz partiküllerin, dinamik rekristalizasyonun, Zener sabitlemenin (iğneleme) ve Orowan mekanizmasının etkileri incelenmiştir.

Beşinci makalemiz, **Tekmile Cürebal, Aleyna Ağırman Kalca, Yücel Özmen**'in "Farklı Saçak Tiplerine Sahip Yarı Küresel Çatılar Üzerinde Basınç Dağılımlarının İncelenmesi" isimli makalesidir. Bu çalışmada, silindirik binaların yarı küresel geometrideki çatıları etrafındaki akış alanları, normal ve yelkıran saçak şeklinde iki farklı saçak tipi için deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmanın deneysel kısmında, rüzgâr tüneline yerleştirilen bina modellerinin çatı yüzeylerinde ortalama basınç dağılımları elde edilmiş ve modeller etrafında akış görüntüleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sayısal kısımda ise, bina modelleri etrafındaki akış alanları SST k- ω türbülans modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Sayısal çalışmadan elde edilen basınç dağılımlarının deneysel çalışmadan elde edilen basınç dağılımlarıyla uyumlu olduğu ve saçak tipindeki değişimin, basınç dağılımlarında belirgin bir değişime yol açmadığı görülmüştür.

Altıncı makalemiz, **Haydar Kepekçi, Ergin Kosa, Cüneyt Ezgi**'nin "Termoelektrik Soğutucunun Modelleme Çalışması ve Performans İncelemesi" isimli makalesidir. Termoelektrik soğutucular elektronik, medikal ve gıda endüstrisi uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. İki farklı malzemedен oluşan kapalı bir devreden sadece küçük bir akım geçirerek herhangi bir hareketli parça kullanmadan da bir soğutma etkisi elde edilebilir. Bu etkiye Peltier etkisi, bu prensibe göre çalışan soğutucuya ise termoelektrik soğutucu denir. Bu sistemler, biri soğuk diğeri sıcak iki termal iletken plaka arasına sıkıştırılmış birkaç termoelektrik bacadan oluşurlar. Termoelektrik soğutucular, düşük performans katsayıları (COP) nedeniyle şu anda buhar sıkıştırmalı soğutma sistemleri ile rekabet edememektedir. Ancak bazı uygulamalarda küçük boyutları, sadeliği, sessizliği ve güvenilirliği nedeniyle tercih edilmişlerdir. Bu çalışmada, maksimum soğutma gücü 50 W olan, 40mmx40mmx3.6mm boyutlarında bir termoelektrik soğutucu hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı kullanılarak modellenmiştir. Ayrıca, bir termoelektrik soğutucunun performansı araştırılmıştır. Yapılan hesaplamalarda seramik plakalar arasındaki sıcaklık farkı ve elektrik akım hesapları yapılmıştır. Ayrıca simülasyondan elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Analizlerden elde edilen veriler deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. 25 °C ve 50 °C yüzey sıcaklıkları için maksimum performans katsayıları sırasıyla 1.091 ve 1.445 olarak hesaplanmıştır. Genel olarak, aynı sıcaklık farkları için sıcak yüzeylerin sıcaklığı arttıkça termoelektrik soğutucunun COP değeri artmıştır.

Yedinci makalemiz, **Babak Keivani, Hayati Olgun, Aysel T. Atımtay**'in "Biyokömür-Soma Kömür Karışımlarının Oksijenlenme Koşullarında Birlikte Yakılmasının Deneysel İncelenmesi ve Emisyonlar Üzerindeki Etkileri" isimli makalesidir. Bu deneysel çalışma, kızılçam talaşından elde edilen biyokömürün Soma linyit ile birlikte yakılmasını kapsamaktadır. Deneyler 30 kW termal kapasiteli dolaşimli akışkan yataklı yakma (DAY) sisteminde, havada ve oksijence zengin hava ortamında gerçekleşmiştir. Deneylerde akışkan yatağın içindeki yanma sıcaklığı 850 + 50 °C'de tutulmuştur. Farklı oranlarda linyit ve biyokömür karışımları oksijence zengin ortamda yanma testleri yapılmıştır. Kızılçam talaşı için 300 °C ve 30 dakika işlem koşullarının soma linyit ile biyokömürün akışkan yatakta birlikte yakılması açısından en uygun üretim koşulları olacağı görüşüne varılmıştır. Linyitteki biyokömür karışımın payı %50'ye kadar artırılmıştır. Yakıt karışımlarının ağırlıkça %50'ye kadar çıktığı

ve sistemde biyokömürün etkin bir şekilde yakıldı bulunmuştur. Sonuçlar kömür ve biyokömürün birlikte yanması için biyokömürün iyi bir katkı yakıtı olabileceğini göstermektedir. Ayrıca oksijence zengin ortamında birlikte yakmanın SO_2 , CO ve N_2O 'nun baca gazı emisyonlarını azaltmak için bir seçenek olduğunu göstermiştir. Havaya oksijen eklenmesi yanma verimini arttırmış ve CO emisyonlarını azaltmıştır. Biyokömürün içinde kükürt bulunmadığından SO_2 emisyonlarını önemli ölçüde azaltmıştır. Bununla birlikte, NO_x emisyonları, yüksek oksijen konsantrasyonları ve yüksek seviyelerde biyokömür ilavesi ile artmıştır.

Sekizinci makalemiz, **Beytullah Başeğmez**'in "Demiryolu Taşıtlarında Kullanılan Fren Disklerinin Isı ve Malzeme Yönünden Değerlendirilmesi" isimli makalesidir. Demiryolu taşıtı frenleme sistemleri, emniyetli şekilde durdurma, yavaşlatma ve uygun hızla hareketi sağlar. Yaygın olarak sürtünme etkisiyle mekanik frenleme gerçekleştirilir ve demiryolu taşıtları yüksek hızda uygun tasarlandığında fren disklerinin kullanımı, tek güvenli seçenektir. Fren diski boyutları ve ağırlığı, şasi altındaki alan, servis hızı gibi parametrelere göre çeşitlilik gösterir. Farklı malzemeler kullanıldığında ağırlık yarı yarıya varacak kadar azaltılabilmektedir. Frenleme esnasında mekanik enerji ısıya dönüşür. Çeşitli şekillerde ve boyutlarda tasarlanabilen soğutma kanatçıkları arasından akan hava, diskte konveksiyonla etkili soğutma sağlar. Diskte yerel olarak aşırı ısınan alanlar, fren diski malzemesinde yapısal değişikliğe, termal çatlak oluşumuna ve diğer hasarlara yol açar. Bu hasarlar, kontrol edilmediği ve ilerlediği, derin çatlaklar haline dönüştüğü takdirde zamanla disk kullanılamaz hale gelir. Demiryolu taşıtı fren diski imalinde yaygın ve geleneksel olarak dökme demir (lamelli, vermiküler, küresel grafitli) kullanılır; ayrıca yüksek alaşımlı dökme demirler, dökme ve dövme çelik. Fren diski çeliklerinin kırılma tokluğunu artırmak ve aşınma dirençlerini yükseltmek için bileşene çeşitli alaşım elementleri eklenebilir. Ayrıca özellikle alüminyum ve seramik matrisli kompozit malzemelerin kullanımı da söz konusudur; böylelikle istenilen özelliklerde ve oldukça hafif tren fren diski üretilebilir. Bu çalışmada fren disk yapısı ve soğutma kanatçıkları, frenlemede ısı oluşumu, transferi, sıcaklık gradyanları ve sıcak bölgelerde oluşan sorunlar, termik çatlaklar, fren disklerinde kullanılan ve kullanılabilen malzemeler hakkında bilgi verilmiştir.

Dokuzuncu makalemiz, **Gökçe Mehmet Gençer, Coşkun Yolcu, Fatih Kahraman, Melih Belevi**'nin "SiCP/A356 Kompozitinin Aşınma Direncine Ultrasonik Dövme İşleminin ve Yaşlandırma Sertleşmesinin Etkilerinin Karşılaştırılması" isimli makalesidir. Çalışmada, karıştırmalı döküm yöntemiyle üretilmiş ağırlıkça %10 SiC partikül takviyeli alüminyum matrisli kompozit plakalara 2 ve 5 saat olmak üzere iki farklı yaşlandırma süresi kullanılarak T6 ısıl işlemi uygulanmıştır. Buna ilaveten, döküm sonrası elde edilen bir diğer kompozit plakaya ise ultrasonik dövme yöntemi uygulanmıştır. Matris malzemesi olarak A356 alaşımı kullanılan kompozit plakaların, uygulanan işlemler sonrasında iç yapılarındaki ve sertlik değerlerindeki değişimler ve bulamaç (çamur) ortamındaki abrasif aşınma davranışları incelenmiştir. Sonuçlara göre, uygulanan ısıl işlemin ve ultrasonik dövme yönteminin SiC partikül takviyeli A356 kompozitin bulamaç ortamındaki abrasif aşınma direncini arttırdıkları ancak imalat sırasında takviyeler nedeniyle mikro hataların oluşması halinde, seramik takviyelerin sağladığı aşınma direncini yine kendilerinin negatif etkileyebileceği de gözlemlenmiştir.

Onuncu makalemiz, **Aybike Özyüksel Çiftçioğlu**'nun "Kısıtlı Mühendislik Problemlerinin Karşılaştırılmalı Ağırlık ve Maliyet Optimizasyonu" isimli makalesidir. Mühendislik alanındaki gerçek dünya problemleri genellikle doğrusal olmayan veya kısıtlı tasarım problemleridir. Pek çok nedenden ötürü, bir mühendis yalnızca uygun şekilde çalışan herhangi bir tasarımı değil, en iyi tasarımı elde etmek ister. En iyi tasarımı belirleme sürecine optimizasyon denir. Optimizasyon ile mevcut kısıtlayıcıları sağlayarak belirli bir amaç fonksiyonunu elde edecek şekilde problemin en iyi tasarımı belirlenir. Bu çalışmada çeşitli eşitlik ve eşitsizlik kısıtlamaları olan çekme/basınç yayı, kaynaklı giriş ve basınçlı kap tasarımları olmak üzere üç gerçek dünya mühendislik tasarım problemi optimize edilmeye çalışılmış, tasarım problemlerinin optimum değişkenleri belirlenmiştir. Optimizasyon sürecinde sekiz farklı algoritma kullanılmış, gerçek mühendislik problemlerine ait en iyi tasarımlar oluşturulmaya çalışılmıştır. Optimizasyon algoritmaları, meta-sezgisel algoritmaların alt dallarından olan evrimsel tabanlı, sürü tabanlı, matematik tabanlı ve fizik tabanlı algoritmalarından seçilmiştir. Bunların yanı sıra, algoritma-

ların sonuçları yakınsama eğrileri ve kutu grafikler yardımıyla birbirleri ile kıyaslanmıştır. Gri kurt algoritması her üç problemde de en başarılı performans gösteren algoritma olmuştur. Bunun yanı sıra, sürü tabanlı, fizik tabanlı ve matematik tabanlı algoritmalar gerçek mühendislik problemlerini optimize etmede diğer algoritmalarından daha iyi sonuç vermiştir.

On birinci makalemiz, **Murat Toptaş, Mehmet Yılmaz**'ın “Yangın Söndürme İçin Alternatif Bir Tasarım: Akıllı Yangın Söndürme Bombası” isimli makalesidir. Yangınlar başta ormanlar olmak üzere, gaz ve petrol nakil hatları, kimyasal madde ve mühimmat depolama alanları gibi birçok noktada ortaya çıkabilmektedir. Bu durumlarla mücadelede günümüzde kullanılmakta olan karadan ve havadan yangınlarla mücadele yöntemleri çoğu durumda etkisiz kalmaktadır. Bu çalışmada havadan yangınlarla mücadele operasyonlarında kullanılacak bir ürünün tasarımı önerilmiştir. Akıllı Yangın Söndürme Bombası olarak adlandırılan bu tasarım yeni ve etkili bir üründür. Bu ürün NATO üyesi ülkelerin envanterlerinde bulunan bir harp mühimmatı türü olan MK-82 (havadan yere genel maksat bombası) tip mühimmatın tasarımına benzer bir tasarıma sahiptir. Havacılık ve yangın söndürme endüstrisine kazandırılması amaçlanan akıllı yangın söndürme bombasının mesken alanları dışındaki açık saha yangınlarında etkin bir şekilde kullanılması beklenmektedir.

On ikinci makalemiz, **Halil Yalçın Akdeniz**'in “Helikopterlerde Kullanılan Bir Piston-Prop Motorun Enerji, Ekserji, Termoekolojik, Sürdürülebilirlik, Termoekonomik ve Eksergoekonomik Performans Analizleri” isimli makalesidir. Bu çalışmada, helikopterlerde kullanılan piston-prop motorlar için enerji, ekserji, termoekolojik, sürdürülebilirlik, termoekonomik ve eksergoekonomik analizler açıklanmış ve 190 SHP güce sahip bir piston-prop motor üzerinde bu analizler uygulanmıştır. İlk olarak piston-prop motor bir termodinamik sistem olarak ele alınmış olup buna göre sistemin kontrol hacmi, giriş ve çıkış akışları, denge denklemleri ve ölü hal koşulları belirlenmiştir. Elde edilen bulgulara göre sistemin enerji verimi % 15.51 olarak bulunurken, ekserji verimi % 11 olarak hesaplanmıştır. Sistemin entropi üretimi, sürdürülebilirlik indeksi, termoekolojik performans katsayısı, termoekonomik parametre değeri, kayıp ekserjisine bağlı eksergoekonomik parametre değeri, yıkım ekserjisine bağlı eksergoekonomik parametre değeri ve toplam eksergoekonomik parametre değeri sırasıyla 2,940 W/K, 1.124, 0.161, 2.20 W/TL, 1.29 W/TL, 2.50 W/TL ve 3.79 W/TL bulunmuştur. Analizler sonucunda sisteme giren yakıtın oluşturduğu enerjinin büyük ölçüde kayba ve yıkıma uğradığı görülmüştür. Elde edilen analiz sonuçlarından hareketle, motorun verim ve performansının yükseltilmesine ek olarak sistemdeki kayıpların ve tersinmezliklerin azaltılabilmesi açısından, bu tipteki motorların soğutma teknolojilerinin iyileştirilmesi ile buradaki kayıpların azaltılması ve genel sistem performansının optimize edilmesi önerilebilir.

On üçüncü ve son makalemiz, **Gurbet Örcen, Engin Koyun**'un “Farklı Fiber Dizilimlerine Sahip Kompozit Levhalar Üzerinde Nem ve Sıcaklık Etkisi” isimli makalesidir. Bu çalışmada, farklı fiber takviye açılarına ve farklı genişliklere sahip cam fiber takviyeli epoksi kompozit levhalar üzerinde nem ve sıcaklık etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla, fiber takviye açıları $[0^\circ]_8$ ve $[45^\circ/45^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$ olan kompozit levhalar, 25 mm ve 30 mm ölçülerinde hazırlanarak 40 °C, 60 °C ve 80 °C sıcak suyun içerisinde, 15 gün, 30 gün ve 45 gün süre ile bekletilmiştir. Süre bitiminde numunelerin nem emilim oranları ve dayanımları elde edilmiştir. Elde edilen verilerin kendi aralarında ve kuru numuneler ile karşılaştırılması yapılmıştır. Ayrıca Taramalı Elektronik Mikroskop (SEM) yardımıyla numunelerin morfolojileri görüntülenerek, nem ve sıcaklığın hasar davranışları üzerindeki etkileri incelenmiştir. $[45^\circ/45^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$ fiber dizimli numunelerin dayanımının, $[0^\circ]_8$ fiber dizimli numunelerden elde edilen dayanım değerlerinden daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bekleme süresi ve sıcaklık derecesi arttığı zaman numunelerin matris/fiber yapısında bozulmaların meydana geldiği, buna bağlı olarak da dayanım değerlerinin düştüğü tespit edilmiştir.

Dergimize www.mmo.org.tr/muhendismakina ve <https://dergipark.org.tr> adresinden ulaşabilir; makale ve görüşleriniz ile destek olabilirsiniz.

Bir sonraki sayımızda buluşmak üzere...

PRESENTATION

Dear Colleagues,

The first article published in our journal *Engineer and Machinery* is the article titled “Battery Analysis in Hybrid Electric Vehicles With ADVISOR Program” by **Şule Kuşdoğan, Büşra Özen**. The search for more efficient, sustainable and renewable energy sources in the world is increasing day by day. Naturally, the automobile industry has turned to electric vehicles again. The fact that electric vehicles started to be produced again and the demand for these vehicles in the market increased, brought scientific studies together. Battery systems, one of the most important parameters in electric vehicles, are one of these studies. It is very important in terms of cost and safety to analyze the battery systematically before creating it in a vehicle. In this study, the battery systems used in hybrid electric vehicles were analyzed using the ADVISOR program. The results obtained by simulating different types of selected batteries in series and parallel hybrid electric vehicles were compared. The results obtained were shared within the study.

The our second article is titled “The Usage of Numerical Methods (HAD/CFD) in The Design of Centrifugal Pumps” by **İsmail Ovalı, Öner Atalay, Ege Yılmaz**. Centrifugal pumps are widely used products in engineering field. It contains many different parameters according to the usage areas. At the design stage, many design parameters must be created for different flow rates and pump heads. According to the development of technology, the use of computer aided programs in the design process has become widespread. In this way, time is saved and cost is reduced. Computational Fluid Dynamics (HAD) or CFD analysis, as we are used to in a foreign language, is quite widely used in pump design. After product design and solid model generation, numerical analysis in the pump can be performed using analysis programs. The most important advantage over experimental methods is that the parameters can be changed in an unlimited number. The process can be continued until the desired values are obtained. In the light of the information obtained with the help of a computer, production and use processes can be switched. In this study, a sample centrifugal pump is considered and the numerical analysis steps are explained respectively. The methods and admissions used in the program are considered according to general literature knowledge. The methods to be applied are unlimited and solution networks can be expanded by different ways if wanted.

The our third article is titled “Determination of Mechanical Properties of Single Lap Joints Having Sandwich Composite and Metal Adherend by Experimental and Numerical Approach” by **Engin Erbayrak**. In this study, the mechanical properties of single lap joints having different adherends were determined by experimental and numerical approaches. Steel, aluminum, and aluminum sandwich composite material were used as adherend, and Araldite 2015 epoxy adhesive was used as adhesive in single lap joints. Alongside the single lap joints obtained by using similar adherends, different adherends were also examined within the scope of this study. In the experimental approach, tensile tests were carried out at a rate of 1 mm/min. At the end of the experimental approach, the stress-strain plots of each single lap joint were determined. In addition, the characterization of the polyethylene polymer, which is also included in the aluminum sandwich composite material used as the adherend, was made in experimental approach by XRD test. In the numerical approach, the single lap joint geometry used in the experimental approach was created in the Ansys finite element program. A non-linear contact was established between the adhesive and the adherend, and boundary conditions were applied that meet the experimental conditions. It was observed that the numerical results show a similar tendency with the experimental results due to the non-linear modeling of the lap joints, the application of the correct boundary conditions, and the selection of the correct contact type.

The our fourth article is titled “Multiple Mechanisms Improving The Mechanical Properties Of Surface Metal Matrix Composites Obtained By Friction Stir Processing” by **Gökçe Mehmet Gençer**. Friction stir processing (FSP), a technique based on the principles of friction stir welding (FSW), is a solid-state method that was developed to enhance the properties of metallic materials. The possibility of the addition of hard second phase particles to matrix structure by distributing, subsequently caused that

this method has also been used commonly in surface metal matrix composite (SMCC) manufacturing. By means of the advantages of being a simple, environmentally friendly, and cost-effective solid-state method, FSP has come into prominence more than various liquid and gas-phase methods that are used to manufacture SMCCs. In the FSP method, multiple mechanisms take part together in enhancing the microstructure and mechanical properties of the material during processing. These strengthening mechanisms in matrix structure obtained by hybridizing the specific properties gained to processed material by the FSP method and the enhanced properties by distributing the hard second phase particles in the matrix material. In this study, the effects of hard second phase particles, dynamic recrystallization (DRX), Zener pinning, and Orowan mechanism in the enhancement of mechanical properties of the SMCCs manufactured by FSP were investigated.

*The our fifth article is titled “Investigation of Pressure Distributions on Hemispherical Roofs With Different Eave Types” by **Tekmile Cürebal, Aleyna Ağırman Kalca, Yücel Özmen**. In this study, the flow fields around cylindrical buildings with hemispherical roof geometry have been analyzed experimentally and numerically for two different eaves types (normal and pitched eaves). In the experimental part of the study, the mean pressure distributions on the roof surfaces of the building models placed in the wind tunnel were obtained and flow visualization studies were carried out around the models. In the numerical part, the flow fields around the building models were calculated using the SST $k-\omega$ turbulence model. It was observed that the pressure distributions obtained from the numerical study were compatible with the pressure distributions obtained in the experimental study, and the change in the eave type did not cause an important change in the pressure distributions.*

*The our sixth article is titled “Modeling Study and Performance Investigation of a Thermoelectric Refrigerator” by **Haydar Kepekçi, Ergin Kosa, Cüneyt Ezgi**. Thermoelectric refrigerators are widely used in electronics, medical, and food industry application areas. A refrigeration effect can also be achieved without using any moving parts by merely passing a small current through a closed circuit made up of two dissimilar materials. This effect is called the Peltier effect, and a refrigerator that works on this principle is called a thermoelectric refrigerator. They consist of several thermoelectric legs sandwiched between two thermally conductive plates, one cold and one hot. Thermoelectric refrigerators presently cannot compete with the vapor-compression refrigeration system because of their low- coefficient of performance (COP). However, some applications have been preferred because of their small size, simplicity, quietness, and reliability. In this study, a thermoelectric cooler having a maximum cooling power of 50 W, having a dimension of 40mmx40mmx3.6 mm, is modeled in multi-physics software. Also, the performance of a thermoelectric refrigerator is investigated. It is computed the temperature difference between ceramics plates versus electric current and COP for a temperature difference between ceramics plates. The simulation results are compared with experimental data. The data obtained from the analyses have been compared with the experimental results and found to agree with each other. For the surface temperatures of 25 oC and 50 oC, the maximum coefficients of performance have been computed to be 1.091 and 1.445, respectively. In general, as the temperature of hot surfaces has increased for the same temperature differences, the COP of the thermoelectric cooler has increased.*

*The our seventh article is titled “Experimental Investigation of Co-combustion of Biocoal with Soma Lignite in Air and The Oxygen-enriched Air Atmospheres and Its Effects on Emissions” by **Babak Keivani, Hayati Olgun, Aysel T. Atımtay**. This experimental work includes the co-combustion of Soma lignite with biochar obtained from red pine sawdust. The experiments were carried out in a circulating fluidized bed combustion (DAY) system with a thermal capacity of 30 kW, in air and in an oxygen-rich air atmosphere. In this study, the combustion temperature in the fluidized bed was kept at 850 + 50 °C. Combustion tests of Soma lignite and biochar mixtures at different rates were carried out in an oxygen-rich medium. It was concluded that 300 °C and 30 minutes processing conditions for red pine sawdust would be the most suitable production conditions for the co-combustion of soma lignite and biochar in a fluidized. The share of biochar mixture in lignite has been increased up to 50%. by weight. It was found that the biochar was burned effectively when the mixture of biochar*

was up to 50%. The obtained results emphasized that biochar can be a good additive fuel for co-combustion of coal and biochar. It has also shown that co-combustion in an oxygen-rich atmosphere is a choice to decrease stack emissions of SO_2 , CO and N_2O . Addition of oxygen to air increased the combustion efficiency and reduced CO emissions. Since biocoal does not have sulfur in it significantly reduced SO_2 emissions. However, emissions of NO_x increased with high oxygen concentrations and high levels of biocoal addition.

The our eighth article is title "Assessment of Brake Discs Used Railway Vehicles in terms of Heat and Material" by **Beytullah Başeğmez**. Railway vehicle brake systems provides safely stopping, slowing and its movement at the appropriate speed. Mechanical braking is commonly performed by the effect of friction, and the use of brake discs is the only reliable option when railway vehicle is designed for high speed. The dimensions and weight of the brake discs, the area under the chassis, the service speed of the train, etc. varies as it is designed according to the parameters. The weight can be reduced by up to half, when different materials are used. During braking, mechanical energy is converted into heat. The air flowing between the ventilation vanes, which can be designed in various shapes and sizes, provides effective convective cooling in the disc. Locally overheated areas cause structural changes in the brake disc material, thermal crack formation and other damage. If these damages are not controlled and progress and turn into deep cracks, the disc becomes unusable over time. Lamellar, vermicular or spheroidal graphite cast iron is commonly and traditionally used in the manufacture of railway vehicle brake discs. Also cast irons with special compositions, as well as casting and forging steel. Various alloying elements can be added to the composition to increase the fracture toughness and wear resistance of steels to be used as brake disc material. There is also the use of composite materials especially aluminium or ceramic matrix composites thus, a train brake disc desired property and very light can be produced. In this study, information is given about brake disc structure and cooling vanes, heat generation and transfer in braking, heat gradients and problems in hot regions, thermal cracks, materials used and can be used in brake discs.

The our ninth article is title "Comparison Of The Effects Of Ultrasonic Impact Treatment and Age Hardening On Wear Resistance Of SiCp/A356 Composite" by **Gökçe Mehmet Gençer, Coşkun Yolcu, Fatih Kahraman, Melih Belevi**. In the study, 10 wt.% SiC reinforced aluminum matrix composite plates fabricated by stir casting method were T6 heat treated by using two different artificial aging times as 2 and 5 hours. Furthermore, post-casting ultrasonic impact treatment was applied to the other obtained composite plate. The changes in the microstructures and hardness values and slurry wear behaviors of the composite plates which A356 alloy was used as matrix material were investigated. According to the results, the applied heat treatment and ultrasonic impact treatment improved the slurry abrasive wear resistances of the SiC reinforced A356 composite. However, during the composite fabrication process, in the condition of micro discontinuity formation due to the reinforcements; it was observed that the wear resistance ensured by ceramic reinforcements can be adversely affected again by reinforcements

The our tenth article is title "Comparative Weight and Cost Optimization of Constrained Engineering Problems" by **Aybike Özyüksel Çiftçioğlu**. Real-world problems in engineering are often nonlinear or constrained design problems. For many reasons, an engineer wants to get the best design, not just any that works properly. The process of determining the best design is called optimization. With optimization, the best design of the problem is determined to achieve a specific objective function by providing the current constraints. In this study, three real-world engineering design problems are tried to be optimized, namely tension/compression spring, welded beam, and pressure vessel designs with various equalities and inequality constraints. In the optimization process, eight different algorithms are used, the best designs are created, and the optimum variables of the problems are determined. Optimization algorithms are selected from evolutionary-based, swarm-based, mathematics-based, and physics-based algorithms, which are sub-branches of metaheuristic algorithms. In addition, the results of the algorithms are compared with each other with the help of convergence curves and box graphs. The grey wolf algorithm is the algorithm that showed the most successful performance in all

three problems. Besides, swarm-based, physics-based, and math-based algorithms performed better than other algorithms in optimizing real engineering problems.

The our eleventh article is title “An Alternative Design for Fire Extinguishing: Smart Fire Extinguishing Bomb” by **Murat Toptaş, Mehmet Yılmaz**. Fires can occur at many points such as gas and oil transmission lines, chemical substance and ammunition storage areas, especially in forests. The land and aerial firefighting methods, which are used today in combating these situations, are ineffective in most cases. In this study, the design of a product that can be used in aerial firefighting operations is proposed. This design, called Smart Fire Extinguisher, is a new and effective product. This product has a design similar to the MK-82 (air-to-ground general purpose grenade) type ammunition, a war ammunition type found in the inventory of NATO member countries. It is expected that the smart firefighting bomb, which is intended to be brought to the aviation and firefighting industry, will be used effectively in open field fires outside of residential areas.

The our twelfth article is title “Energy, Exergy, Thermoecological, Sustainability, Thermoeconomic and Exergoeconomic Performance Analyses of A Piston-Prop Engine Used in Helicopters” by **Halil Yalçın Akdeniz**. In this study, energy, exergy, thermoecological, sustainability, thermoeconomic and exergoeconomic analyzes for piston-prop engines used in helicopters are explained and these analyzes are applied on a piston-prop engine with 190 SHP power. Firstly, the piston-prop engine is considered as a thermodynamic system and accordingly the control volume, inlet and outlet flows, balance equations and dead state conditions of the system are determined. According to the findings, the energy efficiency of the system is found as 15.51%, while the exergy efficiency is calculated as 11%. The system’s entropy production, sustainability index, thermoecological performance coefficient, thermoeconomic parameter value, exergoeconomic parameter value due to loss exergy, exergoeconomic parameter value due to destruction exergy and total exergoeconomic parameter value are found as 2,940 W/K, 1.124, 0.161, 2.20 W/TL, 1.29 W/TL, 2.50 W/TL ve 3.79 W/TL, respectively. As a result of the analyses, it is noticed that the energy generated by the fuel entering the system is largely lost and depleted. In view of the obtained results, in addition to increasing the efficiency and performance of the engine, in order to reduce the losses and irreversibility in the system, it can be recommended to improve the cooling technologies of this type of engines.

The our thirteenth and final article is title “Effect of Humidity and Temperature on Composite Plates With Different Fiber Orientations” by **Gurbet Örcen, Engin Koyun**. In this study, the effect of humidity and temperature on glass fiber reinforced epoxy composite plates with different fiber reinforcement angles and different widths were experimentally investigated. For this purpose, composite plates with fiber reinforcement angles of $[0^\circ]_8$ and $[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ]_8$ were prepared in 25 mm and 30 mm dimensions and kept in hot water at 40 °C, 60 °C and 80 °C for 15, 30 and 45 days. At the end of the duration, the moisture absorption rates and strengths of the specimens were obtained. The obtained data were compared among themselves and with that of dry specimens. In addition, the morphologies of the specimens were visualized with the help of Scanning Electron Microscope (SEM) and the effects of humidity and temperature on failure behavior were examined. It was determined that the strength of the $[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ]_8$ fiber orientations specimens was lower than the strength values obtained from the $[0^\circ]_8$ fiber orientations specimens. It has been determined that when the waiting time and temperature increase, the matrix/fiber structure of the specimens deteriorates and the strength values decrease accordingly

You can also view the journal on the web page www.mmo.org.tr/muhendismakina, <https://dergipark.org.tr> and support us with your articles and comments.

Best regards until our next issue...

UCTEA CHAMBER OF MECHANICAL ENGINEERS
Board of Directors

Advisor Programıyla Hibrit Elektrikli Taşıtlarda Batarya Analizi

Şule Kuşdoğan^{1*}, Büşra Özen²

ÖZ

Dünyada daha verimli, sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynağı arayışı her geçen gün artmaktadır. Doğal olarak otomobil endüstrisi yeniden elektrikli taşıtlara yönelmiştir. Elektrikli taşıtların tekrardan üretilmeye başlaması ve piyasada bu taşıtlara talebin artması bilimsel çalışmaları beraberinde getirmiştir. Elektrikli taşıtlardaki en önemli parametrelerden biri olan batarya sistemleri bu çalışmalardan bir tanesidir. Bir taşıtta bataryanın oluşturulmasından önce sistemsel olarak analizinin yapılması maliyet ve güvenlik açısından çok önemlidir. Bu çalışmada hibrit elektrikli taşıtlarda kullanılan batarya sistemlerinin ADVISOR programı aracılığıyla analizi yapılmıştır. Seçilen farklı türde bataryalar seri ve paralel hibrit elektrikli taşıtlarda simüle edilerek ortaya çıkan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar çalışma içerisinde paylaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli taşıt(ET), hibrit elektrikli taşıt(HET), batarya, ADVISOR

Battery Analysis İn Hybrid Electric Vehicles With ADVISOR Program

ABSTRACT

The search for more efficient, sustainable and renewable energy sources in the world is increasing day by day. Naturally, the automobile industry has turned to electric vehicles again. The fact that electric vehicles started to be produced again and the demand for these vehicles in the market increased, brought scientific studies together. Battery systems, one of the most important parameters in electric vehicles, are one of these studies. It is very important in terms of cost and safety to analyze the battery systematically before creating it in a vehicle. In this study, the battery systems used in hybrid electric vehicles were analyzed using the ADVISOR program. The results obtained by simulating different types of selected batteries in series and parallel hybrid electric vehicles were compared. The results obtained were shared within the study.

Keywords: Electric vehicle (EV), hybrid electric vehicle (HEV), battery, ADVISOR

* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 21.04.2021

Kabul/Accepted : 29.05.2021

¹ Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, kusdogan@kocaeli.edu.tr
ORCID: 0000-0003-0586-4142

² Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, busrakoca01@hotmail.com
ORCID: 0000-0002-4100-5487

EXTENDED ABSTRACT

Introduction/ Background

In recent years, many factors such as environmental protection and greenhouse gas emissions, fossil fuel scarcity and price changes or high pollution in developed cities have become one of the main concerns for social and political agents and the scientific community. These factors accelerate the development of more efficient, sustainable and renewable energy systems. Today, the increase in the prices of fossil energy resources, the uncertainty in obtaining them and the environmental problems caused by their consumption have led to more efficient energy use and increased interest in renewable energy sources. The decrease in oil, which is one of the most important energy resources, and the increase in its prices seriously affect the transportation sector. On the other hand, reducing pollution has become an important issue in the world. Many countries have turned to renewable energy sources in order to reduce pollution. These reasons have enabled the automobile industry to prefer electric and hybrid electric vehicles. Increasing demand for hybrid electric vehicles has brought scientific studies with it. One of these studies is battery systems. The battery is one of the most important parameters of the energy storage system in hybrid electric vehicles. In this study, energy storage systems in hybrid electric vehicles and their analysis with the ADVISOR program have been evaluated.

Objectives/ Research Purpose

Batteries are one of the main elements used as an energy storage system in the entire vehicle system. For this reason, the battery system in a vehicle; It is very important in terms of cost and security to analyze the compatibility with the system before it is installed. The ADVISOR program developed by the American National Renewable Energy Laboratory (NREL) enables the comparison of such systems. This study enabled the modeling of the battery systems in hybrid electric vehicles using ADVISOR program and the analysis of the selected battery types by comparing the results data for different hybrid vehicles.

The search for more efficient, sustainable and renewable energy sources in the world is increasing day by day. Naturally, the automobile industry has turned to electric vehicles again. The fact that electric vehicles started to be produced again and the demand for these vehicles in the market increased, brought scientific studies together. Battery systems, one of the most important parameters in electric vehicles, is one of these studies. It is very important in terms of cost and safety to analyze the battery systematically before creating it in a vehicle. In this study, the battery systems used in hybrid electric vehicles were analyzed using the ADVISOR program. The results obtained by simulating different types of selected batteries in series and parallel hybrid electric vehicles were compared. The results obtained were shared within the study.

Methods/ Methodology

In this study, there is interest in the ADVISOR program, which has a powerful analysis tool. With a user-friendly interface (GUI-graphical user interface), ADVISOR was created in Matlab-Simulink, a software module in Matlab to model, simulate and analyze dynamic systems. The program's first goal is to highlight the system-level interactions of hybrid and electric vehicle components and their impact on vehicle performance and fuel economy. In this study, using the ADVISOR program, different batteries were selected in series and parallel hybrid electric sample vehicles, and analyzes were made, and the result graphs were discussed. The aim is to introduce the ADVISOR program, which is an advanced vehicle simulation, with sample applications and to show that hybrid vehicles can be simulated in advance.

Results/ Findings

By analyzing the performance of five different battery types in sample series and parallel hybrid electric vehicles using the ADVISOR program, it is possible to simulate the vehicles designed in the computer environment beforehand. ADVISOR displays the selected parameter results in graphical form. With the help of this program, different energy storage systems in hybrid electric vehicles are analyzed. According to the analysis results, it was concluded that the battery type significantly affects the vehicle performance. It has been observed that some batteries used in serial hybrid electric vehicles perform just like the full electric vehicle. This shows that series hybrids are more advantageous in city driving.

Discussion and Conclusions

Especially hybrid electric vehicles; It is a fact that today, when alternative energy sources to petroleum-based fuels are being searched extensively, it has become an important research subject. The importance of the ADVISOR program, which allows these vehicles to be tested from every angle before real life, is emphasized. This study, it is aimed to provide scientific studies and to encourage those who make researches on this subject to use the ADVISOR program.



1. GİRİŞ

Günden güne giderek bozulan çevre koşulları, dünyada uzun yıllardır insanlık tarafından en çok tartışılan konulardan biridir. Çevreyi koruma anlayışının artmasıyla birlikte öte yandan petrol rezervlerinin azalması ve buna bağlı olarak petrol fiyatlarındaki artışlar, otomobil üreticilerini yeni çözümler üretmeye ve yeni alternatif enerji kaynakları arayışına zorlamıştır. Bu arayışın sonuçlarından biri de, elektrik motorlarını araca entegre etme fikridir. Böylece elektrik motoru ve içten yanmalı motor (İYM) birleşimi ile hibrit teknolojisi meydana gelmiştir. Hibrit elektrikli taşıtlar bugün çeşitli üreticiler tarafından geliştirilmektedir. Son zamanlarda yakıt tüketimi ve yüksek kirlilik sorununa çözüm olarak kabul edilen hibrit elektrikli taşıtlara yönelik talebin artması bilimsel çalışmaları da beraberinde getirmektedir.

Yeni taşıtların geliştirilmesi, araç endüstrisinin küresel çevresel bozulma ve yakıt kıtlığı sorunuyla yüzleşmesinin önemli bir yolu olmuştur. Hibrit elektrikli taşıt, güç bataryasının düşük enerji yoğunluğu ve elektrikli taşıtın kısa sürüş mesafesi sorunlarını çözmek için etkili bir seçimidir [1]. Genel olarak bir hibrit taşıt, bir içten yanmalı motor ve elektrikli tahrik sisteminin birleşimidir. Taşıtın performansı, büyük ölçüde taşıt güç aktarma organına, elektrik sisteminin doğruluğuna ve verimliliğine bağlıdır [2]. Güç kaynaklarının miktarına ve güç aktarım mekanizmasının iletim moduna göre, hibrit elektrikli taşıt sistem topolojisi paralel, seri ve seri-paralel hibrit elektrikli taşıt olarak sınıflandırılır. Bu topolojiler farklı taşıtlarda kullanılır [3].

Hibrit elektrikli taşıtlarda enerji depolama sistemlerinin öne çıkan kombinasyonları bataryalar, kapasitörler ve yakıt hücreleri olduğundan bu teknolojiler, çevresel etkiler açısından daha detaylı araştırılmaktadır. Daha fazla iyileştirme için olumlu veya olumsuz yönler ortaya konulmaktadır [4]. Bataryalar, gücü elektrik enerjisi şeklinde taşırlar. Bataryaların depoladığı enerji miktarı taşıtın menzilini belirler. Bataryaların şarj durumu, enerji depolama sistemi tarafından depolanan şarj miktarı oranıdır [5].

Günümüzde hibrit elektrikli taşıtlara yönelik uygulamalar için kurşun asit bataryalar (Pb), nikel metal hidrür bataryalar (NiMH), nikel kadmiyum bataryalar (NiCad) ve lityum iyon bataryalar (Li-ion) kullanılmaktadır. Bu bataryaların genel performans değerleri Tablo 1’de verilmektedir. Pb batarya, düşük maliyetlidir ancak düşük enerji yoğunluğuna ve kurşun zehirlenmesi gibi kirlilik sorunlarına sahiptir. NiMH batarya, 60 Wh/kg üzerinde yüksek bir enerji yoğunluğu ve uzun bir kullanım ömrü sağlar, ancak kendi kendine deşarj oranı %28’in üzerinde yüksektir. Lityum iyon batarya, 10 Wh/kg’a kadar yüksek enerji yoğunluğuna ve 600 katın üzerinde bir servis döngüsüne sahip elektrikli taşıtlar için idealdir [6].

Hibrit elektrikli taşıtlarda kullanılan içten yanmalı motorların ne zaman devreye gireceğini batarya şarj durumu belirler. Şarj değeri belli limitler altına düştüğü zaman içten yanmalı motor devreye girerek bataryaları şarj eder. Ayrıca hibrit taşıtların çalış-

Tablo 1. 3 Boyutlu Yazıcı Teknolojileri ve Malzeme Türleri

Batarya Türü	Enerji yoğunluğu (Wh / kg)	Güç yoğunluğu (W / kg)	Çevrim ömrü (Döngü)	Aylık kendi kendine deşarj oranı	Sermaye maliyeti (\$ / kWh)
Lityum iyon bataryalar	100-160	80-2000	600-2000	3-10%	200-700
Nikel kadmiyum bataryalar	40-60	200-500	500	20%	300
Nikel metal hidrür bataryalar	60-100	200-1500	750	28%	300-500
Kurşun asit bataryalar	20-50	80-300	300-450	5%	70

ma prensiplerinde, içten yanmalı motorun verimsiz olduğu düşük devir ve düşük moment bölgelerinde elektrikli motoru devreye girer. Bu şekilde yakıt tüketimi azaltılır ve egzoz emisyonlarında olumsuz etki aza indirgenir [7].

ADVISOR (Advanced Vehicle Simulator) - Gelişmiş Araç Simulatörü, Amerika Birleşik Devletleri hükümetinin kurmuş olduğu Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL-National Renewable Energy Laboratory) tarafından ilk olarak Kasım 1994'te tasarlanan bir benzetim programıdır [8]. Kullanıcı dostu bir ara yüzü (GUI- graphical user interface) ile ADVISOR, dinamik sistemleri modellemek, simüle etmek ve analiz etmek için Matlab'de bir yazılım modülü olan Matlab-Simulink'de oluşturulmuştur [9]. ADVISOR, dünya çapında otomobil üreticileri, üniversite ve enstitü araştırmacıları tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır [10].

Programdaki ilk amaç, hibrit ve elektrikli taşıt bileşenlerinin sistem düzeyinde etkileşimlerini ve bunların taşıt performansı ve yakıt ekonomisi üzerindeki etkilerini vurgulamaktır [11]. Yakıt tüketiminin kontrol stratejisine göre tahmin edilmesi, çeşitli bölümler arasındaki işlevin ve ilişkilerin araştırılması, farklı sürüş (yol) döngüleri altında hibrit elektrikli taşıt (HET) emisyonunun karşılaştırılması, HET'in kontrol stratejisinin değerlendirilmesi, HET'in yakıt tüketimine göre optimize edilmesi ADVISOR programının bazı işlevlerindedir [12].

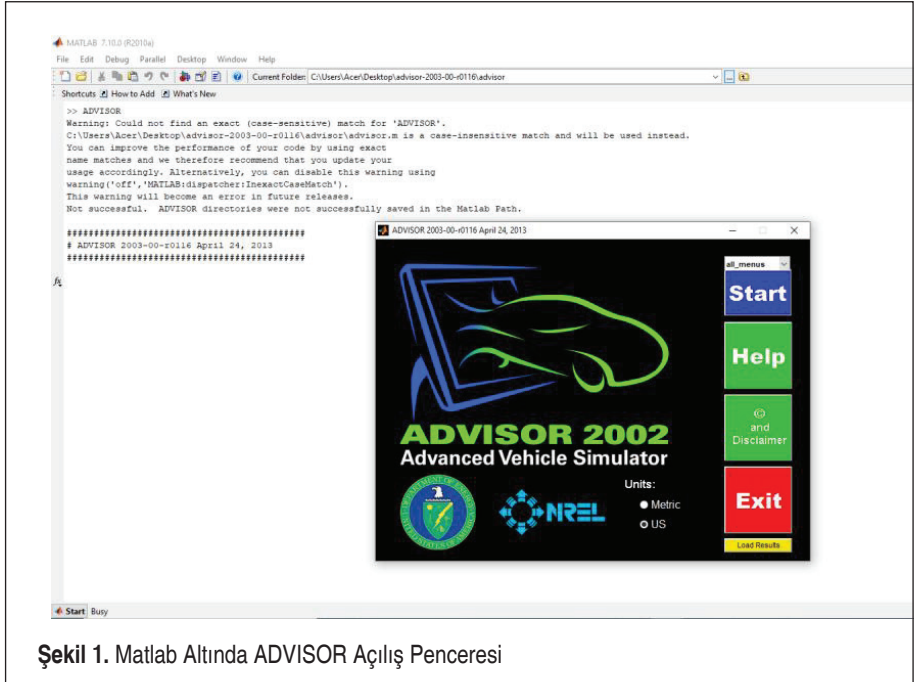
Bu çalışmada, hibrit elektrikli taşıtlardaki batarya sistemleri ADVISOR tarafından modellenmiş ve bu modeller karşılaştırmalar yapılarak analiz edilmiştir. Enerji depolama sistemleri hibrit elektrikli taşıtların vazgeçilmez unsurlarındandır. Bu nedenle önceden sistemin taşıtla uyumunu analiz etmek maliyet ve güvenlik açısından önemlidir. Bu yazıda ADVISOR programının kullanımı ayrı ayrı seri ve paralel hibrit bir taşıtta ve batarya tipleri karşılaştırılarak belirtilmiş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.



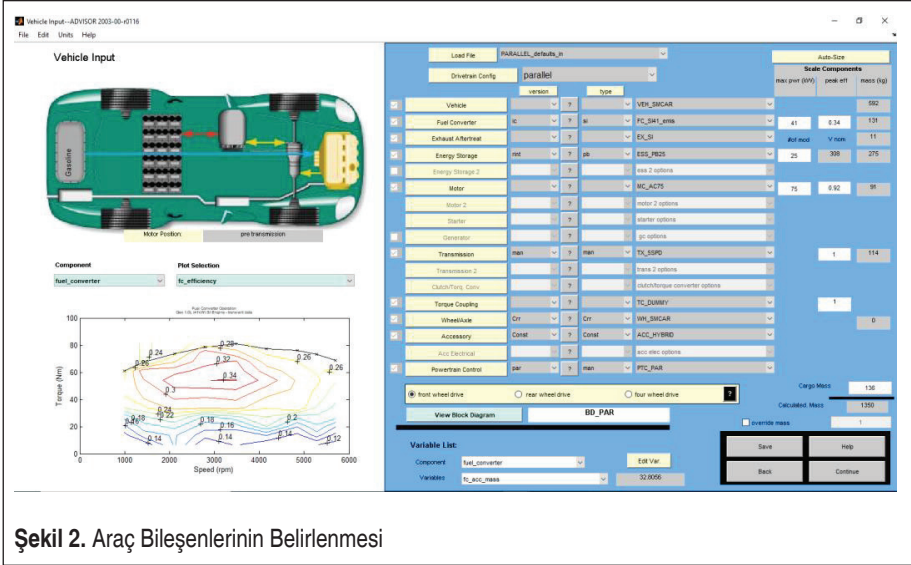
2. ADVISOR İLE TAŞIT ANALİZİ

ADVISOR, kullanıcılar için simülasyonda farklı taşıtları tanımlamak için uygun bir programdır. Yazılımın net oluşu, kullanıcıların taşıt benzetim modellerini ve kontrol stratejilerini tasarlamalarına imkân verir [13]. Kullanıcılar, yeni modül geliştirmek ve taşıt modülünü simüle etmek için alt modülü kullanabilirler. Kullanıcı, ADVISOR'un Matlab çalışma alanında tanımladığı herhangi bir skaler parametreyi değişken listesi aracılığıyla değiştirebilir. Ya da ADVISOR veri tabanında yer alan taşıt tiplerinden seçerek karşılaştırmalı bir analiz yapabilir. Ayrıca yapılan simülasyonların kaydedilmesi ve sonrasında bir başka çalışmayla kıyaslanabilme imkânı büyük bir rahatlık sağlar. Program Matlab tabanlı olup, açılış penceresi Şekil 1'de verilmiştir.

ADVISOR, kullanımı kolay GUI aracılığıyla birçok güçlü analiz işlevine doğrudan erişim sağlamaktadır. GUI sayfaları, bir aracı yapılandırmak, bir simülasyonu yürütmek ve sonuçları analiz etmek için kullanılabilen çeşitli özellikleri açıklamaktadır. GUI sayfalarından ilki araç giriş ekranıdır. Bu ekran kullanıcının taşıt bileşenlerini seçtiği yerdir. Ekranın düzeninde, pencerenin sol tarafı araç bilgilerinin grafiksel temsildir; sağ tarafı ise kullanıcının harekete geçtiği yerdir. Ekranın sağ tarafında, kullanıcı araca, ne görmek ve ne yapmak istediğini belirtir ve ADVISOR'un yapacağı bir sonraki eylemi kontrol eder. Örneğin, araç giriş ekranında Şekil 2'de gösterildiği gibi, sol üstteki resim, hangi taşıt yapılandırmalarının seçildiğini (geleneksel, seri,



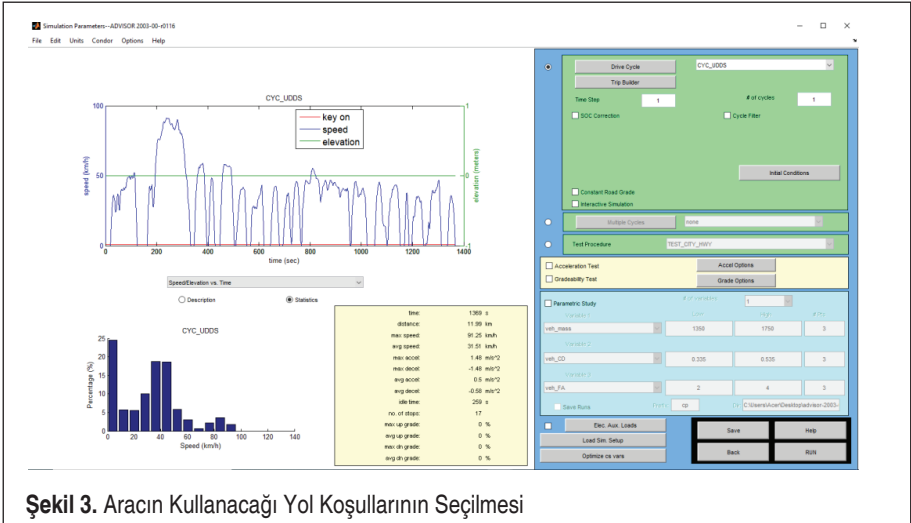
Şekil 1. Matlab Altında ADVISOR Açılış Penceresi



Şekil 2. Araç Bileşenlerinin Belirlenmesi

paralel, yakıt hücresi veya elektrikli araç) grafik olarak gösterir. Sol alttaki kullanıcı tarafından seçilebilir grafikler, kullanıcının motor ve motor için verimlilik haritaları, emisyon sınırları ve bataryalar için performans grafikleri gibi seçilen bileşenlere ilişkin performans bilgilerini anında görüntülenmesine olanak sağlar [14].

İkinci GUI ekranı Şekil 3'te gösterildiği gibi simülasyon kurulum sayfasıdır. Bu ekrandaki kullanıcının temel amacı, taşıtın kullanacağı yol koşullarını tanımlamaktır. Simüle edilebilecek olaylardan bazıları tek bir sürüş döngüsü, çoklu döngü ve özel

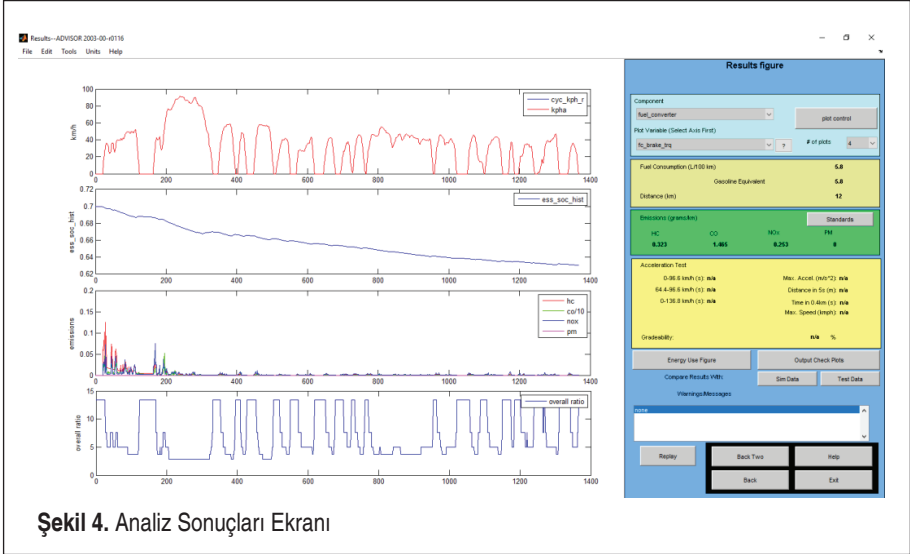


Şekil 3. Aracın Kullanacağı Yol Koşullarının Seçilmesi



test sürüşlerini içerir. Yine, pencerenin sağ kısmında, kullanıcı döngüleri seçer. Sol kısımdayken de simülasyon parametrelerini tanımlar; seçimler hakkında bilgi verilir. Yapılandırılan simülasyon parametreleri ile “çalıştır” butonuna tıklamak simülasyonu yürütecektir ve tamamlandığında bir ADVISOR sonuç ekranı gelecektir. Ayrıca kullanıcı “units” sekmesinden tercih ettiği birimi (metric, us) seçebilir [15].

Sonuçlar ekranı Şekil 4’te gösterildiği gibidir. Bu ekran, üç ana ADVISOR ekranının sonucusudur. Bu sayfa, kullanıcının sağ tarafta yakıt ekonomisi, emisyonlar, hızlanma ve tırmanma kabiliyetinin özet sonuçlarını ve simülasyonun sol taraftaki çalışma alanına koyduğu zamana bağlı değişkenlerin grafiklerini görmesini sağlar [16].

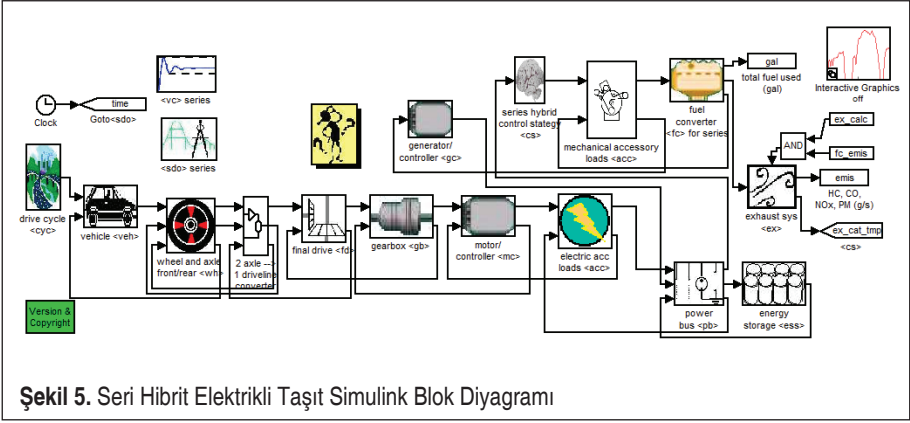


Şekil 4. Analiz Sonuçları Ekranı

Örnek bir sonuçlar ekranını gösteren Şekil 4’te, temsili grafikler olarak seçilen dört grafik ortaya çıkmaktadır; araç hızı, batarya şarj durumu (State of Charge-SoC), düzenlenmiş emisyonlar ve egzoz sistemi içindeki çeşitli yerlerdeki sıcaklıklar. Bu çalışmadaki yapılan analizde; seçilen seri ve paralel hibrit elektrikli taşıtlarda kullanılan beş farklı bataryanın taşıt üzerindeki şarj durum grafikleri, yakıt sarfiyatları ve benzin eşdeğerleri, en yüksek ivmelenme ve hız testleri ve emisyon değerleri tablolar şeklinde karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Uygulamanın amacı kullanılan batarya tiplerinin hibrit taşıtlar üzerindeki performanslarını farklı parametreler üzerinden inceleyip sonuçları kıyaslamaktır [17].

3. UYGULAMA VE SİMÜLASYON SONUÇLARI

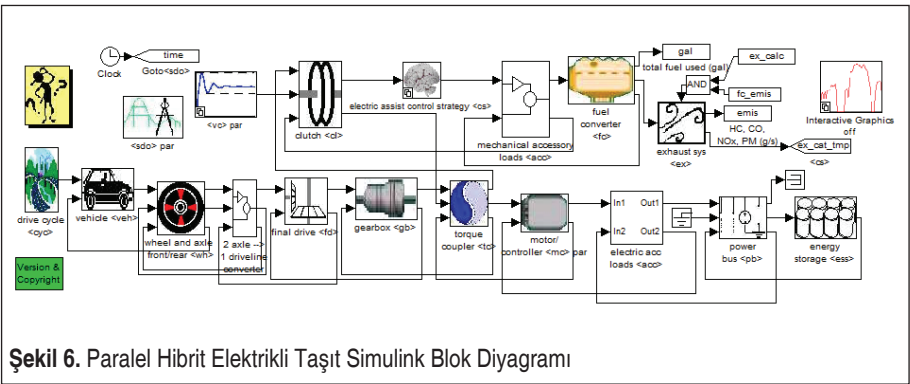
Bu çalışmada seri ve paralel hibrit elektrikli örnek taşıtlarda program üzerinden fark-



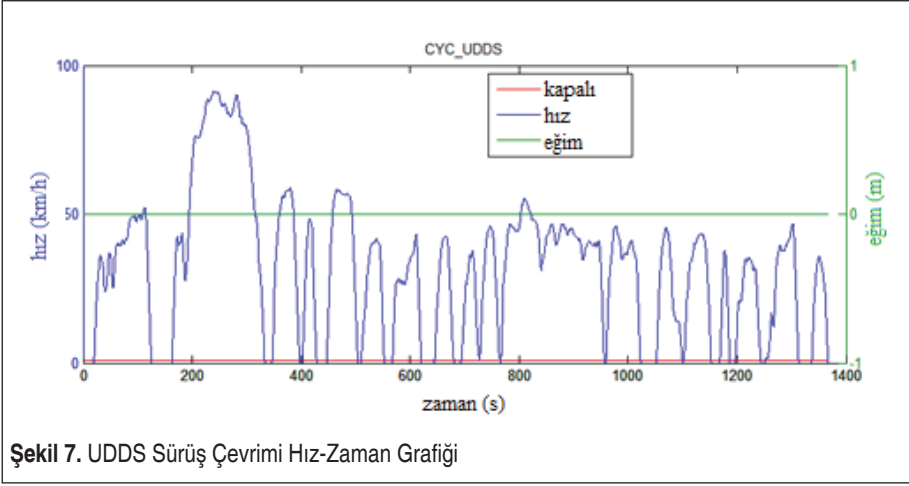
Şekil 5. Seri Hibrit Elektrikli Taşıt Simulink Blok Diyagramı

lı bataryalar seçilerek analizler yapılmış, sonuç grafikleri tartışılmıştır. Bu bölümde, günümüzde ticari hayatta başarıyla yer edinen, konvansiyonel taşıtlara göre farklı sürüş sistemleri içeren hibrit taşıtların, enerji tüketimlerinin ve performans kıstaslarının karşılaştırılması yapılacaktır. Burada karşılaştırılması yapılacak taşıt çeşidi, ortak bir binek tip sedan taşıt olup tahrik sistemleri seri ve paralel hibrit olarak iki tip seçilmiştir. Seçilen taşıtlara ait blok diyagramlar Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmiştir.

Seçilen seri ve paralel hibrit elektrikli taşıtlarda yol koşulları seçimi ADVISOR veri tabanında bulunan sürüş çevrimi (drive cycle) temel alınarak test simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu sürüş çevrimi; şehir içi sürüş çevrimi olarak adlandırabileceğimiz Urban Dynamometer Driving Syhedule (UDDS) sürüşüdür. Taşıt test simülasyonlarının gerçekleştirildiği UDDS sürüş çevrimine ait hız-zaman grafiği ve özellikleri sırasıyla Şekil 7 ve Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 6. Paralel Hibrit Elektrikli Taşıt Simulink Blok Diyagramı



Şekil 7. UDDS Sürüş Çevrimi Hız-Zaman Grafiği

Tablo 2. Sürüş Çevriminin Özellikleri

Veriler	Değerler	Birimler
Süre	1369	s
Mesafe	11,99	km
Maksimum hız	91,25	km/h
Ortalama hız	31,51	km/h
Maksimum ivme	1,48	
Maksimum yavaşlama ivmesi	-1,48	
Rölanti süresi	259	s
Duraklama sayısı	17	-

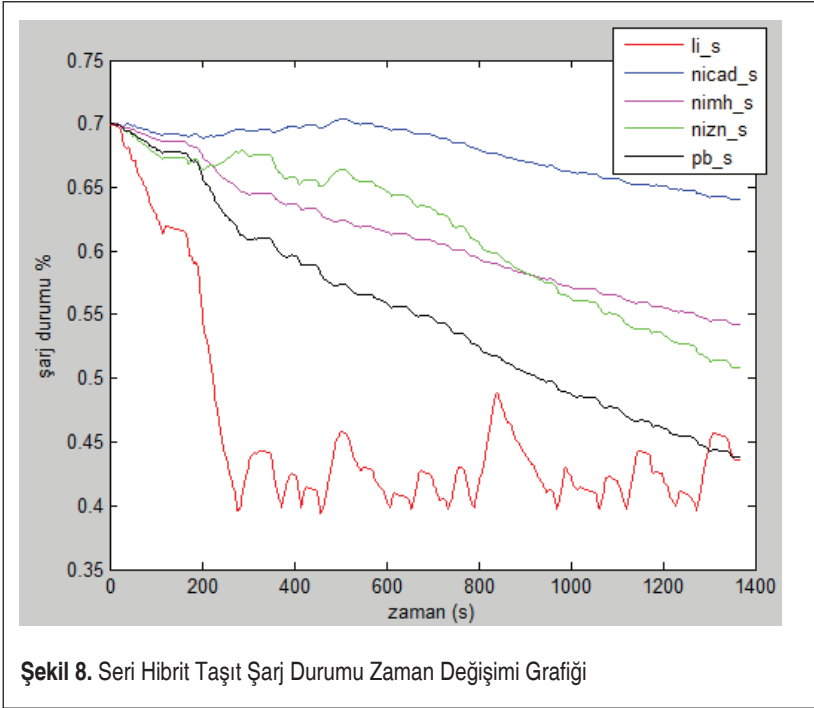
Bu çalışma seçilen her iki tür için de “VEH_SMCAR” parametreleri kullanılarak, 1400 saniyelik bu güzergâhta elde edilmiştir. Batarya analizi yapılacağından diğer tüm veriler sabit tutulmuştur. Kullanılan batarya türleri hibrit elektrikli taşıtlarda kullanılan kurşun asit (Pb), lityum iyon (Li-ion), nikel kadmiyum (NiCad), nikel metal hidrür (NiMH) ve nikel çinko (NiZn) bataryadır. Seri ve paralel hibrit taşıtlar için seçilen farklı batarya modellerine ait veriler Tablo 3’te belirtilmiştir.

3.1 Şarj Durumu (SoC)

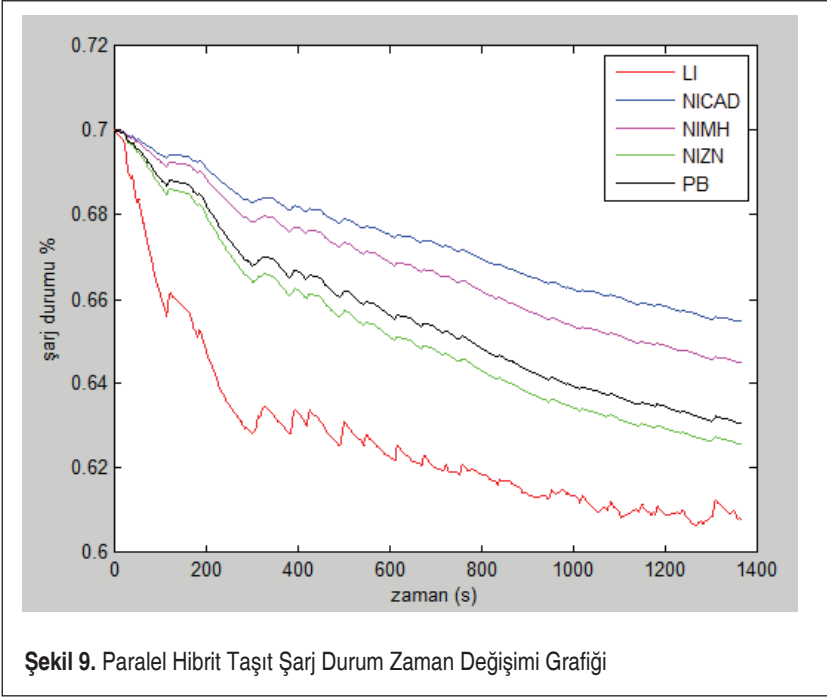
ADVISOR analiz sonuçlarını grafiklerle ortaya koymaktadır. Yapılan analizler sonucunda batarya sistemlerinin taşıt üzerindeki zamana bağlı şarj durum grafikleri bu çalışma için tatmin edicidir. Seri ve paralel hibrit elektrikli taşıtların seçilen bataryalarda şarj durum zaman grafikleri Şekil 8 ve Şekil 9’da gösterildiği gibidir.

Tablo 3. Batarya Modelleri

	Pb	Li-ion	NiCad	NiMH	NiZn
Nominal gerilim (V)	12	9	6	6,2	10,6
Düşük / yüksek limit gerilimi (V)	9,5 / 16,5	6 / 11,7	5,9 / 6,9	4,56 / 7,83	6,65 / 14,7
Enerji kapasitesi (Ah)	26	6	110	28	22
Ağırlık (kg)	11	1,13	14	3,6	6,34



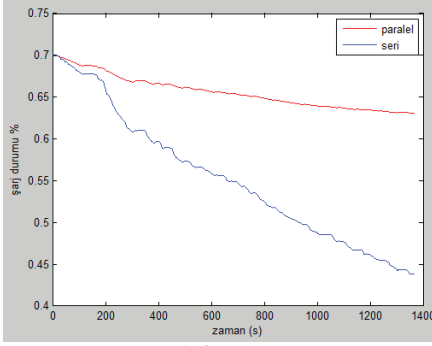
Taşıtın şarj durumunun (SoC) belirli aralıkta korunabilmesi, bataryanın taşıt hareketine katkısının olması ve rejeneratif frenlemede açığa çıkan enerjinin şarj olarak saklanabilmesi için oldukça önemlidir. Seri hibrit elektrikli taşıtta seçilen batarya tipleri için şarj aralığı %70-%44 aralığında korunmaktadır. Şekil 8'deki grafikten anlaşılacağı gibi taşıtın ivmelenebilmesi için Li-ion bataryanın diğer bataryalara oranla daha yüksek güç kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca taşıtın dur kalk yapmasıyla rejeneratif frenleme ile ortaya çıkabilecek enerjiyi depolama kabiliyeti Li-ion bataryada daha yüksektir. Şarj durumunu en iyi koruyan batarya grafiğe göre NiCad bataryadır. NiMH ve NiZn bataryalar ise benzer özellik göstermektedir.



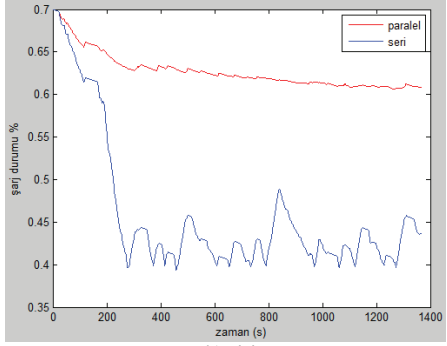
Şekil 9. Paralel Hibrit Taşıt Şarj Durum Zaman Değişimi Grafiği

Şekil 9’da ise paralel hibrit taşıta seçilen beş farklı batarya tipinin başlangıçtan itibaren olan şarj durumlarının seyri görülmektedir. Şarj aralığı bataryalarda %70-%61 aralığında değişmektedir. Li-ion batarya seri tipte olduğu gibi paralel taşıtta da rejeneratif frenleme ile ortaya çıkabilecek enerjiyi depolama kabiliyeti en yüksek olan bataryadır. NiCad batarya ise yine şarj durumunu koruyan en iyi batarya türüdür.

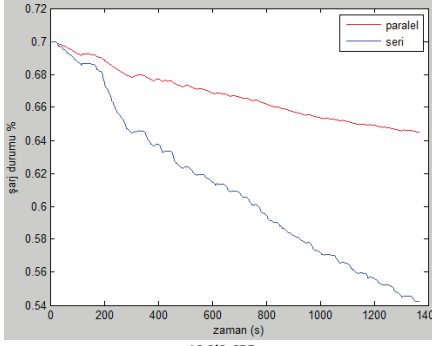
Şekil 10’da gösterilen sonuç grafikleri, batarya çeşitlerinin seri ve hibrit elektrikli taşıtlar arasındaki kıyaslamasını vermektedir. Seri tip taşıtlarda taşıt tahriki sadece elektrik motoru tarafından sağlanmaktadır. Bu durum da yüksek güç gerektiren durumlarda bataryadan daha fazla enerji çekilmesine sebep olur. Paralel taşıtlarda ise hem elektrik motoru hem de İYM birlikte tahriklenir ve yüksek güç durumlarında genelde İYM devreye girer. Böylece elektrik motorunun güç gereksinimi serilere göre daha az olur. Şekil 10’daki grafiklere bakıldığında da bütün batarya çeşitlerinin seri tip taşıtlarda daha fazla enerji harcadığı, şarj seviyelerinin daha düşük seviyelere düştüğü görülmektedir. Şarj durumunun seri hibritlerde daha düşük olmasına rağmen rejeneratif frenleme ile enerji depolama kabiliyetleri paralel hibritlere göre daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Bu da şehir içi sürüşlerde seri hibritlerin daha avantajlı olduğunu açıklar.



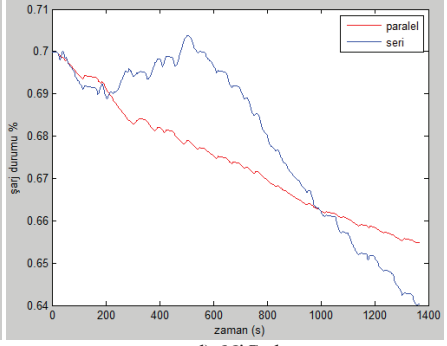
a)Pb



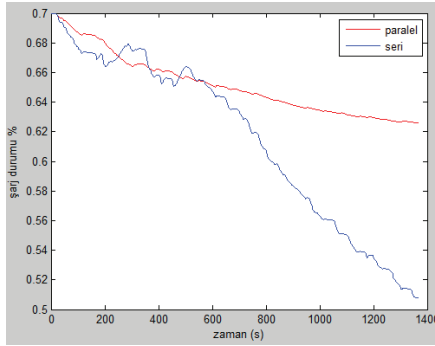
b)Li-ion



c)NiMH



d) NiCad



Şekil 10. Batarya Türlerine Ait Şarj Durumu-Zaman Değişimi



3.2 Yakıt Sarfiyatı

Bu çalışmada örnek olarak seri ve paralel hibrit taşıtlar karşılaştırılmıştır. Programın örnek veri dosyalarından seçilen taşıtların analizi sürüş çevrimi olarak şehir içi güzergâhında tamamlanmıştır. Simülasyon, bu güzergâh tamamlanana kadar devam ettirilmiştir. Bu karşılaştırma için simülasyondan elde edilen yakıt sarfiyatı sonuçları Tablo 4'te özetlenmiştir.

Tablo 4'ten anlaşıldığı üzere aynı güzergâhta seri hibrit elektrikli taşıtta seçilen bazı bataryaların (Pb ve NiMH) yakıt sarfiyatı olmadığı gözlenmiştir. Bunun sebebi Pb ve NiMH batarya türlerinin seçilen bu güzergâhta elektrikli taşıttaki gibi davranmasıdır. Doğal olarak sadece elektrik motoru çalıştığı için yakıt tüketimi olmamıştır.

Tablo 4. Yakıt Sarfiyatı Karşılaştırılması

	Seri Hibrit Elektrikli Taşıt					Paralel Hibrit Elektrikli Taşıt				
	Pb	Li-ion	NiCad	NiMH	NiZn	Pb	Li-ion	NiCad	NiMH	NiZn
Yakıt Sarfiyatı (l/km)	0	4,5	3,4	0	2,8	5,8	6,4	5,4	5,4	5,7
5 saniyede alınan yol (m)	52,4	52,5	40	60,3	42,6	55,1	55,2	46,3	59	49

Tablo 4'teki sonuçlara bakıldığında seri hibrit elektrikli taşıtta NiCad batarya için yakıt tüketimi 3,4 l/km olmasına rağmen bu değer Li-ion bataryada %32 artmış, NiZn bataryada ise %17 azalmıştır. 5 saniyede alınan yol miktarı ise Li-ion bataryada NiCad bataryaya göre %31,25 artarken NiMH bataryaya göre ise %14,85 daha azalmıştır. Yakıt sarfiyatı olmamasına rağmen 5 saniyede en fazla yolu NiMH batarya almıştır.

Paralel hibrit elektrikli taşıta baktığımızda ise yakıt sarfiyatı değerinin NiCad ve NiMH bataryalarda 5,4 l/km olurken bu değer NiZn'da %5,55, Pb bataryada %7,4, Li-ion bataryada ise %18,5 artışı gözlemlenmiştir. 5 saniyede alınan yol miktarlarında ise Li-ion bataryada NiCad'a göre %19,22 artarken NiMH bataryaya göre %6,44 azalmıştır.

3.3 İvme ve hız

Kullanılan şehir içi sürüşte taşıttın elde ettiği maksimum hız bütün batarya tiplerinde aynıdır ve 25,34 km/h olarak ölçülmüştür. Ayrıca seçilen taşıt tipinin kullanılan farklı batarya tiplerine göre program verilerindeki diğer sürüşlerde ulaşabileceği en yüksek hız değerleri Tablo 5'te verilmiştir. Seri ve paralel hibrit elektrikli taşıtta bütün batarya tiplerinde en yüksek ivmelenme değeri aynı ve 5 m/s²'dir. Tablo 5'e göre seri hibrit elektrikli taşıtta NiMH bataryada en yüksek hız NiCad bataryaya göre %15,94 artar-

Tablo 5. En yüksek İvmelenme ve Hız Karşılaştırılması

	Seri Hibrit Elektrikli Taşıt					Paralel Hibrit Elektrikli Taşıt				
	Pb	Li-ion	NiCad	NiMH	NiZn	Pb	Li-ion	NiCad	NiMH	NiZn
En yüksek hız (km/h)	158	156,5	134,8	156,3	137,5	191,4	190,1	166,9	209,6	169,2

ken Li-ion bataryaya göre ise %0,12 azalmıştır. Pb bataryada en yüksek hız lityum iyon bataryaya göre %17,21 artış göstermiştir. En yüksek hızlanma ise seri hibrit elektrikli taşıtta 158 km/h ile Pb bataryada meydana gelmiştir.

Paralel hibrit elektrikli taşıtta Tablo 5'e göre Li-ion bataryanın en yüksek hızı NiCad bataryaya göre %13,9, NiZn bataryaya göre %12,35 artarken, NiMH bataryaya göre ise %10,25 azalmıştır. En yüksek hız değeri paralel hibrit elektrikli taşıtta NiMH bataryası tarafından sağlanmıştır.

Seri ve paralel hibrit taşıtlardaki ivmelenme süreleri Tablo 6'da verilmiştir. Verilen hız aralıklarında seri hibrit elektrikli taşıtta en kısa sürede performans sergileyen NiMH bataryadır. 0-96,6 km/h hız aralığında ivmelenme süresi Pb bataryada 11,3 saniye olurken bu değer Li-ion bataryada %5,30 ve NiMH bataryada ise %38,93 artarken, NiZn bataryada %80,53 ve NiCad bataryada ise %109,73 azalmıştır.

Tablo 6. İvme Testi

İvme testi (s)	Seri Hibrit Elektrikli Taşıt					Paralel Hibrit Elektrikli Taşıt				
	Pb	Li-ion	NiCad	NiMH	NiZn	Pb	Li-ion	NiCad	NiMH	NiZn
0-96,6 (km/h)	11,3	10,7	23,7	6,9	20,4	9	8,7	14,5	6,7	12,7
64,4-96,6 (km/h)	6,2	5,7	14,3	3	12,2	4,5	4,2	7,8	2,8	6,8
0-137(km/h)	28,1	30,6	-	13,3	91,6	18,4	17,9	32,9	11,9	28,5

3.4 Emisyon Değerleri

Hibrit elektrikli taşıtlar için en önemli parametrelerden bir tanesi de egzoz emisyon değerleridir. Simülasyon sonuçlarında seri ve paralel hibrit elektrikli taşıtların sürüş sonucunda ortaya çıkan hidrokarbon (HC), karbonmonoksit (CO), azotoksit (NOx) gazları ve partikül madde (PM) değerleri Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7'deki sonuçlardan da görülebileceği gibi emisyon değerleri iki taşıtta da se-



Tablo 7. Emisyon Değerleri

Emisyon değerleri (g/km)	Seri Hibrit Elektrikli Taşıt					Paralel Hibrit Elektrikli Taşıt				
	Pb	Li-ion	NiCad	NiMH	NiZn	Pb	Li-ion	NiCad	NiMH	NiZn
HC	0	0,419	0,375	0	0,373	0,323	0,335	0,319	0,317	0,321
CO	0	2,7	2,683	0	2,34	1,465	1,512	1,426	1,406	1,435
NOx	0	0,521	0,459	0	0,442	0,253	0,266	0,243	0,233	0,241
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

çilen batarya tiplerinde birbirine yakın değerlerde seyretmiştir. Seri hibrit elektrikli taşıtta Pb ve NiMH bataryaların emisyon değerinin olmaması tam elektrikli taşıt gibi davranmasına sebep olmuştur. Bu da içten yanmalı motorun devreye girmemesinden kaynaklanır. İçten yanmalı motor, batarya şarj seviyesinin belli bir değerin altına inmesiyle devreye girmektedir.

Seri hibrit taşıtta HC miktarı NiCad bataryada 0,375 g/km olurken bu değer NiZn'da %0,53 azalmış, Li-ion bataryada ise %11,73 artış göstermiştir. NiCad'a göre Li-ion bataryadaki CO miktarı %0,63 artmış, NiZn bataryada ise %12,78 azalmıştır. NOx gaz değerlerine bakıldığında ise NiZn batarya NiCad'a göre %3,70 daha az salınım yaparken, Li-ion bataryada bu değer %13,50 yükselmiştir.

Paralel hibrit taşıta bakıldığında ise en düşük emisyon değerleri NiMH bataryada görülmektedir. Örneğin HC miktarlarında NiMH bataryaya göre NiCad %0,63, NiZn %1,26, Pb %1,89 ve Li-ion bataryada ise %5,67'lik artış göstermiştir. CO ve NOx miktarlarında da aynı şekilde benzer artışlar olmuştur. Her iki taşıt tipinde bütün batarya tiplerinde partikül maddeye rastlanmamıştır.

4. SONUÇ

Bu çalışmada hibrit elektrikli taşıtların ana unsurlarından biri olan batarya sistemleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Taşıt performanslarının analizini yapabilen gelişmiş bir araç simülatörü olan ADVISOR yazılımı tanıtıldı. Seçilen beş farklı batarya çeşidinin örnek seri ve paralel hibrit elektrikli taşıtlardaki performansı ADVISOR programı kullanılarak analiz edildi. Böylece tasarlanan taşıtların önceden bilgisayar ortamında simüle edilebilme imkânı doğmuştur. ADVISOR, seçilen parametre sonuçlarını grafik biçiminde göstermiştir. Grafikler yorumlandı ve bataryaların performansına etkisi olan veriler çizelgelerde sunuldu. Analiz sonuçlarına göre şehir içi sürüş çevriminde bataryaların şarj durumu sonuçlarına bakıldığı zaman bütün batarya

tiplerinin seri hibrit elektrikli taşıtlarda sürüşü daha düşük şarj seviyelerde bitirdikleri gözlemlendi. Bu durum seri hibritlerin paralel hibritlerden farklı olarak sadece elektrik motoruyla tahriklendiğini, böylece daha fazla enerji harcadıklarını açıklar. Ayrıca seri hibritlerde rejeneratif frenleme ile ortaya çıkan enerji miktarı paralel hibritlerden daha yüksektir. Böylece seri hibritlerde batarya performanslarının enerji depolama konusunda daha başarılı olduğu görülmüştür. Yapılan bu çalışmada batarya tipinin taşıt performansını önemli ölçüde etkilediği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKÇA

1. **Xue Q., Zhang X., Teng T., Zhang J.,Feng Z., Lv Q.** 2020. “A Comprehensive Review on Classification Energy Management Strategy, and Control Algorithm for Hybrid Electric Vehicles”, *Energies*, 13(5355), 1-30.
2. **Chowdhury M. S. A., Rahman A. M., Mamun K. A. A.** 2016. “Modelling and simulation of power system of battery, solar and fuel cell powered Hybrid Electric Vehicle”, *International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (ICEEICT)*, 22-24 September 2016, Dhaka, Bangladesh.
3. **Rezazade S., Changizian M., Saleki A., Moghbeli H.** 2018. “Investigation and Comparison between PHEV and SHEV for Sedan Vehicle Based on ADVISOR”, 2018 9th Annual Power Electronics, Drives Systems and Technologies Conference (PEDSTC), 13-15 February 2018, Tehran, Iran.
4. **Balali Y., Stegen S.** 2021. “Review of energy storage systems for vehicles based on technology, environmental impacts, and costs”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 1-15.
5. **Bhurse S. S., Bhole A. A.** 2018. “A Review of Regenerative Braking in Electric Vehicles”, *International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC)*, 28-29 March 2018, India.
6. **Ma S., Lin M., Lin T.E., Lan T., Liao X., Marechal F., Herle J.V., Yang Y., Dong C., Wang L.** 2021. “Fuel cell-battery hybrid systems for mobility and off-grid applications: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 1-20.
7. **Büyükkaracı B.** 2017. “Türkiye’nin İlk Motorlu Aracı Jeep Willys’in Tarihçesi ve Hibrid Versiyonunun Dizaynı ve Hesaplarının Yapılması”, Yüksek Lisans Tezi, Beykent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
8. **Wipke K., Cuddy M., Bharathan D., Burch S., Johnson V., Markel A., Sprik S.** 1999. *Advisor 2.0: A Second-Generation Advanced Vehicle Simulator for Systems Analysis*, Technical Report, NREL/TP-540-25928, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO.
9. **Markel T., Brooker A., Hendricks T., Johnson V., Kelly K., Kramer B., O’Keefe M., Sprik S., Wipke K.** 2002. “ADVISOR: a systems analysis tool for advanced vehicle modeling”, *Journal of Power Sources*, 110 (2002), 255–266.



10. **Ağyel S.** 2011. "Computer Simulation For Series Hybrid Electrical Vehicle", Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
11. **Turkmen A. C., Solmaz S., Celik C.** 2017. "Analysis of fuel cell vehicles with advisor software", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 70(2017), 1066-1071.
12. **Bin Z., Pin F., Guoqing X.** 2007. "Simulation of Hybrid Electric Truck and Plug-in Hybrid Electric Truck Based on ADVISOR", International Conference on Integration Technology, March 20 - 24, 2007, Shenzhen, China.
13. **Xu J.W., Zheng L.** 2010. "Simulation and Analysis of Series Hybrid Electric Vehicle (SHEV) based on ADVISOR", International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. DOI:10.1109/ICMTMA.2010.678
14. **Kunt M.A.** 2019. "Advisor Based Modelling of the Effect of Rolling Resistance on Regenerative Braking in All-Electric Passenger Cars", El-Cezerî Journal of Science and Engineering, 6(3), 847-855.
15. **Niknamian S.** 2019. "Fuzzy Logic Controller for Parallel Plug-in Hybrid Vehicle", Scholar Journal of Applied Sciences and Research, 2(9), 19-26.
16. **Rashid M. I. M., Danial H.** 2017. "ADVISOR Simulation and Performance Test of Split Plug-in Hybrid Electric Vehicle Conversion", Energy Procedia, 105(2017), 1408-1413.
17. **Saleki A., Rezazade S., Changizian M.** 2017. "Analysis and Simulation of Hybrid Electric Vehicles for Sedan Vehicle", 25th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE2017), 2-4 May 2017, Tehran, Iran.

Santrifüj Pompa Tasarımında Sayısal Yöntemlerin (HAD/CFD) Kullanımı

İsmail Ovalı¹, Öner Atalay^{2*}, Ege Yılmaz³

ÖZ

Santrifüj pompalar mühendislik alanında yaygın olarak kullanılan ürünlerdir. Kullanım alanlarına göre çok farklı parametre içermektedir. Tasarım aşamasında ise farklı debiler, basma yükseklikleri için bir çok dizayn parametresi oluşturulması gerekmektedir. Teknolojinin gelişmesi ile birlikte bilgisayar destekli programların tasarım sürecinde kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu sayede hem zamandan tasarruf sağlanmakta hem de maliyet azaltılmaktadır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) veya yabancı dilden alıştığımız şekliyle CFD analizleri pompa tasarımında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Ürün tasarımı yapıldıktan ve katı model oluşturulduktan sonra analiz programları kullanılarak pompa içindeki sayısal analizler yapılabilir. Burada deneysel metotlara göre en önemli olan avantaj ise parametrelerin sınırsız sayıda değiştirilebilir olmasıdır. İstenilen değerler elde edilinceye kadar süreç devam ettirilebilir. Bilgisayar yardımıyla elde edilen bilgiler ışığında üretim ve kullanım süreçlerine geçilebilir. Bu çalışmada örnek bir santrifüj pompa ele alınarak sayısal analiz adımları sırasıyla açıklanmıştır. Program içinde kullanılan yöntem ve kabuller genel literatür bilgisine göre ele alınmıştır. Uygulanacak yöntemler sınırsız olup istenildiği takdirde farklı yollar ile çözüm ağları genişletilebilir.

Anahtar Kelimeler: Santrifüj Pompa, Tasarım, HAD/CFD

The Usage of Numerical Methods (HAD/CFD) in The Design of Centrifugal Pumps

ABSTRACT

Centrifugal pumps are widely used products in engineering field. It contains many different parameters according to the usage areas. At the design stage, many design parameters must be created for different flow rates and pump heads. According to the development of technology, the use of computer aided programs in the design process has become widespread. In this way, time is saved and cost is reduced. Computational Fluid Dynamics (HAD) or CFD analysis, as we are used to in a foreign language, is quite widely used in pump design. After product design and solid model generation, numerical analysis in the pump can be performed using analysis programs. The most important advantage over experimental methods is that the parameters can be changed in an unlimited number. The process can be continued until the desired values are obtained. In the light of the information obtained with the help of a computer, production and use processes can be switched. In this study, a sample centrifugal pump is considered and the numerical analysis steps are explained respectively. The methods and admissions used in the program are considered according to general literature knowledge. The methods to be applied are unlimited and solution networks can be expanded by different ways if wanted.

Keywords: Centrifugal pump, Design, HAD/CFD

* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 22.04.2021

Kabul/Accepted : 29.05.2021

¹ Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Denizli, iovali@pau.edu.tr
ORCID: 0000-0002-8193-0060

² Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Denizli, oatalay@pau.edu.tr
ORCID: 0000-0001-6142-1288

³ Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Denizli, yilmazege97@gmail.com
ORCID: 0000-0001-5609-3566



EXTENDED ABSTRACT

Centrifugal pumps are widely used equipment in many fields. From the boiler in the house to the power generation plants, there is a wide range of uses. Although many varieties are available in the catalogues of manufacturers, they are also produced in the form of special production. At the beginning of the parameters affecting the design of the pump is the flow rate of the fluid and the pressure height. In addition, the characteristics of the place where it will be used affect the selection of the pump in properties such as the type of fluid. Pumps are designed according to long-life working conditions and occasionally perform high energy consumption at the rate of their capacity. As much as designers pay attention to the interior design, they also want the pump to be efficient. With the expansion of computer use in the manufacturing sector, analysis programs have been greatly facilitated in pump design. In addition to the programs used in terms of materials, geometry, strength, there are commercial programs that analyze flow aerodynamics.

In this study, some changes were made by creating a ready-made CAD file. Then MESH operations were performed on the part, input parameters were created. After determining the flow model and parameters, analysis and POST PROCESSING are discussed. The ANSYS Workbench program was used in the study.

Computational Fluid Dynamics (CFD) are methods that help flow analysis by solving continuity, momentum and energy equations without installing experimental mechanisms. At this point, the designer can have information before developing his design for different flow forms. All kinds of changes (geometry, pressure, flow rate, etc.) can be done and great savings can be achieved from both time and cost. The most important point here is that the designer must have a good knowledge and experience of fluid mechanics. A lot of information is needed in program editing. Another issue is the capacity of the computers used to perform analysis. Solution time can be long on low-performance computers. It should be well known that no program can obtain better results than experimental analysis conducted under real conditions. At this point, the designer must decide how precisely can accept this data. It is the most appropriate method to compare the prototype product with the information provided by the program before proceeding to final production.



1. GİRİŞ

Santrifüj pompalar birçok alanda yaygın olarak kullanılan ekipmanlardır. Evdeki kombiden tutun da elektrik üretim santrallerine kadar geniş bir kullanım alanı bulunmaktadır. Üretici firmaların kataloglarında birçok çeşit mevcut olmakla birlikte özel imalat şeklinde de üretilmektedirler. Pompanın dizaynını etkileyen parametrelerin başında akışkanın debisi ve basma yüksekliği gelmektedir. Bunların yanında kullanılacağı yerin özellikleri, akışkan tipi gibi özelliklerde pompa seçimini etkilemektedir. Pompalar uzun ömürlü çalışma şartlarına göre tasarımı gerçekleştirilmekte olup kapasiteleri oranında zaman zaman yüksek enerji tüketimi gerçekleştirmektedirler. Tasarımcılar iç tasarıma dikkat ettikleri kadar pompanın aynı zamanda verimli olmasını da istemektedirler. Bilgisayar kullanımının imalat sektöründe yaygınlaşması ile birlikte analiz programları pompa tasarımında da büyük oranda kolaylık sağlamıştır. Piyasada malzeme, geometri, mukavemet yönünden kullanılan programları yanı sıra akış aerodinamiği yönünden de analiz yapan ticari programlar mevcuttur.

Pompaların akış analizleri ile literatürde birçok yayın mevcuttur. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) olarak bilinen bu metot aynı zamanda yabancı dilden kulağımıza yer etmiş olan CFD (Computational Fluid Dynamics) adıyla da kullanılmaktadır. Nataraj ve Singh (2013) yaptıkları çalışmada santrifüj pompanın çark performansındaki iyileştirmeleri analiz etmek için RSM(Response Surface Methodology) yöntemini kullanmışlardır. Bunun yanında CFD yöntemiyle de akış parametrelerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada pompanın basma yüksekliğinde iyileştirmeler olduğu ortaya çıkarken aynı zamanda tükettiği güç değerlerinde de azalma görmüşlerdir[1]. Parlak(2016) yaptığı çalışmada santrifüj tipi bir pompa çarkının belirlenen parametre ve bunların seviyeleri arasından, en iyi verim, basma yüksekliği ve debiyi sağlayacak olan değerleri Taguchi yöntemi kullanılarak deneysel olarak incelemiştir. Ayrıca yapılan varyans analizleri yardımıyla her bir parametrenin verim, basma yüksekliği ve debi üzerindeki etkileri de hesaplanmıştır[2]. Jin ve arkadaşları (2012) ultra düşük özgül hızlı santrifüj pompa tasarımında CFD yöntemini kullanmışlardır. Benzer ürünlere göre yaptıkları çalışmada basma yüksekliği ve enerji performansının daha iyi olduğunu görmüşlerdir [3]. Bacharoudis ve arkadaşları (2008) yaptıkları çalışmada CFD yöntemi ile kanat çıkış çapı, kanat açısı ve kanat sayısı ile ilgili parametreleri değiştirerek pompanın performansına olan etkilerini incelemişlerdir. Yapılan tasarımları deneysel olarak da karşılaştırmışlar ve sayısal analizlerin makul seviyede olduğunu ortaya koymuşlardır.

Pompa tasarımında en çok dikkat edilen konu tasarlanan pompadaki akışın formu ve akış ile ilgili veri (debi, basınç, tork, verim) değerleridir. HAD yöntemi ile yapılan çalışmalarda pompalardaki akış için geçerli olan süreklilik, momentum, türbülans denklemleri ve sınır koşulları ile ilgili bilgiler verilmekte, çözüm yöntemleri ve doğru çözümler elde edilebilmesi için dikkat edilmesi gereken hususlar üzerine durulmakta-



dır. Ayrıca yapılan çalışmalarda çözüm ağının oluşturulması, çözümün elde edilmesi safhasında karşılaşılan zorluklar ve edinilen tecrübeler aktarılmıştır[5]. Ülkemizde sanayide kullanılan elektriğin yaklaşık beşte biri pompalar tarafından tüketilmektedir. Pompaların çalıştığı sistemlerde sıklıkla yapılan hata, yanlış pompa seçimi ve yanlış pompaj sistemi tasarımıdır. Bu tür sistemlerde yapılacak iyileştirmeler ile yüksek miktarda enerji tasarrufu elde edilmesi mümkündür[6].

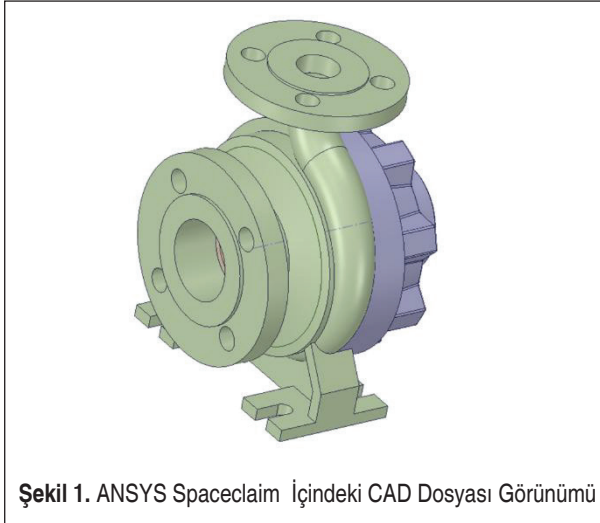
Yapılan bu çalışmada akış analizlerinin yapılacağı pompanın katı modeli elde edilerek MESH işlemleri parça üzerinde gerçekleştirilmiş, giriş parametreleri oluşturulmuştur. Akış modeli ve parametreleri belirlendikten sonra ANALİZ ve POST PROCESSING süreçleri ele alınmıştır. Çalışmada ANSYS Workbench programı kullanılmıştır[7].

2. MATERYAL VE METOD

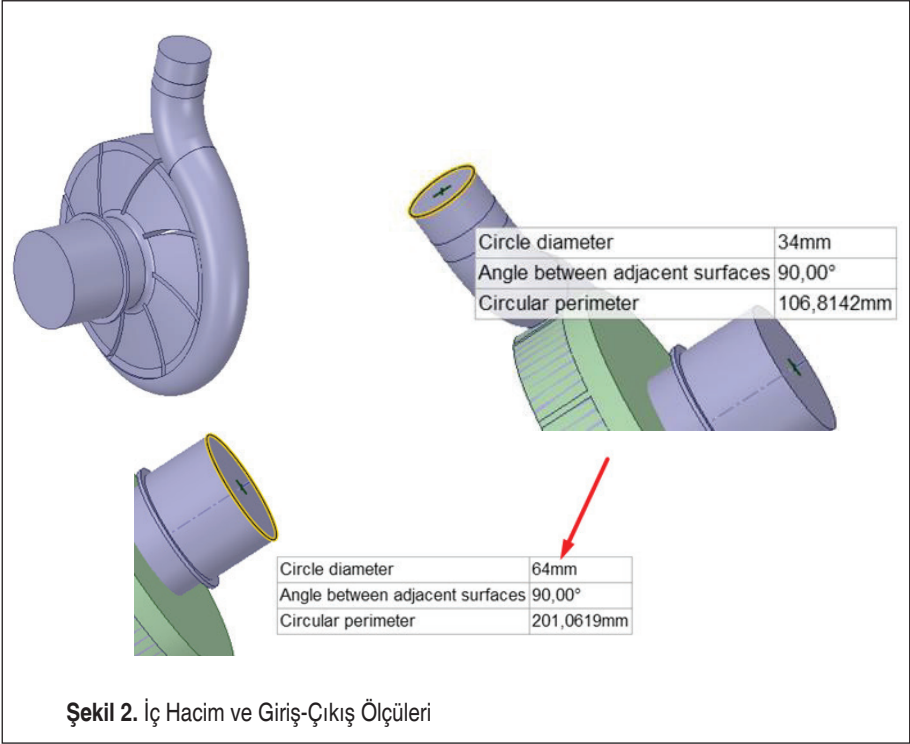
2.1 CAD Dosyasının Hazırlanması

İlk olarak pompanın CAD modelinin oluşturulması gerekmektedir. Hazır pompa modeli mevcut olduğu için için Grabcad sitesinden gerekli olan cad dosyası indirilmiştir. Bu siteden hazır indirilmiş olan pompa üzerinde ilk etapta bazı değişiklikler yapılmıştır. Örnek olarak rulmanlar o-ringler kapaklar gibi akış ile alakası olmayan elemanları analiz dışına çıkarılmıştır. Sonuç olarak Şekil 1 deki gibi bir tasarım elde edilmiştir.

Yukarıdaki pompadaki dış bilşenlerin wall(duvar) olarak ayarlanıp buradaki kısımların da analiz dışı edilmesi gerekmektedir. Burada yapılan işlem suyun hacmini çıkarmaktır. Su ile analiz yapılmış olup suyun bağımsız değerleri alınmıştır. Bunun için spaceclaimin içinde hazırlık modülünde giriş çıkışlar seçilmiş ve iç hacim çıkarıl-



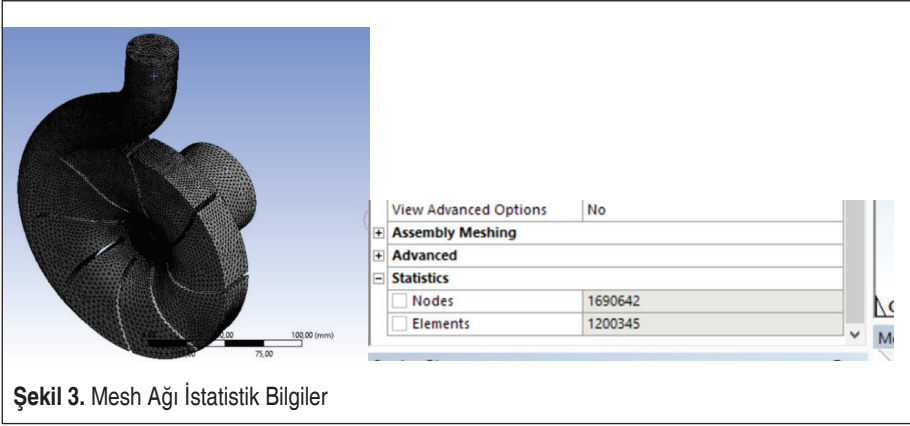
Şekil 1. ANSYS Spaceclaim içindeki CAD Dosyası Görünümü



mıştır. İç hacim oluşturulduktan sonra diğer makine elemanları(pompanın kabuğu ve vida açıkları) analizden atılır. Analizden atıldıktan sonra pompa içindeki akışın hacmi ortaya çıkmış olur ve Şekil 2’de görüldüğü gibi bu hacim üzerinde çalışma yapılır.

2.2 Meshleme

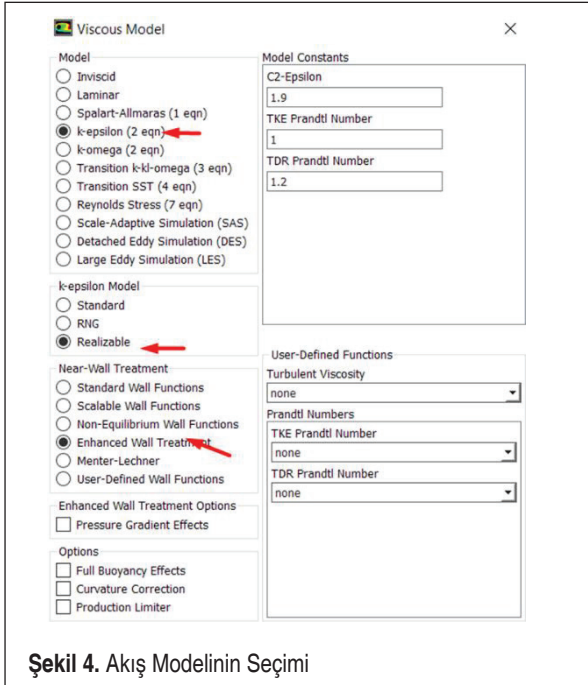
Meshleme(küçük parçalara ayırma) ekranı açılınca refresh(yenileme) yapılır ve gerekli olan katılamaların gelmesi sağlanır. Meshlemeden önce ilk olarak giriş ve çıkış olan bölgeleri seçip isimlendirme yapılır. Diğer kısımlara bir bilgilendirme yapılmasına gerek yoktur, program default olarak buraları wall olarak görecektir. İsimlendirmeden sonra bölgesel meshleme yapıları tanıtılır. Bunun için iki adet body(gövde) meshleme ve 1 adet face(yüzey) meshleme kullanılmıştır. Bu kısımlarda deneme yapılmaları ile istenilen mesh kriterine ulaşılabilir. Mesh kriterleri akış analizi için büyük önem taşımaktadır. Meshleme yapıldıktan sonra aşağıdaki gibi bir mesh ağı olacaktır(Şekil 3). Bunun ardından Reynolds sayısı hesaplanarak akışın tipinin belirlenmesi gerekmektedir. Türbülans veya laminar akış türüne bu aşamada karar verilir. Akış tipinin belirlenmesinde bazı özel programlar kullanılabilir[8]. Bu programlar sayesinde suya ait viskozite ve yoğunluk değerleri elde edilebilir.



Şekil 3. Mesh Ağı İstatistik Bilgiler

2.3 Analiz

Analiz ekranı açılınca ilk olarak çift değerlendirme için (double precision) sekmesi seçilir. Bu daha iyi sonuç verir ancak daha uzun bir analize sebep olur. Program açılınca genel ayarlar sekmesi karşınıza gelmektedir. Bu sekmeden yer çekimini açmak uygun olur, ancak bu ihmal edilebilir bir büyüklüktür. Sonrasında (check ve report quality) sekmelerine basılır. Program tarafından bir hata yakalandığı takdirde (şekilde



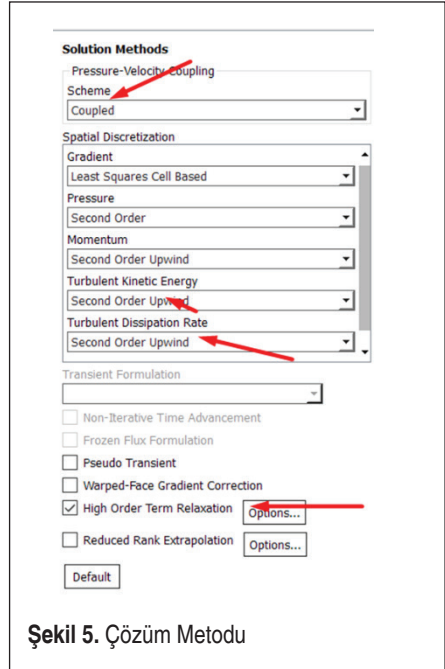
Şekil 4. Akış Modelinin Seçimi

veya meshte) program bunu bilgilendirecektir. Bundan sonraki adımda türbülans modeli seçmek gerekir. Bunun için model sekmesine girilir. Birçok model tanımlamaları mevcuttur fakat bu tip akış problemlerinde k-epsilon modeli sıklıkla kullanılmaktadır. Akış modelinin yanında sınır tabaka seçimi yapılır. Çalışmada Reynolds sayısına uygun olarak (enhanced wall treatment) seçim yapılmıştır(Şekil 4). İsteğe bağlı olarak bu analiz için k-w SST modeli de seçilebilir ancak bu işlem çözümü daha uzun sürede sonuç vermektedir.

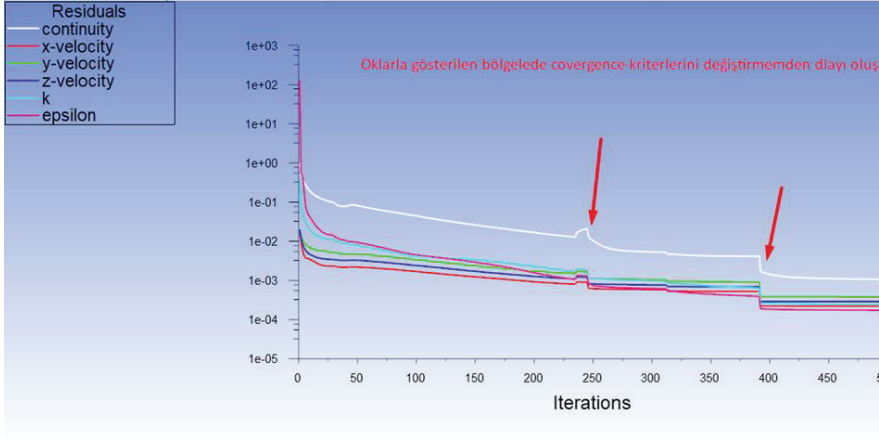
Bundan sonraki adımda akış bölgesi seçimi yapmak için (cell-zone conditions) sekmesine girilir. Daha önce oluşturulan dönme bölgesine çift tıklanır ve açılan menüden dönme hızı, dönme yönü bilgileri girilir. Sonraki adımda malzeme seçimleri yapılır. Su ile analiz yapılacağı için likit su seçilir ve devam edilir.

Sınır şartlarını ayarlamasını ilk olarak girişten başlıyoruz. Zorlama bir giriş olmayacağı için (pressure inlet) olarak seçilecektir. Sınır koşulları atmosferik havada gerçekleştiği varsayımı yapıyoruz. İnlet için türbülans değerlerinin girilmesi. Sınır koşullarında ikinci olarak çıkış şartları ve türbülans değerleri girdisi oluşturulur. Sonrasında referans değerlerinin ayarlamaları yapılır. Bu ayarlar sayesinde daha kolay sonuca ulaşma sağlanır. Daha sonra çözüm yaklaşımı seçilir. Türbülanslı akışlarda coupled methodu öne çıkmaktadır ve nümerik olarak ikinci dereceden çözümler kullanılmaktadır(Şekil 5). Sonrasında hücrelere ilk değerlerin verilmesi için başlatma (initialization) yapılır. Burada genellikle hibrid tip tercih edilmektedir. "Initialization" yakınsama için önem kazanmaktadır ancak doğru cevaba ulaşmada çok önemli bir faktör olarak karşımıza çıkmamaktadır. Analiz için yapılması gereklidir.

Raporlanması istenilen analizin doğruluğunu test etmek amaçlı hata-doğruluk (residuals) ve kütle korunumu ele alınmalıdır. İlk olarak (residual) sekmesine girilir. Burada kriterler belirlenir. Bunlara hata kriteri de denilmektedir. Sistem otomatik olarak 0,001 değerini önermektedir. Analiz doğruluğu için bu değerler düşürülebilmektedir. Ardından kütle korunumu gözlemlemeye geçilir. Kütle korunumu bu raporlama ile görülebilmektedir. Bu sayede Giriş (Inlet) ve Çıkış(Outlet) arasındaki bağıl fark görülebilmektedir. Sistem kütle girişi ve çıkışı eşit olmalıdır



Şekil 5. Çözüm Metodu



Şekil 6. Çözümün İterasyonlara Bağlı Olarak Yakınsaması

yani bu değerin sıfıra yakın çıkması beklenmektedir. Ayrıca çıkışta ne kadarlık bir debi oluştuğunu görmek için sadece (outlet) seçilerek ayrı bir raporlama da oluşturulabilir. Bu çalışmada ilk olarak 200 iterasyon tercih edilerek analize başlanmıştır. Daha sonra residual takibinde beyaz renk ile gösterilen süreklilik çizgisinin (continuity) kararlı hale gelmeyeceği görüldüğünden tekrar bir iterasyon değeri girilmiştir (Şekil 6). Bu çalışmada 498. iterasyonda süreklilik çizgisinin sabit olduğu görüldüğünde çözümün yakınsamış olduğu kabul edilmiştir. Burada ayrıca kütlelin korunumu da incelendiğinden, değişimin sıfır olduğu görüldüğü noktada çözümün yakınsamış olduğu kabul edilmiştir.

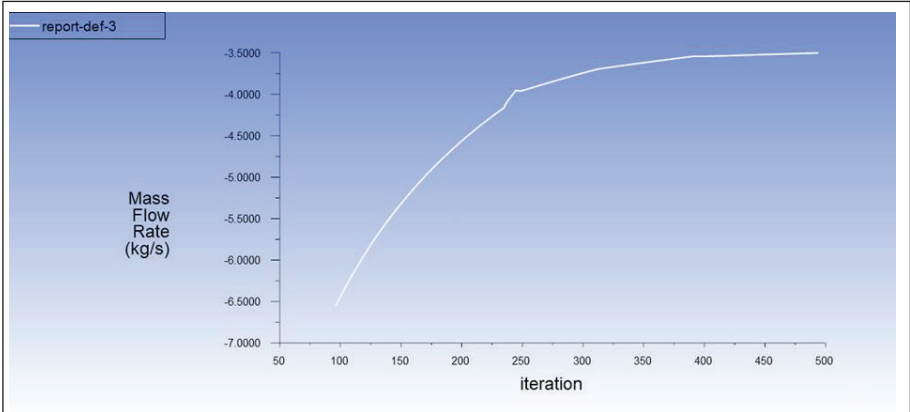
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Post-Processing (Analiz Yorumlama)

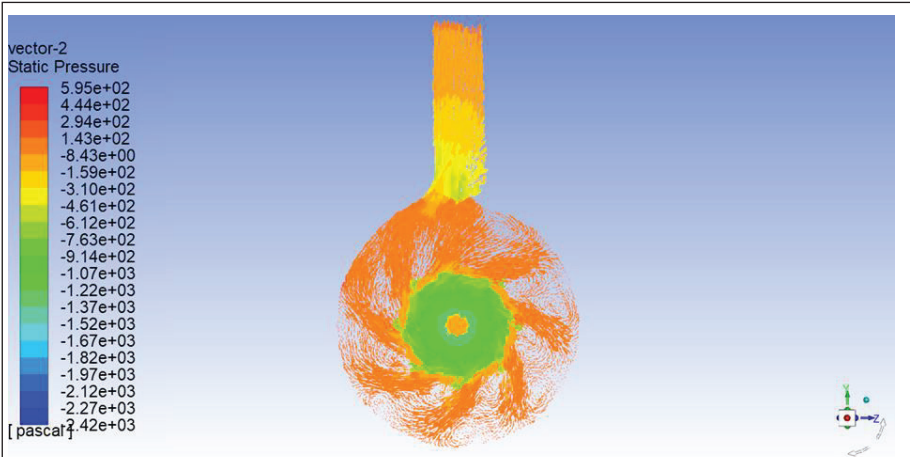
Analiz için girilen değerlere bakılarak çözümün yakınsadığına karar verildiğinde analiz sonlandırılır. Raporlama (report) işlemlerinden debi, hız ve basınç dağılımları ile ilgili birçok veri elde edilir. Bu çalışmada pompa çıkış kütleli debisi 3,58 kg/s olarak hesaplanmıştır (Şekil 7).

Pompa için en önemli parametre debi, basınç ve hız değişimleridir. Yapılan bu çalışmada pompa giriş ve çıkıştaki parametreler de incelenmiştir. Basınç dağılımı (Şekil 8) ve hız vektörleri (Şekil 9) nin pompa geometrisine göre değişimi aşağıda verilmiştir.

Çark çevresi ve pompa çıkışında oluşan basınç değişimleri net olarak görülmektedir. Hız vektörlerine çözüm yakınsamadan önce ve sonra olmak üzere iki ayrı zamanda

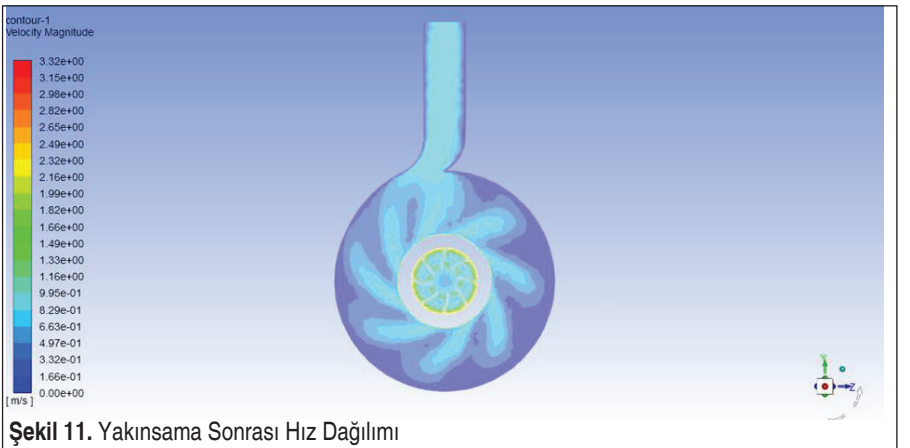
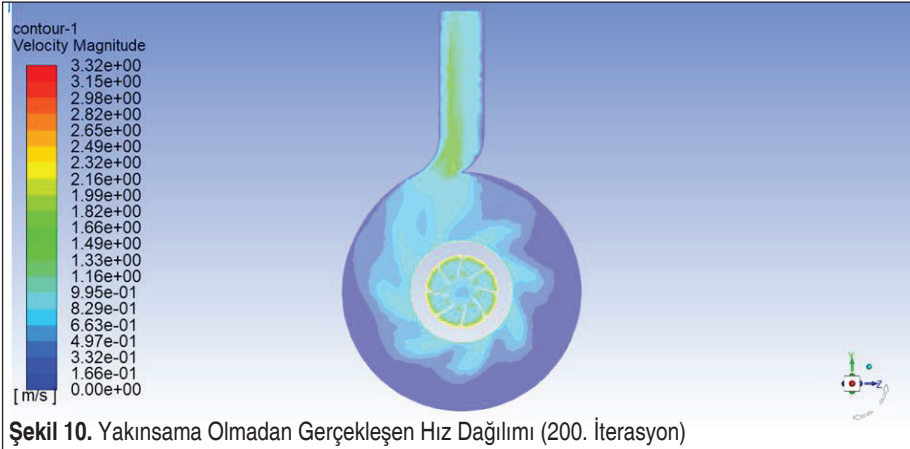
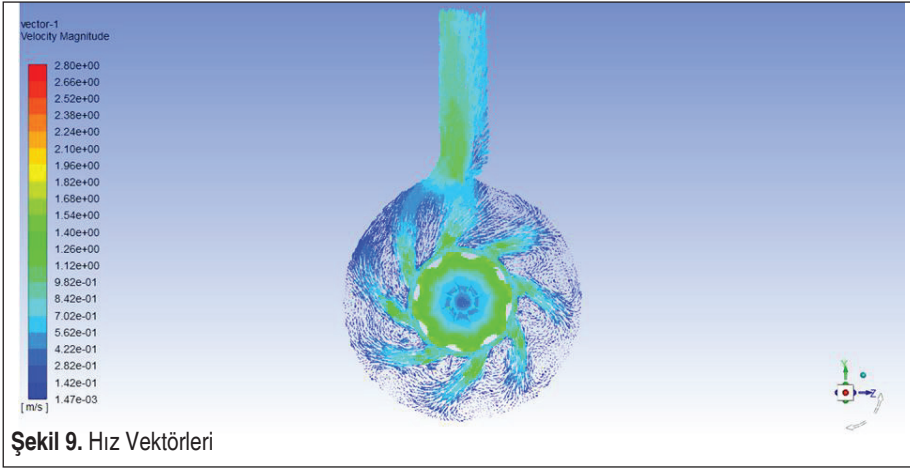


Şekil 7. Kütleli Debi Değişimi



Şekil 8. Basınç Countour Dağılımı

bakılabilir. Şekil 10 ve Şekil 11 da yakınsama öncesi ve yakınsama durumu için hız vektörlerinin değişimi izlenebilmektedir. Yakınsama durumunda ortaya çıkan grafik net bir şekilde anlaşılabilir.





4. SONUÇLAR

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD)(CFD) deneysel düzenekler kurmadan süreklilik, momentum ve enerji denklemlerini çözerek akış analizine yardımcı olan yöntemlerdir. Tasarımcı bu noktada farklı akış formları için tasarımını geliştirmeden önce bilgi sahibi olabilmektedir. Her türlü değişikliğe(geometri, basınç, debi vs) açık olan program sayesinde hem zamandan hem de maliyetten büyük kazanımlar sağlanabilmektedir. Buradaki en önemli nokta tasarımcının iyi bir akışkanlar mekaniği bilgi ve tecrübesine sahip olması gerekmektedir. Program kurgusu içinde birçok bilgiye ihtiyaç vardır. Bir başka konu da kullanılan bilgisayarların analizi gerçekleştirme kapasitesidir. Düşük performanslı bilgisayarlarda çözüm süresi uzun olabilmektedir. Şu da iyi bilinmelidir ki hiçbir program gerçek şartlar altında yapılan deneysel analizlerden daha iyi sonuç verememektedir. Tasarımcı bu noktada ne kadar hassasiyet içinde bu verileri kabul edebileceğine karar vermelidir. Nihai üretime geçmeden önce program sayesinde sağlanan bilgiler ile prototip ürün karşılaştırması yapılması en uygun olan yöntemdir.

KAYNAKÇA

1. **Nataraj, M., Ragoth Singh, R.** Analyzing pump impeller for performance evaluation using RSM and CFD, Desalination and Water Treatment, 1-10, 2013.
2. **Parlak, Z.** 2016. En uygun çark tasarımı ile bir santrifüj pompa performansının iyileştirilmesi, Sakarya Üniversitesi Fen Bil Der, Cilt 20, Sayı 3, 667-676.
3. **Jin, J., Fan, Y., Han, W., Hu, J.** 2012. Design and Analysis on Hydraulic Model of The Ultra -low Specific-speed Centrifugal Pump, Procedia Engineering, 31, 110 – 114.
4. **Bacharoudis, E.C., Filios, A.E., Mentzos, M.D., Margaris, D.P.** 2008. Parametric Study of a Centrifugal Pump Impeller by Varying the Outlet Blade Angle, The Open Mechanical Engineering Journal, 2, 75-83.
5. **Karamanoğlu Y., Mobedi M., Ertöz A.Ö.** 2006. Pompa Tasarımının Gelistirilmesinde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin Kullanılması, Tesisat Mühendisliği Dergisi, 91, 46-55.
6. **Şenol G.K., Karakuş C.** 2017. Pompa ve Pompaj Sistemlerinde Enerji Tasarrufu Uygulamaları, Mühendis ve Makina, 58, 687, 1-16.
7. <https://grabcad.com/library/tag/pump>: son erişim tarihi:01.04.2021
8. https://www.engineeringtoolbox.com/water-density-specific-weight-d_595.html: son erişim tarihi:01.04.2021

Sandviç Kompozit ve Metal Plakalar ile Oluşturulan Tek Bindirmeli Yapıştırma Bağlantılarının Mekanik Özelliklerinin Deneysel ve Nümerik Yaklaşım ile Belirlenmesi

Engin Erbayrak¹

ÖZ

Bu çalışmada, farklı malzemeler kullanılarak oluşturulan tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının mekanik özellikleri deneysel ve nümerik yaklaşım ile belirlenmiştir. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarında plaka malzemesi olarak çelik, alüminyum ve alüminyum sandviç kompozit malzeme, yapıştırıcı olarak ise Araldite 2015 epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır. Aynı malzemeye sahip plakalar kullanılarak elde edilen yapıştırma bağlantılarının yanı sıra, farklı malzemelere sahip plakalardan oluşan yapıştırma bağlantıları da bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Deneysel yaklaşımda çekme testleri 1 mm/dak çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Deneysel yaklaşım sonunda her bir yapıştırma bağlantısının gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri belirlenmiştir. Ayrıca, plaka malzemesi olarak kullanılan alüminyum sandviç kompozit malzeme de yer alan polietilen polimerinin XRD testi ile karakterizasyonu yapılmıştır. Nümerik yaklaşımda, deneysel yaklaşımda kullanılan tek bindirmeli yapıştırma bağlantı geometrisi Ansys sonlu elemanlar programında oluşturulmuştur. Model oluşturulurken yapıştırıcı ile plakalar arasında non-lineer kontak kurulmuş ve deney şartlarını karşılayan sınır şartları uygulanmıştır. Bindirme bağlantılarının non-lineer modellenmesi, doğru sınır koşullarının uygulanması ve doğru temas tipinin seçilmesi nedeniyle nümerik sonuçların deneysel sonuçlarla benzer bir eğilim gösterdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Tek bindirmeli yapıştırma bağlantısı, sandviç kompozit plaka, penaltı temas modeli, çekme dayanımı.

Determination of Mechanical Properties of Single Lap Joints Having Sandwich Composite and Metal Adherend by Experimental and Numerical Approach

ABSTRACT

In this study, the mechanical properties of single lap joints having different adherends were determined by experimental and numerical approaches. Steel, aluminum, and aluminum sandwich composite material were used as adherend, and Araldite 2015 epoxy adhesive was used as adhesive in single lap joints. Alongside the single lap joints obtained by using similar adherends, different adherends were also examined within the scope of this study. In the experimental approach, tensile tests were carried out at a rate of 1 mm/min. At the end of the experimental approach, the stress-strain plots of each single lap joint were determined. In addition, the characterization of the polyethylene polymer, which is also included in the aluminum sandwich composite material used as the adherend, was made in experimental approach by XRD test. In the numerical approach, the single lap joint geometry used in the experimental approach was created in the Ansys finite element program. A non-linear contact was established between the adhesive and the adherend, and boundary conditions were applied that meet the experimental conditions. It was observed that the numerical results show a similar tendency with the experimental results due to the non-linear modeling of the lap joints, the application of the correct boundary conditions, and the selection of the correct contact type.

Keywords: Single lap joints, sandwich composite adherend, penalty contact model, tensile strength

Geliş/Received : 19.05.2021
Kabul/Accepted : 24.06.2021

¹ Bayburt Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bayburt, enginerbayrak@bayburt.edu.tr
ORCID: 0000-0002-0648-8823

EXTENDED ABSTRACT

Introduction/Background

Today, single-lap joints are frequently used in transportation sectors such as automobiles, aircraft, ships, and trains. Lap joints are preferred compared to other connection methods (welding, rivets, etc.) in terms of their advantages such as high strength, low cost, lightness, and less stress accumulation at the connection points.

Objectives/ Research Purpose

In this study, the mechanical properties of single lap joints having different adherends were determined by experimental and numerical approaches. In the experimental approach, tensile tests were carried out and the results were compared with the numerical results. Thus, the verification of the experimental results was carried out.

Methods/ Methodology

In the experimental approach, single lap joints consisted of different adherends and Araldite 2015 epoxy adhesive. Adherends are selected from the structural steel (St37), aluminum, and sandwich aluminum composite, respectively. Single lap joints are produced by combining adherend and adhesive materials in a special mold. Before determining the mechanical properties of the single lap joint, XRD material characterization tests of the aluminum sandwich composite plate were carried out. The mechanical properties of the single lap joints were determined on the MTS universal axial test device at a tensile speed of 1 mm/min. In the numerical approach, firstly, the single lap joint geometry used in the experimental approach was created in the Ansys finite element program. The most important part when creating the model is to determine the correct contact points. Therefore, a non-linear contact was established between the adhesive and the adherend. The pure penalty method was used in the non-linear contact approach. Boundary conditions were applied to the single lap joint model considering the experimental conditions. In the solution approach of the numerical model, the substep number that will determine the iteration steps of the Newton Raphson solution method was determined. The number of sub-steps consists of three parts in the program as initial, minimum, and maximum. At this point, it should be stated that to have equal iteration times used in all steps, all sub-step steps were determined as equal and 60.

Results/ Findings

It is seen that the highest tensile strength value is obtained from the lap joint AC-2015. Also, after evaluating the results, it is understood that the adhesion strength of aluminum plates is higher than other plates. Moreover, it was observed that the numerical results show a similar tendency with the experimental results due to the non-linear modeling of the lap joints, the application of the correct boundary conditions, and the selection of the correct contact type.

Discussion and Conclusions

The mechanical properties of single-lap joints determined by numerical and experimental approaches were compared with each other. The main results are as follows;

1. In single lap joints having dissimilar adherends, the strength values of the lap joints were varied when the adherend on which the tensile load was applied changed.
2. At the end of this study, it was shown that a single lap joint can be formed by using sandwich composite adherend and metal adherends together. It is stated that the lap joints formed by using sandwich composite plates will be suitable especially for the ductile behavior model in which the strain is high and the tensile strength is low.



1. GİRİŞ

Günümüzde tek bindirmeli yapıştırma bağlantıları otomobil, uçak, gemi ve tren gibi ulaştırma sektörlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Yapıştırma bağlantıları, diğer bağlantı yöntemlerine göre (kaynak,perçin vb) yüksek dayanım, düşük maliyet, hafiflik ve bağlantı noktalarında gerilme yığılmalarının az olması gibi sağladığı avantajlar bakımından tercih edilmektedir. Literatürde, yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerinin belirlenmesi ile ilgili pek çok çalışma yer almaktadır. Bu çalışmalarda, yapıştırıcı kalınlığının, bindirme mesafe değerinin, plaka kalınlığının ve hibrit yapıştırıcı kullanımının yapıştırma bağlantısının mekanik özelliklerine etkileri incelenmiştir [1-3]. Ayrıca, farklı plakalar kullanılarak elde edilen bindirme bağlantılarının mekanik özelliklerinin incelenmesi de çok yaygın olmamak ile birlikte literatür de mevcuttur [4-6]. Ancak, bu çalışma kapsamında kullanılan plaka malzemeleri ve yapıştırıcı ile oluşturulan bindirme bağlantısına herhangi bir çalışmada rastlanılmamıştır. M. Mariam vd [7] alüminyum alaşımı (AA7075) ve cam elyaf takviyeli epoksi (GRE) kompozitin kullanılmasıyla elde edilen tek bindirme bağlantılarının çekme ve yorulma özelliklerini incelemiştir. Deneysel sonuçlara göre, birbiri ile aynı olmayan plakalar kullanılarak oluşturulan hibrit bindirme bağlantılarının en yüksek mukavemet ve sertlik değerlerini gösterdiğini belirtmişlerdir. Myeong-Su Seong vd [8] karbon elyaf takviyeli kompozit laminat ve alüminyum plaka kullanılarak elde edilen bindirme bağlantısının mekanik özelliklerinin değişimi için parametrik bir çalışma yapmışlardır. Bindirme bağlantılarında Cytec tarafından üretilen yüksek mukavemetli bir yapıştırıcı olan FM73m, yapıştırıcısını kullandılar. Parametrik çalışma kapsamında, bindirme uzunluğu, yapışma kalınlığı ve malzeme türü gibi çeşitli parametrelerin bindirme bağlantısına etkisini incelediler. Sonuç olarak, bindirme uzunluğunun ve yapıştırma kalınlığının değişmesinin, tek bindirmeli yapıştırma bağlantısında meydana gelen hasar yüküne etkisi olduğunu rapor etmişlerdir. P. Galvez vd [9] karbon fiber takviyeli polimer (CFRP)-çelik plakalardan meydana getirilen tek bindirmeli yapıştırma bağlantısının mekanik özelliklerini ve yorulma davranışını incelemiştir. Farklı plaka malzemelerinden elde edilen bindirme bağlantısının yüzde 30 daha yüksek mukavemet değerlerine sahip olduğunu ve yorulma ömrünün de yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Farklı malzemelere sahip plakalardan oluşturulan tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarına ait çalışmalar için [10-12] referansları incelenebilir. Deneysel çalışmada uygulanan yükleme durumunun teorik yaklaşımı için [13] referansı irdelelenebilir. Kompozit malzemelerin farklı yükleme durumları altındaki davranışları da ilgili literatürde [14-17] mevcuttur.

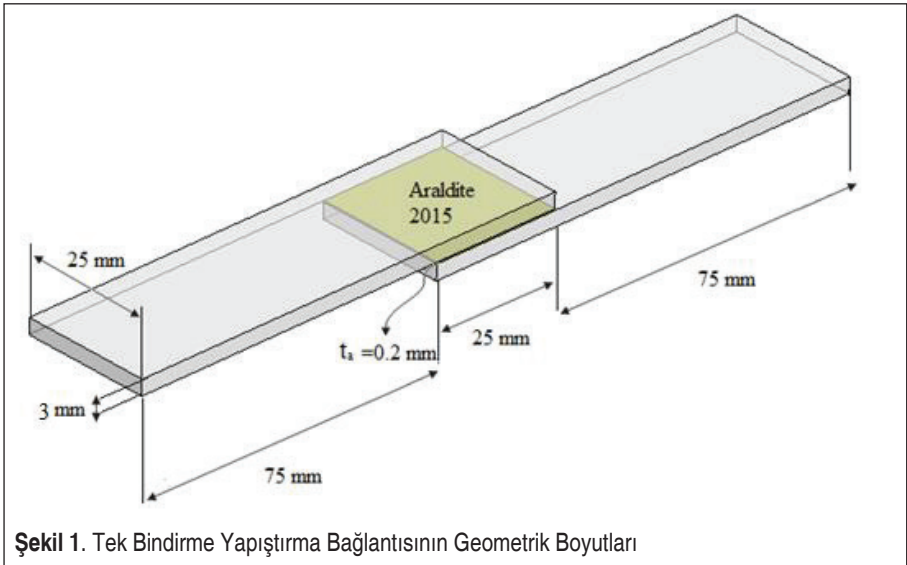
Bu çalışmada, farklı malzemelere sahip plakalardan oluşan tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerinin değişimi deneysel ve nümerik yaklaşım ile incelenmiştir. Ayrıca, plaka malzemesi olarak kullanılan alüminyum sandviç kompozit malzeme de yer alan polietilen polimerinin XRD testi ile karakterizasyonu deneysel

yaklaşım içerisinde yapılmıştır. Nümerik yaklaşımda, deneysel yaklaşımda kullanılan tek bindirmeli yapıştırma bağlantı geometrisi Ansys sonlu elamanlar programında oluşturulmuştur. Model oluşturulurken yapıştırıcı ile plakalar arasında non-lineer kontak kurulmuş ve deney şartlarını karşılayan sınır şartları uygulanmıştır. Bu çalışma kapsamında farklı plaka malzemesi olarak kullanılan alüminyum sandviç kompozit plakaların sektörde yaygın kullanıldığı bilinmektedir [18-20]. Bununla birlikte, bu çalışma sektörde yaygın olarak kullanılan tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarından daha önce denenmemiş alüminyum sandviç kompozit plakaların metal plakalar ile birleştirilmesini ve mekanik özelliklerinin belirlenmesini içermektedir. Dolayısıyla, çalışmanın sağladığı bu yenilik literatüre ve ilgili sektörlerle önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

2.MATERYAL VE YÖNTEM

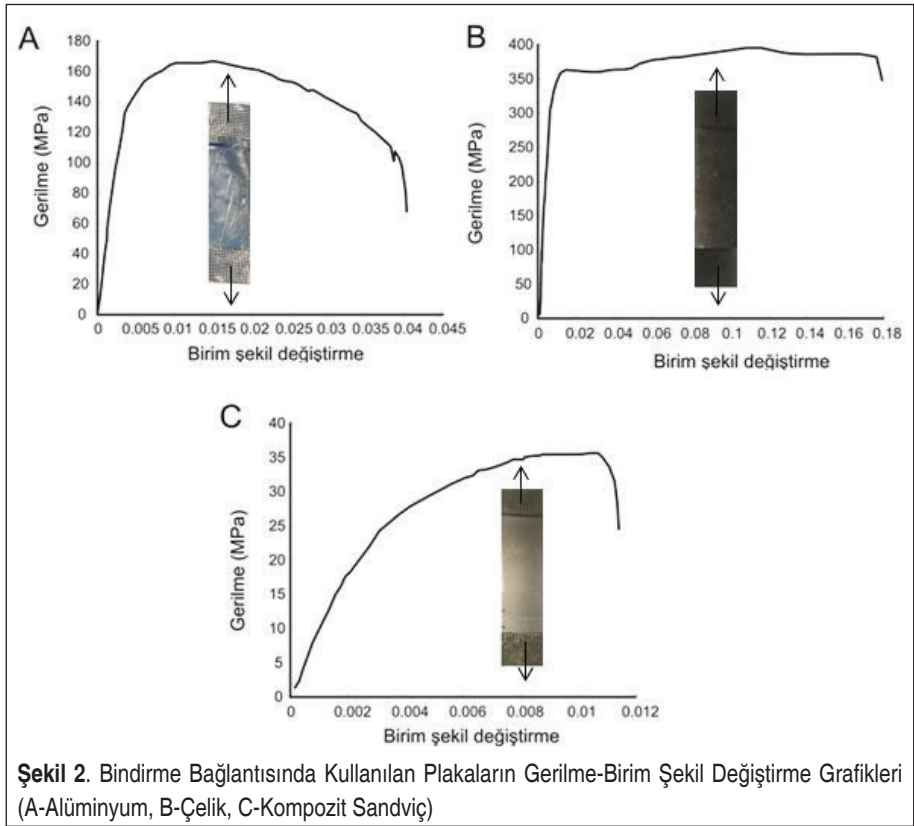
2.1 Materyal

Bu çalışmada, tek bindirmeli yapıştırma bağlantıları, farklı malzemelere sahip plakalar ve Araldite 2015 epoksi yapıştırıcısından meydana getirilmiştir. Plaka malzemeleri sırasıyla yapısal çelik (St37), alüminyum ve sandviç alüminyum kompozittir. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantıları, benzer ve farklı malzemelerden oluşan plakalar ve yapıştırıcı kullanılarak hazırlanmıştır. Bindirme bağlantıları ASTM D3165 - 07 standartları [21] dikkate alınarak oluşturulmuştur. Tek bindirme yapıştırma bağlantısının geometrik boyutları Şekil 1 de gösterilmektedir.



2.2 Yöntem

Tek bindirmeli yapıştırma bağlantıları, plaka ve yapıştırıcı malzemelerin özel bir kalıp içerisinde birleştirilmesi ile üretilmiştir. Kalıp kullanılmasının en önemli sebebi, plakalar arasında kullanılan yapıştırıcının kürleşmesi esnasında, plakaların yanal kaymalarını önlemek içindir. Bununla birlikte, plakalar yapıştırıcı ile kohesif yapışma sağlayabilmesi amacıyla yüzeyleri pürüzlendirilmiştir. Yapıştırıcı kalınlığı ince tel kullanılarak sağlanmıştır. Kalıp içerisinde yer alan bindirme bağlantıları, kullanılan yapıştırıcının oda sıcaklığında kürleşme süresi olan 24 saat bekletilerek, hazırlanmışlardır. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının mekanik testlerinden önce, bindirme bağlantısını oluşturan sandviç kompozit ve metal plakaların çekme testleri yapılarak, mekanik özellikleri belirlenmiştir. Çekme testleri tüm plakalar için 1 mm/dak çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Çekme testinde kullanılan plakalar ASTM 3039 standardına göre hazırlanmıştır [22]. Testlerde, her bir plakadan 3 numune test edilerek, standart sapma değerleri belirlenmiştir [23]. Testler sonunda her bir plaka için elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 2 de gösterilmektedir.



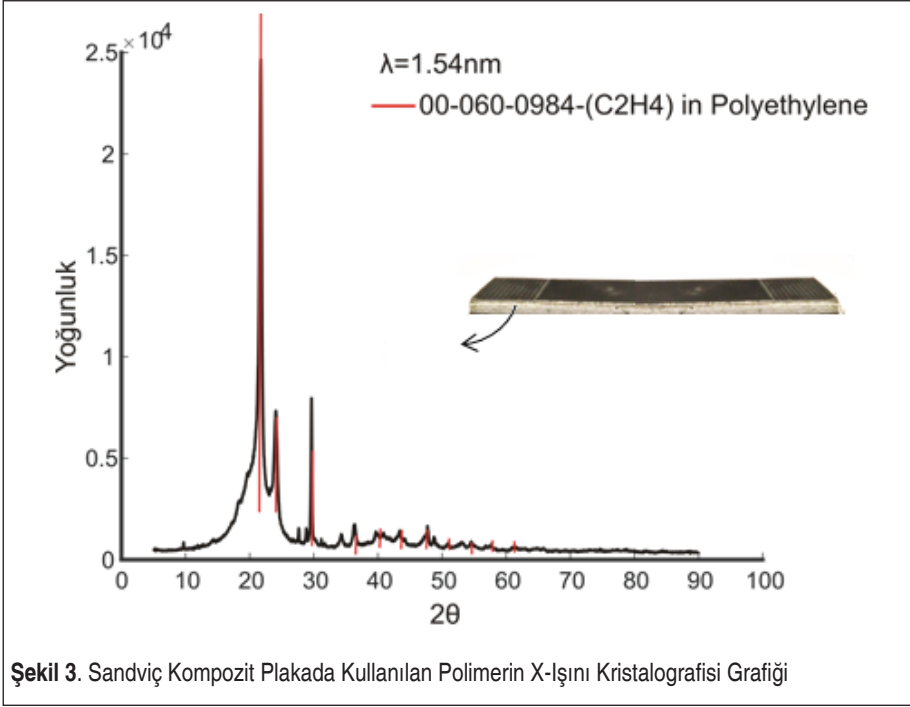
Plakaların gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri incelendiğinde, en yüksek çekme mukavemetinin çelik plakaya, en düşük çekme mukavemet değerinin ise alüminyum sandviç kompozit plakaya ait olduğu görülmektedir. En yüksek birim şekil değişimi de çelik plakadan, en düşük birim şekil değişimi de alüminyum sandviç kompozit plakadan elde edilmiştir. Bu noktada belirtilmelidir ki, plaka ve yapıştırıcının mekanik özelliklerinin belirlenmesi nümerik analiz sırasında kurulacak model için gereklidir. Bindirme bağlantılarında kullanılan yapıştırıcının mekanik özellikleri yapıştırıcının teknik veri sayfasından ve literatürde yer alan çalışmadan elde edilmiştir [24-25]. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantısını oluşturan plaka ve yapıştırıcının mekanik özellikleri Tablo 1 de gösterilmektedir.

Tablo 1. Tek Bindirmeli Yapıştırma Bağlantısını Oluşturan Plaka Ve Yapıştırıcının Mekanik Özellikleri [19-20]

	Araldite 2015	Çelik	Alüminyum	Sandviç kompozit
Akma mukavemeti (MPa)	12.63±0.61	268.58±22.2	124.9±11.25	19.85±1.85
Maksimum çekme mukavemeti (MPa)	21.63±1.61	395.3±28.7	166.8±14.75	35.48±3.54
Kopmada uzama (%)	4.77±0.15	18.15±3.15	4.03±0.88	1.2±0.15
Elastisite modülü (GPa)	1.85±0.21	208.3±7.65	66.12±5.12	9.18±1.25

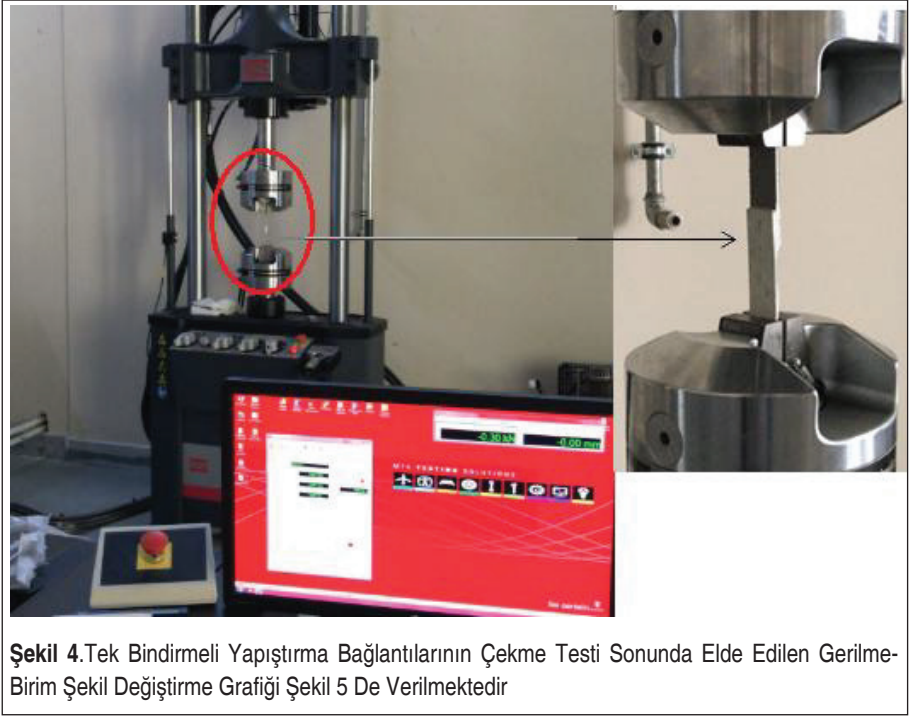
Tek bindirmeli yapıştırma bağlantısının mekanik özellikleri belirlenmesinden önce alüminyum sandviç kompozit plakanın malzeme karakterizasyon testleri yapılmıştır. Sandviç kompozit plaka alt ve üst levhası alüminyum ve ortada polimer malzemedir oluşan bir kompozit yapıdır. Polimer malzemenin hangi polimer yapısına ait olduğunu belirleyebilmek amacıyla XRD (X Işını Kristalografisi) testi yapılmıştır. Kompozit malzeme de kullanılan polimerin türünün doğru belirlenmesi, nümerik analiz sırasında malzeme modelinin doğru oluşturulabilmesi için son derece önemlidir. X-ışını kristalografisi, malzemenin kristalografik yapısını belirlemek için uygulanan bir tekniktir. Bu yöntem de, malzeme üzerine gönderilen X-ışınları ile malzemedir yansıyan X-ışınlarının yoğunluklarını ve saçılma açılarını ölçülerek karakterizasyon işlemi yapılmaktadır [26]. XRD analizi sonunda malzemeye gelen ve yansıyan X ışınlarının yaptığı teta açısı ile belirli bir zirvede gözlemlenen X ışınlarının sayısı olarak nitelendirilen yoğunluk grafiği elde edilmiştir. Yapılan XRD analizinde dalga boyu 1.54nm olarak belirlenmiştir. XRD analiz sonunda elde edilen grafik Şekil 3 de gösterilmektedir.

X ışınlarının gelen ve yansıyan açısı (2θ) ile ışınların toplandığı tepe noktası (Yoğunluk) arasında ki grafik kullanılarak polimerin malzeme grubu belirlenmiştir. Şekil 3 de



görülen ilgili polimerin analiz sonucu, XRD cihazında yer alan malzeme kütüphanesinde taratılarak, uygun malzeme grubu belirlenmiştir. Buna göre, sandviç kompozit plakada kullanılan polimerin XRD davranışı polietilen malzemenin XRD davranışı ile büyük benzerlik gösterdiği gözlemlenmiştir.

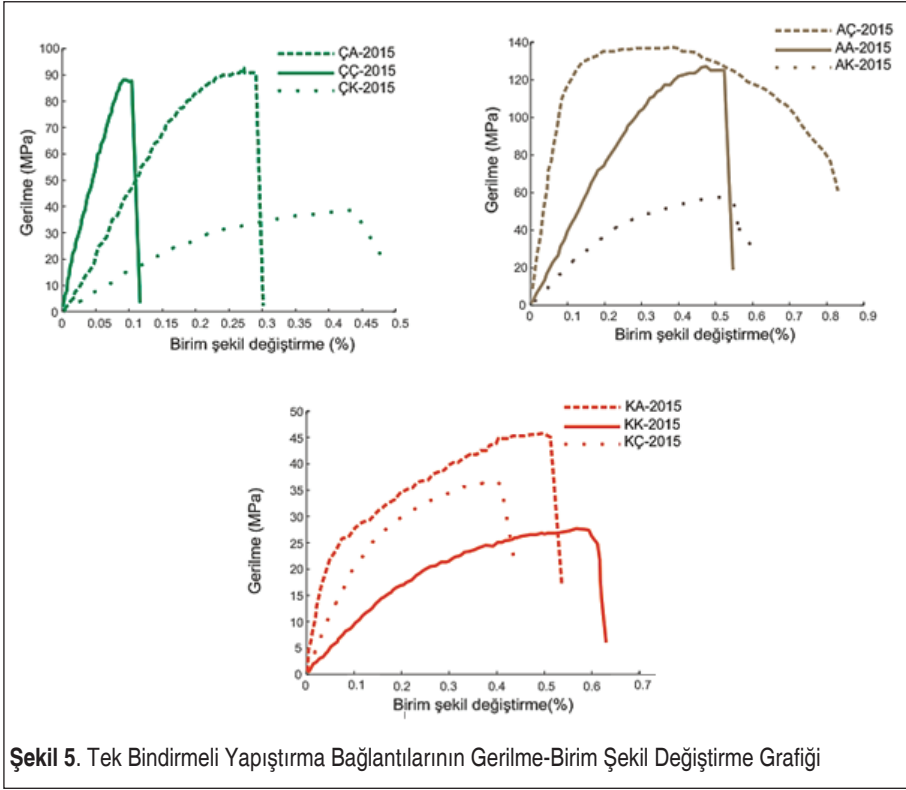
Bindirme bağlantısını oluşturan levhaların mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve sandviç kompozit levhada bulunan polimer malzemenin karakterizasyon işlemi tamamlandıktan sonra, tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının mekanik testlerine başlanmıştır. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının mekanik özellikleri MTS universal eksenel test cihazında, 1 mm/dak çekme hızı altında belirlenmiştir. Mekanik özellikler, test cihazının çekme yükünü uygulamaya başladığı anda cihaz üzerinde bulunan yük hücresi ve gerilim ölçer tarafından alınan dataların, test cihazının ara yüzüne aktarılarak, gerilme- birim şekil değiştirme grafikleri oluşturulması ile belirlenmektedir. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantıları, benzer ve farklı plakalar ile Araldite 2015 epoksi yapıştırıcısı kullanılarak elde edilmiştir. Toplam 27 adet tek bindirmeli bağlantı seti oluşturulmuştur. Bindirme bağlantıları çekme cihazının çenelerine bağlanarak, yükleme işlemi çekme cihazın ara yüzey programı kullanılarak, uygulanmıştır. Deneysel düzeneğinin görüntüsü Şekil 4 de gösterilmektedir.



Şekil 4. Tek Bindirmeli Yapıştırma Bağlantılarının Çekme Testi Sonunda Elde Edilen Gerilme-Birim Şekil Değiştirme Grafiği Şekil 5 De Verilmektedir

Tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının çekme testi sonunda elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme grafiği Şekil 5 de verilmektedir.

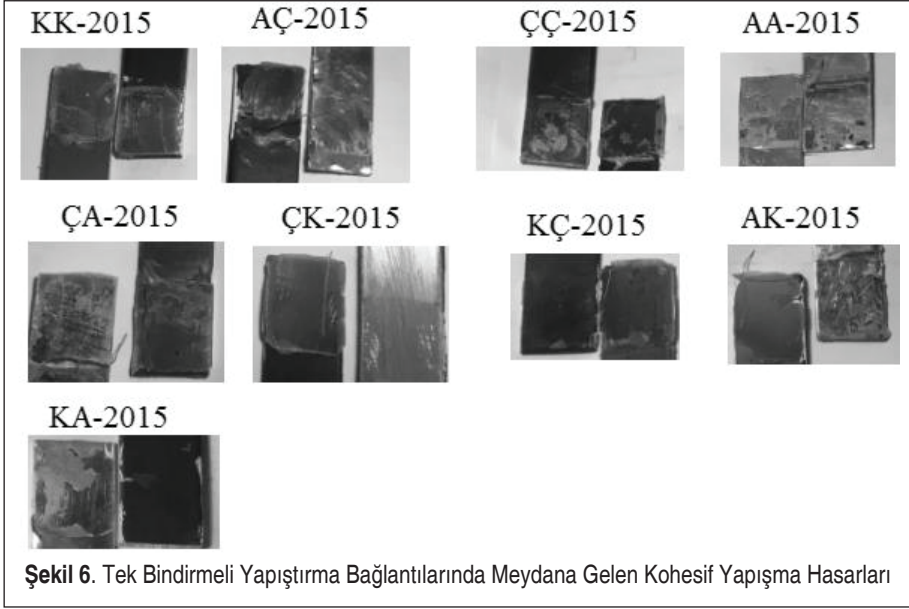
Şekil 5 de görüldüğü gibi, tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarında A, Ç ve K harfleri sırasıyla alüminyum levha, çelik levha ve sandviç kompozit levhayı nitelendirmektedir. 2015 sayısı ise kullanılan Araldite 2015 epoksi yapıştırıcısını belirtmektedir. Tüm setlerdeki ilk harfin, çekme yükünün uygulandığı levhayı gösterdiği belirtilmelidir. Bununla birlikte, çekme testleri oda sıcaklığında ve yaklaşık yüzde 45-50 nem seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Çekme test sonuçları irdelendiğinde, en yüksek çekme mukavemet değerinin alüminyum ve çelik levhalar kullanılarak elde edilen bindirme bağlantısından (AÇ-2015) elde edildiği görülmektedir. En düşük çekme mukavemet değeri kompozit sandviç plakalar kullanılarak elde edilen bindirme bağlantısından (KK-2015) elde edilmiştir. Bununla birlikte, en yüksek birim şekil değiştirme değerinin AÇ-2015 bindirme bağlantısından elde edildiği görülmektedir. En düşük birim şekil değiştirme değeri ise ÇÇ-2015 bindirme bağlantısından elde edilmiştir. Ayrıca, farklı malzemelere sahip plakalar kullanılarak oluşturulan tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarında çekme yükünün uygulandığı plaka değişince bindirme bağlantısının mukavemet değerlerinde de değişimler gözlemlenmiştir. Örneğin, ÇA-2015 tek bindirmeli yapıştırma bağlantısının çekme mukavemet değeri AÇ-2015 bindirmeli yapıştırma bağlantısının çek-



Şekil 5. Tek Bindirmeli Yapıştırma Bağlantılarının Gerilme-Birim Şekil Değişirme Grafiği

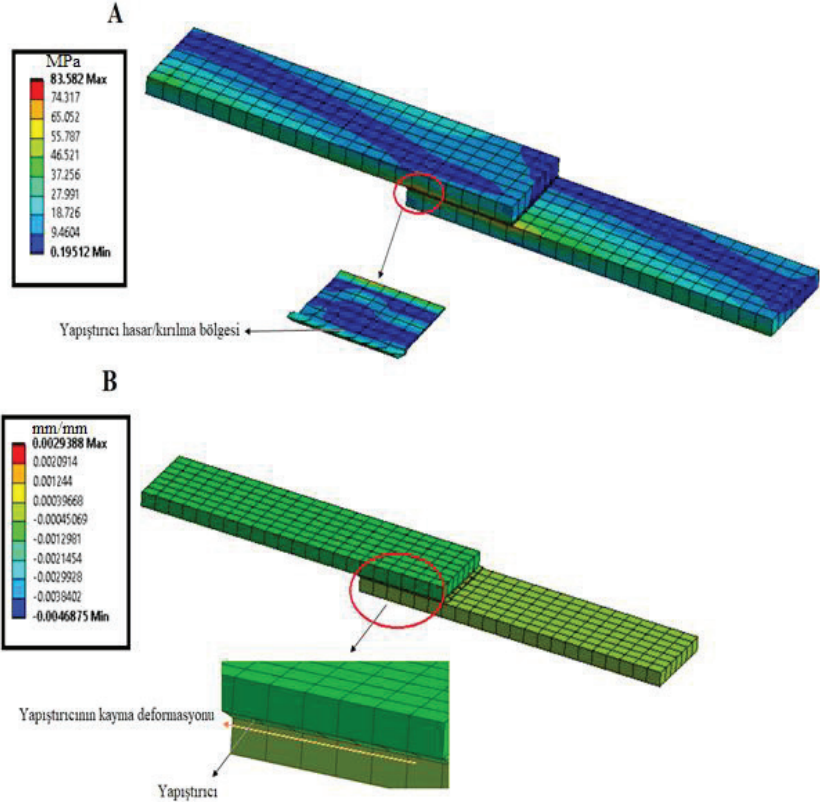
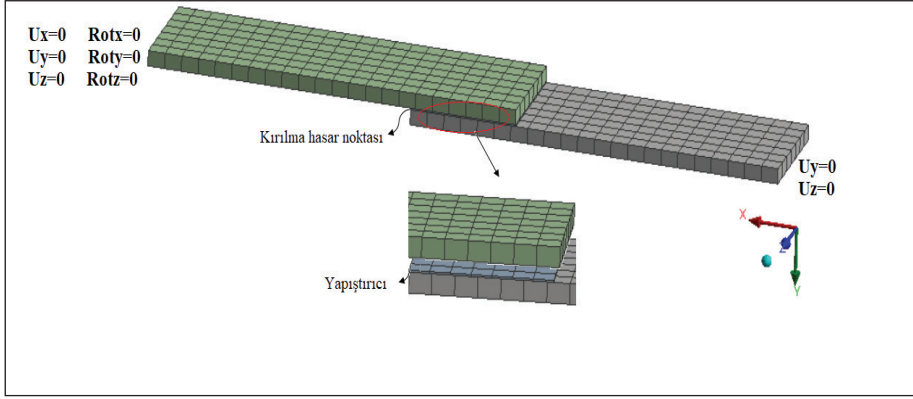
me mukavemet değerinden yaklaşık yüzde 44 daha az elde edilmiştir. Benzer durum AK-2015 bindirme bağlantısı için de geçerlidir. KA-2015 tek bindirmeli yapıştırma bağlantısının çekme mukavemet değeri AK-2015 bindirmeli yapıştırma bağlantısının çekme mukavemet değerinden yaklaşık yüzde 35 daha az elde edilmiştir. Son olarak, ÇK-2015 ile KÇ-2015 bindirme bağlantılarının çekme mukavemet değerleri birbirine yakınsak gelmiştir. Bu sonuçlardan sonra alüminyum plakaların adhezyon kuvvetinin diğer plakalara göre daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır.

Çekme yükünden sonra yapıştırıcıda meydana gelen hasarın incelenmesi önemlidir. Genellikle yükleme koşullarına bağlı olarak plaka yüzeylerin de kohesif ve adhesif yapışma hasarları görülür. Kohesif yapışma hasarların da yapıştırıcı, yüklemmeden sonra birbirlerinden ayrılan her iki plaka yüzeyin de bulunur. Bu durum, uygulanan yükün doğrudan yapıştırıcıya iletildiği şeklinde yorumlanmaktadır [27]. Ancak adhesif yapışma hasarında, uygulanan yük yapıştırıcıya tam olarak iletilmediği için yapıştırıcı sadece bir plaka yüzeyin de görülür. Bu çalışmada, çekme testi sırasında tüm tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının da kohesif yapışma hasarı meydana gelmiştir. Yapıştırıcılar üzerindeki kohezif yapışma hasarları, Şekil 6'da gösterilmektedir.



3. NÜMERİK YAKLAŞIM

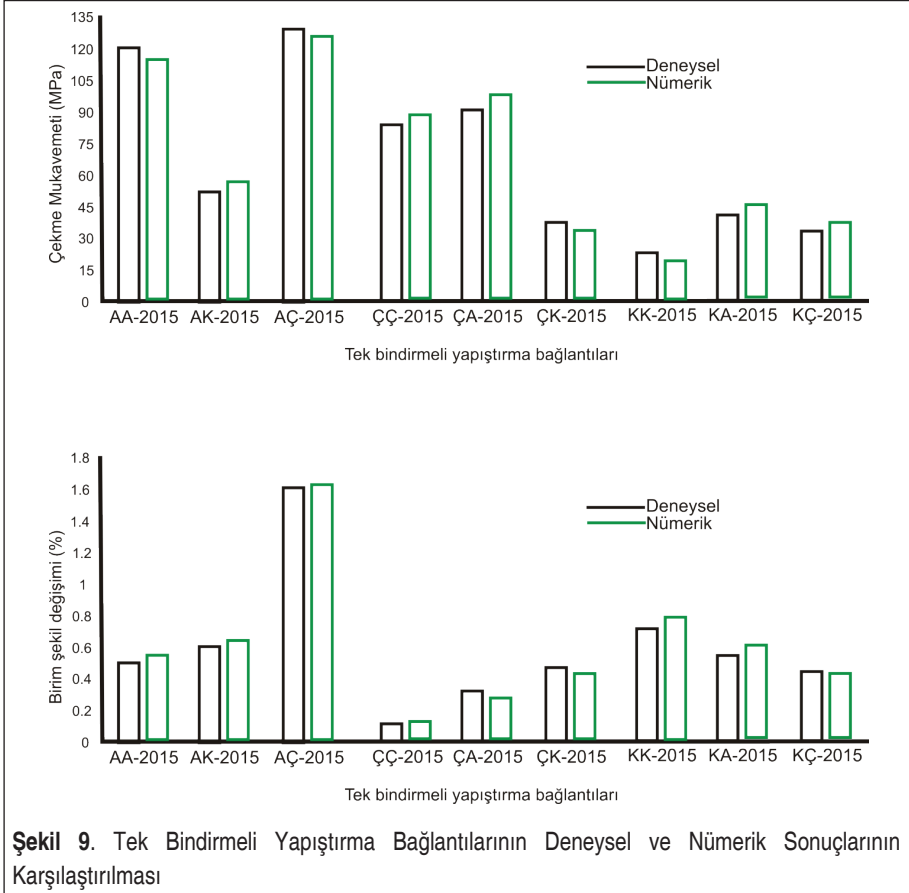
Nümerik yaklaşımda, ilk olarak, deneysel yaklaşımda kullanılan tek bindirmeli yapıştırma bağlantı geometrisi Ansys sonlu elemanlar programında oluşturulmuştur. Model oluşturulurken en önemli kısım doğru temas (kontakt) noktalarını belirlemektir. Bu kapsamda, yapıştırıcı ile plakalar arasında non-lineer kontakt kurulmuştur. Non-lineer kontakt yaklaşımında penaltı yöntemi (pure penalty method) kullanılmıştır. Bu yöntemin diğer non-lineer kontakt yöntemlerine göre en büyük avantajı varyasyonel formülasyondan kaynaklanan kısıtlamaları açıkça ortadan kaldırmasıdır [28]. Dolayısıyla, kontakt bölgesinde ki plastik deformasyonlar rahatlıkla belirlenebilmektedir. Kontakt durumu belirlendikten sonra modelin sonlu elemanlar ağına bölünmesi (mesh) işlemine geçilmiştir. Mesh duyarlılığı ve eleman kalite değeri göz önünde bulundularak, model 1 mm eleman boyutunda, düzgün dörtgenel mesh (mapped mesh) ile sonlu elemanlarına ayrılmıştır. Modelin sınır şartlarını belirlemeden önce, tek bindirmeli yapıştırma bağlantısının plakaları ve yapıştırıcısının malzeme davranışları programın malzeme kütüphanesine tanıtılmıştır. Plakaların çekme testleri sonunda ki mekanik davranışları deneysel yaklaşım içerisinde belirlendiğinden, elde edilen bu davranışlar programa tanıtılmıştır. Yapıştırıcının mekanik davranışı ise yazarın daha önceden yaptığı çalışmada mevcuttur [29]. Ayrıca sandviç kompozit plakaların mekanik davranışı yanında alüminyum plaka ve polietilen ara tabaka yapısı da programa tanıtılmıştır. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantı modeline, deneysel koşullar göz önünde bulundurularak, bir ucundan ankastre, diğer ucundan Y,Z yönünde hareketini



Şekil 8. Tek Bindirmeli Yapıştırma Bağlantısının Nümerik Analiz Sonuçları (A-Eş değer gerilme dağılımı, B-Toplam deformasyon)

kapatacak sınır şartı uygulanmıştır. Bindirme bağlantısının serbest bırakılan X yönüne ise çekme testi sırasında elde edilen deplasman değeri girilmiştir. Bindirme bağlantısının nümerik modeli, meydana gelecek hasar noktaları ve sınır şartlarının gösterimi Şekil 7’de gösterilmektedir.

Nümerik modelin çözüm yaklaşımında, nonlineer çözüm parametreleri olan büyük deformasyonlar (Large deflection) ve Newton Raphson çözüm yönteminin iterasyon adımlarını belirleyecek alt adım sayısı (substep) belirlenmiştir. Alt adım sayısı program içerisinde başlangıç, minimum ve maksimum olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. Bu noktada belirtilmelidir ki, tüm adımlarda kullanılan iterasyon zamanlarının eşit olması için tüm alt adım sayıları eşit ve 60 olarak belirlenmiştir. Çözüm başlandıktan sonra, tek bindirme bağlantısı üzerinde meydana gelen eş değer gerilme ve eş değer birim şekil değiştirme değerleri belirlenmiştir. Eş değer gerilme seçilmesi, bindirme bağlantısı üzerine uygulanan çekme yüküne bağlı olarak hem normal geril-



Şekil 9. Tek Bindirmeli Yapıştırma Bağlantılarının Deneysel ve Nümerik Sonuçlarının Karşılaştırılması



me hem de kayma gerilmesinin oluşmasıdır [30]. Tek bindirme yapıştırma bağlantı yapısının, nümerik analiz sonunda ortaya çıkan gerilme ve birim şekil değiştirme değerleri ile deforme olan yapısı Şekil 8 de gösterilmektedir.

Tek bindirmeli yapıştırma bağlantı setlerinden ÇA-2015' e ait nümerik model sonucu şekil 8de görülmektedir. Eş değer gerilme dağılımında açıkça görülmektedir ki, yapıştırıcı beklenildiği gibi hasar bölgesinden plastik deformasyona uğramıştır. Bu durum doğru kontak çeşidi ile çalışıldığına bir göstergesidir. Ayrıca, birim şekil değiştirme sonucunda, çekme yüküne maruz yapıştırıcıda meydana gelen kayma deformasyonu da açıkça gözlemlenebilmektedir. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının nümerik analiz sonucunda elde edilen gerilme ve birim şekil değiştirme değerleri deneysel sonuçlar ile kıyaslanarak, şekil 9 da verilmiştir.

Şekil 9 da, çekme yüküne maruz tek bindirmeli yapıştırma bağlantısının hem deneysel hem de nümerik yaklaşım sonuçlarının birbirine yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca, sayısal yaklaşımda yapıştırıcıların non-lineer modeli kullanılarak modellenmesi, doğru sınır koşullarının uygulanması ve doğru temas tipi seçimi sonuçların yakınsamasında önemli bir rol oynamıştır. Öte yandan, uygun deney koşullarının sağlanması, test cihazının kalibrasyonu ve birden fazla numunenin test edilmesi de sonuçların deneysel yaklaşım açısından yakınsamasını sağlamıştır. Deneysel ve nümerik yaklaşım irdelendiğinde en yüksek çekme mukavemeti her iki yaklaşım için de AÇ-2015 bindirme bağlantısından elde edilmiştir. Benzer şekilde, en yüksek birim şekil değişimi de yine AÇ-2015 bindirme bağlantısından elde edilmiştir. Böylelikle, nümerik yaklaşım sonuçları, deneysel yaklaşım sonuçlarını doğrulamıştır.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, farklı malzemeler kullanılarak oluşturulan tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının mekanik özellikleri deneysel ve nümerik yaklaşım ile belirlenmiştir. Deneysel yaklaşım, bindirme bağlantılarının çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Nümerik yaklaşım da ise, yapıştırıcı ile plakalar arasında non-lineer kontak kurulmuş, deneysel koşullar ile birebir benzer sınır şartları uygulanmıştır. Nümerik ve deneysel yaklaşımlarla belirlenen tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının mekaniksel özellikleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Ana sonuçlar şu şekildedir;

1. Deneysel yaklaşımda, en yüksek çekme mukavemet değerinin alüminyum ve çelik levhalar kullanılarak elde edilen bindirme bağlantısından (AÇ-2015) elde edilmiştir. En düşük çekme mukavemet değeri kompozit sandviç plakalar kullanılarak elde edilen bindirme bağlantısından (KK-2015) elde edilmiştir. Bununla birlikte, en yüksek birim şekil değiştirme değerinin AÇ-2015 bindirme bağlantısından belirlenmiştir.
2. Farklı malzemelere sahip plakalar kullanılarak oluşturulan tek bindirmeli yapıştır-

ma bağlantılarında çekme yükünün uygulandığı plaka değişince bindirme bağlantısının mukavemet değerlerinde de değişimler gözlemlenmiştir.

3. Benzer ve farklı plaka malzemelerinden oluşan tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının çekme test sonuçlarına göre, alüminyum plakaların adhezyon kuvvetinin diğer plakalara göre daha yüksek olduğu anlaşılmıştır.
4. Nümerik analiz sonuçları irdelendiğinde, tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının hem deneysel hem de nümerik sonuçlarının birbirine yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca, sayısal yaklaşımda yapıştırıcıların non-lineer modeli kullanılarak modellenmesi, doğru sınır koşullarının uygulanması ve doğru temas tipi seçimi sonuçlarının yakınsamasında önemli bir rol oynamıştır.
5. Bu çalışma , sektörde yaygın olarak kullanılan tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarından daha önce denenmemiş alüminyum sandviç kompozit plakaların metal plakalar ile birleştirilmesini ve mekanik özelliklerinin belirlenmesini içermektedir. Dolayısıyla, çalışmanın sağladığı bu yenilik literatüre ve ilgili sektörlerde önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca, özellikle birim şekil değişiminin yüksek, çekme mukavemetinin düşük olduğu sünek davranış modeli için sandviç kompozit plakalar kullanılarak oluşturulan bindirme bağlantılarının uygun olacağı belirtilmektedir.

KAYNAKÇA

1. **Akhavan-Safar, A., Ayatollahi, M.R., da Silva, L.F.M.**2017. “Strength prediction of adhesively bonded single lap joints with different bondline thicknesses: A critical longitudinal strain approach”, *International Journal of Solids and Structures*, 109,189-198.
2. **Özel, A., Aydın M.D., Temiz, Ş.** 2004. “The effects of overlap length and adherend thickness on the strength of adhesively bonded joints subjected to bending moment”, *Journal of Adhesion Science. and Technology*,18,313-325.
3. **Kadioğlu, F., Avil, E., Ercan, M.E., Aydoğan, T.** 2018. “Effects of different overlap lengths and composite adherend thicknesses on the performance of adhesively-bonded joints under tensile and bending loadings”, *Materials Science and Engineering*,369,1-8.
4. **Hasheminiaa,S.M., Parka, B.C., Chuna,H.J., Parkb,J.C., Changb, H.S.** 2019. “Failure mechanism of bonded joints with similar and dissimilar material”, *Composites Part B*, 161,702-709.
5. **Rudawska, A.,** 2019. “Comparison of the adhesive joints’ strength of the similar and dissimilar systems of metal alloy/polymer composite”, *Applied Adhesion Science*, 7,1-17.
6. **Butt, J., Mebrahtu, H., Shirvani,H.** 2016. “Microstructure and mechanical properties of dissimilar pure copper foil/ 1050 aluminium composites made with composite metal foil manufacturing”, *Journal of Materials Processing Technology*,16,1-38.
7. **Mariama, M., Afendia,M., Abdul Majida, M.S., Ridzuana,M.J.M., Gibson A.G.** 2018. “Tensile and fatigue properties of single lap joints of aluminium alloy/glass fibre



- reinforced composites fabricated with different joining methods”, *Composite Structures*,18,1-31.
8. **Su Seong,M., Kim,T.H., Nguyen,K.H., Kweon,J.H., Choi J.H.** 2008. “A parametric study on the failure of bonded single-lap joints of carbon composite and aluminum”, *Composite Structures*,86,135-145.
 9. **Galvez ,P., Quesada, A., Martinez , M.A., Abenojar,J., Boada,M.J.L., Diaz, V.** 2017. “Study of the behaviour of adhesive joints of steel with CFRP for its application in bus structures”, *Composites Part B*,129,41-46.
 10. **Pramanik,A., Basak,A.K., Dong, Y., Sarker,P.K., Uddin, M.S., Littlefair,G., Dixit,A.R., Chattopadhyaya, S.** 2017. “Joining of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites and aluminium alloys-A review”, *Composites: Part A*,17.
 11. **Anyfantis,K.N., Tsouvalis, N.G.** “Experimental parametric study of single-lap adhesive joints between dissimilar materials”, *ECCM15 - 15th european conference on composite materials*,24-28 Haziran 2012, Venedik,İtalya.
 12. **Budhe,S., Ghumatkar,A., Birajdar N., Banea M.D.** 2015. “Effect of surface roughness using different adherend materials on the adhesive bond strength”, *Applied Adhesion Science*,3,1-10.
 13. **Khusnutdinov, N.** 2021.”Self-action in gravity”, *The European Physical Journal Plus*, 136, 1-16, <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01640-4>
 14. **Safaei, B.** 2020.” The effect of embedding a porous core on the free vibration behavior of laminated composite plates.” *Steel and Composite Structures*, 35(5), 659–670. <https://doi.org/10.12989/SCS.2020.35.5.659>
 15. **Dastjerdi, R.M., Behdinin, K.,Safaei, B., Qinc, Z.** 2020. “Static performance of agglomerated CNT-reinforced porous plates bonded with piezoceramic faces”, *International Journal of Mechanical Sciences*,188,105966.
 16. **Dastjerdi, R.M., Behdinin, K.,Safaei, B., Qinc, Z.** 2020. “Buckling behavior of porous CNT-reinforced plates integrated between active piezoelectric layers”, *Engineering Structures*,222, 111141
 17. **Safaei, B, Dastjerdi, R.M., Qin, Z., Behdinin, K.,Chu, F.** 2019. “Determination of thermoelastic stress wave propagation in nanocomposite sandwich plates reinforced by clusters of carbon nanotubes”, *Journal of Sandwich Structures & Materials*, <https://doi.org/10.1177/1099636219848282>.
 18. **A. Aliminyum kompozit.** “Alüminyum Kompozit Panel”, <https://www.alpil.com.tr/urunler/aluminyum-kompozit-panel/>, 10.05.2021.
 19. **Y.Metal.** “Kompozit Panel”, <https://www.yavuzaluminum.com/kompozit-panel-nedir/>, 15.05.2021.
 20. **S. Aliminyum.** “Alüminyum Kompozit Panel”, <https://www.sisteval.com/tr/uretim/aluminyum-kompozit-panel>, 05.05.2021.
 21. **ASTM D3165 – 07.** “Standard Test Method for Strength Properties of Adhesives in Shear

- by Tension Loading of Single-Lap-Joint Laminated Assemblies” <https://www.astm.org/Standards/D3165.htm>, 01.01.2014.
22. ASTM 3039. “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials”, <https://www.astm.org/Standards/D3039>, 01.01.2017.
 23. **Newbold, P., Carlson, W.L., Thorne, B.M.** 1994. “Statistics for business and economics”, ISBN: 0132745658, Prentice Hall, New Jersey.
 24. Araldite 2015 adhesive. “Hunstman advanced materials”,https://krayden.com/technical-data-sheet/hunts_araldite_2015_tds/, 01.01.2015.
 25. **Carvalho,U.T.F., Campilho, R.D.S.G.** 2017. “Validation of pure tensile and shear cohesive laws obtained by the direct method with single-lap joints”, International Journal of Adhesion and Adhesives,77,41-50.
 26. **J, Epp.** 2016. “Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods”, Bölüm: “X-ray diffraction (XRD) techniques for materials characterization”, ISBN: 978-0-08-100040-3, Woodhead Publishing, İngiltere.
 27. **Wei, K., Chen, Y., Li, M., Yang, X.** 2018. “Strength and failure mechanism of composite-steel adhesive bond single lap joints” Advance Material Science and Engineering, <https://doi.org/10.1155/2018/5810180>.
 28. **Laursen, T.A.** 2013.“Computational contact and impact mechanics: fundamentals of modeling interfacial phenomena in nonlinear finite element analysis”, ISBN: 978-3-662-04864-1, Springer Science & Business Media, İsviçre.
 29. **Özer, H., Erbayrak, E.** 2018. “The effects of curing temperature on fracture energy and cohesive parameters for the adhesive Araldite 2015”, Journal of Adhesion Science and Technology, 32,12, 1287-1312.
 30. **Zhou, D., Di, M.** 2019. “Numerical simulation analyses of Single Lap joints for wood PE composites formed with Epoxy and Acrylic ester adhesives”,14,5908-5922.

Sürtünme Karıştırma Prosesi ile Elde Edilen Yüzey Metal Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerini Geliştiren Çoklu Mekanizmalar

Gökçe Mehmet Genç¹

ÖZ

Sürtünme karıştırma prosesi (SKP), sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) yöntemi esaslı olup, metalik malzemelerin özelliklerini iyileştirmek için geliştirilmiş bir katı hal yöntemidir. Yöntem ile sert ikincil faz partiküllerin matris yapısına dağıtılarak eklenebilme (yerleştirilebilme) imkanı, yöntemin sonradan yüzey metal matrisli kompozit (YMMK) üretiminde de yaygın şekilde kullanılmasını sağlamıştır. Basit, çevreci ve düşük maliyetli bir katı hal yöntemi olması, yüzey kompoziti üretiminde kullanılan birçok sıvı ve gaz hal yöntemlerine göre daha ön plana çıkmasını sağlamıştır. Sürtünme karıştırma prosesiyle yüzey metal matrisli kompozit elde ederken malzemenin mikro yapısının ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde birçok farklı mekanizma birlikte rol oynamaktadır. Matris yapısında elde edilen bu mukavemet artırıcı mekanizmalar, yöntemin işlem gören malzemeye kazandırdığı kendine has özellikler ile kullanılan sert ikincil faz partiküllerin matris yapısına dağılmasıyla gelişen özelliklerin melezlenmesi ile sağlanmaktadır. Çalışmada SKP ile elde edilen YMMK'lerin mekanik özelliklerindeki gelişmede sert ikincil faz partiküllerin, dinamik rekristalizasyonun, Zener sabitlemenin (iğneleme) ve Orowan mekanizmasının etkileri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme karıştırma prosesi, dinamik rekristalizasyon, zener sabitleme, orowan mekanizması

Multiple Mechanisms Improving The Mechanical Properties Of Surface Metal Matrix Composites Obtained By Friction Stir Processing

ABSTRACT

Friction stir processing (FSP), a technique based on the principles of friction stir welding (FSW), is a solid-state method that was developed to enhance the properties of metallic materials. The possibility of the addition of hard second phase particles to matrix structure by distributing, subsequently caused that this method has also been used commonly in surface metal matrix composite (SMMC) manufacturing. By means of the advantages of being a simple, environmentally friendly, and cost-effective solid-state method, FSP has come into prominence more than various liquid and gas-phase methods that are used to manufacture SMMCs. In the FSP method, multiple mechanisms take part together in enhancing the microstructure and mechanical properties of the material during processing. These strengthening mechanisms in matrix structure obtained by hybridizing the specific properties gained to processed material by the FSP method and the enhanced properties by distributing the hard second phase particles in the matrix material. In this study, the effects of hard second phase particles, dynamic recrystallization (DRX), Zener pinning, and Orowan mechanism in the enhancement of mechanical properties of the SMMCs manufactured by FSP were investigated.

Keywords: Friction stir processing, dynamic recrystallization, zener pinning, orowan mechanism

Geliş/Received : 30.04.2021

Kabul/Accepted : 01.07.2021

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir, mehmet.gencer@deu.edu.tr
ORCID: 0000-0003-1084-7240

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Conventional materials used in the industry cannot often provide the requirements of modern technology. In order to supply these requirements and obtain materials beyond the conventional alloys, metal matrix composites (MMC) are used commonly in almost every sector of industry [1, 2]. The ability to combine several materials (metal, nonmetal, ceramic) with their specific properties in a single structure, gives a great opportunity for variety. Especially in automotive (fiber reinforced pistons, particle reinforced brake discs) and aviation (fan exit guide vanes of gas turbine engine [4]) industry, the carried-out investigations to decrease the weight are driving force for the optimization of the designs in which the usage of lightweight materials is essential [5-8]. While determining the manufacturing method for MMC parts/machine elements; the geometry of designed parts, the expected properties from parts, the matrix material, and the type, shape, and size of reinforcements are considered. The homogenous distribution of reinforcements in MMC structure is an important and difficult situation [6, 12]. MMC production by using liquid phase methods may result in some problems in matrix such as interface reactions between matrix and reinforcements, formation of some detrimental phases, clustering of reinforcements, casting defects that especially affects the tensile properties, heterogeneous and unfavorable microstructure formation, inclusions and porosity [9, 13-18]. In this study, the principles of multiple mechanisms that affect enhancing the microstructural and mechanical properties of the particle reinforced surface metal matrix composites obtained via friction stir processing are stated.

The Importance of Manufacturing Surface Metal Matrix Composites (SMMC) Through Friction Stir Processing (FSP)

MMCs generally have also some disadvantages besides their advantages, such as decrease in ductility with regard to the matrix material, high expenses and the complexity of manufacturing in most cases. Especially the relation between the cost and strength of MMCs is the most important issue to optimize in MMC manufacturing [23]. The sizes and types of used reinforcements, matrix materials, the particle/matrix ratio in MMC, the difficulty in machinability and the used method to produce MMC cause the cost of MMC to change in wide ranges [23, 24]. Furthermore, to prevent unfavorable effects of discontinuities that might be formed in the composite structure due to liquid phase methods, in most applications only the SMMC can be selected for service besides manufacturing the material completely composite. The most important advantage of the SMMC is being manufactured by hybridizing the toughness of the matrix and good properties of the surface. With these properties, SMMCs are superior to the alloys manufactured completely as MMC [9]. Various liquid phase methods may result in obtaining SMMC with similar disadvantages as in MMC manufacturing. If the SMMC production with lesser defects (discontinuities) and low cost is done below the melting point of the matrix material, the mentioned problems and the results of these in the composite structure will be prevented on a vast scale. Thus, the service life of the manufactured composite materials will be increased [6, 26-29].

Friction Stir Processing (FSP)

Recently, the liquid phase methods (laser melt treatment, plasma spray, and centrifugal casting, etc.) used to obtain surface MMC have been losing their utilization gradually in industry. Friction stir processing (FSP) has been using as a novel surface modification technique to obtain surface MMC with its superior properties such as being solid-state method, environmentally friendly, energy-efficient, economic, simple, clean, and versatile [9, 13, 30].

In friction stir processing, a non-consumable rotating tool that has a specific pin and shoulder



is immersed in material to ensure the required surface modification like in friction stir welding (FSW). The friction between the tool and material supplies needed frictional heat to soften the material. By rotating and simultaneously traveling of the immersed tool, the material is exposed to severe plastic deformation (SPD), the thermal effect, and complex material flow called “stirring” [9, 30]. FSP is a local thermo-mechanic method that refines the microstructure and increases the homogeneity and density of the material solely in the applied local area [35]. Although FSP was basically developed for grain refinement, it subsequently became a commonly used application with the advantages of the solid-state methods in surface composite manufacturing [6, 26-29, 31-34].

Enhancing The Mechanical Properties of Surface Composites by FSP

Various hard second phase particles (SiC, TiC, BC, BN, Al₂O₃, TiN, etc.) are used in SMMCs obtained through FSP. Material surface is treated with the FSP tool and thus hard second phase particles are added to the surface of the matrix material and distributed in the processed zone. These hard ceramic reinforcements increase the surface hardness remarkably. Besides this, high heat input formed by friction and occurred severe plastic deformation result in to form of dynamic recrystallization (DRX) in the stir zone (SZ). DRX increases the grain boundary energy in SZ, and consequently, it ensures the formation of fine grains by increasing the grain boundary amount. Thus, the equiaxed and fine-grained microstructure is obtained in SZ [47]. This situation is one of the multiple strengthening mechanisms of FSP that is carried out in SZ depending on the Hall-Petch relation. Also, the hard second phase particles in SMMCs affect the dynamic recrystallization with FSP. These reinforcements cause inhomogeneous local deformations and thus grains are fragmented and the effectiveness of DRX increases [40]. Grain boundaries migrate during DRX and grain growth. During this migration, it is expected that the grain boundaries move through the hard particles. But hard second phase particles do not allow this migration by applying Zener pinning force to grain boundaries. These reinforcements that are distributed to structure below melting point by FSP and the reaction possibility with the matrix is reduced are very effective in the application of Zener pinning force in SMMCs. Another strengthening mechanism in SMMC manufacturing through FSP is blocking the dislocation movement in crystal by hard second phase particles depending on the Orowan mechanism.

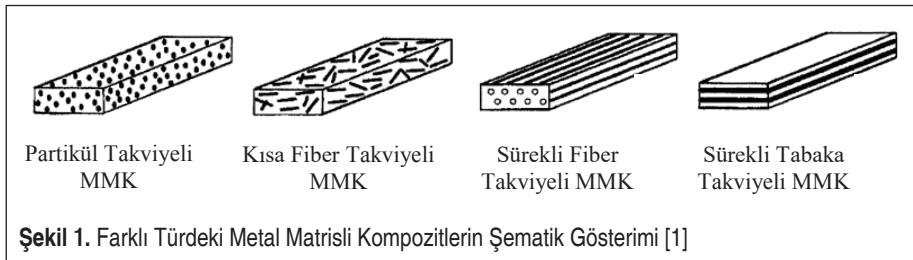
Conclusion

In this study, the mechanisms that enhance the microstructure and mechanical properties of SMMCs manufactured by FSP and their effects on the matrix structure were investigated. During FSP; it was observed that fine-grained structure obtained due to DRX, hard second phase particles and the positive effects (Zener pinning and Orowan mechanism) of these reinforcements improve the surface properties all together in a single process.

1. GİRİŞ

Endüstride kullanılan geleneksel alaşımların çoğu; yüksek dayanım/yoğunluk oranı, iyi derecede tokluk, yüksek sıcaklıklarda çalışabilme vb. gibi birçok özelliği bir arada bulunduramamakta ve günümüz teknolojisinin gereksinimlerini çoğu zaman tek başlarına sağlayamamaktadırlar. Bu gereksinimleri karşılamak ve geleneksel alaşımların sınırlarının üzerinde malzemeler elde edebilmek için metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler günümüzde endüstrinin neredeyse her alanında yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Metal matrisli kompozitler, tasarlanan mühendislik malzemesinden kullanım aşamasında beklenen özellikleri karşılamak amacıyla biri metal (saf ya da alaşım durumunda) olmak üzere en az iki farklı malzemenin (metal, ametal, seramik vb.) belirli yöntemler dahilinde birleşimi ile elde edilen malzemelerdir. Metal matrisli kompozitleri oluşturan malzemeler fiziksel ve kimyasal olarak birbirlerinden farklı özellikler gösterirler [1]. Bileşen malzemelerin herhangi birinden tek başına elde edilemeyen özelliği sağlamak amacıyla üretilen MMK'de ana malzeme metal matris iken diğer malzeme/ler ise takviye görevi gören mikro ya da nano boyutlarda partiküller, kısa fiberler, sürekli fiberler ya da sürekli tabakalar olabilmektedir (Şekil 1). Matris malzemesi takviye elemanlarını bir arada tutar ve malzemenin şekilsel bütünlüğünü korur. Takviyeler ise matrise belirli oranda ve boyutlarda eklenerek kompozit yapıdan beklenen özellikleri sağlarlar [2, 3].



Çeşitli malzemeleri (metal-seramik-ametal) sahip oldukları özellikleri ile birlikte tek bir yapıda birleştirebilme, büyük bir çeşitlilik imkanı sağlamaktadır. Bu çeşitlilik içinde ticari olarak kullanılan MMK'lerin başında alüminyum, magnezyum, bakır, titanyum, nikel esaslı alaşımlar gelmektedir. Ancak MMK'ler denince akla çoğunlukla hafif metal matrisli kompozitler gelmektedir. Özellikle otomotiv (fiber takviyeli pistonlar, partikül takviyeli fren diskleri) ve havacılık endüstrisi (gaz türbini motorunda fan çıkış kılavuz kanatları [4]) başta olmak üzere ağırlık azaltmak için yapılan çalışmalar, düşük ağırlığa sahip malzemelerin kullanıldığı tasarımların optimizasyonu için çok büyük itici güç olmaktadır [5-8]. Bu kapsamda, alüminyum alaşımları yüksek mukavemet/ağırlık oranı, iyi yorulma dayanımı ve aşınma direnci, yüksek düktiliteye



sahip matrisleri, kolay işlenebilme özellikleri ve uygun maliyetleri ile MMK üretiminde matris malzemesi olarak en yaygın kullanılan metal haline gelmiştir [9-11]. Birçok farklı yöntem ile imal edilebilen MMK parçalarının/makine elemanlarının üretimi için kullanılacak yöntem belirlenirken; parçaların geometrileri, parçadan beklenen özellikler, kullanılacak matris malzemesi ve takviye elemanının cinsi, şekli ve boyutu dikkate alınır. MMK'lerdeki takviye malzemelerinin yapı içinde homojen dağılımları önemli ve zor bir durumdur [6, 12].

Ergitme esaslı yöntemler ile MMK üretmek; matris ve takviyeler arasındaki arayüz reaksiyonları, kompozit yapı içinde bazı zararlı fazların oluşumları, takviyelerin belirli bölgelerde kümelenmesi, özellikle çekme dayanımını etkileyen döküm yöntemi hataları, heterojen ve uygun olmayan içyapı oluşumu, inklüzyonlar ve porozite gibi bazı tipik problemleri de yanında getirmektedir [9, 13-18]. Y.Z. Li ve ark. B4C/AA6061 alüminyum kompozitlerinde takviye ve matris malzemesi arasında gerçekleşen arayüz reaksiyonları sonucu $MgAl_2O_4$, MgB_7 ve $Mg_0,78Al_{10,75}B_{14}$ bileşiklerinin oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Bu bileşiklerin oluşumu nedeniyle matriste Mg'nin ciddi şekilde azaldığını ve bunun sonucu olarak da üretilen kompozitin yaşlanma ile sertleşebilirliğinin bozulduğunu belirtmişlerdir [19]. Rajan ve ark. karbon destekli alüminyum MMK'da karbon fiberin ergimiş alüminyumla 900K'in üzerinde şiddetli şekilde reaksiyona girdiğini ve fiberlerin parçalanmasıyla alüminyum karbür ($Al_4C_3(5)$) oluşturarak yapının mukavemeti azalttığını belirtmişlerdir [20]. Davidson çalışmasında ürettiği %15 SiCp takviyeli AA2014 MMK'da takviyelerin kümelenmediği bölgelerde çatlak başlangıcının gerçekleştiği tespit etmiştir [21]. Oluşan bu gibi mikro/makro süresizlikler yapı içinde buldukları veya kümelendikleri yerlerde düşük mukavemetli bölgeler oluşturup Al MMK'nın kullanım sırasında iş göremez hale gelmesine ya da beklenen özellikleri gösterememesine sebep olmaktadır [9, 22]. Bunun yanında, kullanılan üretim yöntemlerindeki kontrolü zor olan bazı parametreler de (döküm işleminde soğuma sıcaklığı gibi) MMK'nın kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir [12]. Çalışmada, katı hal yöntemi olan sürtünme karıştırma prosesi ile elde edilen sert partikül destekli yüzey metal matrisli kompozitlerin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde etkili olan çoklu mekanizmalar hakkında bilgiler özetlenmiştir.

2. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA PROSESİ (SKP) İLE YÜZEY METAL MATRİSLİ KOMPOZİTİ ÜRETİMİNİN ÖNEMİ

MMK'ler genel olarak sağladığı avantajların yanında bazı dezavantajlara da sahiptirler. Bunlar; matris malzemesine göre süneklikte azalma, imalatın maliyetli ve çoğu zaman karmaşık oluşudur. Özellikle MMK'lerin dayanımları ve maliyetleri arasındaki ilişki MMK imalatında en çok optimize edilmeye çalışılan durumdur [23]. Örneğin izotropik ve düşük tokluk özelliğine sahip partikül takviyeli MMK'lerin maliyeti, ani-

zotropik ve yüksek mukavemetli sürekli fiber takviyeli MMK'lere göre relatif olarak oldukça düşüktür. MMK'lerden beklenen çeşitli özellikleri sağlamak için kullanılan takviyeler ve boyutları, matris malzemeleri, MMK'deki matris ve takviye malzemesi oranı, üretim sonrası işlenebilirliklerindeki zorluk ve MMK'yı üretmek için kullanılan yöntem MMK maliyetinin çok geniş sınır değerler arasında değişmesine sebep olmaktadır [23, 24]. Bunlara ilaveten, özellikle sıvı hal yöntemleriyle ortaya çıkma ihtimali olan çoğu süreksizliğin MMK parçalarının performanslarını ve kullanım ömürlerini azaltmaması için de tüm kütlenin kompozit halde üretilmesi yerine çoğu uygulamada sadece yüzey metal matrisli kompozitlerin (YMMK) kullanımları tercih edilebilir (özellikle aşınma ve yorulma dirençlerinin öncelikli olduğu durumlarda). Bu nedenle, imalat endüstrisindeki son gelişmelerle birlikte, MMK'den istenilen dayanım ve özellikleri sağlamak, üretim maliyetinin daha dar aralıkta değişken olmasını sağlamak ve içyapısı geliştirilmiş daha az hatalı MMK elde etmek için son yıllarda MMK'leri kütle halinde üretmek yerine sadece yüzey kompoziti (yüzey metal matrisli kompozit) olarak üretme yollarına başvurulmuş ve bu doğrultuda iyi sonuçlar alınmıştır [25]. Yüzey kompozitlerinin en önemli avantajı matrisin sahip olduğu tokluğun ve yüzeyin iyi mekanik özelliklerinin melezlenmesiyle elde edilmesidir. Bu özellikleriyle yüzey kompozitleri alaşımlardan veya tamamıyla kompozit olarak üretilmiş malzemelerden daha iyidir [9].

YMMK üretirken de yine MMK'larda olduğu gibi çeşitli sıvı hal yöntemleri kullanılabilir ve bu yöntemler MMK üretimindeki benzer dezavantajlarla YMMK elde edilmesine sebep olabilmektedir. Uygun maliyetli ve daha az hatalı (süreksizlikli) YMMK elde etme prosesi eğer matris ergime noktasının altında gerçekleştirilirse bahsi geçen problemler ve bunların yapı içindeki sonuçları büyük oranda engellenebilir ve böylece üretilen malzemelerin kullanım ömürlerinin artışı sağlanır [6, 26-29].

3. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA PROSESİ (SKP)

Son dönemde YMMK üretiminde sıvı hal yöntemleri olarak kullanılan lazer ergitme yöntemi, plazma püskürtme ve savurma döküm gibi yöntemler yerini çevreci, enerji tasarruflu, ekonomik, basit, temiz ve çok yönlü bir yüzey modifikasyon tekniği olan sürtünme karıştırma prosesine bırakmaktadır [9, 13, 30]. K. Venkatesvara reddy ve ark. çalışmalarında SKP ile hazırladıkları grafit takviyeli AA6061 yüzey kompozitini başarılı bir şekilde üretmişler ve elde ettikleri kompozitin sıcaklık ve frekansa bağlı sönümlenme özelliğinin geliştiğini belirtmişlerdir [31]. N. Naghshehkish ve ekibi SKP yöntemi ile ince taneli ve mekanik özellikleri geliştirilmiş grafen oksit destekli AA5083 matrisli yüzey kompoziti üretmişlerdir. Grafen oksitin ana metale göre sertliği %49 arttırdığını ve mukavemetini geliştirdiğini belirtmişlerdir [32]. E.B. Moustafa ve ark. SKP yöntemi ile ürettikleri AA7075/SiC-BN hibrit yüzey nanokompozitinde belirgin tane küçülmesi ve takviyelerle birlikte sertlik ve aşınma direncinde artış göz-



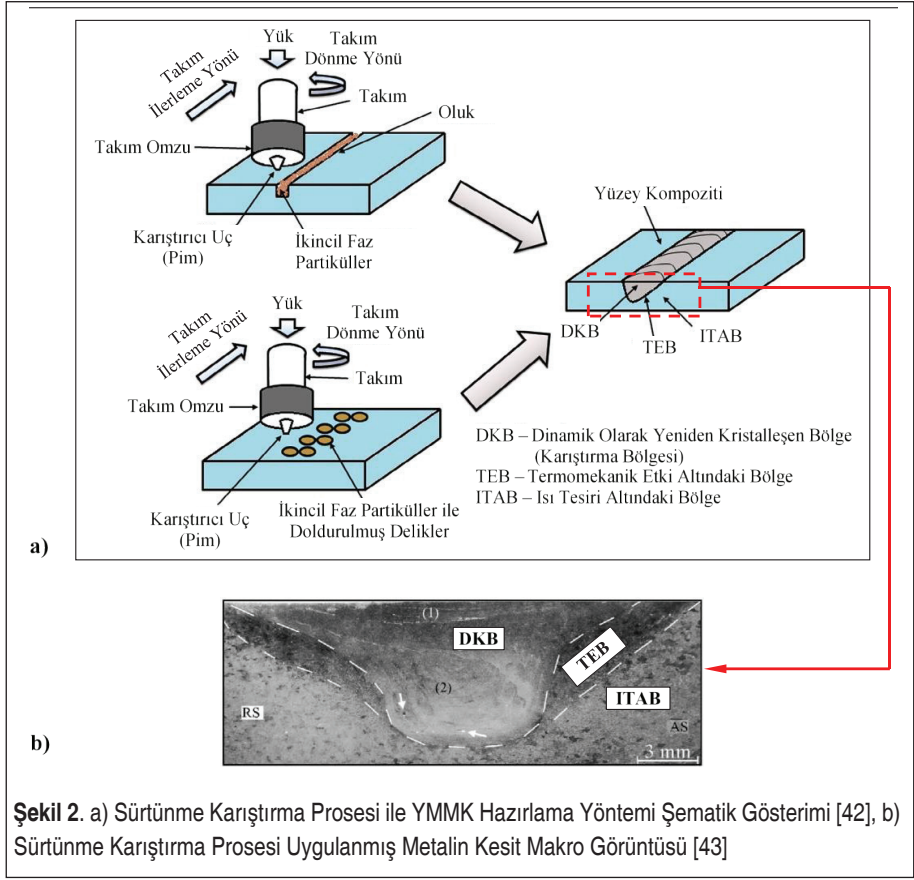
lemlemişlerdir [33]. Barati ve ekibi çalışmalarında SKP ile SiO₂ partikül destekli AA6061 üretirken ana malzemeye uygulanan titreşimin etkilerini araştırmış ve uygulanan titreşimin ana malzemenin mikroyapısını ve mekanik özelliklerini iyileştirmede sadece SKP ile üretilen YMMK'ye göre daha faydalı olduğunu belirtmişlerdir [34].

SKP'de, sürtünme karıştırma kaynağında (SKK) olduğu gibi, karıştırıcı uç (batıcı uç) ve omuz kısmı bulunan dönen bir silindirik takım, gerekli yüzey modifikasyonunu sağlamak amacıyla levhaya daldırılır (Şekil 2(a)). Takım ve levha arasındaki sürtünme malzemenin yumuşaması için gerekli sürtünme ısısının oluşmasını sağlar. Malzemeye daldırılan takımın dönmesi ve aynı zamanda ilerlemesiyle, malzeme "karıştırma" olarak bilinen kompleks malzeme akışına, aşırı plastik deformasyona (eş zamanlı olarak sürtünme, ekstrüzyon ve dövme) ve termal etkiye maruz kalır [9, 30]. Bu haliyle, SKP malzemenin tüm kütesinin özelliklerini etkilemeden sadece uygulandığı lokal bölgede malzemenin sahip olduğu tane yapısı inceltir ve malzeme yoğunluğunu ve homojenliğini arttıran lokal termomekanik metal işleme prosesidir [35]. SKP'nin katı hal yöntemi olmasının getirilerinin yanında, takım tasarımını, işlem parametrelerini ve soğutma/ısıtma durumunu optimize ederek malzemenin mekanik özelliklerini ayarlama ve işlenen bölgenin derinliğini isteğe göre belirleyebilme gibi de avantajları bulunmaktadır [36-38]. SKP sonrasında malzemede oluşan bazı karakteristik bölgeler; dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB) ya da karıştırma bölgesi (KB), termo-mekanik etki altındaki bölge (TEB) ve ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) olarak isimlendirilmiştir (Şekil 2(b)).

SKP, SKK'nin temel prensipleri üzerine kurulmuş ve başlangıçta metalik malzemelerin özellikle mikroyapısal modifikasyonunu gerçekleştirmek ve malzemeye lokal olarak spesifik özellik kazandırmak için ortaya çıkmıştır [9, 30]. SKP her ne kadar temelde tane küçültme yöntemi olarak geliştirilse de daha sonraları katı hal yönteminin yüzey kompozit imalatındaki avantajları ile yaygın halde kullanılan bir uygulama haline gelmiştir [6, 26-29, 31-34].

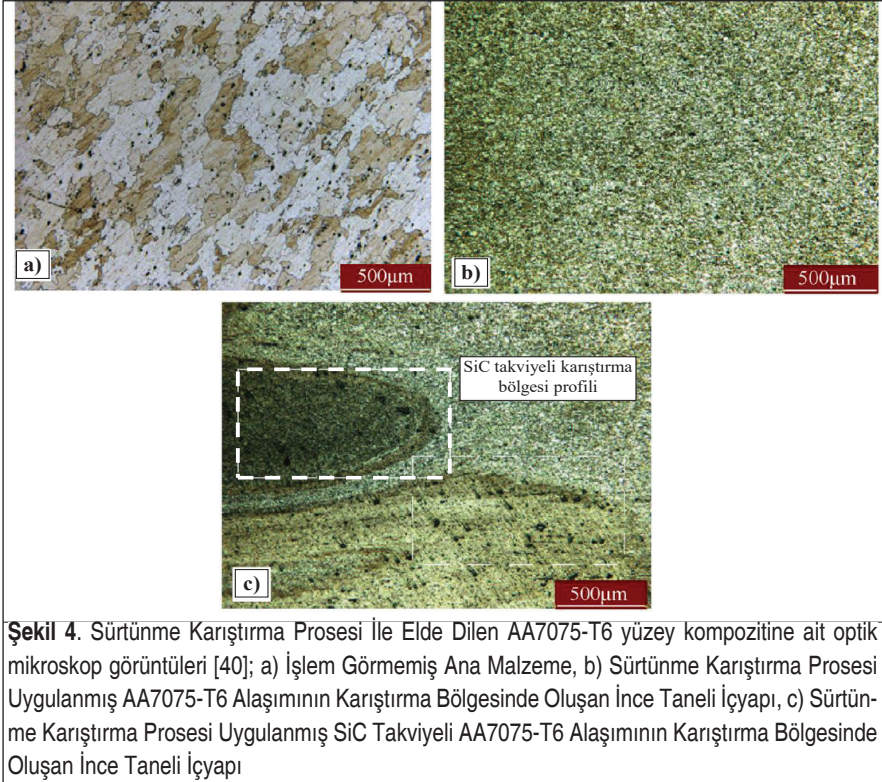
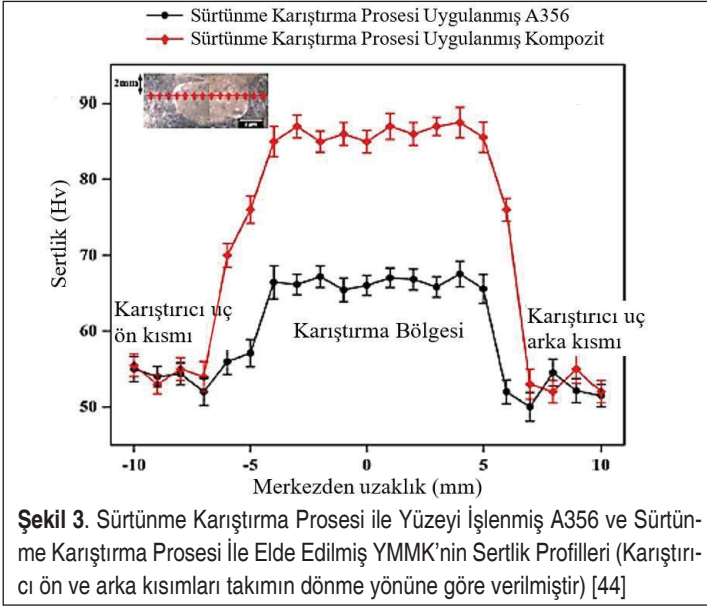
4. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA PROSESİ İLE YÜZEY KOMPOZİTLERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİN GELİŞTİRİLMESİ

Yöntem ile elde edilen YMMK'lerde çeşitli ikincil faz görevi gören sert partiküller (SiC, TiC, BC, BN, Al₂O₃, TiN vb.) kullanılmaktadır. Bu partiküller SKP ile yüzeye karıştırılmadan önce, ana malzeme yüzeyinde belirli derinlik ve genişliklerde oluk ya da delikler açılır. Sert seramik partiküller, uygun oranlarda oluklara/deliklere doldurularak üzerleri karıştırıcı ucu olmayan takım kullanılarak SKP ile kapatılır. Daha sonra, karıştırıcı ucu olan takım kullanılarak yüzey SKP ile işlenir ve sert seramik partiküller ikincil faz olacak şekilde matris malzemesi yüzeyine karıştırılır. Bu seramik partiküller sert yapıları ile yüzeyde önemli ölçüde sertlik artışına sebep olmaktadır (Şekil



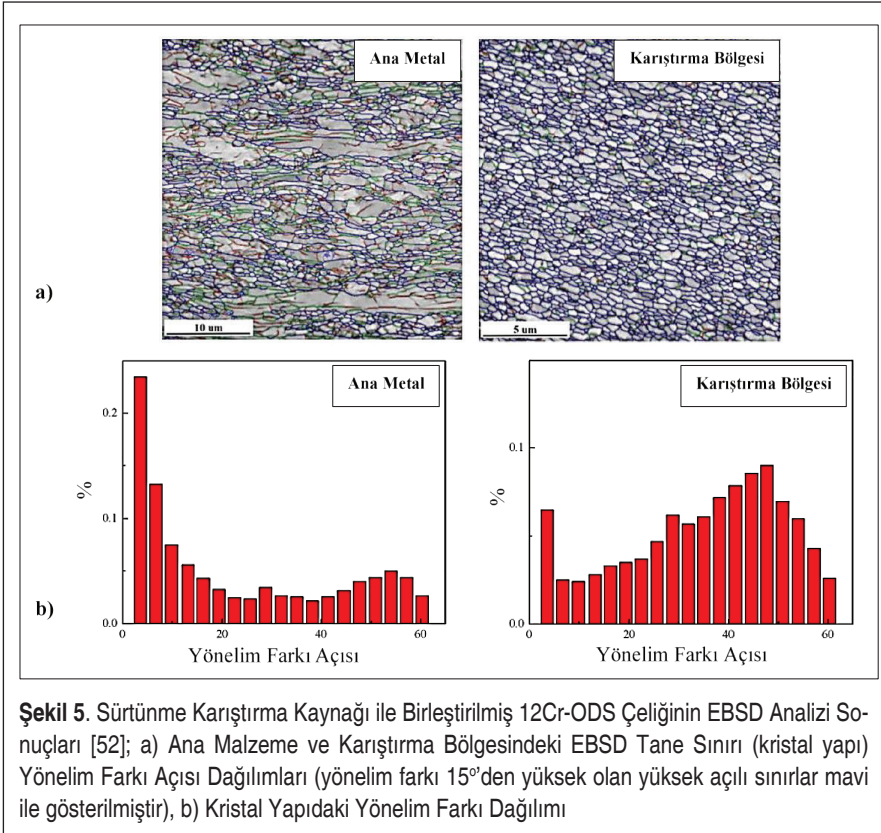
3). Bunun yanında, SKP süresince sert partiküllerin bir kısmı parçalanarak yapıya daha homojen dağılabilmektedir [39, 40]. Bu durum, yöntemle elde edilen partikül destekli YMMK'lerde mukavemet artışı açısından çok büyük avantaj sağlar. Sert partiküllerin yüzeye daha homojen dağılabilmesi için birden fazla paso atılması gerekir [41].

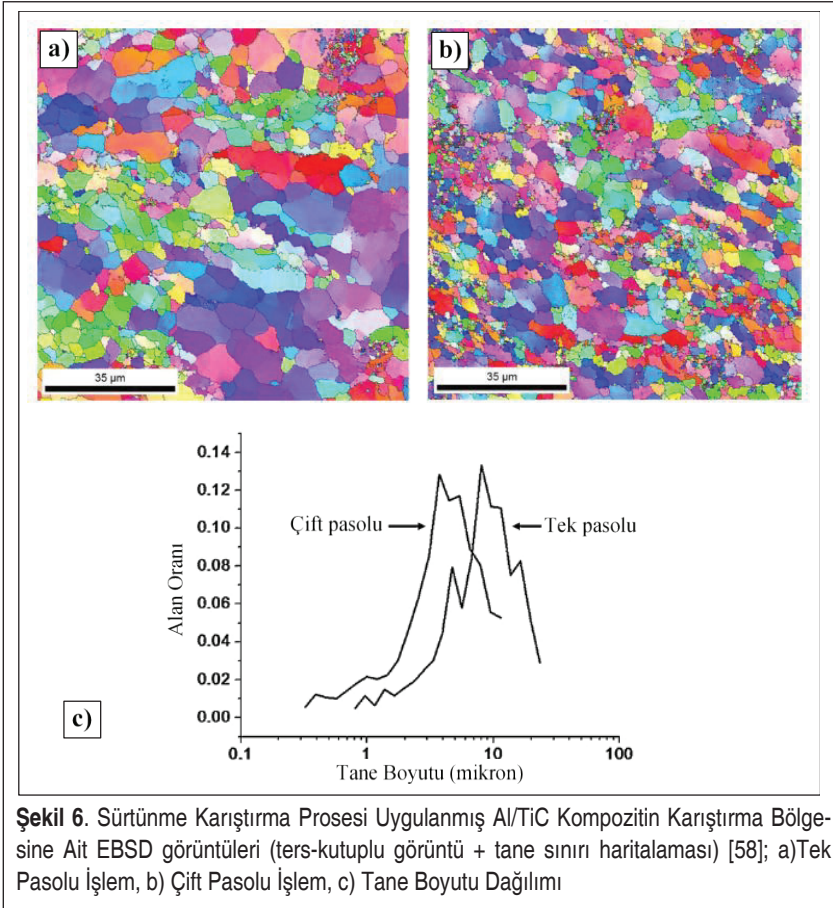
SKP ile YMMK'lerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesindeki tek etken ikincil faz partiküllerinin sahip oldukları yüksek sertlik değildir. Yöntem aynı zamanda kendisine has özellikleriyle de matris malzemesinin mekanik özelliklerini geliştirmektedir [45, 46]. Yöntemde sürtünme sebebiyle oluşan yüksek ısı ve aşırı plastik deformasyon, karıştırma bölgesinde (KB) dinamik rekristalizasyonun oluşmasına neden olur. Dinamik rekristalizasyon bu bölgede tane yüzey enerjisi miktarının artmasına, dolayısıyla tane sınırlarının artmasına sebep olarak yeni tane oluşumunu sağlar. Böylece karıştırma bölgesinde eş eksenli ve ince taneli mikroyapı oluşur [47]. İnce taneli içyapıda dislokasyonlar, hareketlerine doğal engel olan tane sınırlarına iri taneli yapıdaki



hareketlerine göre daha çabuk ulaşırlar ve burada yığılmaya başlarlar. Bu bölgede aynı zamanda SKP etkisiyle gerçekleşen yüksek-açılı tane sınırlarının sayısındaki artışın da kaymanın bir taneden komşu taneye geçmesini, tane sınırları ile birlikte, ekstra zorlaştırarak malzemenin sertliğinin ve akma gerilmesinin artmasını sağlar [40, 48]. Bu durum, SKP'nin karıştırma bölgesinde Hall-Petch ilişkisine bağlı olarak gerçekleştirdiği çoklu mukavemet artış mekanizmalarındandır.

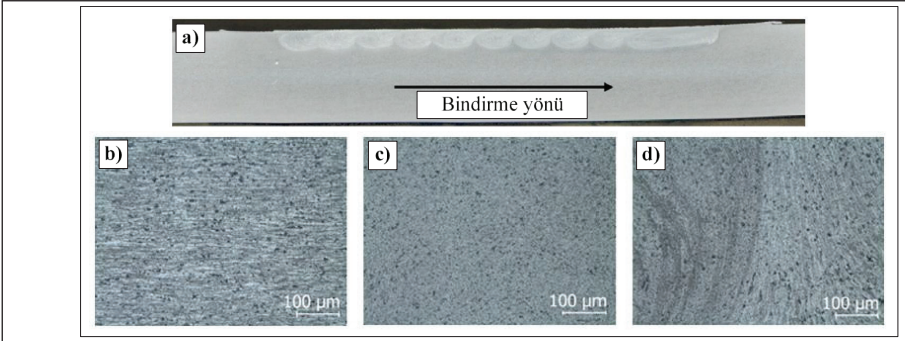
SKP süresince dinamik rekristalizasyona etki eden; termo-mekanik işlem parametreleri (proses parametreleri, karıştırıcı ucun dişli ya da çokgen profile sahip oluşu), malzeme alaşım durumu, malzemenin başlangıç tane boyutu gibi çeşitli faktörler bu bölgede gerçekleşen yeniden tane oluşumuna ve boyutuna doğrudan etki eder [37, 49]. YMMK yapıda bulunan sert ikincil faz partiküller de SKP ile dinamik rekristalizasyona etki eder. SKP sırasında yapıda bulunan sert partiküller homojen olmayan lokal deformasyonlara sebep olarak, tanelerin parçalanmasına ve böylelikle dinamik rekristalizasyon etkinliğinin artmasına sebep olur [40]. Bunun yanında, işlem süresince takım geçişinden sonra gerçekleştirilen ekstra soğutma işlemi de bu bölgeden ısı-



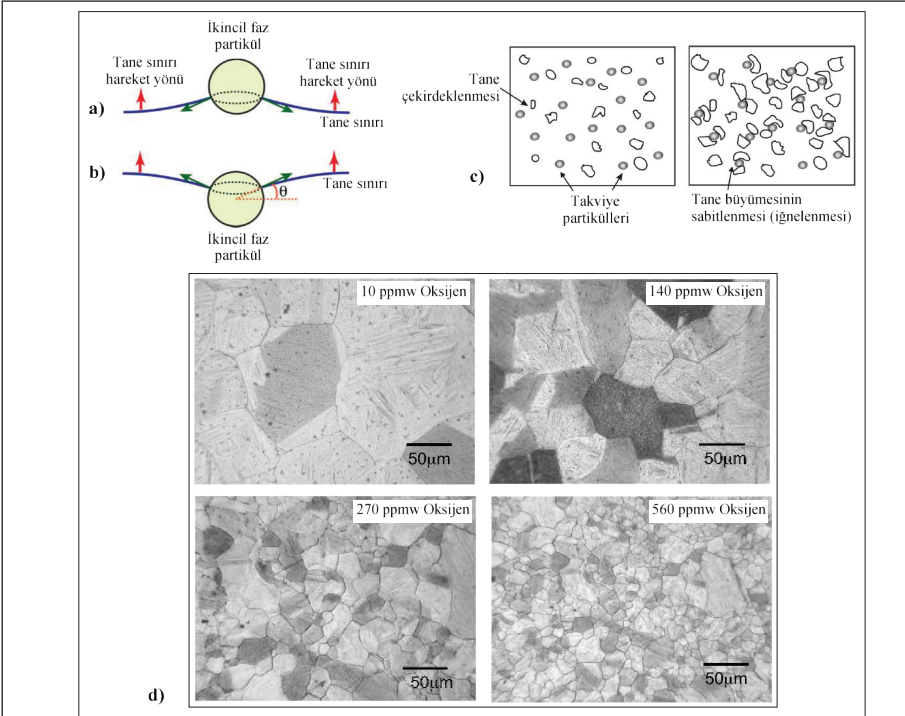


nın hızla uzaklaşmasını sağlamak ve tane büyümesini engelleyerek daha ince taneli yapının elde edilmesine yardımcı olmaktadır [50].

Şekil 4'te H.A. Deore ve ark. [40] SKP ile yüzey kompoziti haline getirdiği AA7075-T6 levhanın ana malzeme ve karıştırma bölgesine ait içyapı görüntüleri verilmiştir. Karıştırma bölgesinde oluşan dinamik rekristalizasyon, tane yüzey enerjisi miktarının artmasına ve bu da tane sınırlarının artmasına sebep olmuştur. Aynı çalışmada, SKP sonrası karıştırma bölgesindeki yüksek-açılı tane sayısının arttığı da tespit edilmiştir [40, 48]. Karıştırma bölgesinde yüksek mekanik kuvvet ve aşırı plastik deformasyon sebebiyle oluşan dislokasyonların alt tane sınırları tarafından absorbe edildiği düşünülmektedir. Bu durum, sürekli-dinamik rekristalizasyonun etkin hale gelmesiyle düşük-açılı tane sınırlarındaki yönelim bozukluğunu (yönelim farkını) artırarak yüksek-açılı tane sınırlarının oluşumunu tetiklemektedir (Şekil 5) [40, 51-53]. Bunun yanında, SKP ile elde edilen ince taneli bölgede malzemenin süperplastik özelliği de



Şekil 7. %50 Bindirme Oranıyla Sürtünme Karıştırma Prosesi Uygulanan AA5083-H111 Plakasının Kesatine Ait Optik Mikroskop Görüntüleri [54]; a) Kesit Makro Görüntüsü, b) Ana Malzeme, c) Homojen Yapı Elde Edilmiş Karıştırma Bölgesi, d) Termo-Mekanik Etki Altındaki Bölge



Şekil 8. Tane Sınırı-Zener Sabitlemesi (iğneleme) İlişkisi Şematik Gösterimleri ve Mikroyapı Görüntüsü; a) Hareket Eden Tane Sınırının İkincil Faz Partikül İle Teması (arayüzeydeki gerilim tane sınırını partiküle doğru çekmektedir) [59], b) Tane Sınırı Hareketine Devam Etmeye Çalışırken Arayüzeydeki Kılcalık Etkisi Tane Sınırını Geriye Çekmektedir [59], c) Takviye Partiküllerinin Tane Büyümesini Sabitlemesinin Şematik Gösterimi [41], d) 1200 °C'ye Isıtılmış Östenitik Çeliğin Yapısında Bulunan Farklı Oranlardaki İnce Oksit Partiküllerinin Östenit Tanelerinin İrileşmelerine Zener Sabitleme (iğneleme) ile Etkileri [60] (ppmw: Kütlece milyonda bir)

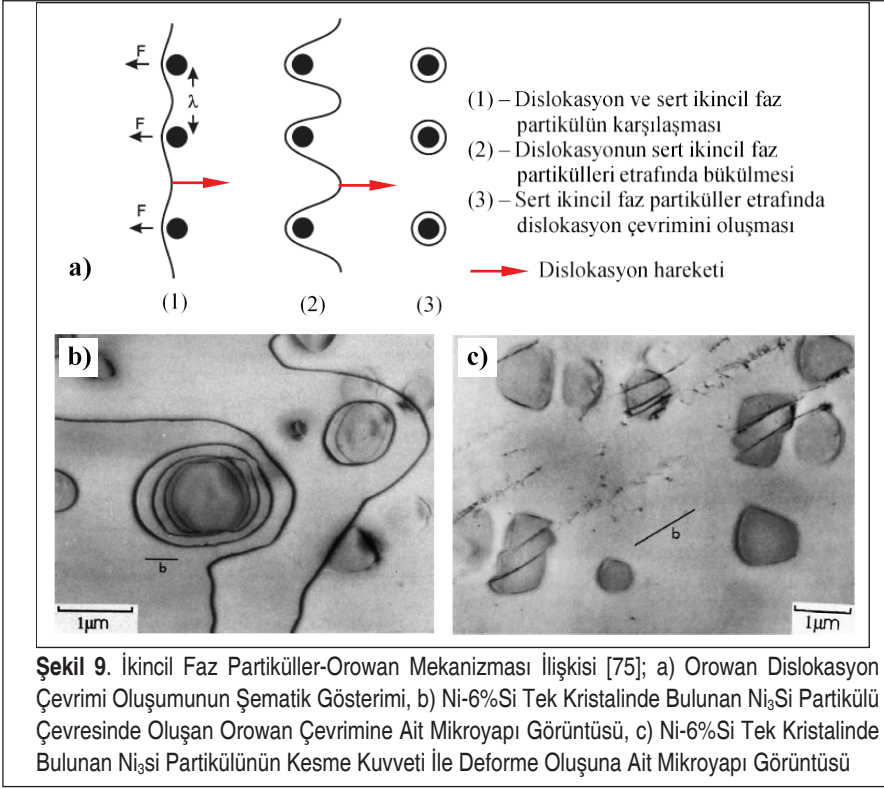


gelişmektedir [46, 54-57]. Bu özelliği geliştirmek ve daha ince taneli iç yapı elde edebilmek için SKP ile çoklu paso (Şekil 6) ya da belirli bir yüzde ile bindirilmiş pasolar (Şekil 7) da uygulanmaktadır [58].

Çok kristalli malzemelerde ince taneli iç yapı elde edilebiliyor olması, malzemelerin sahip olduğu fiziksel ve kimyasal özelliklerin geliştirilmesi ya da ayarlanabilmesi açısından çok büyük öneme sahiptir [61-63]. SKP ile ana malzemenin yüzeyinde lokal olarak tane inceltme işleminin (yöntem parametrelerinin ayarlanması ile) yapılabilir olması, yöntemi diğer YMMK elde etme yöntemlerinin önüne geçmesini sağlamaktadır. İnce taneli malzemenin elde edilebilmesi kadar kullanım sırasında sahip olduğu yapıyı koruması da aynı derecede öneme sahiptir. Sert ikincil faz partiküllerin matris malzemesine yüksek sertlik kazandırması için kullanımının yanında, malzemenin sıcaklık etkisiyle tanelerinin irileşmesini yavaşlatmak veya durdurmak (Zener sabitleme/iğneleme) için de matris içinde kullanılması en efektif yollardan biridir [64].

Rekristalizasyon ve tane büyümesi sırasında tane sınırları hareket eder. Hareket eden tane sınırları ilerledikleri yönde bulunan ve matris malzemesi ile uyumlu olmayan sert ikincil faz partikülleri geçmek için normal ilerleme hareketlerine göre daha çok serbest enerji harcayacaklardır. Tane sınırları ilerleme hareketleri sırasında normalde sert partikülün içinde olması gerekirken, partiküllerin uyguladıkları sabitleme (iğneleme) kuvveti ile sert partikülleri geçemezler (Şekil 8). SKP ile ergime sıcaklığı altında yapıya dağıtılmış ve matris ile arasında reaksiyon olasılığı minimuma indirgenmiş sert ikincil faz partiküller YMMK'lerde bu sabitleme (iğneleme) kuvvetinin uygulanmasında çok etkilidir. İlerleme hareketinin devam edebilmesi için (sert partiküllerin geçilmesi için) yeni tane sınırları oluşmak zorundadır [41, 64-67]. Bu durum enerjik olarak elverişli değildir. Çünkü tane sınırlarının sert partikülleri geçmesi için gerekli ekstra serbest enerji, tane büyümesi için gerekli serbest enerji değişimine eşit ya da ondan büyük ise tane büyümesi gerçekleşmez [67]. Böylelikle matris malzemesi ile uyumsuz sert ikincil faz partiküller tane sınırlarına sabitleme (iğneleme) kuvveti (Zener sabitleme) uygulayarak hareketlerine engel olarak davranır ve tanelerin büyümesini yavaşlatır ya da büyümesine engel olur. Bu şekilde tane büyümesi engellendiğinde özel kritik tane boyutu da elde edilebilmektedir [68-72]. SKP ile sert ikincil faz partiküllerin yüzeyde (özellikle bindirilmiş pasolar ile) homojen dağıtılması ve belirli miktarda parçalanması, yöntem sırasında oluşan ısı nedeniyle tane irileşmesine engel olmaktadır. Böylelikle yöntem, elde edilen YMMK malzemeye Zener sabitleme (iğneleme) yoluyla da ekstra mukavemet artışı sağlamaktadır.

SKP ile YMMK'deki bir diğer mukavemet artırıcı etki de karıştırıcı uç ile matris yapısına dağıtılmış sert ikincil faz partiküllerinin kristal içinde dislokasyon hareketlerine Orowan mekanizmasına göre direnç göstermesiyle gerçekleşir (Şekil 9 (a)-(b)). Matris içindeki sert ikincil faz partiküllerin dislokasyon hareketine etkileri; sertliklerine, matristeki dağılımlarına, şekillerine ve boyutlarına bağlıdır. Eğer takviyeler uygun



boyuta ve yeterli dayanıma sahip değilirse, hareket eden dislokasyon tarafından kesme kuvvetine maruz kaldıklarında kayma düzlemine paralel şekilde parçalanırlar (kesilirler) (Şekil 9 (c)). Ancak hareket halindeki dislokasyonlar matrisle uyumsuz sert ikincil faz partiküller ile karşılaştıklarında, partiküllerin kesilmesinin daha kompleks olmasının da etkisiyle birlikte, kristal içindeki kayma yavaşlayacak ya da duracaktır. Bu şekilde malzemede plastik deformasyon homojen olarak gerçekleşmeyecektir. Dislokasyonların hareketinin takviyelerin etraflarında bükülerek ilerleyebilmesi için daha yüksek kayma gerilmelerine ihtiyaç olacaktır. Böylece SKP ile matris malzemesi yüzeyine karıştırılmış sert ikincil faz partiküller ile birlikte yapıda Orowan mukavemet artışı da sağlanmış olur [73, 74].

5. SONUÇLAR

Çalışmada sürtünme karıştırma prosesi ile üretilen yüzey metal matrisli kompozitlerdeki içyapı ve mekanik özellikleri geliştiren mekanizmalar ve bunların etkileri incelenmiştir. Yöntemde takımın dönme ve ilerleme hareketiyle karıştırma bölgesinde gerçekleştirdiği aşırı plastik deformasyon ve oluşan ısı dinamik rekristalizasyonun



oluşmasını sağlar. Böylelikle bu bölgede ince taneli yapı ve dolayısıyla Hall-Petch ilişkisine bağlı olarak iyi mekanik özellikler elde edilir. SKP ile YMMK imalinde yüzeye eklenen sert ikincil faz partiküller matris yapısında yüzey sertliği, aşınma ve yorulma dirençleri gibi mekanik özellikleri geliştirmektedir. Bu takviye elemanlarının aynı zamanda takımın hareketi ve yöntemde kullanılan paso sayısına bağlı olarak matris yapısına parçalanarak dağıldığı ve böylece YMMK’da Zener sabitlemeye (iğneleme) göre tane büyümesini ve Orowan mekanizmasına uygun olarak da dislokasyon hareketlerine engel olduğu gözlemlenmiştir.

KAYNAKÇA

1. **Chawla, N., Chawla, K. K.** 2006. *Metal Matrix Composites*, ISBN-13: 9780387233062, Springer Science & Business Media, United States of America.
2. **Kalemtaş, A.** 2014. “Metal Matrisli Kompozitlere Genel Bir Bakış,” *Putech&Composites*, Ekim-Kasım-Aralık sayısı, s.18-30.
3. **Gürbüz, M., Mutuk, T.** 2019. “Karbon Esaslı Malzeme Takviyeli Titanyum Kompozitler ve Grafen Üzerine Yeni Eğilimler,” *Mühendis ve Makina*, vol. 60, no. 695, p. 101-118.
4. **Nturanabo, F., Masu, L., Kirabira, J.B.** 2020. “Novel Applications of Aluminium Metal Matrix Composites,” - *Aluminium Alloys and Composites*, ed. Cooke, K., ISBN: 978-1-78984-514-3, IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.81519
5. **Kainer, K.U.** 2006. *Metal Matrix Composites: Custom-made Materials for Automotive and Aerospace Engineering*, ISBN-13: 978-3-527-31360-0, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
6. **Sharifitabar, M., Sarani, A., Khorshahian, S., Afarani, M. S.** 2011. “Fabrication of 5052Al/Al₂O₃ Nanoceramic Particle Reinforced Composite via Friction Stir Processing Route,” *Materials and Design*, vol. 32, no. 8-9, p. 4164–4172. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.04.048>
7. **Cavaliere, P.** 2005. “Mechanical Properties of Friction Stir Processed 2618/Al₂O₃/20p Metal Matrix Composite,” *Composites: Part A*, vol. 36, no. 12, p. 1657–1665. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.03.016>
8. **Gülcan, O., Tekkanat, K., Çetinkaya, B.** 2019. “Fiber Metal Laminatlar ve Uçak Sanyiiinde Kullanımı Üzerine Bir İnceleme,” *Mühendis ve Makina*, vol. 60, no. 697, p. 262-288.
9. **Gangil, N., Maheshwari, S., Siddiquee, A.N., Abidi, M.H., El-Meligy, M.A., Mohammed, J.A.** 2019. “Investigation on Friction Stir Welding of Hybrid Composites Fabricated on Al–Zn–Mg–Cu Alloy Through Friction Stir Processing,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 5, p. 3733-3740. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.033>

10. **Mavhungu, S.T., Akinlabi, E.T., Onitiri, M.A., Varachia, F.M.** 2017. "Aluminum Matrix Composites for Industrial Use: Advances and Trends," *Procedia Manufacturing*, vol. 7, p. 178-182. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.045>
11. **Şenel, M. C., Gürbüz, M., Koç, E.** 2018. "Toz Metalürjisi Metoduyla Üretilen Al-Si₃N₄ Metal Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi," *Mühendis ve Makina*, vol. 59, no. 693, p. 33-46.
12. **Kraiklang, R., Onwong, J., Santhaweesuk, C.** 2020. "Multi-Performance Characteristics of AA5052 + 10% SiC Surface Composite by Friction Stir Processing," *Journal of Composites Science*, vol. 4, no. 2. <https://doi.org/10.3390/jcs4020036>
13. **Gangil, N., Siddiquee; A.N., Maheshwari, S.** 2017. "Aluminium Based In-Situ Composite Fabrication Through Friction Stir Processing: A Review," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 715, p. 91-104. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.04.309>
14. **Ye, H.Z., Liu, X.Y.** 2004. "Review of Recent Studies in Magnesium Matrix Composites," *Journal of Materials Science*, vol. 39, p. 6153-6171. <https://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000043583.47148.31>
15. **Gutman, E.M., Unigovski, Y., Levkovitch, M., Koren, Z.** 1998. "Influence of Porosity and Casting Conditions on Creep of Die-Cast Mg Alloy," *Journal of Materials Science Letters*, vol. 17, p.1787-1789. <https://doi.org/10.1023/A:1006601419020>
16. **Abbas, A., Rajagopal, V., Huang, S.-J.** 2021. "Magnesium Metal Matrix Composites and Their Applications," - *Magnesium Alloys*, ed. Tański, T.A. & Jarka, P., IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.96241
17. **Calin, R., Pul, M., Pehlivanli, Z.O.** 2012. "The Effect of Reinforcement Volume Ratio on Porosity and Thermal Conductivity in Al-MgO Composites," *Materials Research*. vol.15, no. 6, p. 1057-1063. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392012005000131>
18. **Iqbal, A. K. M. A., Arai, Y., Araki, W.** 2013. "Effect of Reinforcement Clustering on Crack Initiation Mechanism in a Cast Hybrid Metal Matrix Composite During Low Cycle Fatigue," *Open Journal of Composite Materials*, vol. 3, no. 4, p. 97-106. DOI: 10.4236/ojcm.2013.34010
19. **Li, Y.Z., Wang, Q.Z., Wang, W.G., Xiao, B.L., Ma, Z.Y.** 2015. "Interfacial Reaction Mechanism Between Matrix and Reinforcement in B₄C/6061Al Composites," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 154, p. 107-117. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.01.052>
20. **Rajan, T. P. D., Pillai, R. M., Pai, B. C.** 1998. "Review Reinforcement Coatings and Interfaces in Aluminium Metal Matrix Composites," *Journal of Materials Science*, vol. 33, p. 3491-3503. <https://doi.org/10.1023/A:1004674822751>
21. **Davidson, D. L.** 1991. "The Effect of Particulate SiC on Fatigue Crack Growth in a Cast-Extruded Aluminum Alloy Composite," *Metallurgical Transactions A*, vol. 22, p. 97-112. <https://doi.org/10.1007/BF03350952>



22. **Garcia, R., Lopez, V. H., Kennedy, A. R., Arias G.** 2007. "Welding of Al-359/20%SiCp Metal Matrix Composites by The Novel MIG Process with Indirect Electric Arc (IEA)," *Journal of Materials Science*, vol. 42, p. 7794–7800. DOI:10.1007/s10853-007-1632-8
23. **Attia, A.N.** 2001. "Surface Metal Matrix Composites," *Materials and Design*, vol. 22, no. 6, p. 451-457. [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(00\)00081-9](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(00)00081-9)
24. **Sunil, B. R.** 2015. "Developing Surface Metal Matrix Composites: A Comparative Survey," *International Journal of Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 4, no. 3, p. 9-16. DOI: 10.14810/ijamse.2015.4302
25. **Huang, Y., Wang, T., Guo, W., Wan, L., Lv, S.** 2014. "Microstructure and Surface Mechanical Property of AZ31 Mg/SiCp Surface Composite Fabricated by Direct Friction Stir Processing," *Materials and Design*, vol. 59, p. 274–278. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.067>
26. **Liu, H., Fujii, H., Maeda, M., Nogi, K.** 2003. "Tensile properties and fracture locations of friction-stir welded joints of 6061-T6 aluminum alloy," *Journal of Materials Science Letters*, vol. 22, p. 1061–1063. <https://doi.org/10.1023/A:1024970421082>
27. **Oh-Ishi, K., McNelley, T. R.** 2004. "Microstructural Modification of As-Cast NiAl Bronze By Friction Stir Processing," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 35, p. 2951–2961. <https://doi.org/10.1007/s11661-004-0242-1>
28. **Su, J.-Q., Nelson, T. W., Sterling, C. J.** 2005. "Friction Stir Processing of Large-Area Bulk UFG Aluminum Alloys," *Scripta Materialia*, vol. 52, p. 135–140. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.09.014>
29. **Hofmann, D. C., Vecchio, K. S.** 2005. "Submerged Friction Stir Processing (SFSP): An Improved Method for Creating Ultra-Fine-Grained Bulk Materials," *Materials Science and Engineering A*, vol. 402, no. 1-2, p. 234–241. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.04.032>
30. **Mishra, R. S., Mahoney, M. W.** 2007. "Friction Stir Processing," - Friction Stir Welding and Processing, ed. Mishra, R.S. & Mahoney, M.W., ISBN-13: 978-0-87170-848-9, ASM International, United States of America.
31. **Reddy, K. V., Naik, R. B., Rao, G. R., Reddy, G. M., Kumar, R. A.** 2020. "Microstructure and Damping Capacity of AA6061/Graphite Surface Composites Produced Through Friction Stir Processing," *Composites Communications* vol. 20. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.04.018>
32. **Naghshehkeh, N., Mousavi, S. E., Karimzadeh, F., Ashrafi, A., Nosko, M., Trembošová, V., Sadeghi, B.** 2019. "Effect of Graphene Oxide and Friction Stir Processing on Microstructure and Mechanical Properties of Al5083 Matrix Composite," *Materials Research Express*, vol. 6, no. 10. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab3a6f>
33. **Moustafa, E. B., Melaibari, A., Basha, M.** 2020. "Wear and Microhardness Behaviors of AA7075/SiC-BN Hybrid Nanocomposite Surfaces Fabricated by Friction Stir Proces-

- sing,” *Ceramics International*, vol. 46, no. 10, p. 16938-16943. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.03.274>
34. **Barati, M., Abbasi, M., Abedini, M.** 2019. “The Effects of Friction Stir Processing and Friction Stir Vibration Processing on Mechanical, Wear and Corrosion Characteristics of Al6061/SiO₂ Surface Composite,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 45, p. 491–497. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.07.034>
 35. **El-Danaf, E. A., El-Rayes, M. M., Soliman, M. S.** 2011. “Low Temperature Enhanced Ductility of Friction Stir Processed 5083 Aluminum Alloy,” *Bulletin of Materials Science*, vol. 34, no. 7, p.1447–1453. <https://doi.org/10.1007/s12034-011-0341-8>
 36. **Kurt, A., Uygur, I. Cete, E.** 2011. “Surface Modification of Aluminium by Friction Stir Processing,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 211, p. 313–317. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.09.020>
 37. **Ma, Z.Y.** 2008. “Friction Stir Processing Technology: A Review,” *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 39, p. 642–658. <https://doi.org/10.1007/s11661-007-9459-0>
 38. **Xue, P., Xiao, B. L., Wang, W. G., Zhang, Q., Wang, D., Wang, Q. Z., Ma, Z. Y.** 2013. “Achieving Ultrafine Dual-Phase Structure with Superior Mechanical Property in Friction Stir Processed Plain Low Carbon Steel,” *Materials Science & Engineering A*, vol. 575, p. 30–34. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.03.033>
 39. **Ghasemi-Kahrizangi, A., Kashani-Bozorg, S. F.** 2012. “Microstructure and Mechanical Properties of Steel/TiC Nano-Composite Surface Layer Produced by Friction Stir Processing,” *Surface & Coatings Technology*, vol. 209, p. 15–22. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.08.005>
 40. **Deore, H. A., Bhardwaj, A., Rao, A. G., Mishra, J., Hiwarkar, V. D.** 2020. “Consequence of Reinforced SiC Particles and Post Process Artificial Ageing on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Processed AA7075,” *Defence Technology*, vol. 16, no. 5, p. 1039-1050. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.12.001>
 41. **Sharma, V., Prakash, U., Kumar, B. V. M.** 2015. “Surface Composites by Friction Stir Processing: A review,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 224, p. 117–134. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.04.019>
 42. **Sunil, B. R., Reddy, G. P. K., Patle, H., Dumpala, R.** 2016. “Magnesium Based Surface Metal Matrix Composites by Friction Stir Processing,” *Journal of Magnesium and Alloys*, vol. 4, no. 1, p. 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2016.02.001>
 43. **Zykova, A. P., Tarasov, S. Y., Chumaevskiy, A. V., Kolubaev, E. A.** 2020. “A Review of Friction Stir Processing of Structural Metallic Materials: Process, Properties, and Methods,” *Metals*, vol. 10, no. 6. <https://doi.org/10.3390/met10060772>
 44. **Kumar, H., Prasad, R., Kumar, P., Tewari, S.P., Singh, J. K.** 2020. “Mechanical and Tribological Characterization of Industrial Wastes Reinforced Aluminum Alloy Composites Fabricated via Friction Stir Processing,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 831. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154832>



45. **Dolatkhah, A., Golbabaei, P., Givi, M. K. B., Molaiekiya, F.** 2012. "Investigating Effects of Process Parameters on Microstructural and Mechanical Properties of Al5052/SiC Metal Matrix Composite Fabricated via Friction Stir Processing," *Materials and Design*, vol. 37, p. 458–464. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.035>
46. **Dhayan, R., Kalaiselvan, K., Sathiskumar, R.** 2014. "Characterization of AA6063/SiC-Gr Surface Composites Produced by FSP Technique," *Procedia Engineering*, vol. 97, p. 625 – 631. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.291>
47. **Mirshakari, B., Zarei-Hanzaki, A., Barabi, A., Abedi, H. R., Lee, S. J., Fujii, H.** 2021. "An Anomalous Effect of Grain Refinement on Yield Stress in Friction Stir Processed Lightweight Steel," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 799. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140057>
48. **Su, J.-Q., Nelson, T. W., Mishra, R., Mahoney, M.** 2003. "Microstructural Investigation of Friction Stir Welded 7050-T651 Aluminium," *Acta Materialia*, vol. 51, no. 3, p. 713-729. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(02\)00449-4](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(02)00449-4)
49. **Huang, K., Logé, R.E.** 2016. "A Review of Dynamic Recrystallization Phenomena in Metallic Materials," *Materials and Design*, vol. 111, p. 548–574. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.09.012>
50. **Su, J.-Q., Nelson, T. W., Sterling, C. J.** 2003. "A New Route to Bulk Nanocrystalline Materials" *Journal of Materials Research*, vol. 18, p.1757–1760. <https://doi.org/10.1557/JMR.2003.0243>
51. **Yadav, D., Bauri, R.** 2012. "Effect of Friction Stir Processing on Microstructure and Mechanical Properties of Aluminium," *Materials Science and Engineering A*, vol. 539, p. 85–92. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.01.055>
52. **Wu, Q., Li, M., Guo, Y., Shan, J., Wang, H., Chang, Y.** 2020. "Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Friction Stir Welded 12Cr-ODS Steel," *Nuclear Materials and Energy*, vol. 25. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2020.100804>
53. **Han, W., Liu, P., Yi, X., Zhan, Q., Wan, F., Yabuuchi, K., Serizawa, H., Kimura, A.** 2018. "Impact of Friction Stir Welding on Recrystallization of Oxide Dispersion Strengthened Ferritic Steel," *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 34, p. 209–213. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2017.11.032>
54. **Gandra, J., Miranda, R. M., Vilaça, P.** 2011. "Effect of Overlapping Direction in Multipass Friction Stir Processing," *Materials Science and Engineering A*, vol. 528, p. 5592–5599. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.03.105>
55. **Pradeep, S., Pancholi, V.** 2013. "Effect of Microstructural in Homogeneity on Superplastic Behaviour of Multipass Friction Stir Processed Aluminium Alloy," *Materials Science & Engineering A*, vol. 561, p. 78–87. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.10.050>
56. **Harwani, D., Badheka, V., Patel, V., Li, W., Andersson, J.** 2021. "Developing superplasticity in magnesium alloys with the help of friction stir processing and its variants – A

- review,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 12, p. 2055-2075. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.115>
57. **Sabbaghian, M., Mahmudi, R.** 2021. “Superplasticity of The Fine-Grained Friction Stir Processed Mg–3Gd–1Zn Sheets,” *Materials Characterization*, vol. 172. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.110902>
 58. **Bauri, R., Yadav, D., Suhas, G.** 2011. “Effect of Friction Stir Processing (FSP) on Microstructure and Properties of Al–TiC in Situ Composite,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 528, p. 4732–4739. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.02.085>
 59. **Koju, R. K., Darling, K. A., Kecskes, L. J., Mishin, Y.** 2016. “Zener Pinning of Grain Boundaries and Structural Stability of Immiscible Alloys,” *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)*, vol. 68, no. 6, p. 1596–1604. <https://doi.org/10.1007/s11837-016-1899-9>
 60. **Terahsima, S., Bhadeshia, H. K. D. H.** 2005. “Grain Growth: Zener Pinning of Grain Boundaries by Oxide Particles,” <https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2005/Zener/23/04/2021>.
 61. **Wu, Y.** 2015. “Effect of Second Phase Particles on Grain Growth for Nanocrystalline AZ31 Mg Alloy by Phase Field Methods,” *International Conference on Energy, Materials and Manufacturing Engineering (EMME 2015)*, 15-16 October 2015, Kuala Lumpur/Malaysia. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20152502006>
 62. **Ali, Y., Qiu, D., Jiang, B., Pan, F., Zhang, M.-X.** 2015. “Current Research Progress in Grain Refinement of Cast Magnesium Alloys: A Review Article,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 619, p. 639–651. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.09.061>
 63. **Svyetlichnyy, D. S.** 2013. “Modeling of Grain Refinement by Cellular Automata,” *Computational Materials Science*, vol. 77, p. 408–416. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2013.04.065>
 64. **Chang, K., Feng, W., Chen, L.-Q.** 2009. “Effect of Second-Phase Particle Morphology on Grain Growth Kinetics,” *Acta Materialia*, vol. 57, p. 5229–5236. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.07.025>
 65. **Bhadeshia, H. K. D. H.** 2015. *Bainite in Steels*, ISBN: 978-1-909662-74-2, W. S. Maney & Son Ltd, UK.
 66. **Guo, L., Roelofs, H., Lembke, M. I., Bhadeshia, H. K. D. H.** 2016. “Effect of Manganese Sulphide Particle Shape on The Pinning of Grain Boundary,” *Materials Science and Technology*, vol. 33, no. 8, p. 1013-1018. <https://doi.org/10.1080/02670836.2016.1258157>
 67. **Rios, P. R., Fonseca, G. S.** 2010. “Grain Boundary Pinning by Particles,” *Materials Science Forum*, vol. 638-642, p. 3907-3912. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.638-642.3907>
 68. **Du, L., Yang, S., Zhang, P., Du, H.** 2018. “Pinning Effect of Different Shape Second-



Phase Particles on Grain Growth in Polycrystalline: Numerical and Analytical Investigations,” *Composite Interfaces*, vol. 25, no. 4, p. 357–368. <https://doi.org/10.1080/09276440.2018.1439625>

69. **Liu, Q., Cui, X., Zhang, C., Huang, S.** 2016. “Experimental Investigation of Suspended Particles Transport Through Porous Media: Particle and Grain Size Effect,” *Environmental Technology*, vol. 37, no. 7, p. 854–864. DOI: 10.1080/09593330.2015.1088578
70. **Novikov, V. Y.** 2016. “Grain Growth Jointly Affected by Immobile and Mobile Particles,” *Materials Letters*, vol. 178, p. 276–279. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.05.017>
71. **Quested, T. E., Greer, A. L.** 2004. “The Effect of The Size Distribution of Inoculant Particles on As-Cast Grain Size in Aluminium Alloys,” *Acta Materialia*, vol. 52, p. 3859–3868. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2004.04.035>
72. **Fu, H. M., Zhang, M.-X., Qiu, D., Kelly, P. M., Taylor, J. A.** 2009. “Grain Refinement by AlN Particles in Mg–Al Based Alloys,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 478, p. 809–812. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.12.029>
73. **Zhang, Z., Chen, D. L.** 2006. “Consideration of Orowan Strengthening Effect in Particulate-Reinforced Metal Matrix Nanocomposites: A Model for Predicting Their Yield Strength,” *Scripta Materialia*, vol. 54, p. 1321–1326. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2005.12.017>
74. **Matsukawa, Y.** 2019. “Crystallography of Precipitates in Metals and Alloys: (2) Impact of Crystallography on Precipitation Hardening” - *Crystallography*, ed. Akitsu, T., ISBN: 978-1-83881-879-1, IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.78499
75. **Humphreys, F. J., Hatherly, M.** 2004. *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*, ISBN: 0 08 044164 5, Elsevier Ltd.

Farklı Saçak Tiplerine Sahip Yarı Küresel Çatılar Üzerinde Basınç Dağılımlarının İncelenmesi

Tekmile Cürebal¹, Aleyna Ağırman Kalca^{2*}, Yücel Özmen³

ÖZ

Bu çalışmada, silindirik binaların yarı küresel geometrideki çatıları etrafındaki akış alanları, normal ve yelkırık saçak şeklinde iki farklı saçak tipi için deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmanın deneysel kısmında, rüzgâr tüneline yerleştirilen bina modellerinin çatı yüzeylerinde ortalama basınç dağılımları elde edilmiş ve modeller etrafında akış görüntüleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sayısal kısımda ise, bina modelleri etrafındaki akış alanları SST k- ω türbülans modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Sayısal çalışmadan elde edilen basınç dağılımlarının deneysel çalışmadan elde edilen basınç dağılımlarıyla uyumlu olduğu ve saçak tipindeki değişimin, basınç dağılımlarında belirgin bir değişime yol açmadığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Silindirik bina, yarı küresel çatı, saçak, basınç dağılımı

Investigation of Pressure Distributions on Hemispherical Roofs With Different Eave Types

ABSTRACT

In this study, the flow fields around cylindrical buildings with hemispherical roof geometry have been analyzed experimentally and numerically for two different eaves types (normal and pitched eaves). In the experimental part of the study, the mean pressure distributions on the roof surfaces of the building models placed in the wind tunnel were obtained and flow visualization studies were carried out around the models. In the numerical part, the flow fields around the building models were calculated using the SST k- ω turbulence model. It was observed that the pressure distributions obtained from the numerical study were compatible with the pressure distributions obtained in the experimental study, and the change in the eave type did not cause an important change in the pressure distributions.

Keywords: Cylindrical building, hemispherical roof, eave, pressure distribution

* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 24.05.2021

Kabul/Accepted : 29.07.2021

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Trabzon, tekmilecurebal@ktu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9156-5917

² Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Trabzon, aleynaagirman@ktu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1147-141X

³ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Trabzon, yozmen@ktu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1127-1060



EXTENDED ABSTRACT

Introduction/ Background

Nowadays, cylindrical structures are commonly used in various architectural applications such as tall buildings, cylindrical tanks, stadiums sports halls and hangars. The effects of wind on these structures are closely related to building roof geometries. The geometric difference in the roof and eaves of the cylindrical structures have an impact on the pressure distribution on the roof surfaces. For this reason, the evaluation of the flow fields around cylindrical buildings with different roof and eave geometries has an important effect on wind engineering applications.

Objectives/ Research Purpose

In this study, it is planned to comprehensively examine the wind loads on the roof surfaces of two cylindrical building models with hemispherical geometric roofs for two different types of eaves in the form of normal and pitched eaves. Within the scope of the study, it is purposed to obtain experimentally and numerically the mean pressure distributions on the roof surfaces of the building models and the flow fields around the model.

Methods/ Methodology

The experimental study is carried out in an open circuit wind tunnel with a cross section of 457 mm (H) x 457 mm (W) x 2450 mm (L). To simulate atmospheric boundary layer, by using barrier, roughness elements and vortex generators at the entrance of the test section, a 150 mm thickness turbulent boundary layer is obtained at a free flow rate of 15 m/s. Visualization of flow structures around building models is carried out using a smoke wire technique. The pressure measurement system consists of the signal conditioner module of the TSI IFA-100 System Intelligent Flow Analyzer, Setra 239 Model Pressure Gauge, A / D converter, a package program and a computer that perform data analysis. Pressure signals are taken at sampling rate of 1000 Hz and measurement time of 16 s and filtered at 300 Hz. The dimensions of cylindrical part of the models are H=150 mm, D=100 mm. The eave length and the pitched eave angle are taken into account as S = 10 mm and $\alpha = 45^\circ$, respectively. In the study, the blockage ratio expressed as the ratio of the model surface area to the test zone cross-sectional area is calculated to be approximately 4.45%. In the numerical part, the finite volume method is used to discretization of conservation equations and it is solved by using the ANSYS Fluent 18.0 package program. The flow fields around the building models are calculated using the SST k- ω turbulence model, which gives very successful results in boundary layer flows with strong reverse pressure gradients.

Results/Findings

As can be seen in the figure, the difference in eave type does not create a important difference in the flow fields. Incoming flow to the building model follows the roof surfaces, separates from the peaks of the roofs and creates reverse flow regions behind the models. Depending on the reverse flow regions formed the leeward edge of the model, the mixing layer descends. Moreover, the pressure coefficients on the leading edge exposed to the wind is positive. Due to flow separated from the peak of the roof, negative pressure fields occur on the large part of roof surface.

Discussion and Conclusions

It is observed that the pressure distributions obtained from the numerical study are compatible with the pressure distributions obtained in the experimental study, and the change in the eave type does not cause a significant difference in the pressure distributions. Because of flow separated from the peak of the hemispherical roofs, critical negative pressures occur in these regions. The more critical negative pressures are obtained around $x / L = 0.4$ and are progressively reduced in the leeward side of the roofs. It is seen that the pressure coefficients which in the eave region directly exposed to the incoming flow are positive and the negative pressure coefficients occur as the wind angle increases. The most critical negative pressure values are obtained at $\theta=90^\circ$ because of flow separation. It is also noted that the pressure distributions are symmetrical as from the position of $\theta = 180^\circ$.



1. GİRİŞ

Günümüzde, yüksek yapılar, stadyumlar, spor salonları ve hangarlar gibi birçok mimari uygulamada, silindirik formda binalarla karşılaşmaktadır. Geleneksel bina çeşitliliğinden farklı olan silindirik binaların çatıları da, ilgi çekici mimari şekilleri nedeniyle farklı geometrilerde inşa edilmektedir. Silindirik binaların çatılarındaki ve saçaklarındaki geometrik farklılık, çatı yüzeylerindeki basınç dağılımlarını oldukça etkilemektedir. Bu durum, farklı çatı ve saçak geometrilerine sahip silindirik binalar etrafındaki akış alanlarının incelenmesi ihtiyacını ortaya koymaktadır.

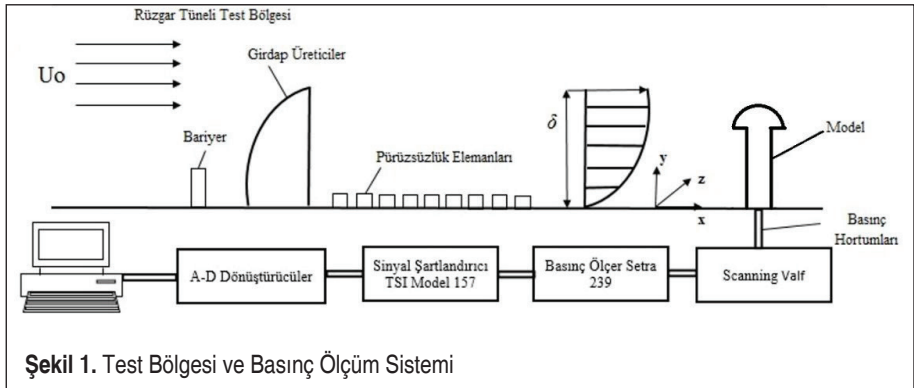
Literatürde düz, konik veya yarı küresel geometrilerde çatılara sahip silindirik binaların etrafındaki akış alanlarının incelenmesine yönelik deneysel ve sayısal çalışmalar mevcuttur. Sabransky ve Melbourne [1], tahıl depolama silolarının dairesel silindirik duvarları ve konik çatıları üzerindeki basınç dağılımlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Portela ve Godoy [2], konik çatılı silindirik bir çelik tankın çatısı üzerindeki basınç dağılımlarını deneysel olarak inceledikleri çalışmalarında, konik çatının orta kısmındaki basıncın arttığını belirtmişlerdir. Portela ve Godoy [3], kubbe çatılı silindirik çelik tanklar üzerindeki basınç dağılımlarını deneysel ve sayısal olarak inceledikleri çalışmalarında, silindirik gövde ile çatı arasındaki geometrik geçişin akış ayrılmasını önemli ölçüde değiştirdiğini ortaya koymuşlardır. Afgan vd. [4], farklı en-boy oranlarına sahip silindirik bir bina etrafındaki akış yapısını sayısal olarak araştırmışlardır. Uematsu vd. [5], dairesel düz çatılara etki eden basınç dağılımlarını deneysel olarak incelemişler ve tasarım rüzgâr yükünün rüzgâr etkisi faktörü yaklaşımı kullanarak tahmin edilebileceğini belirtmişlerdir. Tavakol vd. [6], yarım küre etrafındaki ortalama akış hızlarını ve türbülans seviyelerini deneysel ve sayısal olarak belirlemişler ve yarım küre etrafındaki akışın hızlandığını ve türbülans yoğunluğunun yükseklikle değiştiğini gözlemişlerdir. Cheng ve Fu [7], yarım küre şeklindeki kubbenin aerodinamik özellikleri üzerinde Reynolds sayısının etkisini incelemek amacıyla rüzgâr tüneline basınç ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Tsutsui [8], farklı en-boy oranlarına sahip silindirik yapıların yüzeylerindeki basınç dağılımlarını deneysel olarak incelemiştir. Özmen [9], düz çatıya sahip silindirik bir bina modelinde çatı kenarı boyunca yerleştirilen farklı yüksekliklere sahip parapetlerin basınç dağılımları üzerindeki etkisini deneysel olarak araştırmıştır. Sumner vd. [10], silindirik bir bina modelinde, en-boy oranı değişiminin model etrafındaki akış yapısı üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. En-boy oranının azalmasıyla model arkasındaki ters akış bölgesinin büyüklüğünün arttığını belirtmişlerdir. Özmen ve Aksu [11], düz, konik ve yarı küresel şeklinde üç farklı çatıya sahip silindirik binaların yüzeylerindeki basınç dağılımlarını deneysel ve sayısal olarak incelemişler ve en kritik basınç değerlerinin yarı küresel çatının yüzeyinde oluştuğunu belirtmişlerdir. Beitel vd. [12], silindirik bir bina modelinde en-boy oranı değişiminin, aerodinamik kuvvetler ve bükülme momenti üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Beitel vd. [13] aynı en-boy



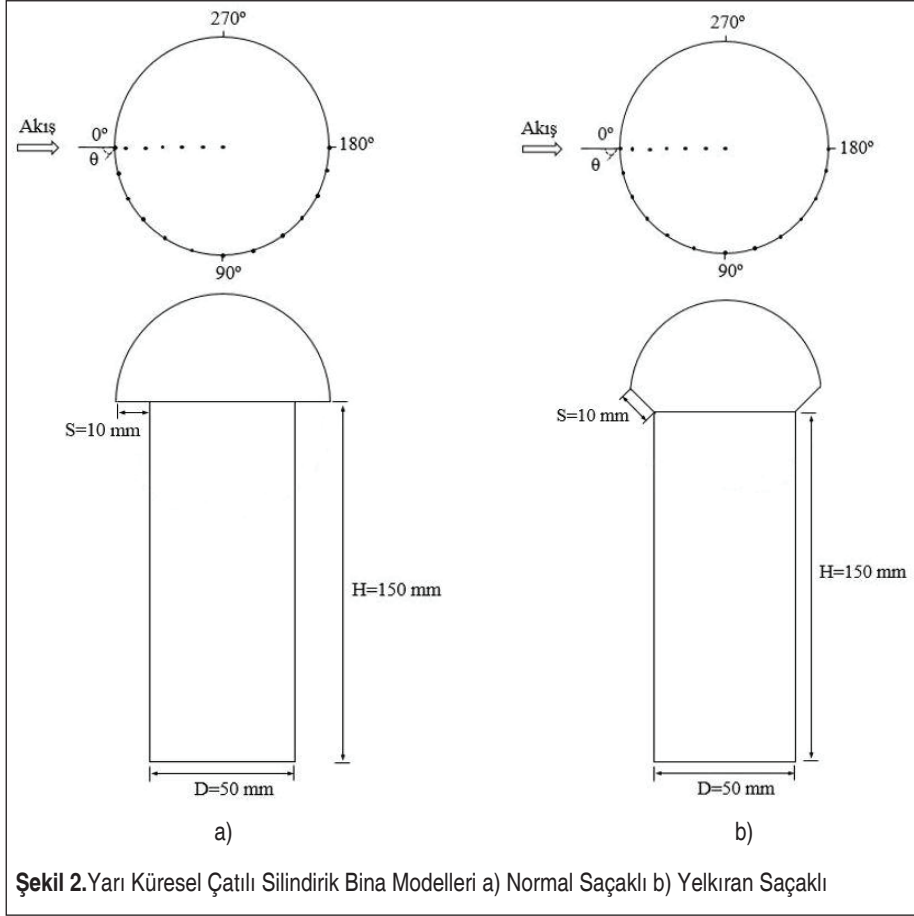
oranlarına sahip silindirik bir bina modeli üzerindeki basınç dağılımlarını inceledikleri bir diğer çalışmada ise basınç dağılımlarının sınır tabaka kalınlığına duyarlı olduğunu belirtmişlerdir. Mevcut literatür incelendiğinde, yarı küresel çatı geometrisine sahip silindirik binalar etrafındaki akış alanlarının araştırılmasına yönelik çalışmaların sınırlı sayıda olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, yarı küresel geometrik çatılara sahip silindirik iki bina modelinin çatı yüzeylerindeki rüzgâr yüklerinin, normal ve yelkiran saçak şeklinde iki farklı saçak tipi için deneysel ve sayısal olarak incelenmesi amaçlanmaktadır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışma, 457 mm x 457 mm kesitinde ve 2450 mm uzunluğunda test bölgesine sahip açık devreli, emme tipinde bir rüzgâr tüneline gerçekleştirilmiştir. Atmosferik sınır tabaka benzeşimi için, test bölgesinin girişinde girdap üreticileri, bariyerler ve pürüzlülük elemanları kullanılarak, 15 m/s'lik rüzgâr geliş hızında 150 mm kalınlığına sahip sınır tabaka elde edilmiştir. Bina modelleri etrafındaki akış yapılarının görüntülenmesi için parafin buharı tekniği kullanılmıştır. Model yüzeyindeki ortalama basınç değerlerinin ölçümü için, model yüzeylerine basınç ölçüm prizleri yerleştirilmiş ve scanning valf ile basınç ölçere bağlantıları sağlanmıştır. Basınç ölçme sistemi, TSI IFA-100 System Intelligent Flow Analyzer cihazının sinyal şartlandırıcı modülü, Setra 239 Model Basınç Ölçer, A/D dönüştürücü, veri analizi yapan bir paket program ve bilgisayardan oluşmaktadır (Şekil 1). Basınç sinyalleri 1000 Hz'lik örnekleme oranında ve 16 s'lik ölçüm süresinde alınmıştır. Alınan basınç sinyalleri 300 Hz'de filtrelenmiş ve TSI IFA-100 ThermoPro paket programı ile kaydedilmiştir. Çalışmada, normal ve yelkiran şeklinde iki farklı saçağa sahip yarı küresel çatılı silindirik bina modelleri kullanılmıştır (Şekil 2). Bina modelleri, Ankara'da bulunan Atakule'den esinlenerek oluşturulmuştur. Modellerin silindirik kısımlarının boyutları $D=50$ mm ve $H=150$ mm'dir. D ve H , sırasıyla, model çapını ve yüksekliğini temsil etmektedir. Saçak uzunluğu $S=10$ mm ve yelkiran saçak açısı $\alpha=45^\circ$ olarak dikkate alınmıştır.



Şekil 1. Test Bölgesi ve Basınç Ölçüm Sistemi



Çalışmada, model yüzey alanının, test bölgesi kesit alanına oranı olarak ifade edilen blokaj oranı yaklaşık % 4,45 olarak hesaplanmıştır.

3. SAYISAL ÇALIŞMA

Çalışmanın sayısal kısmında, silindirik geometriye sahip yarı küresel çatılı bina modelleri etrafındaki türbülanslı akış alanları üç boyutlu zaman bağımsız olarak çözülmüştür. Akış alanlarının çözümünde Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes denklemleri kullanılmıştır. İlgili korunum denklemleri genel formda aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \nabla(\rho\varphi\vec{V}) = \nabla(\Gamma_{\varphi}\nabla\varphi) + S_{\varphi} \quad (1)$$



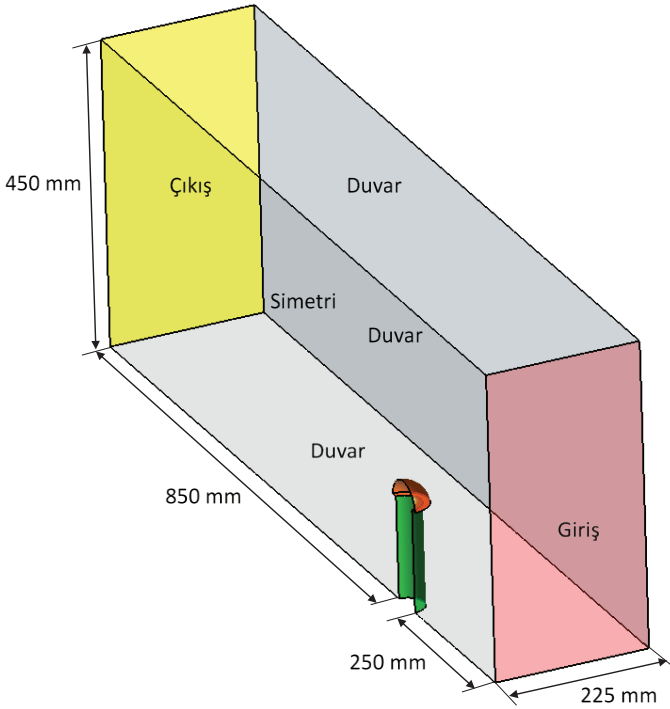
Burada, V hız vektörünü, ρ havanın yoğunluğunu, φ hız bileşenini, Γ_φ difüzyon katsayısını ve S_φ kaynak terimini temsil etmektedir.

Sayısal çözümlerde, SST k- ω türbülans modeli kullanılmıştır. Bu türbülans modeli, güçlü ters basınç gradyanına sahip sınır tabaka akışlarında oldukça başarılı sonuçlar vermektedir [14]. Menter [15] tarafından önerilen SST k- ω türbülans modeline ait transport denklemleri aşağıda verilmektedir

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \bar{G}_k - Y_k + S_k \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (3)$$

burada \bar{G}_k türbülans kinetik enerji üretimini, G_ω özgül yutulma üretimini, Γ_k türbülans kinetik enerjisinin difüzyon etkisini, Γ_ω özgül yutulmanın difüzyon etkisini, S_k ve S_ω kaynak terimlerini ve D_ω karşıt difüzyon terimini ifade etmektedir.

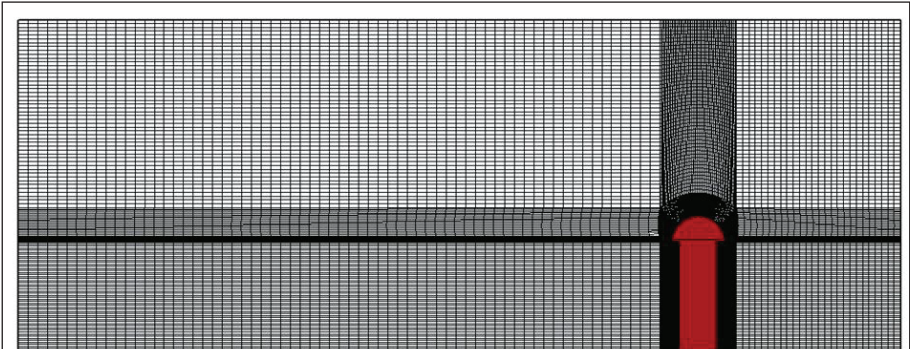


Şekil 3. Akış Alanı Yerleşim Düzeni ve Sınır Koşulları

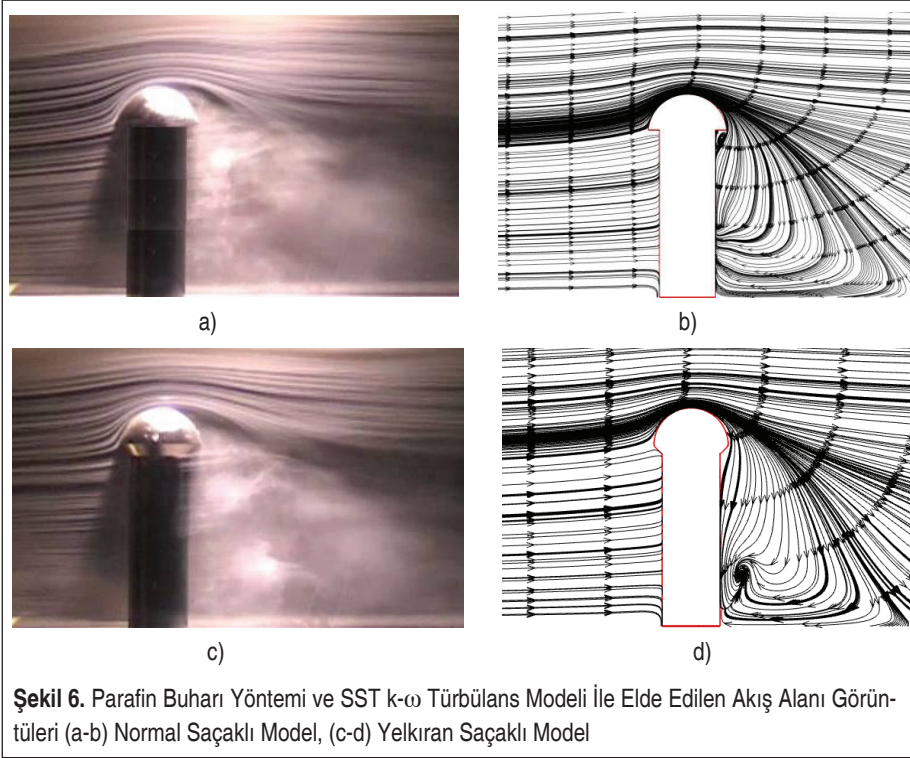
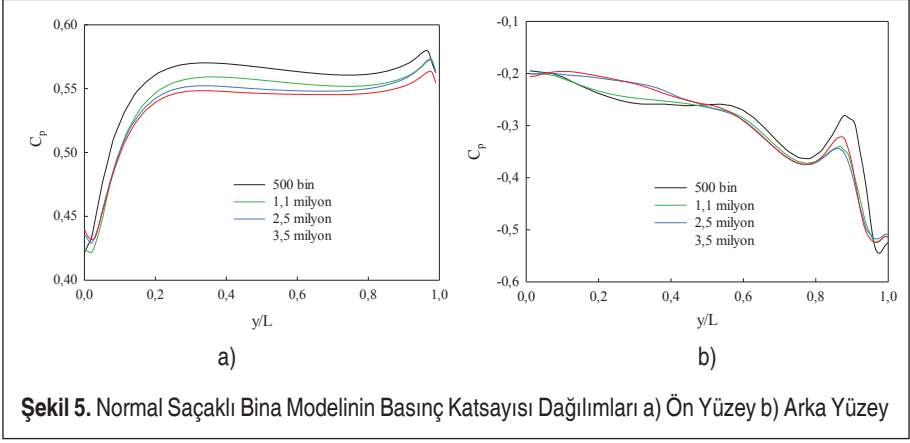


Bina modelinin üç boyutlu akış alanındaki yerleşim düzeni ve öngörülen sınır koşullarının belirtildiği hesaplama alanı Şekil 3'te verilmektedir. Bina modeli giriş bölgesinden itibaren 1.7 H mesafede konumlanmıştır. Modelin simetrik çözüme uygun olması nedeniyle, fazla ağ yapısından kaçınmak ve hesaplama zamanını azaltmak için akış alanı literatürde de yaygın uygulandığı şekliyle yarım model olarak oluşturulmuştur. Akış alanı için sınır şartları, girişte ve çıkışta sırasıyla hız girişi (velocity-inlet) ve basınç çıkışı (pressure-outlet), simetri özelliğinin uygulandığı yüzeyde simetri (symmetry) ve diğer yan yüzeylerde ise kaymayan duvar (wall) şeklinde uygulanmıştır. Kentsel arazi için oluşturulmuş ortalama hız ve türbülans profilleri "User Defined Function (UDF)" kullanılarak giriş şartı olarak verilmiştir. Korunum denklemleri, ANSYS Fluent 18.0 paket programı kullanılarak sonlu hacimler yöntemi ile ayrıklaştırılarak çözülmüştür. Basınç-hız çiftinin çözümünde SIMPLEC algoritması kullanılmıştır. Basınç interpolasyonu için Standard, diğer değişkenlerin (momentum, türbülanslı kinetik enerji ve türbülans dağılım hızı) ayrıklaştırılmasında ise Second Order Upwind yöntemi tercih edilmiştir. Tüm denklemler için yakınsama kriteri 10^{-5} olarak belirlenmiştir.

Modeller etrafındaki ağ yapısı ICEM CFD programı kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 4). Akış alanında dörtgen tabanlı üç boyutlu hexahedron ağ yapısı kullanılmıştır. Bina modelleri etrafında daha yoğun ağ kullanılırken, akış alanının diğer bölgelerinde ise seyrek ağ düzeni tercih edilmiştir. Sayısal çalışmada sonuçların ağ sayısından etkilenmemesi için öncelikle ağdan bağımsızlık çalışması yapılmıştır. Dört farklı ağ yoğunluğunda (yaklaşık 500 bin, 1.1 milyon, 2.5 milyon ve 3.5 milyon), normal saçak tipine sahip bina modelinin silindirik yan yüzeylerinde hesaplanan basınç katsayısı değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 5'te verilmiştir. Yapılan ağdan bağımsızlık çalışmaları sonucunda, 2.5 milyon hücre sayısından sonra sonuçların ihmal edilebilir düzeyde değiştiği görülmüş ve çalışma, bu ağ yoğunluğunda sürdürülmüştür. Tüm model yüzeylerinde $y^+ \approx 2$ değerinde gerçekleşmiştir.



Şekil 4. Ağ Yapısı



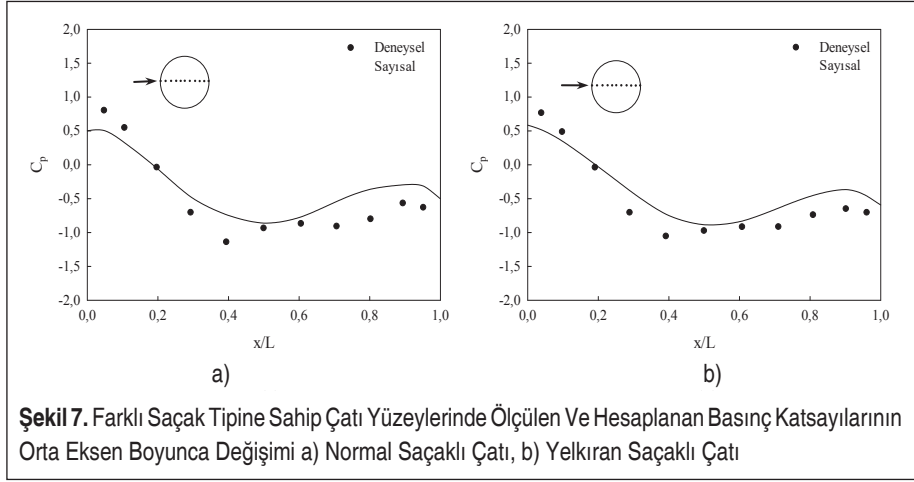
4. BULGULAR

İki farklı saçak tipine sahip yarı küresel çatılı silindirik bina modelleri etrafında parafin buharı tekniği ile deneysel olarak elde edilen ve SST $k-\omega$ türbülans modeli kullanılarak hesaplanan akış alanı görüntüleri karşılaştırmalı olarak Şekil 6' da verilmektedir.

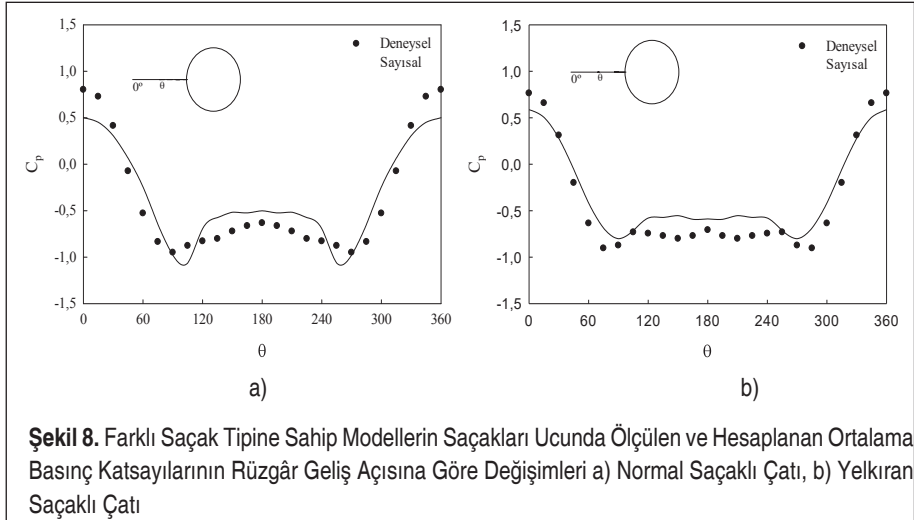


Saçak tipindeki farklılık akış alanlarında belirgin bir değişiklik oluşturmamaktadır. Modellerin üzerine gelen akış, çatı yüzeylerini takip ederek, çatıların tepe noktalarından itibaren ayrılmakta ve modellerin arkasında ters akış bölgeleri oluşturmaktadır. Modellerin arkasında oluşan ters akış bölgelerine bağlı olarak, karışım tabakası alçalmaktadır. Sayısal çözümlerden elde edilen akış yapısının, genel olarak akış görüntüleme fotoğrafları ile uyumlu olduğu görülmektedir.

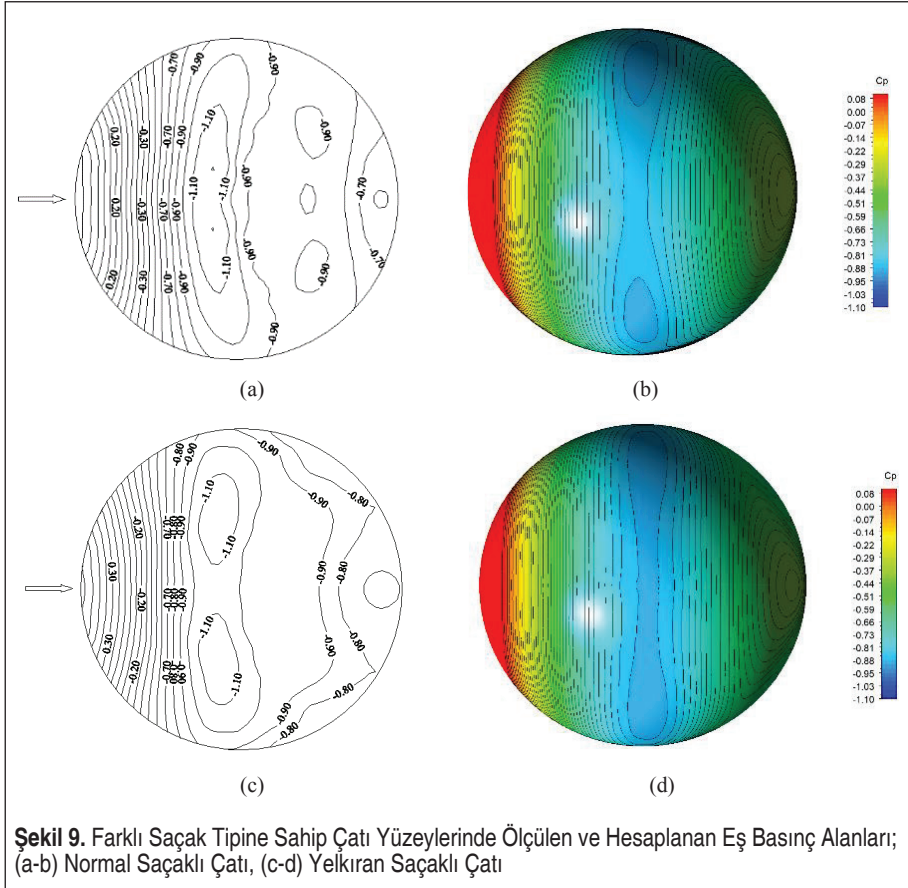
Normal ve yelkıran saçak tipine sahip modellerin, çatı yüzeylerinde ölçülen ortalama basınç katsayılarının orta eksen boyunca değişimleri, sayısal çözümlerle hesaplanan ortalama basınç dağılımları ile birlikte karşılaştırmalı olarak Şekil 7’de verilmektedir.



Şekil 7. Farklı Saçak Tipine Sahip Çatı Yüzeylerinde Ölçülen Ve Hesaplanan Basınç Katsayılarının Orta Eksen Boyunca Değişimi a) Normal Saçaklı Çatı, b) Yelkıran Saçaklı Çatı



Şekil 8. Farklı Saçak Tipine Sahip Modellerin Saçakları Ucunda Ölçülen ve Hesaplanan Ortalama Basınç Katsayılarının Rüzgâr Geliş Açısına Göre Değişimleri a) Normal Saçaklı Çatı, b) Yelkıran Saçaklı Çatı



dir. Rüzgâra doğrudan maruz kalan çatıların ön kısmında basınç katsayıları pozitif değerler almaktadır. Çatıların tepe noktasına yakın bölgeden ayrılan akış nedeniyle, çatıların yüzeylerinin büyük bölümünde basınç katsayıları negatif olmaktadır. En kritik emme basıncı, akış ayrılmasının olduğu tepe bölge yakınında ($x/L=0,4$ civarında) oluşmakta ve çatı arka yüzeyi boyunca kademeli olarak azalmaktadır.

Farklı saçak tipine sahip modellerin saçakları ucunda ölçülen ve hesaplanan ortalama basınç katsayılarının rüzgâr geliş açısı θ ya göre (daireSEL saçak çevresi boyunca) değişimleri Şekil 8’de verilmektedir. Gelen akışa doğrudan maruz kalan saçak bölgesinde basınç katsayıları pozitif olmakta ve rüzgâr geliş açısının artmasıyla basınç katsayıları negatif değerler almaktadır. $\theta=90^\circ$ konumunda akış ayrılması nedeniyle en kritik negatif değerleri alan basınç katsayıları daha büyük rüzgar geliş açılara karşılık gelen saçakların arka bölgelerinde daha hafif ve yaklaşık üniform emme etkisi göstermektedir. Model geometrisine bağlı olarak, saçak ucunun $\theta=180^\circ$ konumun-



dan itibaren basınç dağılımları simetrik olmaktadır. Normal ve yelkırın saçak tipine sahip çatı modelleri yüzeylerinde ölçülen ve hesaplanan basınç dağılımları karşılaştırıldığında, hem her iki saçak tipine ait sonuçların birbirine çok yakın olduğu hem de deneysel ve sayısal basınç dağılımlarının oldukça uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 7-8). Deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki fark ortalama % 8 düzeyinde olmaktadır.

Normal ve yelkırın saçak tipine sahip çatıların yüzeylerinde ölçülen ve hesaplanan ortalama basınç dağılımları, eş basınç alanları olarak Şekil 9’ da verilmektedir. Her iki saçak tipinde de, çatı yüzeylerinde deneysel ve sayısal olarak elde edilen basınç dağılımlarının birbiriyle uyumlu, rüzgara doğrudan maruz kalan ön çatı bölgeleri dışında çatıların yüzeylerinin büyük kısmında basınç katsayılarının negatif olduğu ve yarı küresel çatı yüzeylerinin yatay orta eksen çizgisine göre simetrik olduğu görülmektedir. En kritik negatif basınçlar, akış ayrılması nedeniyle modellerin tepe noktasına yakın bölgede, $c_p=-1,1$ olarak elde edilmektedir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, farklı iki saçak tipi için (normal ve yelkırın saçak) yarı küresel çatı geometrisine sahip silindirik bina modelleri etrafındaki akış alanları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

- Her iki saçak tipinde de gelen akış çatı yüzeyini takip etmekte ve tepe noktasına yakın bölgede akış ayrılmaktadır. Akış ayrılması nedeniyle modellerin arkasında ters akış bölgeleri oluşmaktadır.
- Yarı küresel çatıların tepe noktasına yakın bölgede gerçekleşen akış ayrılmaları nedeniyle, bu bölgelerde kritik negatif basınçlar oluşmaktadır. En kritik negatif basınçlar, $x/L=0,4$ civarında oluşmakta ve çatıların arka bölgesinde kademeli olarak azalmaktadır.
- Gelen akışa doğrudan maruz kalan saçak bölgesinde basınç katsayıları pozitif olmakta ve rüzgar geliş açısının artmasıyla basınç katsayıları negatif değerler almaktadır. $\theta=90^\circ$ konumunda akış ayrılması nedeniyle basınç katsayıları en kritik negatif değerleri almaktadır. $\theta=180^\circ$ konumundan itibaren basınç dağılımları simetrik olmaktadır.
- Hem normal hem de yelkırın saçak tipine sahip yarı küresel çatılardaki basınç dağılımları benzer eğilime sahiptir.
- Modellerin bütün yüzeyleri üzerinde, SST k- ω türbülans modeliyle hesaplanmış ortalama basınç dağılımlarının deneysel verilerle uyumlu olduğu görülmektedir.

SEMBOLLER

D_∞ Karşıt difüzyon



g	Yerçekimi ivmesi [m/s ²]
\bar{G}_k	Türbülans kinetik enerji üretimi
G_{ω}	Özgül yutulma üretimi
k	Türbülans kinetik enerjisi [m ² /s ²]
p	Basınç [Pa]
S_k, S_{ω}	Kaynak terimi
t	Zaman [s]
u	Havanın hızı [m/s]

GreK Semboller

ρ	Havanın yoğunluğu [kg/m ³]
μ	Dinamik viskozite [kg/ms]
ω	Özgül yutulma
Γ_k	Türbülans kinetik enerjisinin difüzyon etkisi
Γ_{ω}	Özgül yutulmanın difüzyon etkisi

KAYNAKÇA

1. **Sabransky, I.J., Melbourne, W.H.** 1987. "Design Pressure Distribution on Circular Silos with Conical Roofs", J. Wind Eng. Ind. Aerod., 26(1), 65-84.
2. **Portela, G., Godoy, L.A.** 2005a. "Wind Pressures and Buckling of Cylindrical Steel Tanks with a Conical Roof", J. Constr. Steel Res., 61, 786-807.
3. **Portela, G., Godoy, L.A.** 2005b. "Wind Pressures and Buckling of Cylindrical Steel Tanks with a Dome Roof", J. Constr. Steel Res., 61, 808-824.
4. **Afgan, I., Moulinec, C., Prosser, R., Laurence, D.** 2007. "Large Eddy Simulation of Turbulent Flow for Wall-Mounted Cantilever Cylinders of Aspect Ratio 6 and 10", Int. J. Heat Fluid Fl., 28, 561-574.
5. **Uematsu, Y., Moteki, T., Hongo, T.** 2008. "Model of Wind Pressure Field on Circular Flat Roofs and its Application to Load Estimation", J. Wind Eng. Ind. Aerod., 96, 1003-1014.
6. **Tavakol, M.M., Yaghoibu, M., Masoudi, M.M.** 2010. "Air Flow Aerodynamic on a Wall-Mounted Hemisphere for Various Turbulent Boundary Layers", Exp. Therm. Fluid Sci., 34, 538-553.
7. **Cheng, C.M., Fu, C.L.** 2010. "Characteristics of Wind Loads on a Hemispherical Dome in Smooth Flow and Turbulent Boundary Layer", J. Wind Eng. Ind. Aerod., 98, 328-344.
8. **Tsutsui, T.** 2012. "Flow Around a Cylindrical Structure Mounted in a Plane Turbulent Boundary Layer", J. Wind Eng. Ind. Aerod., 104-106, 239-247.



9. **Özmen, Y.** 2013. “Effect of Parapets to Pressure Distribution on Flat Top of a Finite Cylinder”, *Wind and Structures*, 17 (5), 465-477.
10. **Sumner, D., Rostamy, N., Bergstrom, N., Bugg, J.D.** 2015. “Influence of Aspect Ratio on the Flow Above the Free End of a Surface-Mounted Finite Cylinder”, *Int. J. Heat Fluid Fl.*, 56, 290-304.
11. **Özmen, Y., Aksu, E.** 2017. “Wind Pressures on Different Roof Shapes of a Finite Height Circular Cylinder”, *Wind and Structures*, 24 (1), 25-41.
12. **Beitel, A., Heng, H., Sumner, D.** 2019. “The Effect of Aspect Ratio on the Aerodynamic Forces and Bending Moment for a Surface-Mounted Finite-Height Cylinder”, *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, 186, 204-213.
13. **Beitel, A., Sumner, D.** 2020. “Characteristics of the Free-End Mean Pressure Distribution for a Surface-Mounted Finite-Height Cylinder”, *Int. J. Heat Fluid Fl.*, 82, 108562.
14. **Argyropoulos, C.D., Markatos, N.C.** 2015. “Recent Advances on the Numerical Modelling of Turbulent Flows”, *Appl. Math. Model.*, 39, 693-732.
15. **Menter, F.R.** 1994. “Two Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications”, *AIAA J.*, 32, 1598-1605.

Modeling Study and Performance Investigation of a Thermoelectric Refrigerator

Haydar Kepekçi^{1*}, Ergin Kosa², Cüneyt Ezgi³

ABSTRACT

Thermoelectric refrigerators are widely used in electronics, medical, and food industry application areas. A refrigeration effect can also be achieved without using any moving parts by merely passing a small current through a closed circuit made up of two dissimilar materials. This effect is called the Peltier effect, and a refrigerator that works on this principle is called a thermoelectric refrigerator. They consist of several thermoelectric legs sandwiched between two thermally conductive plates, one cold and one hot. Thermoelectric refrigerators presently cannot compete with the vapor-compression refrigeration system because of their low-coefficient of performance (COP). However, some applications have been preferred because of their small size, simplicity, quietness, and reliability. In this study, a thermoelectric cooler having a maximum cooling power of 50 W, having a dimension of 40mmx40mmx3.6 mm, is modeled in multi-physics software. Also, the performance of a thermoelectric refrigerator is investigated. It is computed the temperature difference between ceramics plates versus electric current and COP for a temperature difference between ceramics plates. The simulation results are compared with experimental data. The data obtained from the analyses have been compared with the experimental results and found to agree with each other. For the surface temperatures of 25 °C and 50 °C, the maximum coefficients of performance have been computed to be 1.091 and 1.445, respectively. In general, as the temperature of hot surfaces has increased for the same temperature differences, the COP of the thermoelectric cooler has increased.

Keywords: Thermoelectric, COP, refrigerator, CFD, modeling

Termoelektrik Soğutucunun Modelleme Çalışması ve Performans İncelemesi

ÖZ

Termoelektrik soğutucular elektronik, medikal ve gıda endüstrisi uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. İki farklı malzemeden oluşan kapalı bir devreden sadece küçük bir akım geçirerek herhangi bir hareketli parça kullanmadan da bir soğutma etkisi elde edilebilir. Bu etkiye Peltier etkisi, bu prensibe göre çalışan soğutucuya ise termoelektrik soğutucu denir. Bu sistemler, biri soğuk diğeri sıcak iki termal iletken plaka arasına sıkıştırılmış birkaç termoelektrik bacadan oluşurlar. Termoelektrik soğutucular, düşük performans katsayıları (COP) nedeniyle şu anda buhar sıkıştırımlı soğutma sistemleri ile rekabet edememektedir. Ancak bazı uygulamalarda küçük boyutları, sadeliği, sessizliği ve güvenilirliği nedeniyle tercih edilmişlerdir. Bu çalışmada, maksimum soğutma gücü 50 W olan, 40mmx40mmx3.6mm boyutlarında bir termoelektrik soğutucu hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı kullanılarak modellenmiştir. Ayrıca, bir termoelektrik soğutucunun performansı araştırılmıştır. Yapılan hesaplamalarda seramik plakalar arasındaki sıcaklık farkı ve elektrik akım hesapları yapılmıştır. Ayrıca simülasyondan elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Analizlerden elde edilen veriler deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve birbirine uyumlu olduğu görülmüştür. 25 °C ve 50 °C yüzey sıcaklıkları için maksimum performans katsayıları sırasıyla 1.091 ve 1.445 olarak hesaplanmıştır. Genel olarak, aynı sıcaklık farkları için sıcak yüzeylerin sıcaklığı arttıkça termoelektrik soğutucunun COP değeri artmıştır.

Anahtar Kelimeler: Termoelektrik, COP, soğutucu, HAD, modelleme

* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 21.06.2021

Kabul/Accepted : 12.08.2021

¹ Nişantaşı University, Engineering Faculty, Mechatronic Engineering Department, İstanbul
haydar.kepekci@nisantasi.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0037-8332

² Beykent University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, İstanbul, erginkosa@beykent.edu.tr
ORCID: 0000-0002-4607-4115

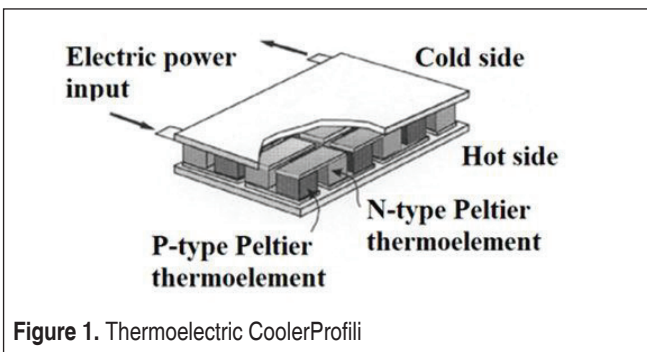
³ Piri Reis University, Engineering Faculty, Marine Engineering Department, İstanbul, cezgi@pirireis.edu.tr
ORCID: 0000-0003-3264-0021

1. INTRODUCTION

Thermoelectric systems were initially examined about 70 years ago, and the use of these devices for air-conditioning and cooling implementations was evaluated shortly later [1]. For years, thermoelectric trading modules have been present, and their price has reduced over time. With researchers' work, thermoelectric devices convert heat energy into electrical energy in the form of a temperature gradient or convert electrical power into a temperature gradient [2]. The thermoelectric modulus technic is the best economic remedy for causes. The thermoelectric modules are usual off-the-shelf parts, the relevance of their running voltages to series-parallel electrical circuitry, simple montage, and small size [3]. A thermoelectric cooler is a little heat pump that has the benefit that there are no moving components.

Thermoelectric modules are mini, lightweight, and can provide cooling below atmospheric temperature. Thermoelectric systems are environmentally friendly as they do not use any refrigerant during operation [2]. The positive aspects of these devices are; reliability, quiet operation, and compactness. As a result, it has attracted many researchers' attention in terms of developing and expanding thermoelectric systems. Furthermore, various reports have demonstrated the feasibility of using thermoelectric modules as a promising alternative for conventional air cooling and heating systems [4]. One reason why thermoelectric cooling systems can be widely used in electronic devices is; temperature control capacity is to provide an efficient heat transfer. It also offers advantages such as high reliability and fast thermal response [5].

The thermoelectric modulus supplies heat transfer through alteration in the energy level of the electrons. The current low energy level P-type semiconductors and high energy level N-type semiconductors transport the heat energy from the cold surface to the hot surface [6]. Another name for thermoelectric refrigerants is Peltier. The Peltier module is created by the serial link of P-type and N-type elements. The Peltier impact happens with the direct current by the Peltier components. In this process, one surface of the thermoelectric modulus cools while the other surface heats [7]. The Peltier module is shown in Fig. 1.





In the system shown in Fig. 1, heat is absorbed from the refrigerated space and rejected to the warmer environment. The difference between these two quantities is the net electrical work that needs to be supplied. For the Peltier cooling systems to work correctly, the module's hot side needs to be cooled. Therefore, when designing thermoelectric cooling systems, a cooling component such as a fan should be added. Thermoelectric refrigeration based on the Peltier impact has significant benefits check against traditional vapor technology, although its COP is not as high a vapor-compression technology. Today, thermoelectric cooling's practice fields contain thermoelectric refrigeration, automobile cooling, thermoelectric air-conditioning, photovoltaic-thermoelectric hybrid system, and freshwater production [8].

Tan and Zhao [9] studied a thermoelectric system for air conditioning with the combination of a phase transition matter as an option to the refrigerant. The addition of phase changer matter led to a 56% increase in thermoelectric module performance. Dessel and Messac [10] experimentally analyzed the thermoelectric performance as an air conditioning system with the combination of the PV system for the procurement of electricity with different electrical connections, input current, and other voltage values. Experimental results demonstrated that the input current alteration does not influence the temperature of the cold surface, but rather the temperature of the hot surface is much influenced. They decided that the cold side's temperature achieves steady-state and stability circumstances faster than the hot surface.

Chinguwa et al. [11] designed an environmentally friendly in-car cooler. They used a thermoelectric cooler in the portable design of 20 liters. As a result of their work, they have significantly reduced exhaust gas to the environment. Tan and Demirel [6] conducted an experimental study using three different cooling systems to examine the temperature and performance of the CPU and the motherboard. The systems used are; heat sink, water cooling system, and thermoelectric cooler. Their results found that the thermoelectric cooling system had better cooling performance than the other two systems under continuous operating conditions. Huang et al. [12] devised a new style procedure for thermoelectric cooler systems in that an experimentally created performance curve of the thermoelectric module was done for design computation. Furthermore, automated testing furnishing was devised and made to take the test. Considering the performance test outcomes, an empiric correlation was obtained for Peltier module performance, and the sequel was used in the system research of a thermoelectric cooler.

Karimi et al. [13] analyzed a pyramid-type multi-stage cooling focusing on the significance of the highest achievable target heat flux and performance coefficient. As a result of the study carried out as numerical simulation, the hot side heat sink's thermal resistance, a multi-stage thermoelectric cooler, has a crucial role in determining all performance. Riffat et al. [1] developed a computer model to measure the perfor-



mance of a thermoelectric heat pump system. They compared the numerical results with experimental data. They analyzed the reasons for the differences and optimized the computer model. Their work was the basis for analyzing and designing the thermoelectric heat pump system. Gökçek and Sahin [8] performed an experimental performance analysis of a mini channel water-cooled thermoelectric refrigerator. The cooling system of the fridge used in the experiment; consists of the mini-channel heat sink on the hot side and two thermoelectric modules integrated with heat distributors on the cold side. As a result, they concluded that the mini-channel heat sink's performance was as good as other liquid-cooled systems.

Nagy and Buist [14] analyzed a thermoelectric cooler's performance and indicated a critical performance decrease due to the thermal resistance of heat sinks. They concluded that the thermal resistance of the heat sinks and the thermal interfaces among the modulus and the heat sinks should be reduced to reach the best feasible refrigerating performance.

The primary purpose of the thermoelectric refrigerator research was to investigate the cooling performance. The coefficient of performance (COP) for the refrigerator is accepted as the performance criterion. This value is the ratio between the cooling load and electrical power consumption. Refrigerators' performance is expressed in terms of the COP as ratio work input of the cooling effect. A prototype cooler with the same characteristics has been designed, and experimental work has been done. The data obtained from the numerical analysis and the data obtained from the experiments have been compared.

2. EXPERIMENTAL METHOD

As shown in Fig. 2, the experimental equipment is installed in a controlled volume. For the Peltier cooler to work well, one above the thermoelectric cooler module and the other above the closed box, two cooling fans' control volume, two cooling fans, and two heat sinks are used. The thermoelectric cooler's underside is designed as a cold area in the prototype system, and appropriate insulation is made. The dimensions of the rectangular covering are selected as 500 mm x 500 mm x 250 mm. Insulation has been provided by using approximately 50 mm thickness Styrofoam on the cooling side. The size of the cooling side is 215mm x 175mm x 130mm.

The installation also contains the electronic components necessary for the operation of the system. The model of the thermoelectric cooler used has been chosen as TEC1-12706. The "127" indicates each one 127 n and p type semiconductor pairs while the "06" correspond to their maximum current (6 amp). The dimensions of the thermoelectric cooler module used in the system shown in Fig. 3 are 40x40x3.6 mm. The specification of the TEC1-12706 conditions is provided in Table 1.

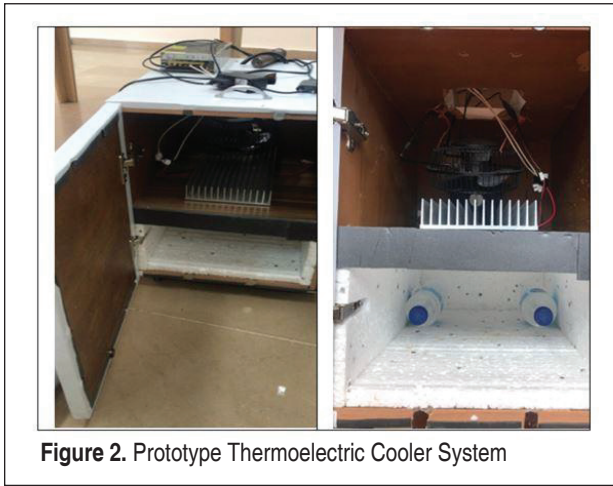


Figure 2. Prototype Thermoelectric Cooler System



Figure 3. Thermoelectric Cooler Module

Table 1. Performance Specifications of TEC1-12706

Hot Side Temperature [°C]	25	50
Q_{max} [W]	50	57
ΔT_{max} [°C]	66	75
I_{max} [A]	6.4	6.4
V_{max} [V]	14.4	16.4
Module Resistance [Ω]	1.98	2.30

Table 2. Physical Properties Of The Devices Used

Device Type	Range	Sensitivity
Thermometer	-50 [°C] – 300 [°C]	1 [°C]
Voltmeter	0.1 [mV] – 600 [V]	%0.5 + 3
Ohmmeter	0.1 [Ω] – 40 [MΩ]	%0.5 + 2
Ammeter	0.1 [A] – 400 [A]	%1.5 + 3

All temperatures have been measured using thermocouples with a sensitivity of ± 1 C. Type E has been chosen as the type of thermocouple conductor. In this system, the ammeter has used for current measurement; the voltmeter has used for voltage measurement; the ohmmeter has used for resistance measurement. The operating range and sensitivity of the measuring devices used are given in Table 2.

Cooling fins (heat sink) are fabricated of aluminum and attached to the thermoelectric refrigerator’s surfaces to reduce their operating temperatures. Small fans are used to induce forced convection over the fins. A temperature drop of 10 oC in one hour has been observed in the water in 2 plastic bottles of 0,5-liter water ($Q=m.c_p.\Delta T$). For this reason, it has been concluded that one thermocouple was sufficient for the cooled volume.

3. SIMULATION METHOD

A simulation methodology has been examined on a thermoelectric cooler with the parameters used in the experimental study. After the computations are completed, the results are compared with experimental data.

The 3D mesh domain image of the thermoelectric cooler analyzed is, as shown in Fig. 4. This mesh has contained about 170,000 cells.

The mesh file’s size parameters have been selected as follows; the maximum element

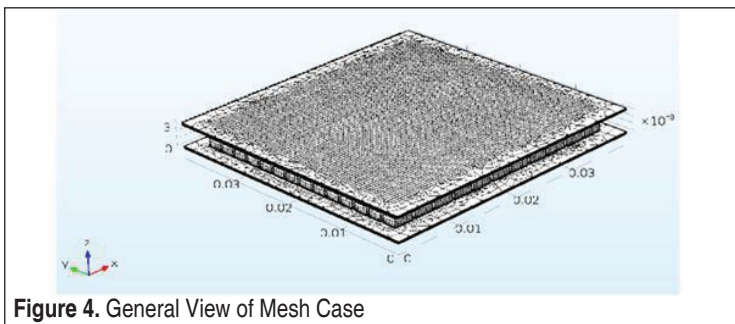


Figure 4. General View of Mesh Case

Table 3. Properties of Bismuth Tin

Property	Expression
Specific heat capacity (c_p)	171.6588 [J/(kg.K)]
Density (ρ)	8340 [kg/m ³]
Seebeck coefficient (α)	-55x10 ⁻⁶ [V/K]
Electrical conductivity (σ)	6.0976x10 ⁴ [S/m]
Thermal conductivity (k)	24.5 [W/(m.K)]
Relative permittivity (ξ)	1

size is 2×10^{-4} , the minimum element size is 2×10^{-6} , the maximum element growth rate is 1.3, curvature factor is 0.2, resolution of narrow regions is 1. The geometry and their mesh have been created using computational fluid dynamics software.

The material of the P-Type and N-Type semiconductor elements of the thermoelectric cooler is Bismuth Tin, the conductor material is copper, and the ceramic material is Tungsten.

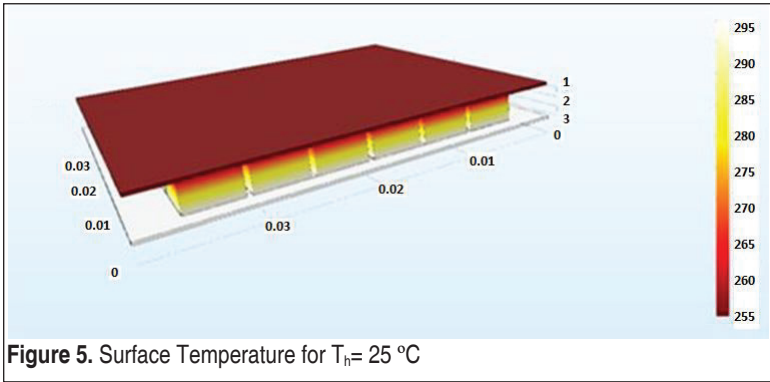
The meshes are structured inside of the geometry. The purpose of the analysis is to measure the coefficient of performance values at different currents. As current values, 1.5 A, 3 A, 4.5 A, and 6 A have been selected. Analyzes have been performed for both 25 °C and 50 °C.

SNOPT has been chosen as the solver method. SNOPT is a specific application, which is making use of a semidefinite quadratic programming solver. It is based on a finite-memory quasi-Newton approach to the Hessian of the Lagrangian and uses a Reduced-Hessian algorithm (SQOPT) for resolving the quadratic programming subproblems. It is designed for many thousands of limitations and factors but an average number of degrees of freedom [15]. In the analysis, a PC with “Intel (R) Core (TM) i7-4710HQ CPU@2.50GHz, four cores” has been used. This computational time was approximately 20 minutes.

4. RESULTS

As a result of the analysis for the surface temperature of 25 °C, the maximum temperature difference has been calculated to be 21.150 K. The current required to obtain this value is 6 A. The required voltage is 0.44423 V. The overall electrical resistance is 0.074038 Ω. The maximum heat dissipation is 12.285 W; the maximum coefficient of performance is 1.091.

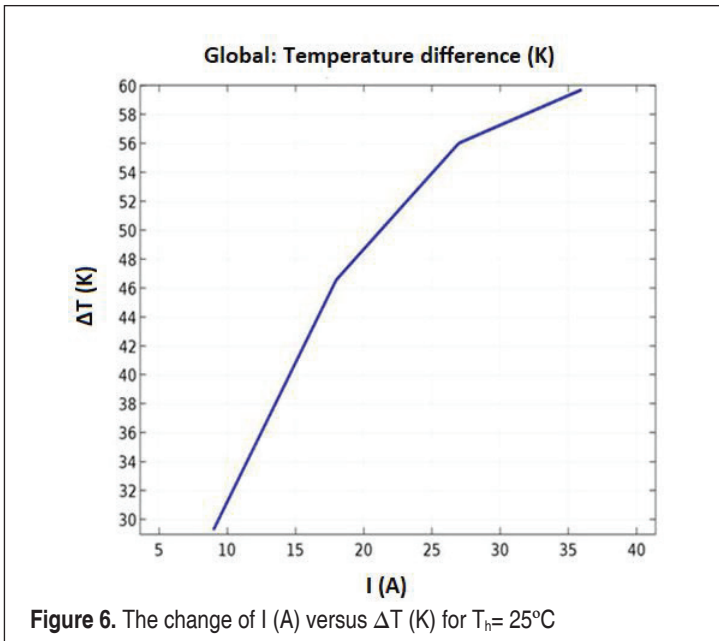
The figure for merit is 0.0023945 1/K. As can be seen from Fig. 5, the surface tempe-

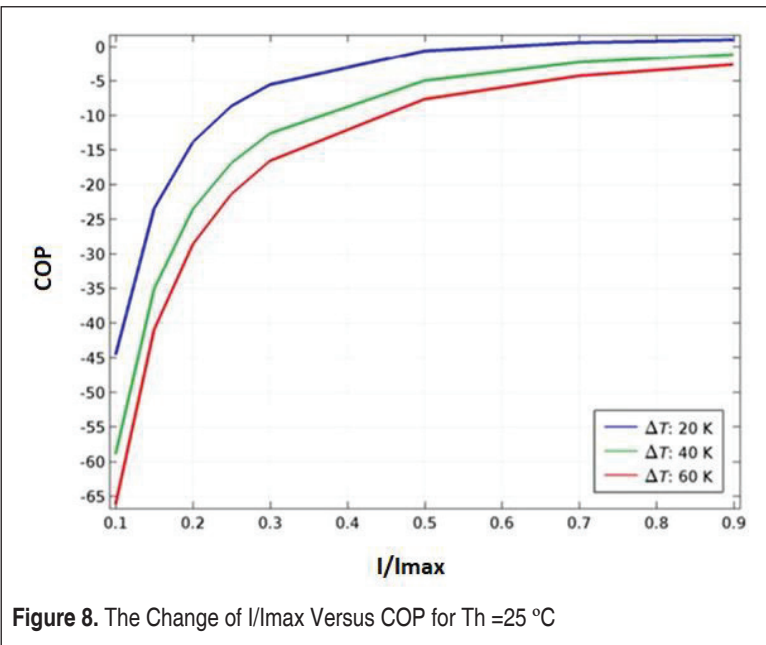
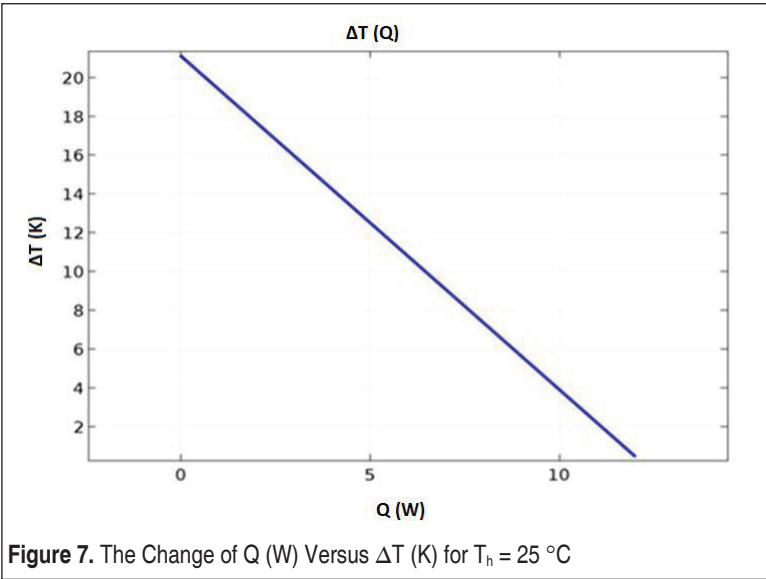


temperature of the hot side goes up to 255 K, and at combining points, the temperature can be up to 295 K.

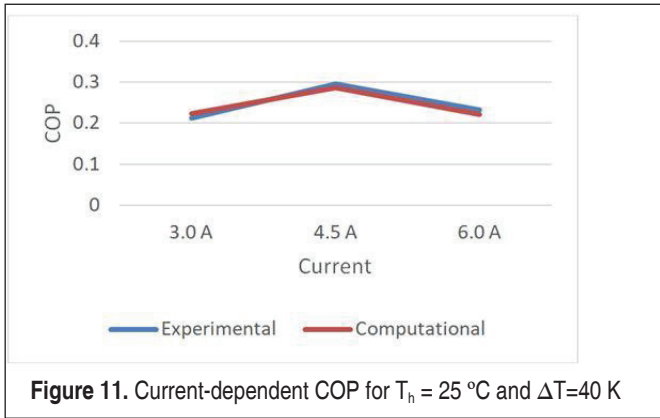
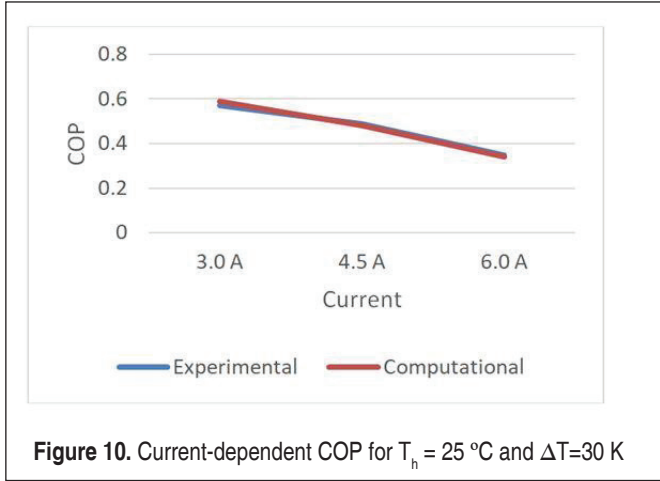
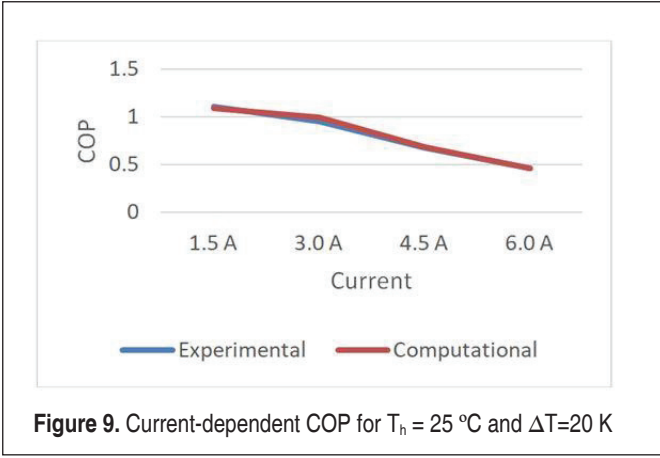
The temperature difference of the thermoelectric cooler has increased as the current has increased. The change of I (A) versus ΔT (K) for $T_h = 25\text{ }^\circ\text{C}$ is illustrated in Fig. 6.

The temperature difference of the thermoelectric cooler has reduced as the cooling load has increased. The change of cooling load versus ΔT (K) for $T_h = 25\text{ }^\circ\text{C}$ is illustrated in Fig. 7.





For temperature differences between ceramics plates of 20 K, 40 K, and 60 K, the change of COP versus the relative applied current I/I_{max} , from 0.1 to 0.9, is depicted in Fig. 8.



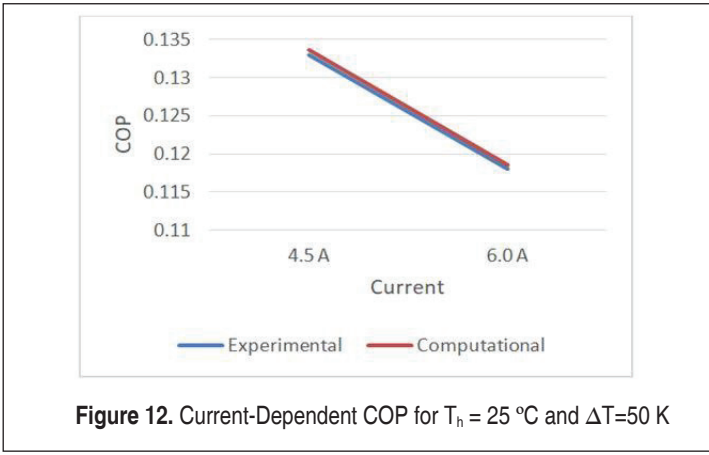


Figure 12. Current-Dependent COP for $T_h = 25\text{ }^\circ\text{C}$ and $\Delta T = 50\text{ K}$

In Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11, and Fig. 12; $T_h = 25\text{ }^\circ\text{C}$; COP coefficients at different current for each ΔT value are given both experimentally and numerically. As the current has increased, the COP of the thermoelectric cooler has reduced. As indicated in Fig. 9, it can be said that numerical results are in good agreement with experimental data. The reason for the uncertainties in the calculated values is the $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ margin of error of the E-type thermocouple used.

Since the thermoelectric cooler’s cooling load is zero at 3 A in $T_h = 25\text{ }^\circ\text{C}$ and $\Delta T = 50\text{ K}$, it is not considered in Fig. 12.

As a result of the analysis for the surface temperature of $50\text{ }^\circ\text{C}$, the maximum temperature difference has been calculated to be 24.496 K. The current required to obtain this value is 6 A. The required voltage is 0.50462 V. The overall electrical resistance is $0.084103\ \Omega$. The maximum heat dissipation is 13.844 W; the maximum coefficient of performance is 1.445. The figure for merit is 0.0023767 1/K . The hot side’s surface temperature goes up to 265 K. Surface Temperature for $T_h = 50\text{ }^\circ\text{C}$ is shown in Fig. 13.

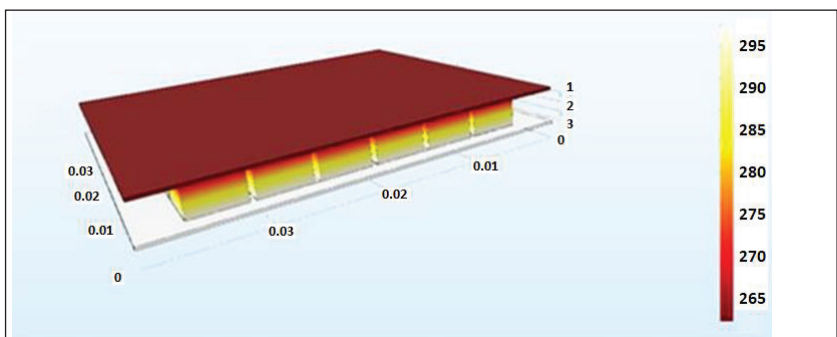
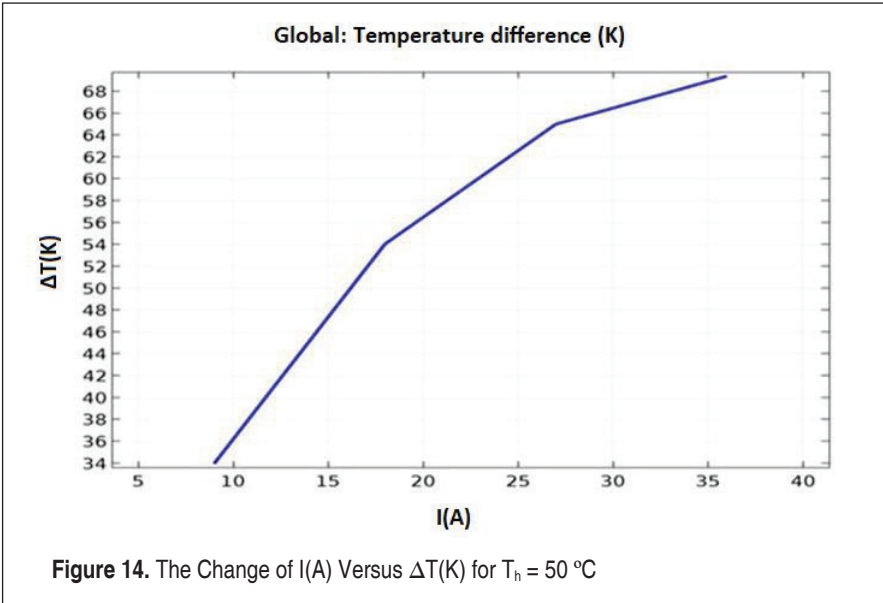
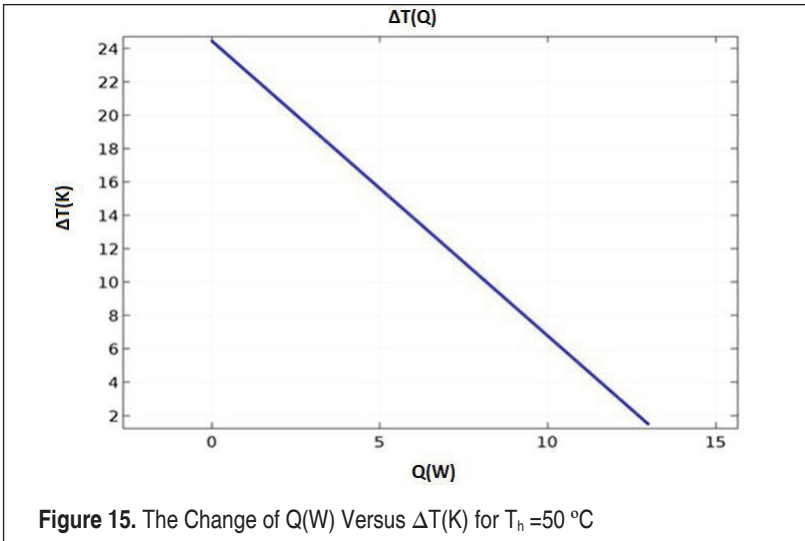


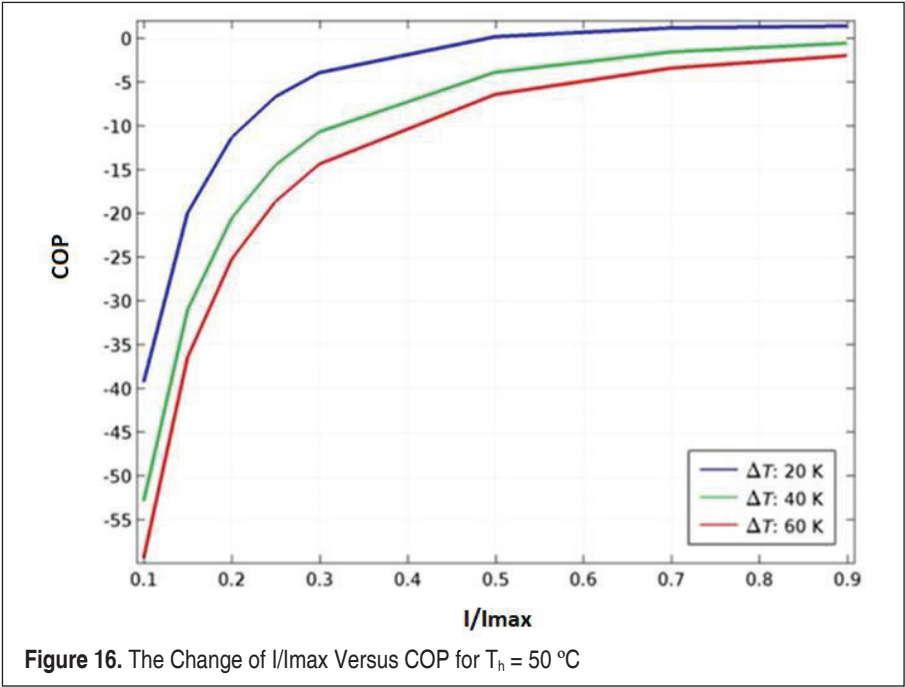
Figure 13. Surface Temperature for $T_h = 50\text{ }^\circ\text{C}$



The change of I (A) according to ΔT (K) for $T_h = 50^\circ C$ is shown in Fig. 14. The change of Q (W) according to ΔT (K) for $T_h = 50^\circ C$ is demonstrated in Fig. 15. The change of I/Imax according to COP for $T_h = 50^\circ C$ has been shown in Fig. 16.

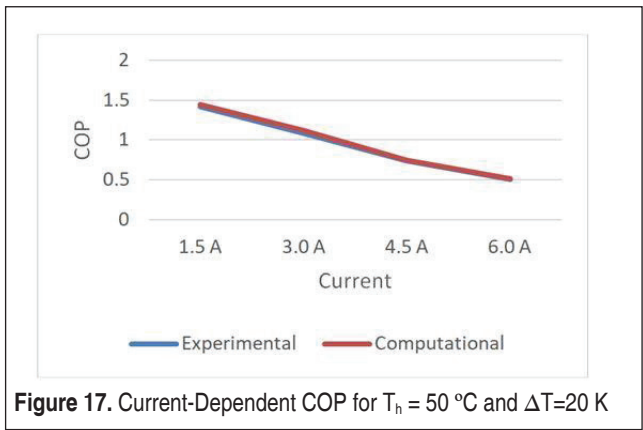
The temperature difference of the thermoelectric cooler has increased as the current has increased. The change of I (A) versus ΔT (K) for $T_h = 50^\circ C$ is illustrated in Fig. 14.

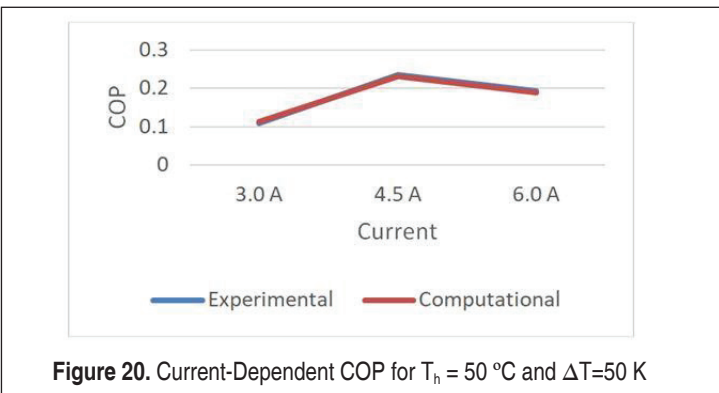
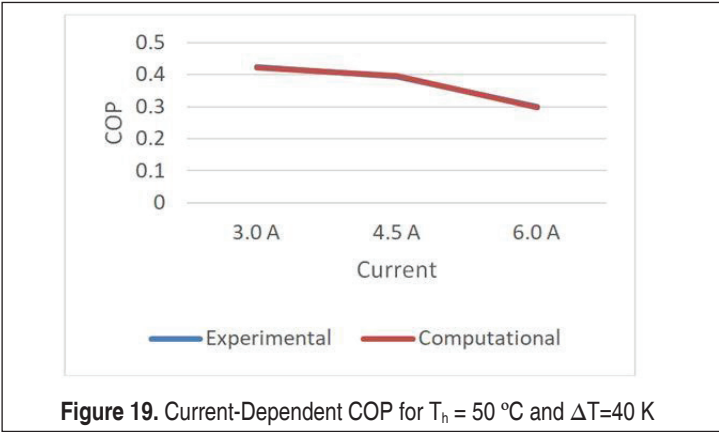
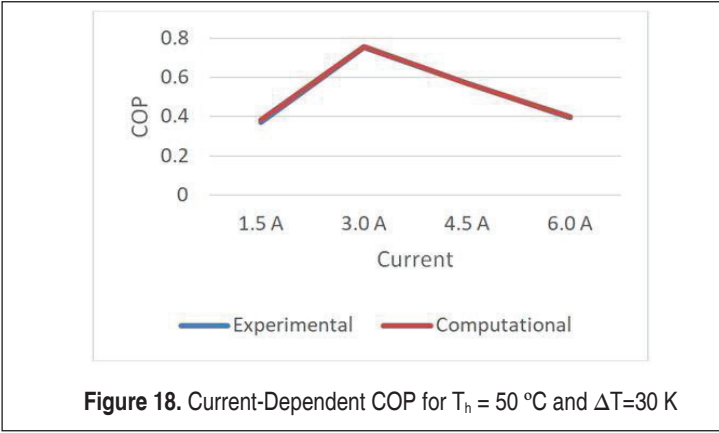




The temperature difference of the thermoelectric cooler has reduced as the cooling load has increased. The change of cooling load versus ΔT (K) for $T_h = 50\text{ }^\circ\text{C}$ is illustrated in Fig. 15.

For temperature differences between ceramics plates of 20 K, 40 K, and 60 K, the change of COP versus the relative applied current I/I_{max} , from 0.1 to 0.9, is depicted in Fig. 16.







In Fig. 17, Fig. 18, Fig. 19, 20; $T_h = 50\text{ }^\circ\text{C}$; COP coefficients at different currents for each ΔT value are given both experimentally and numerically. The reason for the uncertainties in the calculated values is the $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ margin of error of the E-type thermocouple used.

Looking at the graphs obtained, it can be said that experimental and numerical results confirm each other.

5. CONCLUSION

In this study, thermoelectric refrigerators used in different sectors have been studied. The thermoelectric cooling module with 40 mm x 40 mm x 3.6 mm dimensions is used, which works with the Peltier effect principle; a prototype cooling system is designed. This design has been put into production to perform experimental studies and modeling for numerical analysis. The data obtained from the analyses have been compared with the experimental results and found to agree with each other. For the surface temperatures of 25 °C and 50 °C, the maximum coefficients of performance have been computed to be 1.091 and 1.445, respectively.

In general, as the temperature of hot surfaces has increased for the same temperature differences, the COP of the thermoelectric cooler has increased.

Although the coefficients of thermoelectric coolers' performance are low, due to their quiet operation, simple installation, and reliability, they are widely used in low current areas. In future studies, it will be investigated how to improve the COP of thermoelectric coolers.

REFERENCES

1. **Riffat S.B., Ma X., Wilson R.** 2006. "Performance simulation and experimental testing of a novel thermoelectric heat pump system", *Applied Thermal Engineering*, Vol:26, 494-501.
2. **Riffat S.B., Ma X.** 2003. "Thermoelectrics: a review of present and potential applications", *Applied Thermal Engineering*, Vol:23, 913-935.
3. **Rowe D.M.** 1995. "CRC handbook of thermoelectrics", *Application of thermoelectric cooling*, 617-683.
4. **Nassar M., Hegazi A. Mousa M.** 2019. "Combined effect of pulsating flow and magnetic field on thermoelectric cooler performance", *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol:13, 100-103.
5. **Lin Z., Hongbo T., Jianlin Y.** 2013. "Analysis of optimal heat exchanger size of a thermoelectric cooler for electronic cooling applications", *Energy Conversion and Management*, Vol:76, 685-690.
6. **Tan S.O., Demirel H.** 2015. "Performance and cooling efficiency of thermoelectric mo-



- dules on server central processing unit and Northbridge”, *Computers and Electrical Engineering*, Vol:46, 46-55.
7. **Gao M., Rowe D.** 1999. “Cooling performance of the integrated thermoelectric micro cooler, *Solid-State Electronics*”, Vol:43, 923–929.
 8. **Gökçek M., Sahin F.** 2017. “Experimental performance investigation of mini channel water cooled-thermoelectric refrigerator”, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol:10, 54-62.
 9. **Tan G., Zhao D.** 2015. “Study of a thermoelectric space cooling system integrated with phase change material”, *Applied Thermal Engineering*, Vol:86, 187-198.
 10. **Xu X., Dessel S.V., Messac A.** 2007. “Study of the performance of thermoelectric modules for use in active building envelopes”, *Building and Environment Journal*, Vol:3, 1489–1502.
 11. **Chinguwa S., Musora C., Mushiri T.** 2018. “The design of portable automobile refrigerator powered by exhaust heat using thermoelectric”, *15th Global Conference on Sustainable Manufacturing, Procedia Manufacturing*, Vol:21, 741-748.
 12. **Huang B.J., Chin C.J., Duang C.L.** 2000. “A design method of a thermoelectric cooler, *International Journal of Refrigeration*”, Vol:23, 208-218.
 13. **Karimi G., Culham J.R., Kazerouni V.** 2011. “Performance analysis of multi-stage thermoelectric coolers”, *International Journal of Refrigeration*, Vol:34, 2129-2135.
 14. **Nagy M.J., Buist R.J.** 1994. “Effect of heat sink design on thermoelectric cooling performance”, *AIP Conference Proceedings*, 147-149.
 15. **Gill P., Murray W., Saunders M.** 2002. “SNOPT: An SQP Algorithm for large-scale constrained optimization”, *SIAM Review*, Vol:12, No:4, 979-1006.

Biyokömür-Soma Kömür Karışımlarının Oksijenli Koşullarında Birlikte Yakılmasının Deneysel İncelenmesi ve Emisyonlar Üzerindeki Etkileri

Babak Keivani^{1*}, Hayati Olgun², Aysel T. Atımtay³

ÖZ

Bu deneysel çalışma, kızılçam talaşından elde edilen biyokömürün Soma linyit ile birlikte yakılmasını kapsamaktadır. Deneyler 30 kW termal kapasiteli dolaşimli akışkan yataklı yakma (DAY) sisteminde, havada ve oksijen zengin hava ortamında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde akışkan yatağın içindeki yanma sıcaklığı 850 + 50 °C'de tutulmuştur. Farklı oranlarda linyit ve biyokömür karışımları oksijen zengin ortamda yanma testleri yapılmıştır. Kızılçam talaşı için 300 °C ve 30 dakika işlem koşullarının soma linyit ile biyokömürün akışkan yatağa birlikte yakılması açısından en uygun üretim koşulları olacağı görüşüne varılmıştır. Linyitteki biyokömür karışımının payı %50'ye kadar artırılmıştır. Yakıt karışımlarının ağırlıkça %50'ye kadar çıktığı ve sistemde biyokömürün etkin bir şekilde yakıldı bulunmuştur. Sonuçlar kömür ve biyokömürün birlikte yanması için biyokömürün iyi bir katkı yakıtı olabileceğini göstermektedir. Ayrıca oksijen zengin ortamında birlikte yakmanın SO₂, CO ve N₂O'nun baca gazı emisyonlarını azaltmak için bir seçenek olduğunu göstermiştir. Havaya oksijen eklenmesi yanma verimini artırmış ve CO emisyonlarını azaltmıştır. Biyokömürün içinde kükürt bulunmadığından SO₂ emisyonlarını önemli ölçüde azaltmıştır. Bununla birlikte, NO_x emisyonları, yüksek oksijen konsantrasyonları ve yüksek seviyelerde biyokömür ilavesi ile artmıştır.

Anahtar Kelimeler: Oksijen zengin ortamda yanma, biyokömürleştirme, emisyonlar, biyokömür

Experimental Investigation of Co-combustion of Biocoal with Soma Lignite in Air and The Oxygen-enriched Air Atmospheres and Its Effects on Emissions

ABSTRACT

This experimental work includes the co-combustion of Soma lignite with biochar obtained from red pine sawdust. The experiments were carried out in a circulating fluidized bed combustion (DAY) system with a thermal capacity of 30 kW, in air and in an oxygen-rich air atmosphere. In this study, the combustion temperature in the fluidized bed was kept at 850 + 50 °C. Combustion tests of Soma lignite and biochar mixtures at different rates were carried out in an oxygen-rich medium. It was concluded that 300 °C and 30 minutes processing conditions for red pine sawdust would be the most suitable production conditions for the co-combustion of soma lignite and biochar in a fluidized. The share of biochar mixture in lignite has been increased up to 50% by weight. It was found that the biochar was burned effectively when the mixture of biochar was up to 50%. The obtained results emphasized that biochar can be a good additive fuel for co-combustion of coal and biochar. It has also shown that co-combustion in an oxygen-rich atmosphere is a choice to decrease stack emissions of SO₂, CO and N₂O. Addition of oxygen to air increased the combustion efficiency and reduced CO emissions. Since biocoal does not have sulfur in it significantly reduced SO₂ emissions. However, emissions of NO_x increased with high oxygen concentrations and high levels of biocoal addition.

Keywords: Oxygen enriched combustion, torrefaction, emissions, biocoal

* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 28.06.2021

Kabul/Accepted : 13.08.2021

¹ Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kırşehir, bab20822000@yahoo.com, ORCID: 0000-0003-2390-4726

² Ege Üniversitesi, Güneş Enerjisi Enstitüsü, Bornova, İzmir, hayatiolgun1958@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1777-2010

³ Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Fakültesi, 06800 Cankaya, Ankara, ayselatimtay@gmail.com
ORCID: 0000-0001-7012-308X



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The General Directorate of Forestry (GDF) estimates that Turkey has an annual sustainable forest residue potential of five to seven million tons [1]. It is crucial that these forest residues be converted to combustible solid fuels. However, conventional combustion technologies cannot be effectively used to fulfill the energy demands of the country. We are challenged to use wood biomass in general as a fuel for combustion / co-combustion systems because of its fuel properties compared to lignite [2]. To this end, the use of biomass with coal in power plants has its own limitations. For this reason, biomass and coal are not often used together in power plants. Torrefaction is a method that can be used to eliminate / reduce all these negative effects. Biomass co-firing also has the potential to reduce emissions [3]. Previous studies have widely proposed and reported on the use of biomass blends as feedstock in the oxy-combustion process [1]. However, there are very limited pilot studies on the use of biocoal mixtures as a raw material in oxygen combustion processes [4,5]. None of these studies has performed an oxy-combustion study of biocoal mixtures to further evaluate its properties as a potential solid fuel.

In this research torrefied pinewood chips were used for co-combustion with lignite. Detailed information about the torrefaction system is given elsewhere [6,7]. The purpose of this study is two-fold: Firstly, to use torrefied biomass (biocoal) with a lignitic coal for co-combustion, so that the emissions can be lowered as compared to the combustion of lignite coal alone in a power plant for energy generation. Secondly, to use oxy-fuel combustion system to produce a flue gas consisting of CO₂ and H₂O vapor, so that CO₂ in the flue gas can be captured with a CCS technology.

Materials and Methods

Biocoal and Soma lignite were used as fuels for this study. Biocoal was prepared by torrefaction of red pine wood chips in a laboratory scale torrefaction system under nitrogen atmosphere at 300°C for 30 min. The details of the system are given in [6,7].

Experimental System and Procedure

The experimental system used in this study is a pilot scale CFBC system consisting of feeder, combustor reactor, cyclones, down comer, return leg, primary and secondary air feeding systems, combustor heaters, ash hoppers, and a flue gas cooling system, a bag filter and chimney.

Results and Discussion

First of all, soma lignite was combusted alone in air and in the oxygen enriched atmosphere to see its combustion behavior. The average bed temperature increased as the oxygen concentration levels increased in the experiments. CO emission is an indication of non-complete combustion. Therefore, as the oxygen concentration in the combustion air increases, CO concentration in the flue gas decreases due to better combustion with plenty of oxygen (Figure 2a). In contrary to CO emissions, as the oxygen concentration in the combustion air and biocoal amount in the fuel mixture increases, CO₂ emissions increase as explained in CO emissions due to better combustion (Figure 2b). The results show it is the increase in the proportion of biocoal in the fuel composition that results in higher NO_x emissions (Figure 2c). When the oxygen concentration in the combustion air increases, the combustion efficiency also increases to 98.5% for oxygen concentration of 28% with better combustion.

The highest CO emission was obtained with Soma lignite alone, while the CO emission decreased as the biocoal additive increased. In addition to decreased CO emission, the combustion efficiency increased with biocoal addition. As the oxygen content increased along with the addition of biocoal, Soma showed a faster increase in CO₂ concentration as well as the combustion efficiency.

When Orhaneli and Soma lignites are compared, more NO_x formation takes place in Orhaneli case than Soma case with increase of oxygen in combustion air. With the addition of biocoal to these lignites, NO_x formation increased in both cases. However, this is for sure that co-combustion of Soma lignite with biocoal is a very good option to give support to a low-quality coal.



1. GİRİŞ

Türkiye'nin toplam geri kazanılabilir ve kullanılabilir biyokütle enerji potansiyeli 17 milyon ton petrol eşdeğeri (mtoe) olarak tahmin edilmiştir [1]. Orman Genel Müdürlüğü (OGM) tarafından yıllık sürdürülebilir orman kalıntısı potansiyelin yaklaşık 5 ila 7 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir. Yakılabilecek odun, orman artıkları ve çalı bitki örtüsünün maksimum üretim potansiyeli Türkiye'nin Akdeniz Bölgesindedir [1]. Bu nedenle, bu orman artıkları yanıcı katı yakıtlara dönüştürülmesi Türkiye'nin sürdürülebilir enerji üretimi açısından çok önemlidir. Ancak bu potansiyel, geleneksel yakma teknolojileri ile ülkenin enerji ihtiyacı için etkin bir şekilde kullanılamamaktadır. Özellikle bu orman artıklarının enerji dönüşüm merkezlerine taşınması sorun teşkil etmektedir.

Türkiye linyit kaynakları bakımından zengin bir ülkedir. Türkiye'nin 2015 yılında kanıtlanmış geri kazanılabilir linyit rezervi 14,76 milyar ton'dur. Bu linyitlerin ısı değerleri genellikle orta ila düşüktür ve 1000 ila 5000 kcal / kg arasında değişmektedir. Isıtma değerlerinin dağılımı %1'i 4001 kcal / kg üzerinde, %4'ü 3001-4000 kcal / kg arasında, %22'i 2001-3000 kcal / kg arasında, %70'i 1001-2000 kcal / kg arasında ve %3'ü 1000 kcal / kg altındadır [2]. Ayrıca, bu linyitler genellikle yüksek kükürt ve kül içeriğine sahiptir.

Türkiye toplam birincil enerji talebinin %72'sini ithal etmektedir. Bu talep her yıl artıyor çünkü Türkiye'nin kalkınma hızı yılda %4-5 civarında ve bu da büyük miktarda enerji gerektiriyor. Bu nedenle temiz enerji üretiminde uygun bir yakma teknolojisi ile linyit ve biyokütle kaynaklarının birlikte kullanılması akıllıca olacaktır. Akışkan yataкта veya pülverize yanmada düşük kalorili, yüksek küllü ve yüksek kükürlü yakıtları biyokütle ile yakmak için, birlikte yanma uygun bir teknoloji olabilir [3,4].

Dünyada fosil yakıt tüketiminin artması, CO₂ emisyonlarının artmasına neden oluyor. Atmosferdeki son CO₂ konsantrasyonu 414 ppm'ye ulaşmıştır [9]. Mevcut kömür santrallerinde linyit kömürlerinin biyokütle ile birlikte yakılması daha ekonomik ve daha çevre dostu olabilir çünkü biyokütle genellikle çok düşük kükürt ve kül içeriğine sahiptir. Bu nedenle, biyokütlenin birlikte yanması, kömür yakıtlı elektrik santrallerinden kaynaklanan emisyonları azaltma potansiyeline sahiptir.

Acar ve Dinçer [5], yenilenebilir enerji kaynaklarını ve fosil yakıtları elektrik üretiminin çevresel etkileri açısından incelemiş ve çevreye etkisi açısından en zararlı kömürün olduğuna karar vermişlerdir. Kourkoumpas vd. [6] linyit ve biyokütle tabanlı güç sistemlerini çevresel ve ekonomik açıdan yaşam döngüsü analizi metodolojisi ile incelemişler. Linyit kullanımıyla ilişkili önemli çevresel etkileri vurgulamışlar.

Biyokütlenin kömürle birlikte yakmada emisyon azaltımına katkısı, farklı yapısı ve nakliye zorlukları nedeniyle sınırlıdır. Ancak bu katkıyı, biyokütlenin biyokömürleştirilmesi ve linyit kömürüne benzer biyokömürün elde edilmesi ile artırmak müm-



kündür. Genel olarak, biyokütle düşük hacimsel enerji yoğunluğuna, yüksek nem içeriğine ve hidrofilik yapıya sahiptir ve bu da nakliye, depolama ve işlemede daha yüksek maliyetlere yol açıyor. Odunsu biyokütleyi doğrudan yakma / birlikte yakma sistemleri için bir yakıt olarak kullanmak, linyitlere kıyasla yakıt özelliklerinden dolayı zordur. Bu nedenle, biyokütlenin kömürle birlikte karışımı güç santrallerinde kullanımı sınırlıdır. Güç sistemlerinde odunsu biyokütlenin kullanımını artırmanın bir yolu, biyokütleyi biyokömürleştirme yoluyla biyokömüre dönüştürmektir.

Termal bir ön-işlem olarak biyokömürleştirme, biyokütlenin fiziksel ve kimyasal bileşimini önemli ölçüde değiştiren uygulanabilir bir teknolojidir [7]. Biyokömürleştirme, inert bir ortamda 200–300 °C sıcaklık aralığında biyokütlenin yavaşça ısıtılmasını sağlayan bir işlemdir. Bu işlem, biyokütlenin fiziksel, kimyasal ve biyokimyasal bileşimini iyileştirerek, birlikte yanma ve gazlaştırma amaçları için daha iyi performans göstermesini sağlıyor [8].

Bu çalışmada, 5 kg / saat kapasitesine sahip pilot ölçekli sürekli beslemeli biyokömürleştirme sisteminde biyokütleden üretilen biyokömür yakıt olarak birlikte yanma için kullanılmıştır. Biyokömürleştirme sisteminin çalışma koşulları Türk linyitlerinin özelliklerine göre optimize edilmiştir. Bu sistem hakkında ayrıntılı bilgi başka bir yerde verilmiştir [10,11].

Oksi yanma, yakıtın hava yerine oksijen ve geri dönüştürülmüş baca gazı (RFG) karışımında yakıldığı, yeni ve mevcut enerji santralleri için ortaya çıkan bir karbon yakalama ve depolama (CCS) teknolojisidir. Bu teknoloji, esas olarak karbondioksit ve su buharından oluşan bir baca gazı üretiyor. Oksi yanma uygulamalarından biri, artmış oksijen konsantrasyonunda yanmanın gerçekleştiği Oksijence Zengin ortamda Yanmasıdır (OEC). Yanma havasına saf oksijen eklenir ve böylece oksitleyici akışında oksijen konsantrasyonu artıyor.

Biyokömürün kömür ile birlikte akışkan yatak yakma sisteminde ve hava ve oksijence zengin ortamda birlikte yakılması konusunda literatürde çok fazla çalışma mevcut değildir. Çalışmalar kömür ve biyokütlenin birlikte hava ve oksijence zengin ortamda yakılması üzerinedir. Literatürde bu konuya benzer çalışmalar aşağıda verilmiştir:

Engin ve arkadaşları [12], İki düşük kaliteli linyit kömürünün hava ve oksijence zengin ortamında yakılmasını termogravimetrik analiz (TGA) yöntemi ile incelemişlerdir. Oksi yanma deneyleri 950°C’de, 10 °C / dakika, 20 °C / dak ve 40 °C / dakika ısıtma oranları ile % 21 O₂-% 79 CO₂, % 40 O₂-% 60 CO₂ ve % 50 O₂-% 50 CO₂ içeren üç farklı gaz karışımıyla gerçekleştirilmiştir. Kömürlerinin oksijence zengin ortamında yanma kinetiği, Coats-Redfern (model uydurma yöntemi), Friedman (FR), Flynn-Wall-Ozawa’nın (FWO) ve Kissinger-Akahira-Sunose’un (KAS) dört farklı yöntemle incelenmiştir. Her iki kömürün de oksijence yanma ortamındaki yanma davranışları kül ve uçucu madde içeriği gibi özelliklerinden dolayı önemli ölçüde değişmiştir.



Rui ve arkadaşları [13]. 75-150 μm boyut aralığında toz haline getirilmiş, odunsu, otsu ve bitki kökenli atıklar dahil olmak üzere çeşitli biyokütle türlerinin yakılmasından kaynaklanan karbon, kükürt ve azot oksitlerin gaz emisyonlarını karşılaştırmışlardır. Deneyler hem ham biyokütle hem de biyokömür üzerinde, 1400 K'de çalıştırılan, laboratuvar ölçekli, elektrikle ısıtılan bir düşürme tüpü fırında (drop tüp) ve yüksek ısıtma oranlarında (104-105 K/s) gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, (a) Biyokömürün karbon içeriğinin daha yüksek olması nedeniyle biyokömür yakılmasından kaynaklanan CO_2 emisyonunun biyokütleden daha yüksek olduğunu göstermiştir. (b) Biyokömür, biyokütleden daha yüksek kükürt içerse bile biyokömür yakılması ile daha düşük SO_2 emisyon oluşmuştur. (c) biyokömür, ham biyokütleden daha yüksek yakıt-azot kütle fraksiyonlarına sahiptir; düşük-bitümlü kömürle karşılaştırıldığında, bazı ham ve kömürleşmiş biyokütle türleri daha düşük ve bazıları daha yüksek NO_x emisyon faktörleri üretmiştir.

Gil ve arkadaşları [14] kömür ve kömürleşmiş biyokütle karışımlarının öğütülebilirlik ve yanma özelliklerini incelemişlerdir. Kömür ile birlikte yanma deneylerinde kullanılmak üzere; çam, siyah kavak ve kestane ağacın kırıntılarında elde edilen kömürleşmiş biyokütle numuneleri, farklı biyokömürleştirme sıcaklıklarında (240, 260, 280 ve 300 $^{\circ}\text{C}$) ve bekleme sürelerinde (11, 22 ve 43 dakika), boru şeklinde bir döner fırında en iyi biyokömürü oluşturmak için dönüştürülmüştür. Daha sonra kömür/kömürleşmiş biyokütle karışımlarının hem öğütme özellikleri hem de birlikte yanma davranışları incelenmiştir. Karışımların yanma performansı sürüklenmeli akışlı bir reaktörü (EFR) içinde değerlendirilmiştir. Kömürle karşılaştırıldığında, kömür / biyokömür karışımlarının birlikte yanması esnasında, NO ve SO_2 'nin daha düşük emisyonları üretilmiştir.

Kayahan ve arkadaşları [15] 30 kWth dolaşımli akışkan yatakta linyit ve biyokütlenin oksijen zengin ortamında birlikte yanmasını incelemişlerdir. Deneyler iki farklı Türk linyiti, bir biyokütle ve bunların karışımları ile yapılmıştır. Biyokütle payı %20'ye kadar artırılmıştır. Oksijen konsantrasyonu %21 ile %30 arasında tutulmuştur. Linyitlere biyokütle ilave edildiğinde ve karışımdaki oksijen zenginleştirilmesi ve biyokütle oranı arttıkça, yanma üzerinde artan bir sinerjik etkiye sahip olduğu görülmüştür. Oksijen zenginleştirmenin tüm durumlarda NO ve SO_2 oluşumunun arttırdığını göstermiştir. Biyokütle payı arttıkça, tüm oksijen durumlarında NO_x emisyonları artarken, SO_2 emisyonları için bunun tersi gerçekleşmiştir.

Bu çalışmanın amacı iki yönlüdür: İlk olarak, birlikte yakma için linyit kömürü ile işlenmiş biyokütlenin (biyokömür) kullanılması, böylece enerji üretimi için bir elektrik santralinde tek başına linyit kömürünün yakılmasına kıyasla emisyonlar azaltılabilir. İkinci olarak, CO_2 ve H_2O buharından oluşan bir baca gazı üretmek için oksijen-yanma sistemini kullanmak, böylece baca gazındaki CO_2 bir CCS teknolojisi ile yakalanabilir.



2. MATERYALLER VE YÖNTEMLER

2.1 Yakıt ve Yatak Malzemesi

Bu çalışmada yakıt olarak Soma linyiti ve biyokömür kullanılmıştır. Biyokömür, Ege Üniversitesinde kurulan 5 kg / saat kapasiteye sahip laboratuvar ölçekli vidalı “sürekli beslemeli biyokömürleştirme sistemi” ile kızılçam yongalarından üretilmiştir. Yakıt analizleri Tablo 1’de verilen ASTM prosedürlerine göre yapılmıştır. Yaklaşık analiz bir LECO TGA 701 Termogravimetrik Analizör ile gerçekleştirilmiştir. Yakıtların üst ısıl değerini ölçmek için LECO AC350 bomba kalorimetresi kullanılmıştır. Nihai

Tablo 1. Ham Biyokütlenin ve Bu Çalışmada Hazırlanan Farklı Biyokömürlerin Analizi İçin Kullanılan Standartlar

Nihai Analiz	Kükürt	Azot	Hidrojen	Karbon	Oksijen	Kül	Nem
Kullanılan standart	ASTM D4239-14	ASTM D5373-14	ASTM D5373-14	ASTM D5373-14	ASTM D3176-09	ASTM E1755-01	ASTM D 7582-12
Yaklaşık Analiz	Uçucu Madde	Nem	Sabit Karbon	Kül	HHV	HGI	
Kullanılan standart	ASTM D7582-12	ASTM D7582-12	ASTM D3172-13	ASTM E1755-01	ASTM D5865-13	ASTM D5003	

Tablo 2. Yakıt Analizi

	Kızılçam biyokütle (B)	Soma linyit (S)	Kızılçam biyokömürü (BK)
Karbon (% ağı)	44.92	5.14	68.91
Kül (% ağı)	0.88	32.78	1.50
Uçucu Madde, UM (% ağı)	73.76	40.49	39.22
Sabit Karbon, SK (%ağı)	15.53	21.60	58.48
Oksijen (% ağı)	47.95	42.40	23.03
Nem (ağı%)	9.81	1.84	0.79
Azot (% ağı)	0.31	0.84	0.62
Hidrojen (% ağı)	5.89	0.73	5.77
Kükürt (% ağı)	0.029	11.51	0.082
Üst Isıl Değer (kJ/kg)	17506	10513	17506
	19964	13464	19964
Alt Isıl Değer (kJ/kg)	15950	11466	15950
	18588	14108	18588
Hardgrove Grindability Index (HGI)	23	64	104



analiz LECO Truspec CHN-S cihazı ile yapılmıştır [4,12]. Yakıtların nihai, yaklaşık analizi ve ısı değerleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablolardan biyokömürün ısı değerinin Soma linyitinden daha yüksek olduğu görülebilmektedir. Yatak malzemesi olan silika kumun (%99,5 SiO₂), ortalama partikül boyutu 0.34 mm, partikül yoğunluğu 2.4 g / cm³ ve yığın yoğunluğu 1.7 g / cm³’dir. Deneylerde yatak malzemesi olarak 4,5 ile 4,75 kg arasında silika kumu kullanılmıştır. OEC için test matrisi Tablo 3’te verilmiştir.

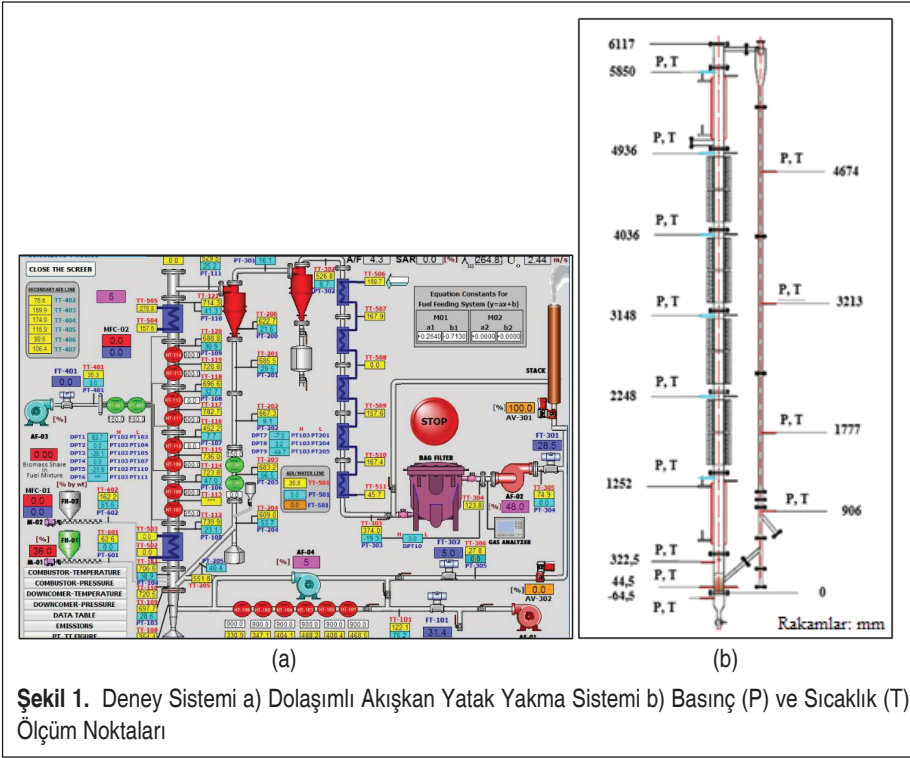
Tablo 3. Oksijen Zengin Ortamda Yanma (Oksijenleme) için Deney Matrisi

Yakıtlar (Soma linyit; Biyokömür: BK), (% ağı.)	Havadaki O ₂ oranı (% hacimce.)
S	21, 23, 26, 28
%90 S + %10 BK	21, 23, 26, 28
%80 S + %20 BK	21, 23, 26, 28
%70 S + %30 BK	21, 23, 26, 28

2.2 Deneysel Sistemi ve Yöntem

Pilot ölçekli DAY sistemi, yakıt besleme sistemi, yakma reaktörü, siklonlar, geri dönüş ayağı, kül toplama ve boşaltma sistemi, FD ve ID fanları, hava ve yanma ısıtıcıları, baca gazı hattı sistemlerinden oluşmaktadır [3,15] (Şekil 1). Yanma reaktörü 108 mm iç çaplı ve 6 m yüksekliğinde 300 AISI 310 paslanmaz çelik borudan yapılmıştır. Birincil hava hattı üzerinde 6 adet elektrikli hava ısıtıcısı ve yanma kolonu üzerinde 8 adet elektrikli hava ısıtıcısı bulunmaktadır. Hava, 200 mbar hidrolik yük basıncına sahip bir hava fanı (FD fan) ile sisteme verilmiştir. Yakıt, vidalı besleyicilerle beslenmiştir. Yakıt besleme hızı bir frekans kontrolörü tarafından kontrol edilmektedir. Ayrıca, oksijen akış hızı, kütle akış kontrolörü (MFC) tarafından kontrol edilmiştir. Sistemden geçen sıcaklık, basınç ve akış oranları SIEMENS Win CC SCADA sistemi ile ölçülerek kontrol edilmiştir. Giriş akışındaki oksijen konsantrasyonu ABB Magnos 206 paramanyetik çevrimiçi oksijen analizörü cihazı ile ve çıkıştaki baca gazı GAS-MET DX 4000 FTIR cihazı ile analiz edilmiştir. Baca gazı bileşenleri CO₂ (% 0-100, ± % 1), O₂ (% 0-25, ± % 1), H₂O (% 0-25, ± % 1), NO_x (0-1000 ppm), N₂O (0-500 ppm), HCN (0-1000 ppm), SO₂ (0-2000 ppm), CO (0-10000 ppm) ölçülmüştür.

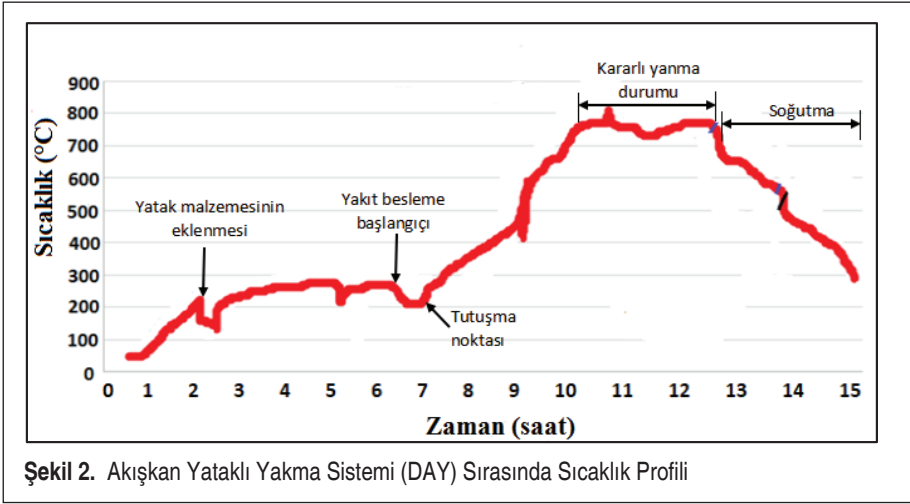
Deneysel yöntem aşağıda açıklanmıştır. Başlangıçta, tüm elektrikli ısıtıcılar (yanma odası ısıtıcıları ve hava kanalı ısıtıcıları) açılmıştır. Boş yanma reaktörü, alt bölgedeki sıcaklık 250 °C’ye ulaşana kadar sıcak hava ile ısıtılmıştır (Şekil 2). Yatak malzemesi (silika kumu) yüklendikten sonra sıcaklık 120-150 °C’ye kadar düşmektedir (Şekil 2). Yatak sıcaklığı tekrar 280-300 °C’ye ulaştığında ki bu olay genellikle 5-6 saat sürüyor,



Şekil 1. Deney Sistemi a) Dolaşımli Akışkan Yatak Yakma Sistemi b) Basınç (P) ve Sıcaklık (T) Ölçüm Noktaları

yakıt beslemesine geçilmiştir. Yakıt soğuk olduğu için yakıt beslemesinin ilk dakikalarında yataktaki sıcaklık düşmektedir (Şekil 2). 10 ile 20 dakika içinde tutuşma meydana gelmiş ve sıcaklık yükselmeye başlamıştır (Şekil 2). Yaklaşık 780oC’de, hava kanalı ısıtıcıları devrede kalırken yakıcı ısıtıcıları kapatılmıştır. Hava kullanıldığında stabil bir durumda çalışmaya ulaşmak için yakıt beslemesinin başlangıcından itibaren 8-10 saat gerekmektedir.

Tüm yakıtlar önce hava ortamında yakılmış ve ardından yanma modu Oksijence zengin hava ortamına geçirilmiştir. Hızlı sıcaklık artışını ve sıcak bölge oluşumunu önlemek için mod değişikliği, O₂ konsantrasyonunu hedef değere küçük adımlarla çok yavaş artırarak gerçekleştirilmiştir. Yanma deneyleri sırasında tipik bir sıcaklık profili Şekil 2’de gösterilmektedir. Her deney yaklaşık 14 ile 18 saat arasında sürmüştür. Deney sırasında yataktaki basınç düşüşü sürekli olarak izlenmiştir. Testler sırasında sıcaklıklar, DAY yanması için tipik olan 800 ile 900 °C arasında tutulmuştur. Yanma havasının O₂ konsantrasyonu hacimce % 21’den (atmosferik koşul) % 28’e çıkarılmıştır. Oksijen zenginleştirme, bir kütle akış kontrolörü ile birincil hava hattına saf oksijenin eklenmesi ile sağlanmıştır. Yanma testleri sırasında, yakıt karışımlarındaki biyokömürün katkıları ağırlıkça %0, %20, %30, %50’ye ayarlanmıştır. Şekil 2’de bes-



leme sisteminin tıkanması veya kapanması nedeniyle hızlı sıcaklık düşüşleri görülmektedir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

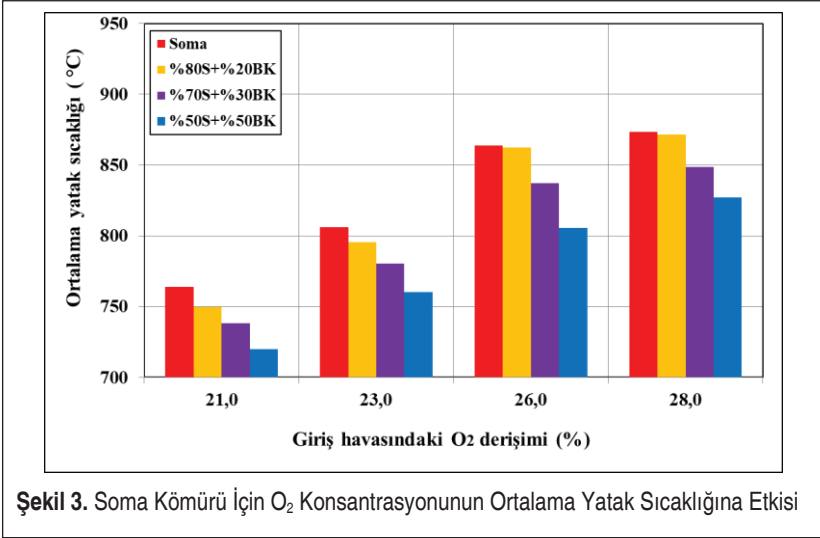
3.1 Sıcaklık Profilleri

Oksijence zengin hava ortamında yanma deneyleri ilk önce tek başına Soma linyit ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra biyokömür ve linyit karışımları, Tablo 3'te gösterilen gerekli yakıt bileşimlerine göre hazırlanmıştır. Tablo 3'te gösterilen test matrisi, Soma linyitine çeşitli biyokömür yüzdelerin ilavesi ile elde edilmiştir. Ortalama yatak sıcaklığı, birincil havadaki oksijen konsantrasyonundan etkilenmiştir.

O₂ konsantrasyonunun ortalama yatak sıcaklığı üzerindeki etkisi Şekil 3'te gösterilmektedir. Deneylerde oksijen konsantrasyonu arttıkça ortalama yatak sıcaklığı yükselmiştir. Soma kömüründe %21 oksijen konsantrasyonu ile ortalama yatak sıcaklığı 710-750 °C arasında değişirken, %28 oksijen konsantrasyonunda ortalama yatak sıcaklığı 875 °C'ye yükselmiştir (Şekil 3).

Soma kömürüne sınırlı miktarda biyokömürün ilave edilmesi ile karışımın ÜİD'i artmıştır çünkü biyokömürün ÜİD'i Soma kömürün ÜİD'inden daha yüksektir, bunun nedeni de biyokömürün karbon içeriğinin Soma'dan daha yüksek olmasıdır (C: ağırlıkça %42,4'e ve %68,9). Karbonun yanması diğer bileşenlere göre daha zordur. Bu nedenle, daha düşük bir yatak sıcaklığı gözlemlenmiştir.

%21 oksijen konsantrasyonunda yanma için yakıt karışımındaki biyokömür yüzdesi ağırlıkça %20'den %50'ye arttığında, ortalama yatak sıcaklığı kademeli olarak

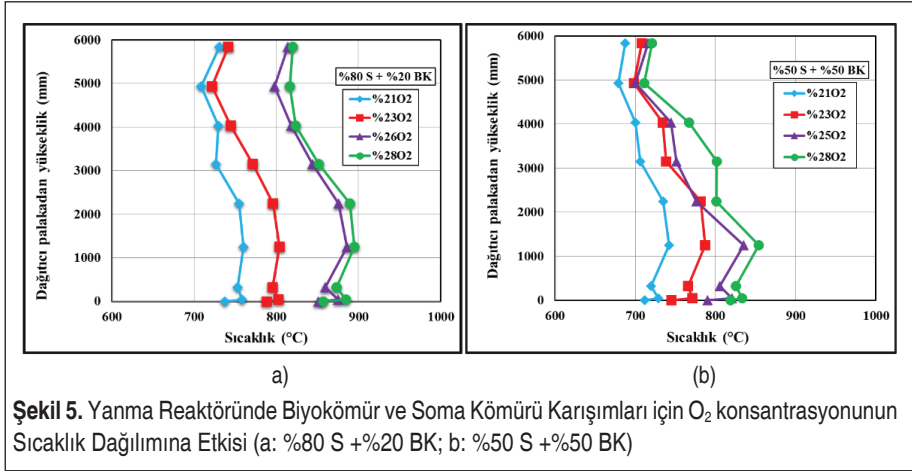
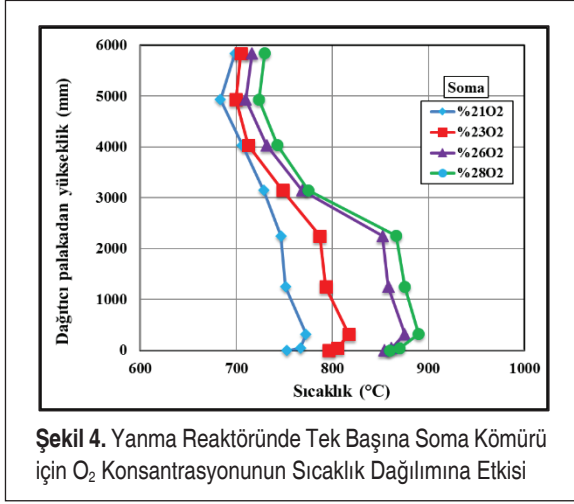


Şekil 3. Soma Kömürü İçin O₂ Konsantrasyonunun Ortalama Yatak Sıcaklığına Etkisi

760'dan 720 °C'ye düşmüştür. Oksijen konsantrasyonu %28'e çıkınca bu eğilimin devam etmiş ve %50 / %50 Soma ve biyokömür karışımı için yatak sıcaklığının 830 °C olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 3'te görüldüğü gibi, %21 ve %23 oksijen konsantrasyonunda Soma kömürü karışımına %20 biyokömür ilave ettiğimizde yatak sıcaklığı biraz düşmüştür. Bununla birlikte, yakıt karışımındaki biyokömür içeriği ağırlıkça %20'den fazla arttıkça, yatağın ortalama sıcaklığı giderek azalmaktadır çünkü biyokömür, Soma kömüründen biraz daha yüksek bir uçucu içeriğe sahiptir (Şekil 3).

Öte yandan, kömüre %50 biyokütle eklendiğinde (Şekil 3), yatak sıcaklığı tek başına kömür yanmasına kıyasla tüm O₂ konsantrasyonlarında daha düşüktür. Bu, daha iyi yanma için biyokömür katkısının bir sınırı olduğunu göstermektedir. Ticari birlikte yakma uygulamasında maksimum biyokütle katkısının %10 ile %15 arasında olduğu dikkate alındığında, bu sonuç bize biyokütleden daha fazla biyokömür ekleyebileceğimizi göstermektedir.

Tek başına Soma kömürü için oksijenle zenginleştirilmiş deneylerinde yakma reaktörün yüksekliği boyunca sıcaklık değişiklikleri, Şekil 4'te verilmiştir. Yanma havasında oksijen konsantrasyonu %21 ile %28 arasında değişmektedir. Yanma havasındaki oksijen konsantrasyonu arttığında, yataktaki (300-320 mm) ve serbest bölgedeki (1252-2248 mm) sıcaklıklar tüm durumlarda artmıştır. Sıcaklık profili üzerinde etkili olan diğer faktör, kömürün uçucu madde (UM) içeriğidir. Kömür partikülleri yanma reaktörüne girdiklerinde uçucu maddeleri buharlaşma eğilimine sahiptirler. UM, serbest bölgede yanmakta ve bu da yatak sıcaklığından daha yüksek bir serbest bölge sıcaklığına neden olmaktadır. Uçucu maddenin yanması nedeniyle serbest bölgede bir maksimum sıcaklık gözlemlenmiştir. Yanma reaktöründe yakılan yakıtın uçucu



madde içeriği ne kadar yüksekse, serbest bölgede ulaşılan maksimum sıcaklık o kadar yüksek olur. Böylece, yanma havasında %28 oksijen konsantrasyonu için serbest bölgede maksimum 860-88 °C sıcaklıkları görülebilir. Şekil 4'te açıkça görülmektedir. Diğer oksijen konsantrasyonları için de benzer sonuçlar görülebilmektedir.

3.2 Emisyonlar

Oksijenle zenginleştirilmiş birincil havada yanma sırasında başlıca kirletici (CO, NO ve SO₂) emisyonlarının değişimleri bu bölümde sunulmuştur. Baca gazındaki her kirleticinin konsantrasyonu, baca gazındaki hacimce %6 O₂'ye dayanır ve normal sıcaklık (273 °K) ve basınçta (1 atm.) mg / Nm³ (kuru bazda) olarak ifade edilmektedir. Ölçü-

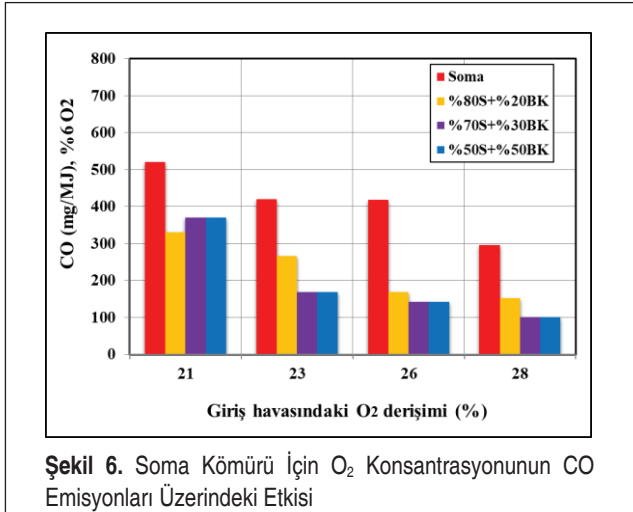


len ppm verileri, oksijenle zenginleştirilmiş durumlar için düzeltilmiş ve mg / MJ'e dönüştürülmüştür.

CO Emisyonları: CO emisyonu, tam olmayan yanmanın bir göstergesidir. Bu nedenle yanma havasındaki oksijen konsantrasyonu arttıkça, bol oksijen sebebiyle daha iyi yanma olur ve baca gazındaki CO konsantrasyonu azalır. Havadaki O₂ oranına göre incelenen tüm durumlar için CO konsantrasyonları Şekil 6'da verilmiştir. Soma kömürün tek başına normal havada yakılması için (hacimce %21 O₂), CO konsantrasyonu 520 mg / MJ olarak bulunmuştur. Yanma havasındaki oksijen konsantrasyonu arttıkça, daha iyi yanma meydana gelmiştir ve hacimce %27 O₂ içeren havada tek başına Soma kömürü için CO emisyonu 295 mg / MJ'e düşmüştür. Bu eğilim, Soma linyitine biyokömürün eklenmesiyle devam etmektedir. Biyokömür ilave yüzdesi arttıkça CO emisyonunda azalma görülmektedir. En yüksek CO konsantrasyonları, ağırlıkça %50 / %50 yanmada bulunmuştur. Bunun iki olası nedeni vardır: (i) biyokömürün eklenmesiyle elde edilen yakıt karışımının daha yüksek uçucu içeriği, serbest bölgedeki uçucu madde içeriğini (hidrokarbon konsantrasyonu) artırır, bu da hidrokarbonlarla CO'dan daha kolay reaksiyona girebilme imkanı olduğu için, CO, OH ve HO₂ radikallerinin oksidasyonunu sınırlar, (ii) CO reaktörden yanmadan kaçar.

Yanma reaktöründe CO emisyonunu azaltmak için olası bir çare, ikincil havanın serbest bölge içine enjekte edilmesi, böylece CO oksidasyonunun artırılması ve ayrıca yanma reaktörün serbest bölge türbülansının artırılması ile olabilir.

Yanma havasındaki oksijen konsantrasyonu arttıkça daha iyi yanma meydana gelmiş ve havada hacimce %28 O₂ ile CO emisyonu 295 mg / MJ'e düşmüştür (Şekil 6). Soma kömürüne ağırlıkça %50 biyokömür ilave edildiğinde bile, yanma sisteminde



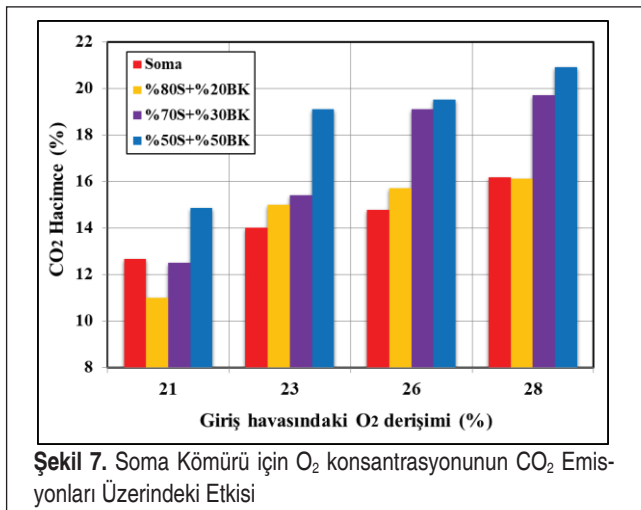


ve emisyonlarda herhangi bir olumsuz durum ile karşılaşmamıştır. Ağırlıkça %50 biyokömür ilavesi, havada %28 O₂ ile CO emisyon değerini 100 mg / MJ'e düşürmüştür. Bu, Soma kömür külünün metal oksit içeriklerine bağlanabilir. Tablo 4'teki Soma kömürünün kül analizinden görülebileceği gibi, Soma kömür külü silika, alümina ve CaO bakımından zengindir. Bu oksitler, yanma reaktöründe CO oksidasyonu için katalizör görevi görebilir.

CO₂ Emisyonları: CO emisyonlarının aksine, yanma havasındaki oksijen konsantrasyonu ve yakıt karışımındaki biyokömür miktarı arttıkça, CO emisyonlarında anlatıldığı gibi daha iyi yanma nedeniyle CO₂ emisyonları da artmaktadır. Şekil 7, tüm yanma deneyleri için O₂ konsantrasyonundaki artışla birlikte CO₂ konsantrasyonunun değişimini göstermektedir. Oksijen zenginleştirme daha iyi yanmayı destekler; bu nedenle, oksijen zenginleştirme tüm durumlarda CO₂ konsantrasyonunu artırır. Linyitlere biyokömürün ilavesi, yakıt karışımındaki oksijenin zenginleştirilmesi ve biyokütle payı artışı, yanma üzerinde artan bir sinerjik etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Yakıt karışımlarında biyokömürün payı arttıkça, Soma linyiti için CO₂ konsantrasyonları artmıştır. Yakıt karışımındaki biyokömürün payı ve oksijen zenginleşmesi arttırıldığı zaman Soma linyitine biyokömürün ilavesi, yanma üzerindeki sinerjik etkiyi artırır. Sinerjistik etki, biyokütlenin yüksek alkali ve toprak alkali metal oksit içeriğine bağlanabilir. Soma linyitinin kül bileşimi yüksek Al₂O₃, CaO ve SiO₂ içerikleri gösteren Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Soma Linyitinin Kül Bileşimi, Ağırlıkça %. (Kuru bazda)

Kömür	Al ₂ O ₃	BaO	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	SiO ₂	SrO	TiO ₂	V ₂ O ₅
Soma	22.24	0.12	19.37	5.85	1.95	2.08	0.07	0.24	0.25	6.79	39.51	0.05	1.14	0.14



Şekil 7. Soma Kömürü için O₂ konsantrasyonunun CO₂ Emisyonları Üzerindeki Etkisi

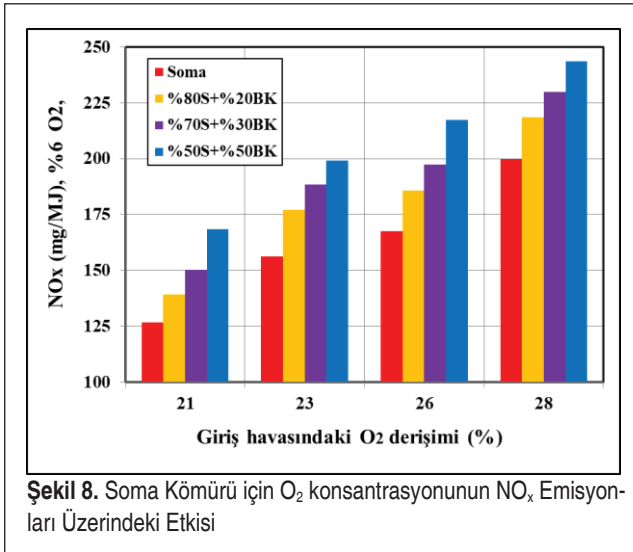


NO_x Emisyonları: Yanma sırasında NO_x (NO ve NO₂) oluşum mekanizması çok karmaşıktır. Yanma bölgesinde bulunan azotlu türlerin tipine, sıcaklığına ve stokiometrik oranına bağlı olarak nitrojen oksit oluşum mekanizması değişir. Genellikle alev türü, NO_x oluşumunun baskın mekanizmasının koşullarını belirlemektedir. NO, yanma sırasında NO_x emisyonlarının çoğunu oluşturur (> %90).

Oksijence zengin ortamdaki sıcaklıklar termal NO_x oluşum sıcaklığının 1000 °C'ın çok altındadır. Romeo vd. [16], termal NO_x'in DAY Oksijen yanma deneylerinde ihmal edilebilir olduğunu göstermiştir [16]. Termal-NO_x oluşumu, dolaşımli akışkan yatak yanmasında daha düşük çalışma sıcaklıkları (800-900 °C) nedeniyle NO emisyonlarının nedeni gibi görünmemektedir [16]. İncelenen koşullarda olası NO_x oluşum yolu, yakıt-N'nin NO'ya dönüştürülmesidir. Yakıt-NO_x oluşumu üzerindeki sıcaklığın etkisi literatürde net değildir. Khan vd. [17], akışkan yatağın çalışma sıcaklıklarının en yüksek yakıt NO_x dönüşüm oranları için uygun olduğunu bildirmektedir [17]. Öte yandan Miller ve Bowman. [18], yakıt-N'den NO_x'e dönüşümün sıcaklığa çok az bağlı olduğunu iddia etmektedirler.

O₂ konsantrasyonuna göre NO_x emisyonlarındaki değişim Şekil 8'de gösterilmektedir. Yanma reaktöründe maksimum sıcaklık 750 °C ve 871 °C olarak gözlemlenmiştir. Küçük sıcaklık aralıklarında NO_x emisyonlarındaki artışa bakıldığında, 760 °C ile 890 °C arasında sıcaklığın yakıt-N'den NO'ya dönüşümünde önemli bir etkisi olmadığını düşünmek mantıklıdır.

O₂ konsantrasyonunun artması ile birlikte tek başına Soma linyitin yanmasından kaynaklanan NO_x emisyonları, 127 mg / MJ'den 200 mg / MJ'e yükselmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Soma Kömürü için O₂ konsantrasyonunun NO_x Emisyonları Üzerindeki Etkisi



Yanma havasında O₂ konsantrasyonunun hacimce %21'den %27'ye yükseltilmesi, Soma linyit için NO_x emisyonlarında hafif artışa neden olduğu göstermektedir. Bunun nedeni, yanma reaktöründe daha yüksek O₂ konsantrasyonunun bir sonucu olarak OH radikallerindeki artıştan kaynaklanıyor olabilmesi ve buda, NO_x oluşumunu artışına sebep olmasıdır [19].

Soma linyitine biyokömür ilavesinin NO_x oluşumu üzerindeki etkisi, Şekil 8'de gösterilmektedir. NO_x emisyonları tüm yakıt karışımları için tek başına linyitten daha yüksektir. Sonuçlar, yakıt karışımındaki artan biyokömür payının daha yüksek NO_x emisyonu ile sonuçlandığını göstermektedir. Biyokömürün azot içeriği (ağırlıkça %0,63) linyitin azot içeriğinden (uçucu içerik olarak ağırlıkça %0,84) daha düşük olmasına rağmen, biyokömür, linyite göre (Soma için 2.19) daha yüksek H/N oranına (9.17) sahiptir. Daha yüksek H/N oranına sahip yakıtların, daha yüksek NH₃ üretmesi bekleniyor ki buda NO oluşumunu arttırmaktadır. Bu nedenle, %50 /%50 kömür ve biyokömür yakıt karışımı için, O₂ konsantrasyonunun hacimce %21'den %28'e çıkmasıyla NO_x emisyonu 170 mg / MJ'den 240 mg / MJ'e yükselmiştir.

SO₂ Emisyonları: Soma linyitinin tek başına yanması, çok düşük S içeriği nedeniyle (ağırlıkça %0,73) ölçülebilir SO₂ emisyonları üretmemektedir. Biyokömürün S içeriği de çok düşüktür (ağırlıkça %0,08). Bu nedenle Soma için SO₂ emisyonları, burada verilmemiştir.

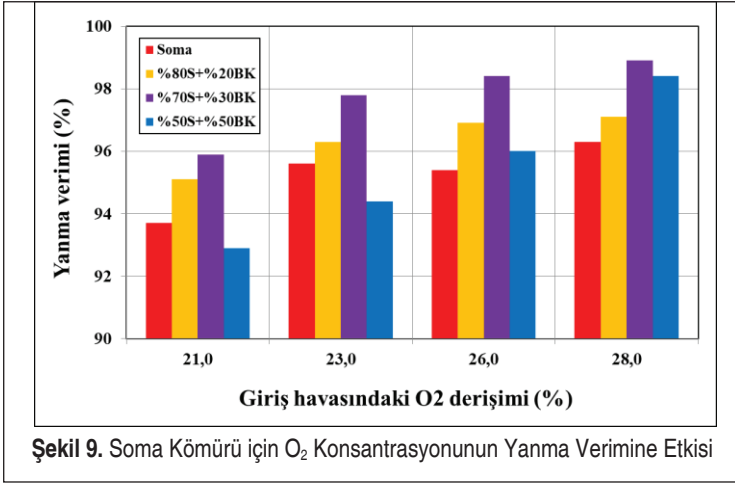
3.3 Yanma Verimi

Yanma verimi aşağıdaki ilişkiden hesaplanmıştır [20]:

Bu verimlilik hesaplama yöntemi, baca gazı bileşimi bilgisine dayanmakta ve karbon kaybının olmadığını ve beslemede sunulan karbon bileşiminin tamamen karbon monoksit ve karbondioksite dönüştüğünü varsaymaktadır. Şekil 8, Soma linyiti ve biyokömür ile karışımları için yanma verimliliği varyasyonunu O₂ konsantrasyonu ile göstermektedir. Sistemde karbon dengesi yapılırsa yakıttaki tüm karbonun CO veya CO₂'ye dönüştüğünü göstermektedir.

$$\eta_{CE} = 100 \times \frac{\text{Baca gazındaki } \%CO_2}{\text{Baca gazındaki } (\%CO_2 + CO)} \quad (1)$$

Bu, yanma veriminin hesaplanmasında "külde yanmamış karbon kalmaması" varsayımının doğru olduğunu göstermektedir. Tek başına Soma linyiti için hava ile yakıldığında yanma verimi, yaklaşık %94 olmuştur. Yanma havasındaki oksijen konsantrasyonu %21'den %28'e çıktığında yanma verimi %96,5'e yükselmiştir. Biyokömür Soma linyitine ilave edildiği zaman, hacimce %28 oksijen konsantrasyonu için yakıt karışımına %20 biyokömür ilavesi için yanma verimi %96,5'e, %30 biyokömür ilavesi için %99'a yükselmiştir. Bununla birlikte, Soma linyitine %50 biyokömür ilavesi için yanma verimi %99'a yükselmiştir.



vesi için, özellikle düşük O₂ konsantrasyonlarında yanma verimi %93-96 arasında daha düşük seviyelere düşmektedir. Bu, yakıt karışımına %50 biyokömür ilavesiyle daha düşük ortalama yatak sıcaklığı ile açıklanabilir. Biyokömür yüksek miktarda sabit karbon içeriyor (%58,49) ve karbonun yanmasının uçucu maddeden daha zor olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, yatağa beslenen yüksek miktarda biyokömür yatak sıcaklığını düşürebilir, buda düşük oksijen konsantrasyonlarında daha düşük yanma veriminin nedeni olabilir. Ancak yanma havasındaki oksijen konsantrasyonu arttığında, daha iyi yanma ile %28 oksijen konsantrasyonu için yanma verimi de %98,5'e yükselmiştir.

3.4 İki Linyit Kömürün Karşılaştırılması- Soma Linyit ve Orhaneli Linyit

Soma linyiti, çam ağacından elde edilen biyokömür ile birlikte yakma için kullanılmadan önce, Orhaneli linyiti de biyokömür ile birlikte yakma için kullanılmıştır. Bu çalışmanın detaylı sonuçları Keivani, B. vd., 2019'da yayınlanmıştır. Bu linyit kömürleri birbirinden çok farklıdır. Orhaneli linyiti, Soma'ya kıyasla düşük kül (%8,8) ve yüksek UM içeriğine (%44,4) sahiptir. Soma, yüksek kül (%42,7) ve düşük UM içeriğine (%32,8) sahiptir. Sabit Karbon (SK) içeriği söz konusu olduğunda, Soma %21,6 ve Orhaneli %41,1 SK'a sahiptir. Bu nedenle bu kömürlerin yanma ve birlikte yanma özellikleri oldukça farklıdır. Bu kömürlerin alt ısıl değerleri (AID) de farklıdır. Orhaneli, yüksek UM, yüksek SK ve düşük kül içeriği nedeniyle çok daha iyi bir kömürdür. AID'i kuru bazda 25034 kJ/kg'dır ve kalorifik değeri biyokömürden (23487 kJ / kg) daha yüksektir. Öte yandan Soma, düşük UM, düşük SK ve yüksek kül içeriği (kuru bazda yaklaşık %42,7) nedeniyle düşük kaliteli bir kömürdür. AID'i kuru bazda 13464 kJ/kg'dır ve kalorifik değeri biyokömürden (23487 kJ/kg) daha düşüktür. Kalorifik değer açısından bakıldığında, Soma linyitin biyokömür ile birlikte



yakılması, düşük kaliteli bir kömüre destek vermek için çok daha iyi bir seçenektir. Emisyonlar dikkate alınır, CO emisyonları eğilimi her iki kömür için de aynıdır. Bol oksijen beslemesi nedeniyle yanma havasındaki oksijen içeriği arttıkça CO emisyonu azalmıştır. Ancak biyokömür ilavesi ile CO emisyonu Soma linyitinde azalmakta, Orhaneli linyitinde artmaktadır. Soma için yanma verimliliği tek başına yakıldığında %93,5-96,5 civarındadır. Yakıt karışımına biyokömür ilavesi ile yanma verimliliği %98-99'a yükselmiş ve bu yakıt karışımında, %50 /%50 kömür ve biyokömür karışımı için CO emisyonlarının 100 mg / MJ'e düşmesini açıklamaktadır.

Orhaneli tek başına yakıldığında yanma verimi %98,7-99,2 civarındadır. Ancak Orhaneli linyitinde yakıt karışımına biyokömür ilavesi ile linyite %20 ve %30 biyokömürün ilavesi için yanma verimi %99,5-99,7'ye kadar yükselmektedir. Bununla birlikte, %50 biyokömür ilavesi ile yanma verimi %93,5-97,5'e düşmektedir. Bu, yakıt karışımındaki %50 /%50 kömür ve biyokömür karışımı için CO emisyonlarının 280 mg / MJ'e kadar artışı açıklamaktadır. Bunun nedeni, yanma reaktöründeki çok yüksek SK içeriğinden ve sabit karbonun daha yavaş yanma hızından kaynaklanıyor olabilir. Bu oldukça ilginç bir noktadır ve yardımcı yanma reaktörlerin tasarımında dikkate alınmalıdır.

Baca gazında CO azaldığında CO₂ konsantrasyonunun artacağı oldukça açıktır. Bu, her iki kömür karışımının baca gazı bileşiminde gözlemlenen durumdur. NO_x emisyonu söz konusu olduğunda: Soma ve Orhaneli için yanma havasındaki oksijen konsantrasyonunun artmasıyla NO_x emisyonları artmaktadır. Bu oldukça beklenen bir durumdur çünkü yanma reaktöründeki fazla oksijen miktarı ile daha yüksek sıcaklıklara ve daha iyi yanma koşullarına ulaşılır. Yanma sırasında yakıt-NO_x oluşmanın beklenmesi ile birlikte, ortamdaki bol oksijen ve kömür külünde bulunan bazı alkali metallerin olası etkisi nedeniyle Termal NO_x oluşumu da gerçekleşebilir. Nitekim Soma durumunda NO_x emisyonları Orhaneli'ye göre daha yüksektir ve daha önce Tablo 2'de verildiği gibi Soma'da kül içeriği oldukça yüksektir (kuru bazda ağırlıkça %42,7). Bu, NO_x oluşumundaki kömür külünün sinerjik etkilerini ve muhtemelen yakıt NO_x'e ilave olarak Termal NO_x oluşumu ile açıklanabilir.

4. SONUÇLAR

Oksijen zenginleştirme, daha iyi yanma nedeniyle tüm durumlarda CO oluşumunu azaltmış ve CO₂ konsantrasyonunu arttırmıştır. Biyokömürün yakıt karışımındaki payı arttıkça, Soma linyiti için CO emisyonu azalmıştır. En yüksek CO emisyonu tek başına Soma linyiti ile elde edilirken, biyokömürün katkı payı arttıkça CO emisyonu azalmıştır. Azaltılmış CO emisyonuna ek olarak, yanma verimliliği biyokömürün ilavesi ile artmıştır. Biyokömür ilavesi ile birlikte oksijen içeriği arttıkça, Soma kömürünün CO₂ konsantrasyonunda ve yanma veriminde daha hızlı bir artış göstermiştir.

Soma linyitine biyokömür ilavesi yanma üzerindeki sinerjik etkiyi arttırmıştır. Siner-



jistik etki, biyokömürün yüksek alkali ve toprak alkali metal oksit içeriğine bağlanabilir. Soma linyiti üzerindeki etki daha belirgindir.

Havadaki oksijen konsantrasyonunu %28'e kadar O₂ ile zenginleştirmek, bu çalışmanın sıcaklık aralığında Yakıt-N dönüşümünü teşvik ederek ve kısmen Termal-NO_x oluşumunu teşvik ederek NO_x emisyonlarını arttırmıştır. Yakıt karışımındaki daha yüksek biyokömür payı, temel olarak biyokömürün düşük S içeriği nedeniyle daha düşük SO₂ emisyonlarına neden olmuştur.

Orhaneli ve Soma linyitleri karşılaştırıldığında yanma havasında oksijenin artışı ile Orhaneli linyitinde Soma'ya göre daha fazla NO_x oluşumu meydana gelmiştir. Bu linyitlere biyokömür ilavesi ile her iki durumda da NO_x oluşumu artmıştır. Bu nedenle, sinerjistik etkinin biyokömürün yüksek alkali ve toprak alkali metal oksit içeriğinin yanı sıra Yakıt-NO_x'e ilave olarak bir miktar Termal-NO_x oluşumuna atfedilebileceğini bekleyebiliriz. Bununla birlikte, Soma linyitinin biyokömür ile birlikte yakılması düşük kaliteli bir kömüre destek vermek için çok iyi bir seçenek olduğu kesindir.

Ticari uygulamalar için daha fazla çalışma yapılmalıdır. Biyokömürleştirme ve DAY sistemlerinde enerji ve ekserji analizleri yapılmalıdır. Ölçek büyütmek için bir model geliştirilmelidir. Oksijenleme teknolojisinin mevcut enerji santrallerine güçlendirme seçeneğini değerlendirmek için oksijen zengin bir yanma ortamında ısı transferi için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

TEŞEKKÜRLER

213M527 numaralı Tübitak 1003 “Dolaşım Akışkan Yatak Yakma Sisteminde Linyit ve Biyokömürün Oksijen Zengin Ortamda Yakılması (OKSİYANMA)” projesi kapsamında TÜBİTAK ARDEB'e desteklerinden dolayı çok teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

1. **Saracoglu, N.** 2015. Energy production from forest residues in Turkey, 3rd International Symposium and Innovative Technologies in Engineering and Science, Valencia, Spain. ISITES.
2. **Ersoy, M.** 2015. Role of coal in Turkey, Workshop on best practices in production of electricity from coal, 29 October 2015, Genova, https://www.unece.org/.../se/.../8_M_Ersoy_TURKEY.pdf (Accessed 08 February 2019).
3. **Varol, M., Atımtay, A.T., Olgun, H. and Atakül, H.** 2014. Emission characteristics of co-combustion of a low calorie and high sulfur-lignite coal and woodchips in a circulating fluidized bed combustor: Part 1, Effect of excess air ratio, Fuel, 117, 792–800.
4. **Atımtay, A.T., Kayahan, U., Unlu, A., Engin, B., Varol, M., Olgun, H., Atakul, H.** 2017. Co-firing of pine chips with Turkish lignites in 750 kWth circulating fluidized bed combustion system, Bioresource Technology, 224, 601–610.
5. **Acar, C. and Dincer, I.** 2017. Environmental impact assessment of renewables and Conventional fuels for different end use purpose, Int. J. Global Warming, 13 (3/4), 260-277.



6. **Kourkoupas, D.S., Stamatiou, G., Karellas, S., Grammelis, P. and Kakaras, E.** 2017. An environmental and economic evaluation of the lignite power generation system by using the life cycle analysis principles, *Int. J. Global Warming*, 13(3/4), 297-329.
7. **Tumuluru, J.S., Sosanj, S., Hess, J.R., Wright C.T. and Boardman, R.D.** 2011. A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications, *Industrial Biotechnology*, 384-401.
8. **Recari, J., Berruoco, C., Puy, N., Alier, S., Bartroli, J. and Farriol, X.** 2017. Torrefaction of a solid recovered fuel (SRF) to improve the fuel properties for gasification processes, *Applied Energy*, 203, 177-188.
9. NASA, Global Climate Change. 2019. <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/>. Erişim tarihi Şubat 25, 2019.
10. **Olgun, H., Keivani, B., Gultekin, S. and Kabadayi A.** 2016. Experimental study on torrefaction of pine wood in a continuous screw conveyor, 6th International Symposium on Energy from Biomass and Waste, Venice -Italy, November 14-17.
11. **Keivani, B., Gultekin, S., Olgun, H., and Atımtay, A.T.** 2018. Torrefaction of pine wood in a continuous system and optimization of torrefaction conditions, *International Journal of Energy Research*, 4597-4609.
12. **Engin, B., Atakül, H.** 2016. Air and oxy-fuel combustion kinetics of low rank lignite, *Journal of the Energy Institute*, 1-12.
13. **Rui, S., Xiaohan, R., Xiaoxiao, M., Nikita, V., Martin, S., Yiannis, A.L.** 2017 Carbon, sulfur and nitrogen oxide emissions from combustion of pulverized raw and torrefied biomass, *Fuel*, 188: 310-323.
14. **Gil, M.V., García, R., Pevida, C. and Rubiera, F.** 2015. Grindability and combustion behavior of coal and torrefied biomass blends, *Bioresource Technology*, 191:205-212.
15. **Kayahan, U. and Ozdogan, S.** 2016. Oxygen enriched combustion and co-combustion of lignites and biomass in a 30 kWth circulating fluidized bed, *Energy*, 116, 317-328.
16. **Romeo, L.M., Díez, L.I., Guedea, I., Bolea, I., Lupiáñez, C., González, A., Pallarés, J., and Teruel, E.** 2011. Design and operation assessment of an oxyfuel fluidized bed combustor, *Exp. Therm. Fluid Sci*, 35(3), 477-484.
17. **Khan, A.A., De Jong, W., Jansens, P.J. and Spliethoff, H.** 2008. Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies, *Fuel Processing Technology*, 90, 21-50.
18. **Miller, J.A., Bowman, G.T.** 1989. Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion, *Prog Energy Combust Sci*, 15, 287-338.
19. **Duan, L., Duan, Y., Zhao, C., and Anthony, E.J.** 2015. NO emission during co-firing coal and biomass in an oxy-fuel circulating fluidized bed combustor, *Fuel*. 150, 8-13.
20. **Patumsawad, S. and Cliffe, K.R.** 2002. Experimental study on fluidized bed combustion of high moisture municipal solid waste, *Energy Conversion and Management*, 43, 2329-2340.

Demiryolu Taşıtlarında Kullanılan Fren Disklerinin Isı ve Malzeme Yönünden Değerlendirilmesi

Beytullah Başgeçmez¹

ÖZ

Demiryolu taşıtı frenleme sistemleri, emniyetli şekilde durdurma, yavaşlatma ve uygun hızla hareketi sağlar. Yaygın olarak sürtünme etkisiyle mekanik frenleme gerçekleştirilir ve demiryolu taşıtları yüksek hızda uygun tasarlandığında fren disklerinin kullanımı, tek güvenli seçenektir. Fren diski boyutları ve ağırlığı, şasi altındaki alan, servis hızı gibi parametrelere göre çeşitlilik gösterir. Farklı malzemeler kullanıldığında ağırlık yarı yarıya varacak kadar azaltılabilmektedir. Frenleme esnasında mekanik enerji ısıya dönüşür. Çeşitli şekillerde ve boyutlarda tasarlanabilen soğutma kanatçıkları arasında akan hava, diskte konveksiyonla etkili soğutma sağlar. Diskte yerel olarak aşırı ısınan alanlar, fren diski malzemesinde yapısal değişikliğe, termal çatlak oluşumuna ve diğer hasarlara yol açar. Bu hasarlar, kontrol edilmediği ve ilerlediği, derin çatlaklar haline dönüştüğü takdirde zamanla disk kullanılamaz hale gelir. Demiryolu taşıtı fren diski imalinde yaygın ve geleneksel olarak dökme demir (lamelli, vermiküler, küresel grafitli) kullanılır; ayrıca yüksek alaşımli dökme demirler, dökme ve dövme çelik. Fren diski çeliklerinin kırılma tokluğunu artırmak ve aşınma dirençlerini yükseltmek için bileşene çeşitli alaşım elementleri eklenebilir. Ayrıca özellikle alüminyum ve seramik matrisli kompozit malzemelerin kullanımı da söz konusudur, böylelikle istenilen özelliklerde ve oldukça hafif tren fren diski üretilebilir. Bu çalışmada fren disk yapısı ve soğutma kanatçıkları, frenlemede ısı oluşumu, transferi, sıcaklık gradyanları ve sıcak bölgelerde oluşan sorunlar, termik çatlaklar, fren disklerinde kullanılan ve kullanılabilecek malzemeler hakkında bilgi verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Demiryolu, fren diskleri, malzeme, ısı, ısıl hasarlar

Assessment of Brake Discs Used Railway Vehicles in terms of Heat and Material

ABSTRACT

Railway vehicle brake systems provides safely stopping, slowing and its movement at the appropriate speed. Mechanical braking is commonly performed by the effect of friction, and the use of brake discs is the only reliable option when railway vehicle is designed for high speed. The dimensions and weight of the brake discs, the area under the chassis, the service speed of the train, etc. varies as it is designed according to the parameters. The weight can be reduced by up to half, when different materials are used. During braking, mechanical energy is converted into heat. The air flowing between the ventilation vanes, which can be designed in various shapes and sizes, provides effective convective cooling in the disc. Locally overheated areas cause structural changes in the brake disc material, thermal crack formation and other damage. If these damages are not controlled and progress and turn into deep cracks, the disc becomes unusable over time. Lamellar, vermicular or spheroidal graphite cast iron is commonly and traditionally used in the manufacture of railway vehicle brake discs. Also cast irons with special compositions, as well as casting and forging steel. Various alloying elements can be added to the composition to increase the fracture toughness and wear resistance of steels to be used as brake disc material. There is also the use of composite materials especially aluminium or ceramic matrix composites thus, a train brake disc desired property and very light can be produced. In this study, information is given about brake disc structure and cooling vanes, heat generation and transfer in braking, heat gradients and problems in hot regions, thermal cracks, materials used and can be used in brake discs.

Keywords: Railway, brake discs, material, heat, thermal damages

Geliş/Received : 15.07.2021

Kabul/Accepted : 13.08.2021

¹ Uşak Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Makine Programı, Uşak, beytullah.basgecz@usak.edu.tr

ORCID: 0000-0001-5981-5317



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Stopping, slowing it down or ensuring its movement at the appropriate speed on downhill descents of the railway vehicle are actualized by brake systems. In contemporary, railway vehicle started to be produced suitable for movement at high speeds, with globalization, to overcome distances in a short time and this situation brings with it many dangers. So, infrastructure and railway vehicle design should be compatible with the service speed. Braking is commonly performed by the effect of friction, and almost all railway vehicles use friction braking by mechanical or electrical manners. Brake discs are used, as a mechanical braking system, instead of the old system with shoe so no braking on the wheel tread. It gives pretty good results for the wheels; the stresses on the wheels are reduced and their life is extended. Brake discs provide a quieter and smoother braking process. In both axle and wheel mounted types, friction is applied to the brake disc by an equipment (pad/caliper) that creates friction force on the brake disc surface. The brake disc that have suitable structure and metallurgy can complete its service life without any problems by minimizing the problems that may occur due to thermal damage and wear.

Brake Disc Construction and Cooling Vanes

The dimensions of the brake discs, the area under the chassis, the operating speed range of the train, etc. varies as it is designed according to the parameters. Weight of commonly used cast brake discs are heavy - placed on the wheel are lighter - but when different materials are used, the weight can be reduced by up to half. The air flowing between the ventilation vanes, which can be designed in various shapes and sizes, provides effective convective cooling in the disc. Improved heat dissipation in addition to direct energy savings as a result of reduced pumping losses with adequate and properly designed cooling; It has great potential to reduce energy consumption, negative environmental impact and costs.

Thermic Review of Brake Disc

When braking starts; the brake cylinder which receives the command closes the brake callipers by driving them with hydraulic or compressed air. The brake pad contacts the brake disc and the braking process begins. During braking, mechanical energy is converted into heat. Hot zones which high temperature gradients on the friction surface are considered among the most dangerous phenomena that cause damage to the friction elements and premature failure. These high local temperatures can also lead to unacceptable braking performances, such as brake weakening or called hot flickers. Locally overheated areas, as well as thermal and mechanical stress caused by frictional heating, cause structural changes in the brake disc material, thermal crack formation and other damage. If these damages are not controlled and progress and turn into deep cracks, the disc becomes unusable over time. To prevent the formation of cracks in the brake discs; material with high yield and fatigue strength should be selected, necessary actions should be taken to reduce the temperature occurring during braking and/or changes should be made in the brake disc design to reduce stresses.

Materials Used and Can Be Used in The Brake Disc and Their Metallurgy

The friction and wear behaviour of the materials used in the brake friction elements are basically; physical, chemical, mechanical properties of the material, namely the material characteristic; braking pressure, initial braking speed, braking time, temperature rise at braking etc. braking conditions in which we can list the features; ambient temperature, humidity, air flow etc. environmental conditions; surface conditions including surface roughness and contact properties; It is affected by structural parameters such as shape, size and contact shape of the brake pair. By changing the material used, the friction-wear behavior of the disc can be improved and the brake system can be made suitable for high speed. Cast iron is commonly and traditionally used in the manufacture of brake discs, given its low cost, ease of manufacture, resistance to thermal loads, and strength. We can list the types used in the production of railway vehicle brake discs as follows; lamellar, vermicular, spheroidal graphite cast irons, cast irons with special compositions, as well as cast and wrought steel. Cast steel has high strength and good toughness. Vanadium, molybdenum, nickel and solution aluminium can be added to the component to increase the fracture toughness of steels to be used as brake disc material. Wear resistance can be brought to the desired level by changing the carbon and chromium ratios. In the literature review, it was seen that AISI 4330 steel, 28CrMoV5-0.8 steel and 30CrNiMn steel were used as high-speed brake disc material. There is also the use of composite materials especially aluminium matrix composites and ceramic matrix composites, thus, a train brake disc desired properties and very light can be produced.

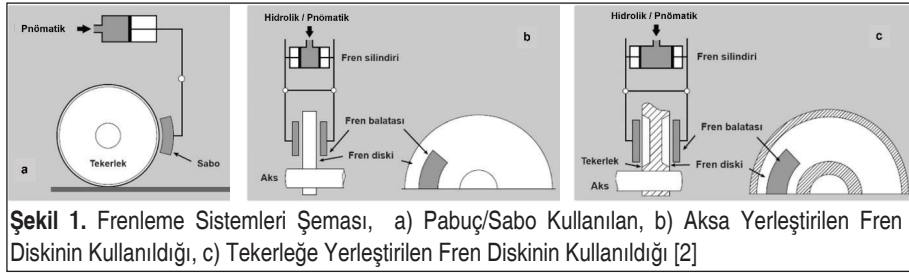
Discussion and Conclusion

It is foreseen that the steel brake discs with the composition containing the mentioned elements and which will be manufactured by forging method will be the optimum solution option.

1. GİRİŞ

Demiryolu taşıtının yavaşlatılması, durdurulması veya rampa aşağı inişlerde uygun hızla hareketinin sağlanması amacıyla uygulanan işlemin sağlandığı frenleme sistemi, demiryolu taşıtı için yüksek öneme sahiptir. Yaygın olarak sürtünme etkisiyle frenleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Demiryolu taşıtlarının hemen hepsinde mekanik ya da elektriksel yollarla sürtünmeli frenleme uygulamaları kullanılmaktadır.

Mekanik frenleme sisteminin kullanıldığı mekanizmaların tümünde tekerleğe/diske sürtünme uygulayan kısım vardır. Bu kısım, hidrolik veya pnömomatik olarak tahrik edilir. Fren kuvvetinin kontrolü, sürtünme yüzeyleri arasında üretilen basınç ile sağlanır. Mekanik frenler pabuçlu ve diskli frenler olarak ikiye ayrılabilir [1]. Şekil 1’de pabuçlu ve fren diskli sistemler, tahriğin sağlandığı fren silindiriyle birlikte gösterilmiştir. Ayrıntılı olarak ele aldığımız disk frenli mekanik frenleme sistemleri kendi içinde çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir.



Pabuçlu frenlerde pabuç (sabo), tekerlek aderans yüzeyine sürtünmeyle frenleme etkisi oluşturur. Yüksek hızlarda kayma etkisi istenmeyen düzeylerde olacağından ve tekerlek yüzeyine hasar vereceğinden yüksek hızlı trenlerde pabuçlu fren kullanmak olası değildir; onun yerine disk frenler kullanılır [1].

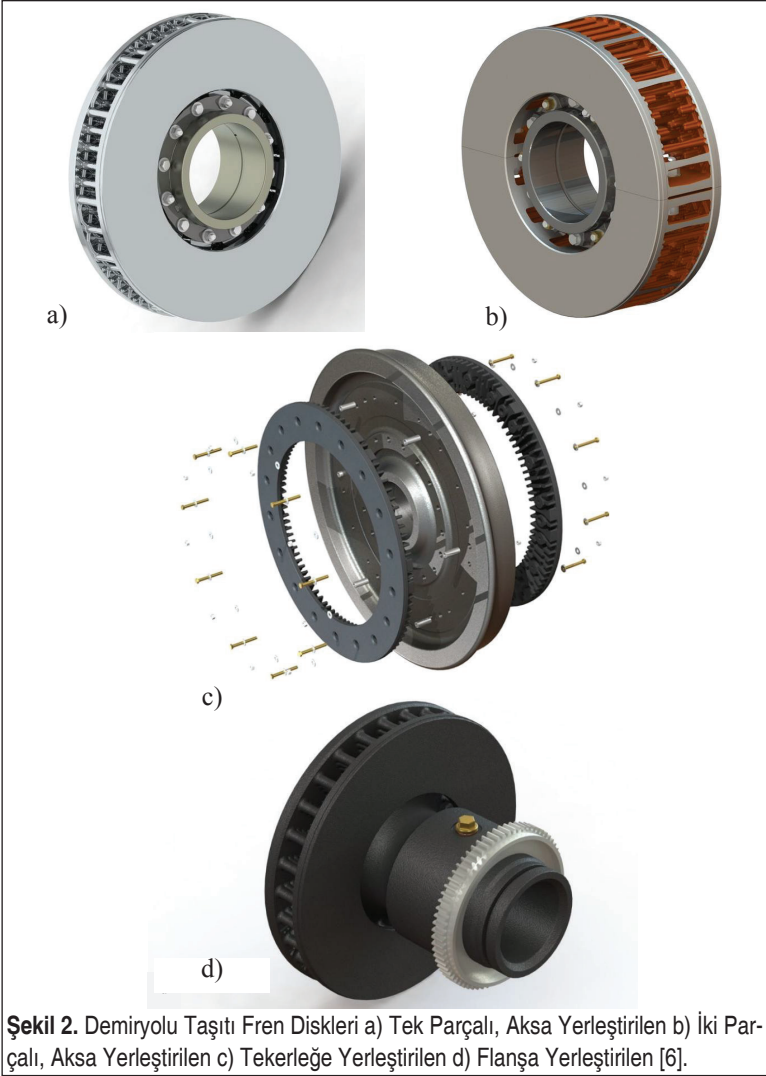
Fren disklerinin kullanımıyla tekerlek yuvarlanma yüzeyinden frenleme olmaz, tekerlekler açısından oldukça iyi sonuçlar doğurur; tekerleklerdeki gerilmeler düşer ve ömürleri uzar [3]. Fren diskleri daha sessiz ve yumuşak bir frenleme süreci sağlar.

Sürtünme aksamının disk - balata çifti olduğu frenleme sistemi; fren silindiri, boşluk ayarlayıcı, fren kaliperi, fren balatası tutucusu, fren balatası ve diskten oluşur. Söz konusu sistemde kullanılan fren diskleri;

- Vagonların/trenin frenlenmesi esnasında oluşan kinetik ve potansiyel enerjinin tümünü ya da istenilen kısmını emebilmelidir.
- Frenleme torkunu üretebilmeli, karşılamalı ve aksa aktarabilmelidir.
- Balata ile sürtünmeli birleşme sağlayabilmeli ve bu şekilde disk frene sahip araçların kinetik ve potansiyel enerjisi ısıya dönüşebilmelidir.



- Kondüksiyon/konveksiyon/radyasyon yollarıyla enerjiyi/ısıyı dağıtabilmelidir [4].
- Yüksek frekanslı sıcaklık değişimlerine dayanabilmelidir. Fren diskinin iyi derecede ısı direnci, yüksek termal iletkenlik, yeterli ısı kapasitesi ve düşük doğrusal genleşme katsayısına sahip olması gerekir.
- Güvenlik parçası olarak kabul edildiklerinden özellikle acil durum/emniyet frenlemelerinde fonksiyonlarını tam olarak yerine getirmeleri gerekmektedir. Acil frenleme süresince fren diskinin yüzeyinde belirgin bir hasar olmamalıdır, aşınma oranı düşük ve termal deformasyonlar minimum seviyede olmalıdır.



- İyi derecede termal yorulma direncine, her türlü koşulda kararlı sürtünme katsayısı ve düşük aşınma oranına sahip olmalıdır.
- Yüksek sıcaklık ve nem içeren ortamda çalıştığı göz önünde bulundurmalı, yeterli korozyon direncine sahip olmalıdır [5].

Demiryolu taşıtı fren diskleri aksa, tekerleğe ve flanşa yerleştirilen olmak üzere üç farklı tipte olabilmektedir, Şekil 2’de sırasıyla gösterilmiştir.

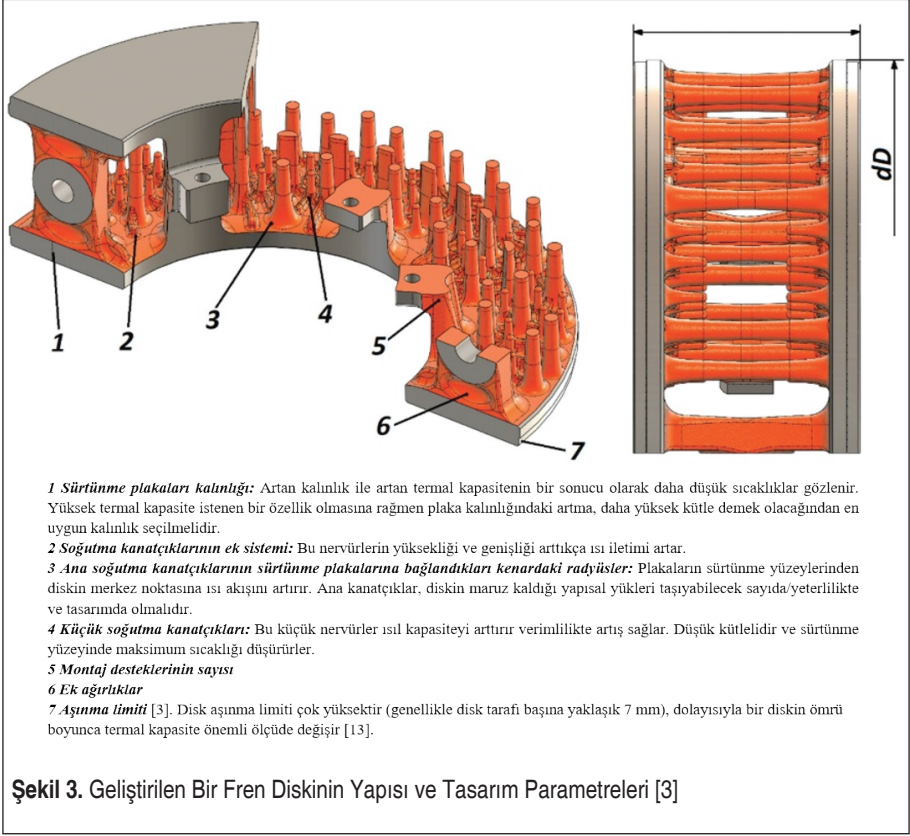
Tekerleğe yerleştirilen fren diskinin avantajları; aks çevresindeki alanın boş olarak kalması, çeşitli boyuttaki tekerleklerle uygulanabilmesi, pabuçlu sistemden dönüşümünün kolay olması, hem çeken hem de çekilen yük ve yolcu taşıtlarında uygulanabilmesi, geniş hız aralığında kullanılabilmesidir [7].

Tüm tiplerde fren diski yüzeyinde sürtünme kuvveti yaratan ekipman; kaliper ve onun içerisinde yer alan balata ile fren diskine sürtünme uygulanır. Aksa yerleştirilen fren diskleri, sistemin konumlandırılması için yeterli açıklığa sahip olan çekilen araç bojilerinde kullanılır. Tekerleğe yerleştirilen fren diskleri, cer (çekiş) motorunun da bulunduğu çeken araç bojilerinde kullanılır; bu bojilerde aksa yerleştirilen disklerin kullanımını için yeterli açıklık yoktur [2]. Tüm tekerleğe yerleştirilen disk tasarımlarının temel özelliği, yalnızca bir sürtünme yüzeyinin varlığıdır. Tek taraflı ısı girişi, yüksek frenleme görevlerinde malzemede akmaya ve kalıcı disk (halka) konikleşmesine neden olabilir. Bu nedenle, benzer boyut ve kütledeki aksa yerleştirilen disklerle kıyasla, tekerleğe yerleştirilen diskler genellikle daha düşük görevlerle sınırlıdır [8].

2. FREN DİSKİ YAPISI VE SOĞUTMA KANATÇIKLARI

Fren diskleri, tek parça veya ayrılabilir iki parça halinde döküm, dövme vd. yöntemlerle imal edilebilirler. Fren disklerini birleştirme elemanı olarak civatalar kullanılır. Bunların sayısı da tasarıma göre farklılık göstermektedir.

Fren disklerinin boyutları, şasi altındaki alan, kullanılacağı trenin çalışma hız aralığı gibi parametrelere göre tasarlandığından çeşitlilik gösterir. Hindistan demiryollarında işletilmekte olan yolcu vagonlarında kullanılan fren diskleri için dış çap, iç çap ve kalınlık değerleri sırasıyla şu şekildedir; 640 mm, 350 mm ve 110 mm [4]. Çin demiryollarında işletilmekte olan hızlı trenlerde kullanılan fren diskleri için değerler ise şu şekildedir; dış çap 725 mm, iç çap 286 mm ve kalınlık 52 mm [9]. Fransa demiryollarında işletilmekte olan yüksek hızlı trenlerde bir aksta 4 fren diski konumlandırılmıştır ve fren diski boyutları şu şekildedir; dış çap 640 mm, kalınlık 45 mm, diskin iç çapı 380 mm ve fren diskinin ana sürtünme yarıçapı 255 mm’dir [10]. Tekerleğe yerleştirilen tip fren diskinin boyutları şu şekildedir; dış çap 560 mm, iç çap 360 mm, sürtünme diskinin kalınlığı 23 mm [11]. Bahsedilen kalınlıktaki diskler tekerleğin her iki yanına montajlanıyor olduğundan fren diski toplam kalınlığı belirtilen kalınlığın iki katıdır denilebilir.



Fren diskinin kütlesi kritik konudur. Fren diski daha hafif imal edilirse, hem üretim için gerekli malzeme ve enerji azalacağından üretim maliyeti düşer hem de dönme ve öteleme ataleti de düşer. Yaygın olarak kullanılan döküm fren diskleri, 100-125 kg dolaylarında ağırlığa sahiptir -tekerleğe yerleştirilenler daha hafif- fakat farklı malzemeler kullanıldığında ağırlık yarı yarıya varacak kadar azaltılabilmektedir.

Sürtünme yüzeylerini göbeğe bağlayan parmakların sayısı ve biçimi fren diskinin mekanik ve termal yükler açısından yapısal optimizasyonunun bir sonucudur; ayrıca kullanılacak cıvata sayısı da bununla doğrudan ilintilidir. Parmaklarda minimum stres seviyeleri yaratırken diskin termal genişmesine izin vermek ve yine de sürtünme halkası hareketlerini kontrol etmek için 12 adet parmak/cıvata en iyi çözümdür [12]. Şekil 3'te yaygın yapıdan farklı olarak tasarlanmış bir fren diskinin yapısı ve tasarım parametrelerinin hangi etkileri ortaya çıkardığı anlatılmıştır.

Disk soğutması, işletim maliyetleri ve filo kullanılabilirliği üzerinde önemli etkileri olan disk ve balata aşınması ve ömrü üzerinde baskın etkiye sahiptir [13]. Fren diski

için en doğru termal akış sistemini bulmak üzerine çalışmalar devam etmektedir. Katı dolu ve soğutma kanallarına sahip fren disklerinin termal performansı karşılaştırıldığına, toplam konveksiyonel ısı transfer katsayısının yaklaşık üçte birinin kanatçıklardan ve geri kalan üçte ikisinin ortam havasına maruz kalan sürtünme yüzeylerinden olduğu sonucuna varılmıştır [14]. Katı diskte hava direnci oldukça düşüktür. Hava hızı soğutmada önemli rol oynar.

Fren diskleri kanatçıkları radyal ve teğetsel şekilde konumlandırılmış tasarımlara sahip olabilir. Radyal kanatçıklı diskler en büyük pompalama/aerodinamik kayba sahiptir ama en efektif soğutmayı gerçekleştirir [13]. Sürtünen yüzeyler arasında radyal olarak düzenlenen soğutma kanatçıkları, sürtünme plakaları arasında verimli soğutma sağlar. Çapraz soğutma kanalları ısıyı uzaklaştırır; sürtünme plakalarının termal balansının sürdürülmesine yardımcı olur. Kanatçıklar ile soğutma havası göbekten sürtünme plakalarının dışına iç yüzeyden akarak dağılır. Hava, hıza bağlı olan merkezkaç kuvvetinin etkisiyle hareket eder [4]. Kanatçıklar çok sayıda olmalıdır ve kalınlıkları 8 - 10 mm dolaylarında olabilir. Soğutma verimliliği kanatlardan geçen hava hızına bağlı ve kanatçık sayısı hava hızını doğrudan etkilediğinden uygun sayıda ve kalınlıkta kanatçık olması önemlidir [15].

Yeterli ve uygun tasarımdaki soğutma ile azalan pompalama kayıplarının bir sonucu olan doğrudan enerji tasarrufuna ek olarak ısı dağılımının iyileştirilmesi; enerji tüketimini, olumsuz çevresel etkiyi ve maliyetleri azaltmak için büyük potansiyele sahiptir [13].

3. FREN DİSKİNİN ISIL (TERMİK) İNCELEMESİ

3.1 Fren Diskinde Isı Oluşumu ve Dağıtımı

Frenleme komutunu alan fren silindiri, hidrolik veya pnömatik olarak fren kaliperlerini tahrik edip kapanmalarını sağlar. Fren balatası fren diskine temas eder; frenleme işlemi başlar. Frenleme esnasında mekanik enerji ısıya dönüşür.

Kaymalı sürtünmeye maruz balata-disk çiftinin temas yüzeylerinde, yüksek hız ve sürtünme kuvvetleri yüzünden ortaya çıkan kayda değer termal yük, sıcaklığı yükseltir. Temas bölgesinde tipik ısı akışı koşulu geçerlidir ve sıcaklık dağılımı üç boyutludur [16].

Fren diskinde ısıya dönüşen enerji belli bir oranda kondüksiyon, önemli bir oranda radyasyon ve büyük oranda ise konveksiyon yoluyla çevreye iletilir. Isı iletimi (kondüksiyon), frenlemenin ilk saniyelerinde en önemli rolü oynar. Fren diski sıcaklığı, frenleme ısı akışı ve termal kapasitenin bir sonucu olarak homojen yarı kararlı bir



sıcaklık seviyesine ulaştıktan sonra konveksiyon ve radyasyon önemlidir. Disk, frenleme enerjisini ne kadar hızlı emer ve yayarsa, daha küçük sıcaklık gradyanları vardır, bu nedenle termal şok riski o kadar azdır. Fren disklerinden üç ısı dağıtma modundan, taşıt hareket ederken veya dururken de frenin çevre ortamdaki havaya maruz kalması nedeniyle konveksiyonel ısı dağıtımı büyük önem kazanmaktadır. Standart fren disklerinde konveksiyonel soğutma performansı, fren diskinin geometrisi değiştirilerek optimize edilebilir [11].

Katı dolu bir fren diski geometrisi ısıyı yalnızca çevre ortama yayabilir ve aktarabilir ancak soğutma kanallarına sahip havalandırmalı fren disklerinde kanal yüzeyinden konveksiyonla ısı kaybedilir. Doğrusal olmayan davranışı nedeniyle disk yüzey sıcaklığı yüksek seviyelere ulaştığında radyasyonla ısı dağılımı önemli hale gelir [11]. Radyasyon, hızdan bağımsız olan ısı yayma modudur. Tekerleğe yerleştirilen fren disklerinde diskin arka yüzü, nispeten yakın olan tekerleğe ısı yayar; [8]. aksa yerleştirilenlerde ise soğutma kanallarının bulunduğu iç boşlukta yayılır. Bu alanlardaki ışınım ile ısı transferi, yansıma nedeniyle sınırlıdır. Bununla birlikte, ön (sürtünme) disk yüzü için radyasyonla ısı dağılımı son derece önemlidir [8].

Soğutma hızı parametresi, disk tasarım parametrelerinden elde edilir; ısı transfer katsayısı ve konveksiyon alanı ile doğru; özgül ısı, ve disk kütlesi ile ters orantılıdır. Isı transfer katsayısı disk boyutları ve kanatçıklar arasında akan hava hızından kestirilebilir. Yukarıda bahsedilen soğutma hızı parametresi, konveksiyonun yanı sıra konveksiyon yoluyla ısı dağılımını da içerdiğinden konveksiyonla ısı transferinin net parametresi için iletimle ısı transferinin çıkarılması gerekir [15]. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinden elde edilen verilere göre konveksiyonel ısı transfer katsayısı değerleri disk yüzeyi boyunca büyük değişiklikler göstermektedir. Konveksiyonel ısı dağıtım katsayısı diskin birçok bölgesinde 30 ila $60 \frac{W}{m^2K}$ aralığında yer alır ve ortalama değer $44,9 \frac{W}{m^2K}$ olarak hesaplanmıştır. Kanatçık yüzeylerinde değişkenlik artar ve katsayı yükselir [8].

3.2 Fren Diskinde Sıcaklık Gradyanları ve Sıcak Bölgelerde Oluşan Sorunlar

Fren diskindeki sıcaklık genellikle servis hızına göre saptanır. Servis hızının artırılmasıyla maksimum sıcaklık artar. Frenleme süresince maksimum sıcaklık, güvenlik ve servis performansı açısından çok önemlidir. Frenleme sırasında maksimum sıcaklıktaki değişim üç fazda açıklanabilir; ani artış, denge fazı ve yavaşça düşüş. Termal şoklar ve termo-mekanik gerilmeler disk için iki temel servis yüküdür ve her ikisi de sıcaklıkla ve özellikle de maksimum sıcaklıkla ilişkilidir. Sıcaklık değişimleri ısı döngü gerilmelerine sebebiyet verir [9].

Demiryolu taşıtı fren diskinde başlıca beş tip sıcaklık gradyanı tanımlanabilir, Tablo 1’de sıcaklık gradyanlarına ait bilgi verilmiştir.

Tablo 1. Deneysel Termograflara Göre Demiryolu Taşıtları Fren Diski Sıcaklık Gradyanları Sınıflandırması [17].

Sıcaklık gradyanı türü	Boyut (mm)	Isı seviyesi (°C)	Zaman
Şiddetli	<1	1200	<1 ms
Sıcak noktalarda gradyan	Uzunluk: 5 - 20	650 - 1000	0,5 - 10s
Sıcak noktalar	Genişlik: 5 - 50	800’e kadar	>10s, radyal değişimler var
Makroskobik sıcak noktalar	40 - 110	1100’e kadar	>10s, sabitleştirilmiş
Bölgesel	80 - 200	20 - 300	>10s

Fren diski sürtünme yüzeyinde temas basıncı düzensiz şekilde dağılır ve sıcak nokta olarak adlandırılan çok yüksek sıcaklıkta dar alanlar oluşur [17]. Bu yerel bölgelerde aşırı yüksek uç sıcaklıklar gözlenir; sıcaklıklar östenit çelik sıcaklığını da aşan şekilde 900 °C’ye varır. Frenleme sırasında aşırı ısınmış bölgelerde yüksek sıcaklık dalgalanmaları (ısınma-soğutma), çeliğin mikro yapısında dönüşüm(ler)e neden olur [18].

Frenleme süresince sıcak alanlar radyal doğrultuda hareket eder [17]. Yerinde ölçümle diskin sıcaklık değişiminde sıcak bir halkanın oluştuğu ve tüm sürtünme yüzeyine yayıldığı gösterilmiştir. Disk yüzeyinde sıcak noktalardan oluşan halka, sıcak noktalar ve soğuk bölge sıcak noktaları ve soğuk bölgelerden oluşur [9].

Sürtünme yüzeyindeki yüksek sıcaklık gradyanları olan sıcak bölgeler, sürtünme elemanlarında hasara ve erken arızaya yol açan en tehlikeli fenomenler arasında sayılırlar. Bu sıcak noktalardan kaynaklanan termo-mekanik talebin plastik gerinim varyasyonları, çekme ve sıkıştırma gerilmeleri döngüsüne neden olabilir. Dolayısıyla termal düşük çevrim yorulması meydana gelebilir ve bunun disk yüzeyindeki çatlakların gelişmesi ile ilişki içerisinde olduğu gösterilmiştir. Bu yüksek lokal sıcaklıklar, frenin zayıflaması veya ısıl titreme adı verilen istenilmeyen düşük frekanslı titreşimler gibi kabul edilemez fren performanslarına da yol açabilir [19] ve servis ömrünü olumsuz etkiler. Müsaade edilen maksimum sıcaklıktan daha yüksek sıcaklıklarda çalışan sürtünme çifti, termal deformasyonlara, sürtünme katsayısında dalgalanmalara, fren kayıpları oluşmasına neden olabilmektedir [20]. Isıl hasarlar yüzey pürüzlülüğünü artırır ve diskin sürtünme özelliğini bozar [9]. Demiryolu taşıtlarının dayanıklılığı, güvenilirliği ve her şeyden önce emniyeti ile ilgili gereklilikleri hesaba katmak, çalışırken fren diskinin maruz kalacağı termal yükü azaltmak çok önemli bir husustur [21].



3.3 Fren Diskinde Termal Çatlaklar

Demiryolu fren disklerinin sürtünme yüzeyindeki termik (ısıl) çatlaklar disklerin ömürleri süresince gelişebilir. Tekrarlı frenleme çevrimleri boyunca, sürtünme yüzeyinde çevrim sıcaklığı ve mekanik yükler söz konusudur. Sert frenleme koşullarında, diskin sürtünme yüzeylerinde yüksek sıcaklıklarda plastik şekil değişimi meydana gelir ve bahsedilen bu gerinim malzemede geri dönülemez hasara yol açabilir. Çevrimsel ısıl plastik gerinim ve artık gerilmeler, termal çatlakların başlama ve büyüme sebebi olan etken faktörler olarak göz önünde bulundurulur [18]. Termik çatlaklar ciddi hasarlara neden olabilir; fren performansının bozulması, fren balata ve disklerinin sık sık değiştirilmesi gerekliliği nedeniyle bakım maliyetlerinin artması gibi. Fren diski malzemesinin çatlak başlatma ve yayılma karakteristikleri fren disklerinin ömrünü önemli ölçüde etkiler [22]. Fren diski 6 ay kullanıldıktan sonra sürtünme yüzeyinde termik yorulma çatlakları meydana gelebilmektedir. Fren diskinin tipik kullanım ömrü 5-6 yıl iken; genellikle 2-3 yıllık aralıklarla değiştirilmektedir [23].

Sürtünme yüzeyindeki hasar gelişimi frenleme çevrim sayısının bir fonksiyonudur. İlk bin frenleme çevriminde, fren diskinin sürtünme yüzeyinde sadece yüzeysel izler gözlenir. 103–104 frenleme döngüsünden sonra fren diski sürtünme yüzeylerinde termik çatlaklar ortaya çıkar. Termal çatlaklar, termal yorulma sonucu ortaya çıkan tipik çatlaklardır. Yerel stres konsantrasyonu nedeniyle sürtünme yüzeyinin pürüzlülüğündeki artış, termal stres ve yerel sürtünme gerilimi radyal derin çatlakların yayılması ve birleşmesi için termal çatlakları tahrik eder. 104 frenleme döngüsünden sonra radyal derin çatlaklar görülmeye başlar, artan döngü sayısı ile derin çatlaklar büyür ve gelişir. Termal(ısıl) çatlakların derinlik aralığı, 0,1 – 0,45 mm dolaylarındadır buna karşın radyal derin çatlakların derinliği ise 0,5 – 2 mm arasında değişebilmektedir [24]. Şekil 4’de sıcak noktalar, termik (ısıl) çatlaklar ve derin radyal çatlaklar gibi fren diski sürtünme yüzeyinde meydana gelen ısıl hasarların gözle net şekilde görülebildiği bir fotoğraf verilmiştir.



Şekil 4. Fren Diski Sürtünme Yüzeyindeki Isıl Hasarlar [24]

Disk yüzeyinden iç kısmına doğru giden yolda sıcaklıkların ve yüzey gerilmelerinin düşürülmesi diskte oluşacak aşınma ve çatlakların önlenmesi ve mevcut çatlakların ilerlemesinin yavaşlamasına olanak tanıdığından, frenleme basıncı ve disk malzemesi seçimi fren disk tasarımında oldukça önemlidir [20]. Fren disklerinde çatlak oluşumuna engel olmak için; yüksek akma ve yorulma dayanımına sahip malzeme seçilmeli, frenlemede oluşan sıcaklığın düşürülmesi için gerekenler yapılmalı ve/veya fren diski tasarımında gerilmeleri azaltacak değişikliklere gidilmelidir.

4. FREN DİSKİNDE KULLANILAN/BİLECEK MALZEMELER VE METALURJİSİ

Demiryolu fren sisteminin tasarım sürecinde, sürtünme çiftinin maruz kalacağı termal yük kilit konudur. Çalışma sıcaklığına bağlı olarak, sürtünme elemanlarının imalatında farklı malzemeler kullanılabilir [21]. Öte yandan malzemenin aşınma davranışı, disk malzemesinin seçiminde ve tasarımında çok önemlidir [25].

Fren sürtünme elemanlarında kullanılan malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışları temel olarak aşağıda belirtilen faktörlerden etkilenmektedir.

- **Malzeme karakteristiği:** Malzemenin fiziksel, kimyasal, mekanik özellikler vd.
- **Frenleme koşulları:** Frenleme basıncı, ilk frenleme hızı, frenleme zamanı, frenlemede sıcaklık artışı vd.
- **Çevre şartları:** Çevre sıcaklığı, nem oranı, hava akışı vd.
- **Yüzey koşulları:** Yüzey pürüzlülüğü, temas özellikleri vd.
- **Yapısal parametreler:** Biçim, boyut, fren çiftinin temas şekli vd. [26].

Fren disklerinin üretiminde düşük maliyeti, imalat kolaylığı, termal yüklere karşı direnci ve dayanımı göz önünde bulundurularak yaygın ve geleneksel olarak dökme demir kullanılır. Yüksek hızlı demiryolu taşıtları fren disklerinde kullanılan dökme demirler ise Ni, Cr ve Mo'li özel kimyasal kompozisyonlara sahiptir [27].

Dökme demirin mikroyapısı, ferrit/perlit matris içerisinde dağılmış grafit parçacıklarından oluşur. Dökme demirler grafitlerin şekli, dağılımı, büyüklüğü ve yoğunluğu gibi özellikleri ile karakterize edilir, adlandırılırlar. Grafit parçacıklar mekanik özelliklere büyük oranda etki eder [28].

Demiryolu taşıtı fren diski imalinde kullanılan türleri şu şekilde sıralayabiliriz; lamelli, vermiküler, küresel grafitli dökme demirler, yüksek alaşımlı dökme demirler ve ayrıca dökme çelik kullanılmaktadır. Dökme çelik yüksek dayanıma ve iyi derecede tokluğa sahiptir [5].

Raylı araçlarda kullanılan fren diskleri yaygın ve geleneksel olarak lamel grafitli dök-



me demirden üretilmektedir. Bunun nedenleri; a) yüksek ısı iletkenlik, b) yüksek ısı ı dağılma gücü, c) ısı ı yüklerle direnç, d) düşük maliyet ve e) üretiminin basitliğine dayanmaktadır [29]. Buna karşın lamel grafitli (gri) dökme demirin istenmeyen önemli bir özelliği, oluşmuş bir çatlaktan çok sayıda yeni çatlak oluşumuna neden olarak nihayetinde kırılmaya sebep olan grafit pullara sahip olmasıdır. Gri dökme demir kayda değer miktarda silisyum içerir, karbon oranları %4'ün altındadır. Çoğu dökme demirin bileşimi, demir-karbon sisteminin ötektik noktası civarında olduğundan, ergime sıcaklıkları da buna paralel şekilde, genellikle 1.150 ila 1.200 °C arasında değişmektedir [30].

Vermiküler grafitli dökme demir; termal ve elektriksel iletkenlik, basma dayanımı küresel grafitliden yüksek, buna karşın süneklik, çekme ve akma dayanımı küresel grafitliden düşüktür. Yapısında düşük oranda mevcut olan küresel grafitlerin miktarına bağlı olarak mekanik özellikleri farklılaştırılabilir. Lamelli dökme demir ile kıyaslandığında ise; termal ve elektriksel iletkenlik, basma dayanımı düşük, buna karşın süneklik, çekme ve akma dayanımı yüksektir. Dolayısıyla özellikle orta derecede mekanik ve fiziksel özellikler talep edildiğinde başvurulabilir [31].

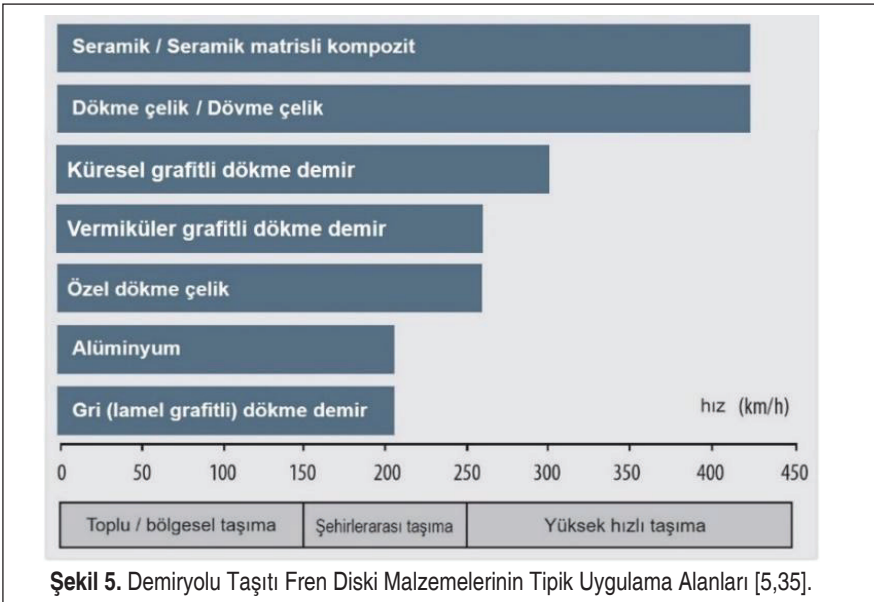
Akma dayanımı dolaylarında yaşanan termo-elastik/plastik gerilmeleri karşılamak için gereken tokluk davranışının üstün olması nedeniyle daha iyi termal iletkenliğe sahip lamelli veya vermiküler grafitli diğer dökme demir malzemeler yerine küresel grafitli dökme demir tercih edilebilir [32].

Fren diski malzemesi olarak kullanılacak çeliklerin kırılma tokluğunu artırmak için bileşene vanadyum, molibden, nikel ve çözelti alüminyum eklenebilir; karbon ve krom oranları değiştirilerek aşınma dirençleri istenen düzeye getirilebilir [27]. Krom ve molibden çökelti ve katı çözelti güçlendirme etkisine sahiptir. Krom, çeliğin oksidasyon direncini artırır ve ayrıca krom oranındaki artışla oksidasyon sonucu disk yüzeylerinde gözlenen Fe₂O₃, Fe₃O₄, FeO, FeCr₂O₄ katmanlarının kalınlığı azalır. Vanadyum ince tane ve çökelti güçlendirme etkisine sahiptir, böylece dayanım ve tokluk artar. Ayrıca vanadyum, fren diski çeliğinin termal şok direncini ve aşınma direncini artırabilir [33]. Yapılan çalışmalar neticesinde; sürtünme yüzeyine yakın bölgelerdeki sertliğin yüksek sertleşirli çeliğinki kadar yüksek olduğ u ve her ilave %0,1 vanadyum ile ısı şoku direncinin iyileştirildiği açıklanmıştır. Ayrıca V ilavesinin yüksek tokluk ve sertliğ e sahip olan alt beynite dönüşüme yol açtığı tespit edilmiştir [34].

Çeşitli kompozisyonlara sahip pek çok çelik türü numunesi ile ASTM E399'a uygun olarak gerçekteştirilen kırılma tokluğu deneyleri sonucunda AISI 4330 malzemesinin kırılma tokluğu açısından uygun olduğ u tespit edilmiştir. Aynı zamanda termal çatlak direnci de daha iyidir [27].

Yüksek hızlı trenlerde kullanılmak üzere geliştirilen bir fren diski, dövme yöntemiyle imal edilmiştir ve çeliğinin kompozisyonu şu şekildedir; karbon %0,15 - 0,18, silis-

yum maks %0,20, mangan %0,80 - 1,10, fosfor maks. %0,015, kükürt maks. %0,015, krom %1,25 - 1,50, molibden %0,80 - 1,10, vanadyum %0,20 - 0,30 [7]. Fransa demiryollarında işletilmekte olan yüksek hızlı trenlerde aksa yerleştirilmiş fren diskleri 28CrMoV5-0.8 çeliğinden dövme yöntemiyle imal edilir ve temperli martenzitik mikroyapıyı elde edebilmek için ısı işleme tabi tutulur [17]. Çin demiryolları hızlı trenlerinde kullanılan fren diskleri 30CrNiMn çeliğinden ve kapalı kalıpta dövme yöntemiyle imal edilir [9]. Bir diğer çalışmada, su verilmiş ve temperlenmiş 15CDV6 çeliğinden dökme yöntemiyle imal edilen fren diskleri çalışılmıştır [13]. Şekil 5’de demiryolu taşıtı fren diski malzemesi olarak kullanıla/n/bilecek malzemelerin hangi maksimum hıza ulaşan trenlerde kullanılabileceği ve hangi misyona sahip trenlerde kullanımlarının daha uygun olabileceği ile ilgili grafik verilmiştir.



Şekil 5. Demiryolu Taşıtı Fren Diski Malzemelerinin Tipik Uygulama Alanları [5,35].

Fren sistemin ağırlığının azaltılması, son yıllarda hafif alaşımlardan ve metal matrisli kompozitlerden (MMK) yapılan fren disklerinin geliştirilmesine yol açan ana konudur [36]. Parçacık takviyeli alüminyumdan (alüminyum matrisli kompozit) mamül sürtünme plakalı fren diskleri, geleneksel dökme demir disklerle kıyasla %50’ye varan ağırlık azaltma sağlar - yaklaşık 60 kg ağırlıkta diskler üretilmiştir [36].- ve daha az disk ve balata aşınması sunar [35].

Ortak sürekli metal seramik kompozitler olarak da adlandırılan, SiC seramik ağıyla güçlendirilmiş alüminyum matris kompozitleri olan SiC3D/Al kompozitler, yüksek spesifik sertlik, yüksek plastik akış mukavemeti, sünme direnci, iyi oksidasyon ve korozyon direnci dahil olmak üzere arzu edilen mekanik özellikleri sağlayabilir. Dök-



me demir ve çeliklerin yoğunluğunun yarısı yoğunluğa ve daha iyi termal iletkenliğe sahiptirler fakat yüksek sıcaklıklarda mukavemetleri daha düşüktür. SiC3D/Al kompozitler kuru sürtünme ve aşınma uygulamalarında kullanılmıştır, özellikle iyi sürtünme ve aşınma performanslarıyla yüksek hızlı trenlerin fren sisteminde potansiyel uygulamalara sahiptirler [37].

Düşük ağırlıklarına ve üstün termal özelliklerine rağmen, düşük süneklik, çatlak büyüme davranışındaki artış ve nispeten yüksek fiyat, araştırmacıların dikkatini seramik matrisli kompozitlere (SMK) kaydırmıştır [36]. Organik kompozit sürtünme malzemelerinin genel olarak düşük ısıl iletkenlikle karakterize edildiği dikkate alındığında, kullanım oranındaki artışın fren diskinin ömrünü olumlu yönde etkilemesi gerekmektedir [21]. Toz metalürjisi ile geliştirilen yüksek performanslı kompozit malzeme olan C/SiC, düşük yoğunluk, iyi yüksek sıcaklık direnci, yüksek mukavemet, oldukça iyi sürtünme özellikleri, düşük aşınma oranı ve uzun ömür gibi bir dizi önemli avantaja sahiptir. Yüksek frenleme performanslarıyla C/SiC malzemeden yapılmış olan fren diskleri, yüksek hızlı trenler ve diğer birtakım uygulamalarda kullanıma potansiyeline sahiptir [25].

Bu yeni malzeme sınıfının üretimi için şerit döküm, kimyasal buharla infiltrasyon, katı ve sıvı infiltrasyon ve ardından sıcak presleme veya sıcak izostatik presleme dahil olmak üzere çeşitli işlemler kullanılabilir. Kompleks biçimli C/SiC kompozitleri halihazırda erimiş silikon kullanılarak C preformlarının infiltrasyonu ile üretilmektedir; ardından reaktif sinterleme prosesiyle yoğun C/SiC malzemeye dönüştürmektedir. Bir diğer yöntem, silazanlar veya karbosilazanlar gibi organometalik polimerik SiC/Si₃N₄ öncüllerine dayanmaktadır [36].

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Demiryolu taşıtları çeşitli frenleme sistemlerine sahip olabilmekle birlikte yaygın olarak mekanik frenleme kullanılmaktadır. Türkiye’de ve dünyada yüksek hızlı tren hatları yaygınlaşmaktadır, yapım aşamasında olan hatlar mevcuttur. Yüksek hız ve kütleyle sahip olan demiryolu taşıtının emniyetli frenlenmesi kritik konulardan biridir. Demiryolu taşıtı fren diski, bu sistemin en önemli parçalarındandır. Bundan dolayı, yüksek hızlı demiryolu taşıtlarında eski tip pabuçlu frenlerin kullanılması olası değildir. Fren diski boyutları, yapısı ve kütlesi konuları çalışılmış ve çeşitli optimum çözümler geliştirilmiştir. Frenleme sırasında açığa çıkan çok yüksek enerjiyi emmesi, ısıya dönüştürmesi ve ısıyı dağıtması görevleri kendisinden beklenen fren diskleri için soğutma oldukça önemlidir. Her durumda frenleme sırasında disk sürtünme yüzeyinde çok yüksek sıcaklıklara ulaşan dar alanlar oluşur ve yüksek ısı, kabul edilemez fren performanslarına yol açar, termal deformasyonlar, sürtünme katsayısında dalgalanmalar ve fren kayıpları oluşur. Isıl hasarlar yüzey pürüzlülüğünü artırır ve diskin sürtünme özelliğini bozar ve demiryolu taşıtlarının güvenilirliği/emniyeti açısından

tehdit oluşturur. Bunun sonucunda, termal çatlaklar ve radyal derin çatlaklar gibi çeşitli hasarlar ile aşınma meydana gelir ve beklenen zamandan çok daha önce fren disklerinin değiştirilmesi gerekebilir. Çeşitli şekillerde ve boyutlarda tasarlanabilen soğutma kanatçıkları arasından akan hava, diskte konveksiyonla etkili soğutma sağlar. Diskin yapısal özelliklerinde yapılacak değişiklikler ile sürtünme yüzeyinde aşırı yüksek sıcaklıklardan dolayı oluşacak çatlakların, hasarın ve aşınmanın önüne geçilebilir.

Fren diskinin aşınma davranışı saydığımız parametrelerin yanında sıkı şekilde malzemeyle ilgilidir. Yaygın ve geleneksel olarak dökme demir kullanılır. Gri dökme demir yerine küresel grafitli dökme demirlerin tercih edilmesiyle tokluk artar, fren diskinin daha yüksek hızlarda çalışma olanağı sağlanmış olur; vermiküler ise bu ikisinin arasındadır. Yüksek hızlı demiryolu taşıtları fren disklerinde kullanılan dökme demirler ise Ni, Cr ve Mo'li özel kimyasal kompozisyonlara sahiptir. Son yıllardaki çalışmalarda ağırlığı azaltmak ve diğer istenilen özellikleri elde etmek için çeşitli kompozit malzemelerin (özellikle alüminyum ve seramik matrisli) demiryolu taşıtı fren diski olarak kullanımı önerilmiştir. Buna karşın dövme çelikler, saatte 400 km/h'i aşan yüksek hızlarda kullanıma uygundur, istenilen aşınma direncini ve kararlı mikro yapıyı sağlamaları bakımından yeterli seviyededir. Fren diski malzemesi olarak kullanılacak çeliklerin kırılma tokluğunu artırmak için bileşene vanadyum, molibden, nikel ve çözültü alüminyum eklenebilir; karbon ve krom oranları değiştirilerek aşınma dirençleri istenen düzeye getirilebilir. Vanadyum dayanımı ve tokluğu, termal şok direncini ve aşınma direncini artırır. Özellikle soğutma kanatçıklarının tasarımında olmak üzere, gerçekleştirilecek yapısal değişikliklerle soğutma performansı artırılmış ve bahsedilen alaşım elementlerini uygun oranda içeren dövme yöntemiyle üretilen çelik fren diski, fren diskinden beklenen özellikleri sağlayabilecek, ısıl hasarlar ve aşınma nedeniyle oluşabilecek sorunlar minimuma indirilerek servis ömrünü sorunsuz tamamlayabilecektir.

KAYNAKÇA

1. **Sharma, R.,C., Dhingra, M. ve Pathak, R., K.** (2015). Braking Systems in Railway Vehicles. (IJERT) International Journal of Engineering Research & Technology, Vol.4, Issue.01, 206-211.
2. **Hasegawa, I. ve Uchida, S.** (1999). Braking systems. Japan Railway & Transport Review 20, 52-59.
3. **Grive, U. ve Muhić, S.** (2018). Numerical optimization of brake discs for railway vehicles. Journal of Energy Technology, JET., Vol.11, Issue.3, Type.1.01, 11-25.
4. Research Designs and Standarts Organization. (2017). Specification for Standardized Brake Disc for LHB Coaches (RDSO/2017/CG-02). Manak Nagar Luckdown, RDSO.
5. **Li, J., Li, H., Jiao, B., Lv, B., Chen, D. ve Gu, L.** (2013). Development of cast steel for brake discs of high-speed train. Applied Mechanics and Materials, Vol.419, 370-375.



6. Brake Discs, Kovis Group, (2021, 12 Mayıs). Erişim adresi <https://www.kovis-group.com/kovis/en/products/brake-discs/>.
7. **Tirovic, M.** (1998). Development of a wheel mounted disc brake for a high-speed train. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol.212, 113-121.
8. **Tirovic, M. ve Galindo-Lopez, C.H.** (2008). Convective heat dissipation from a wheel-hub mounted railway brake disc. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol.222, 355-365.
9. **Wang, Z., Han, J., Liu, X., Li, Z., Yang, Z. ve Chen, E.** (2019). Temperature evolution of the train brake disc during high-speed braking. Advances in Mechanical Engineering, Vol.11(1), 1-10.
10. **Desplanques, Y., Roussette, O., Degallaix, G., Copin, R. ve Berthier, Y.** (2007). Analysis of tribological behaviour of pad-disc contact in railway braking Part 1. Laboratory test development, compromises between actual and simulated tribological triplets. Wear, Vol.262, 582-591.
11. **Galindo-Lopez, C. H.** (2009). Optimisation of convective heat dissipation from ventilated brake discs. Doktora Tezi, Cranfield Üniversitesi, Birleşik Krallık.
12. **Tirovic, M. ve Galindo-Lopez, C.H.** (2012). Maximising heat dissipation from ventilated wheel-hub-mounted railway brake discs. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol.227(3), 269-285.
13. **Tirovic, M.** (2009). Energy thrift and improved performance achieved through novel railway brake discs. Applied Energy, Vol.86, 317-324.
14. **Nejat, A., Aslani, M., Mirzakhali, E. ve Najian Asl, R.** (2011). Heat transfer enhancement in ventilated brake disk using double airfoil vanes. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, Vol.3(4), 045001.
15. **Sakamoto, H.** (2015). Heat convection and design of brake discs. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol.218, 203-212.
16. **Adamowicz, A. ve Grzes, P.** (2011). Analysis of disc brake temperature distribution during single braking under non-axisymmetric load. Applied Thermal Engineering, Vol.31 (6-7), 1003-1012.
17. **Dufrénoy, P. ve Weichert, D.** (2003). A thermomechanical model for the analysis of disc brake fracture mechanisms. Journal of Thermal Stresses, Vol.26(8), 815-828.
18. **Li, Z., Han, J., Yang, Z. ve Li, W.** (2015). Analyzing the mechanisms of thermal fatigue and phase change of steel used in brake discs. Engineering Failure Analysis, Vol.57, 202-218.
19. **Panier, S., Dufrénoy, P. ve Weichert, D.** (2004). An experimental investigation of hot spots in railway disc brakes. Wear, Vol.256, 764-773.
20. **Balci, M. N.** (2020). Fren disk-balata mekanizmasının üç boyutlu gerilme analizi. Konya Journal of Engineering Sciences, Vol.9, No.1, 62-84.

21. **Yevtushenko, A., Kuciej, M. ve Wasilewski, P.** (2019). Experimental study on the temperature evolution in the railway brake disc. *Theoretical & Applied Mechanics Letters*, Vol.9, 308-311.
22. **Goo, B. ve Lim, C.** (2012). Thermal fatigue of cast iron brake disc materials. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.26(6), 1719-1725.
23. **Kim, D.J., Seok, C.S., Koo, J.M., We, W.T., Goo, B.C., ve Won, J.I.** (2010). Fatigue life assessment for brake disc of railway vehicle. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol.33, 37-42.
24. **Wang, Z., Han, J., Domblesky, J. P., Li, Z., Fan, X. ve Liu, X.** (2019). Crack propagation and microstructural transformation on the friction surface of a high-speed railway brake disc. *Wear*, Vol.428-429, 45-54.
25. **Fan, S., Zhang, L., Cheng, L., Zhang, J., Yang, S. ve Lui, H.** (2011). Wear mechanisms of the C/SiC brake materials. *Tribology International*, Vol.44, 25-28.
26. **Xiao, X., Yin, Y., Bao, J., Lijian, L. ve Feng, X.** (2016). Review on the friction and wear of brake materials. *Advances in Mechanical Engineering*, Vol.8(5), 1-10.
27. **Sakamoto, H. ve Hirakawa K.** (2005). Fracture analysis and material improvement of brake discs. *JSME(The Japan Society of Mechanical Engineering) International Journal, Series:A Vol.48 No.4*, 458-464.
28. **Gigan, G., Norman, V., Ahlström, J. ve Vernersson, T.** (2019). Thermomechanical fatigue of grey cast iron brake discs for heavy vehicles. *Proceedings of the Institution of mechanical engineers. Part D, Journal of Automobile Engineering*, Vol.233(2), 453-467.
29. **Er, O. ve Ünel, E.** (2013). Raylı araçların boji donanımında kullanılan dökme demir ürünler. 2. Uluslararası Raylı Sistemler Mühendisliği Sempozyumu (ISERSE'13), Karabük, Türkiye, 9-11 Ekim.
30. **Abebe, L., Nallamothe, R.B., Subrahmanyam, K.H.S., Nallamothe, S.K., Nallamothe A.K.** (2016). Thermal analysis of disc brake made of different materials. *SSRG International Journal of Mechanical Engineering*, Vol.3(6), 5-9.
31. **Karatay, B. ve Hasırcı, H.** (2018). Üretim koşullarının vermiküler grafitli dökme demirin mikro ve makro yapısal özelliklerine etkileri. *Fen Bilimleri Dergisi GU J Sci, Part C:Tasarım ve Teknoloji*, Vol.6(4), 887-897.
32. **Šamec, B., Potrc, I. ve Šraml, M.** (2011). Low cycle fatigue of nodular cast iron used for railway brake discs. *Engineering Failure Analysis*, Vol.18, 1424-1434.
33. **Wu, D., Wang, F., Li, C., Zheng, Y. ve Shen, W.** (2018). Effect of temperature on oxidation behavior of Cr-Mo-V steel with different Cr contents for high-speed train brake discs. *9th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing*, Arizona, ABD, 11-15 Mart.
34. **Harada, N., Takuma, M., Tsujikawa, M. ve Higashi, K.** (2013). Effects of V addition



on improvement of heat shock resistance and wear resistance of Ni–Cr–Mo cast steel brake disc. *Wear*, Vol.302, Issues.1-2, 144-1452.

35. Brake discs and pads. (2014). Munich: Knorr-Bremse s. 2.
36. **Rak, Z. S.** (2013). CMC material for train brake systems. *Journal of Advances in Applied Ceramics*, 99(6), 270-273, <http://dx.doi.org/10.1179/096797800681072>.
37. **Nong, X.D., Jiang, Y.L., Fang, M., Yu, L. ve Liu, C.Y.** (2017). Numerical analysis of novel SiC₃D/Al alloy co-continuous composites ventilated brake disc. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.108, 1374-1382.



SiC_p/A356 Kompozitinin Aşınma Direncine Ultrasonik Dövme İşleminin ve Yaşlandırma Sertleşmesinin Etkilerinin Karşılaştırılması

Gökçe Mehmet Gençer^{1*}, Coşkun Yolcu², Fatih Kahraman³, Melih Belevi⁴

ÖZ

Çalışmada, karıştırırmalı döküm yöntemiyle üretilmiş ağırlıkça %10 SiC partikül takviyeli alüminyum matrisli kompozit plakalara 2 ve 5 saat olmak üzere iki farklı yaşlandırma süresi kullanılarak T6 ısıtılma işlemi uygulanmıştır. Buna ilaveten, döküm sonrası elde edilen bir diğer kompozit plakaya ise ultrasonik dövme yöntemi uygulanmıştır. Matris malzemesi olarak A356 alaşımı kullanılan kompozit plakaların, uygulanan işlemler sonrasında iç yapılarındaki ve sertlik değerlerindeki değişimler ve bulamaç (çamur) ortamındaki abrasif aşınma davranışları incelenmiştir. Sonuçlara göre, uygulanan ısıtılma işlemi ve ultrasonik dövme yönteminin SiC partikül takviyeli A356 kompozitin bulamaç ortamındaki abrasif aşınma direncini arttırdıkları ancak imalat sırasında takviyeler nedeniyle mikro hataların oluşması halinde, seramik takviyelerin sağladığı aşınma direncini yine kendilerinin negatif etkileyebileceği de gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Silisyum karbür, ultrasonik dövme yöntemi, karıştırırmalı döküm, T6 ısıtılma işlemi

Comparison Of The Effects Of Ultrasonic Impact Treatment And Age Hardening On Wear Resistance Of SiC_p/A356 Composite

ABSTRACT

In the study, 10 wt.% SiC reinforced aluminum matrix composite plates fabricated by stir casting method were T6 heat treated by using two different artificial aging times as 2 and 5 hours. Furthermore, post-casting ultrasonic impact treatment was applied to the other obtained composite plate. The changes in the microstructures and hardness values and slurry wear behaviors of the composite plates which A356 alloy was used as matrix material were investigated. According to the results, the applied heat treatment and ultrasonic impact treatment improved the slurry abrasive wear resistances of the SiC reinforced A356 composite. However, during the composite fabrication process, in the condition of micro discontinuity formation due to the reinforcements; it was observed that the wear resistance ensured by ceramic reinforcements can be adversely affected again by reinforcements

Keywords: Silicon carbide, ultrasonic impact treatment, stir casting, T6 heat treatment

* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 17.07.2021

Kabul/Accepted : 18.08.2021

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir
mehmet.gencer@deu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1084-7240

² Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir
coskun.yolcu@deu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-7335-3091

³ Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir
fatih.kahraman@deu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1075-9171

⁴ Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir
melih.belevi@deu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0862-4657



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

A356 is a hypoeutectic alloy composed of coarse α -Al dendrites and acicular eutectic Si phase. By applying heat treatment, spheroidization of the eutectic Si phase and thus, obtaining a more homogeneous microstructure is one of the frequently used modification methods in order to enhance the material properties [13, 14]. Even though the properties of monolithic materials can be improved via these kinds of methods, they often cannot meet the requirements of today's technology alone. Therefore, the necessity of enhancing multifunctional metal matrix composite materials has arisen in order to cope with the latest industrial needs and to obtain materials beyond the limits of conventional alloys [15, 16].

Liquid-state methods are widely used in the fabrication of metal matrix composites with their advantages such as being simple, and efficient, having a suitable potential for mass production, and having the ability of near-net-shape manufacturing. In the fabrication of the particle reinforced A356 alloy by stir casting method, the stirring process has a significant effect on the modification of the microstructure by crumbling the needle-shaped silicon [19, 20], however, it is not sufficient. Heat treatment is an important solution that is still frequently used to modify the eutectic phase in the whole microstructure of ceramic particle reinforced A356 composites obtained by the casting method.

In order to improve wear resistance, it is highly demanded that the composite surface has a fine-grained and favorable microstructure with the increased hardness [25-27]. Impact treatment is an environmentally friendly, economical, multi-purpose, and easy-to-apply method used to enhance the microstructure and increase the hardness in the material surface [28]. Another feature that makes this method come into prominence is, within the range of high-frequency, performing severe plastic deformation in the material surface without any thermal effect, [29, 30].

Slurry abrasive wear causes most of the engineering materials that are used in hydroelectric and thermal power plants, mining operations, petroleum and chemical industries, and slurry transmission (transport) lines to become out of order after a certain period of time [4]. In this study, the effects of heat treatment using different aging times and ultrasonic impact treatment on the microstructure and slurry abrasive wear resistance of the obtained composite were investigated comparatively.

Experimental Study

A356 alloy was used as a metal matrix in the study. The average size of the SiC particles used as reinforcement was 45 μ m. Stir casting method was used to obtain A356+SiCp composite. In order to increase the wettability of SiC particles, the particles were kept at 550 $^{\circ}$ C for 3 hours and, 2 wt % Mg was added into the liquid matrix. After the pouring, the cooling process was carried out at room temperature.

T6 heat treatment using two different aging times was applied to the A356+SiCp composite plates obtained by stir casting. T6 heat treatment was carried out according to the ASTM B917 standard. After the plates were subjected to the solution heat treatment at 540 $^{\circ}$ C for 4 hours, the quenching was carried out in the water at ambient temperature conditions. The aging processes were carried out at 155 $^{\circ}$ C for 2 and 5 hours.

Ultrasonic impact treatment was carried out with a hemispherical pin having a 5 mm diameter on the surface of plates obtained by stir casting. The used frequency and impact amplitude during the process were 24.8 kHz and 17.5 μ m, respectively.

Slurry abrasive wear tests were carried out according to the ASTM G105-20 standard. In order to obtain the slurry environment with abrasive particles, the mixture of quartz sand and pure water was arranged in the ratio of 1.5:1.

Results and Discussion

It was observed that the microstructure of the plate obtained via the casting process consists of coarse α -Al



dendrites and interdendritic acicular eutectic Si phase. Second phase SiC particles in the MMC structure showed a highly homogeneous distribution without any macro-clusters. This situation indicates that the particles were properly wetted by the matrix. However, it was also determined that the matrix could not completely surround the particles due to micro-clustering of the particles in some zones of the obtained MMC plate, and therefore, porosity formation occurred.

After T6 heat treatment, it was observed that most of the eutectic phase in the matrix material became spherical and dispersed more homogeneously in the structure [5]. In addition, α -Al dendrites in the matrix material also became more spherical after heat treatment. When the microstructures of the T6 heat-treated samples were compared, it was determined that the eutectic phase formed through an increase in the aging time increased and coarsened relatively.

While the grains were oriented by deformation on the ultrasonic impact treated surface, fractures occurred in the intergranular eutectic Al-Si phase that presented in the structure and this phase was fragmented. It has been observed that the orientation resulting from the plastic deformation gradually decreases from the surface of the sample towards the inner part and does not occur after approximately 40 μ m.

Ultrasonic impact treatment increased the hardness of the base material (61.3 \pm 1.4 HV) to an average of 87.23 \pm 1.5 HV throughout the 300 μ m depth from the surface and thus resulted in a significant increase in hardness of 42.3%. While the hardness decreases rapidly from the surface towards the inner part, a hardness increment has been obtained up to a depth exceeding approximately 2 mm with the method. The hardness values of the samples aged for 2 and 5 hours were measured as 83.5 \pm 2.2 HV and 74.2 \pm 1.5 HV, respectively.

According to the slurry abrasive wear test results, the highest weight loss (~940 mg) was measured in the base material. Improving the surface hardness via ultrasonic impact treatment and obtaining a dense layer on the surface by deformation enhanced the wear resistance by 14.6 % compared to the base material. Total weight losses in samples aged for 2 and 5 hours were measured as 673.7 and 910 mg, respectively. The specimen aged for 5 hours, although its hardness is higher than the base material, wore less than the base material in the first two rubber wheels used in the tests, while it was worn more than the base material in the wear test with 70 durometer rubber wheel. It has been observed that this situation occurred due to an increase in the wear rate of the 5 hours aged sample caused by the porosities formed in the MMC plate during fabrication and the microscale clustering of SiC particles. Particularly, the detachments that occurred in the regions where the particles were clustered, increased both the weight loss and the 3-body abrasive wear on the surface with the detachment of the matrix and SiC particles from the structure.

Conclusion

In order to improve the microstructure and to improve the slurry abrasive wear behavior of the obtained composite, heat treatment, which is a traditional method, and ultrasonic impact treatment, which is a modern application, were used.

Ultrasonic impact treatment increased the hardness value of the composite to 87.23 HV by ensuring to form cold deformation on the surface. It has been found that the method increases the hardness of the composite from the surface to a depth exceeding 2 mm.

The slurry abrasive wear resistances of the samples were higher than the untreated composite structure. It was observed that the fabrication-induced micro discontinuities in the 5 hours aged sample can prevent the advantage of having high hardness by increasing the amount of wear rate in this sample.



1. GİRİŞ

Yakıt tasarrufu sağlamak, karbondioksit salınımını düşürmek ve çevre kirliliğini azaltmak için özellikle havacılık ve otomotiv sektörü başta olmak üzere endüstride hafif alaşımlara olan ihtiyaç çok yüksektir [1-3]. Düşük yoğunlukları, yüksek özgül dayanımları, iyi dökülebilme-kaynaklanabilme özellikleri, üstün korozyon ve uygun aşınma dirençleri ile A356 alaşımları; uçak bağlantı parçaları, vites kutusu gövdeleri, su soğutmalı silindir blokları, yağ karterleri, pompa gövdeleri gibi çeşitli makine parçalarının/elemanlarının üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır [4-7]. A356, iri α -Al dendritlerinden ve iğne-şekilli ötektik Si fazından oluşan ötektik altı (hipoötektik) bir alaşımdır. Alaşımın yapısında bulunan gevrek ve iğne-şekilli ötektik Si fazının alaşımın mekanik özelliklerini zayıflatması gibi önemli bir dezavantajı vardır [8-12]. Isıl işlem ile yapıdaki ötektik Si fazının küreselleştirilmesi ve daha homojen iç yapı elde edilmesi, malzeme özelliklerinin geliştirilmesi için sıklıkla kullanılan modifikasyon yöntemlerindedir [13, 14]. Ancak sahip oldukları özellikler bu gibi çeşitli modifikasyon işlemleriyle geliştirilmiş olsalar dahi, monolitik malzemeler günümüz teknolojisinin gereksinimlerini çoğu zaman tek başlarına karşılayamamaktadırlar. Bu nedenle, son endüstriyel ihtiyaçlarla başa çıkmak ve geleneksel alaşımların sınırlarının üzerinde malzemeler elde edebilmek için çok işlevli metal matrisli kompozit (MMK) malzemelerin geliştirilme gereksinimi ortaya çıkmıştır [15, 16].

Birçok farklı yöntem ile imal edilebilen MMK parçaların/makine elemanlarının üretimi için kullanılacak yöntem belirlenirken; parçaların geometrileri, parçadan beklenen özellikler, kullanılacak matris malzemesi ve takviye elemanının cinsi, şekli ve boyutu dikkate alınır [17, 18]. Sıvı-hal yöntemleri basit, verimli, seri imalat için uygun bir potansiyele sahip olmaları ve son şekle yakın parça imal edilebilmesi gibi avantajlarıyla metal matrisli kompozit üretiminde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Partikül destekli A356 alaşımının karıştırmalı döküm yöntemiyle üretiminde, karıştırma işlemi iğne-şekilli silisyumu parçalayarak iç yapının düzenlenmesinde belirgin bir etkiye sahiptir [19, 20]. Bunun yanında, yöntemle imal edilen seramik takviyeli A356 alaşımlarında ötektik fazın büyümesini engelleyici bir diğer mekanizma da partikül itme prensibidir. Karıştırma işlemiyle yapıya homojen dağıtılan ikinci faz seramik partiküller, katılma süresince dendritler tarafından itilerek taneler arası bölgelere hapsolürler ve buralarda ötektik fazın büyümesini engellerler/yavaşlatırlar [21-23]. Bu avantajlara rağmen iğne-şekilli ötektik silisyum fazı döküm yapı içinde belirli bölgelerde gelişebilmektedir. Döküm yöntemiyle elde edilmiş seramik partikül destekli A356 kompozitlerde ötektik fazın tüm yapıda düzenlenebilmesi ve dolayısıyla kompozitin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi için ısıl işlem uygulaması günümüzde hala sıklıkla kullanılan önemli bir çözüm yoludur.

Her ne kadar yapıya eklenen takviyeler sayesinde alaşımların mekanik ve kimyasal özellikleri geliştirilmiş olsa da söz konusu çeşitli aşınma ve korozyon şartları altında



çalışma olunca MMK malzemelerin sahip oldukları özelliklere ilaveten yüzey özellikleri ekstra önem kazanmaktadır. Aşınma sebebiyle malzeme kaybına ilgili yüzeydeki düşük sertlik değerinin ve uygun olmayan iç yapının etkili olduğu bilinmektedir [24]. Bu nedenle aşınma direncinin geliştirilmesi amacıyla kompozit yüzeyinin artırılmış sertlik ile birlikte ince taneli ve uygun bir iç yapıya sahip olması önemli derecede talep görmektedir [25-27]. Ultrasonik dövme yöntemi malzeme yüzeyinde iç yapıyı geliştirmek ve sertliği arttırmak için kullanılan çevreci, ekonomik, çok amaçlı ve kolay uygulanabilen bir yöntemdir [28]. Bu yöntemi öne çıkaran bir diğer özellik ise herhangi bir termal etki olmadan, yüksek frekans aralığında, malzeme yüzeyinde mikron ölçekte yoğun plastik deformasyon gerçekleştirmesidir [29, 30]. Yöntemde bir ultrasonik transdüzer ile üretilen yüksek frekanslı ultrasonik dalgalar, çelik pim(ler) vasıtasıyla yüzey özellikleri geliştirilecek parçaya darbeler şeklinde iletilir. Malzeme yüzeyine iletilen ultrasonik enerji, istenilen mekanik değerlerin elde edilebilmesi için malzemeye özel uygun frekans aralığında verilmektedir [31].

Çeşitli tribolojik ortamlarda çalışacak MMK malzemelerden elde edilen parçalar için bu malzemelerin farklı şartlar altındaki aşınma dirençlerinin belirlenmesi çok önemlidir [16]. Bulamaç (çamur) ortamında abrasif aşınma, bir sıvı ortamda askıda kalan katı partiküllerin malzeme yüzeyine çarpmasıyla oluşan mekanik etki ile yüzeyden sürekli malzeme kaybı olarak tanımlanır. Malzemede gerçekleşen kayıp; abrasif partikülün cinsine, yüzeye çarpma hızına ve sıvı ortamın kimyasına (korozyon etkisine) önemli ölçüde bağlıdır. Bu aşınma tipi özellikle; hidroelektrik ve termik santrallerde, maden işletmelerinde, petrol ve kimyasal endüstrilerde ve bulamaç iletim (taşım) hatlarında bulunan mühendislik malzemelerinin çoğunun belirli süre sonunda kullanım dışı kalmasına sebep olmaktadır [4]. Bu kapsamda, çalışmamızda, sahip olduğu özellikler sayesinde endüstrinin farklı alanlarında kullanım bulan SiC partikül takviyeli A356 kompozitine farklı yaşlandırma süreleri kullanılarak gerçekleştirilen ısı işleminin ve ultrasonik dövme yönteminin elde edilen kompozitin iç yapısına ve bulamaç (çamur) ortamındaki abrasif aşınma direncine olan etkileri kıyaslanarak araştırılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Çalışmada metal matris olarak A356 alaşımı kullanılmıştır. Matris malzemesine ait kimyasal kompozisyon Tablo 1’de verilmiştir. Takviye için kullanılan SiC partiküllerin ortalama boyutu 45 µm’dir. A356+SiC_p kompozitin elde edilmesi için karıştırmalı döküm yöntemi kullanılmıştır (Şekil 1a). Matris malzemesi asal gaz (argon) atmosferi altında elektrikli ergitme ocağında 800 °C’de ergitilmiştir. K-tipi termokupl kullanılarak sıvı matrisin sıcaklığı pota içinde düzenli olarak ölçülmüştür. SiC partiküllerinin ıslatılabilirliğini arttırmak için partiküller 550 °C’de 3 saat boyunca tutulmuş ve sıvı matris içine kütlece %2 Mg eklenmiştir. Ergiyiğe önce Mg ilavesi yapılmış ve 1 dk boyunca 1000 d/d ile karıştırılmıştır. Ardından kütlece %10 SiC partikülleri eklenerek

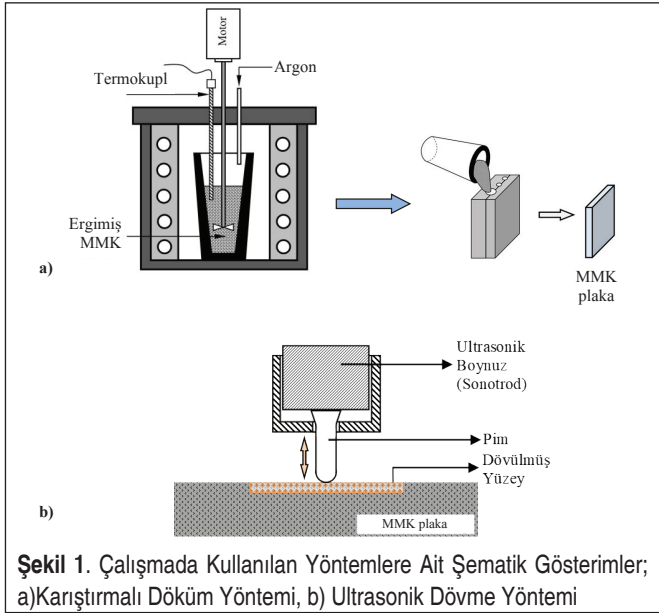
**Tablo 1.** A356 Matris Metalinin Kimyasal Kompozisyonu (% ağı.)

Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti	Al
6,5-7,5	0,25-0,45	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	Balance

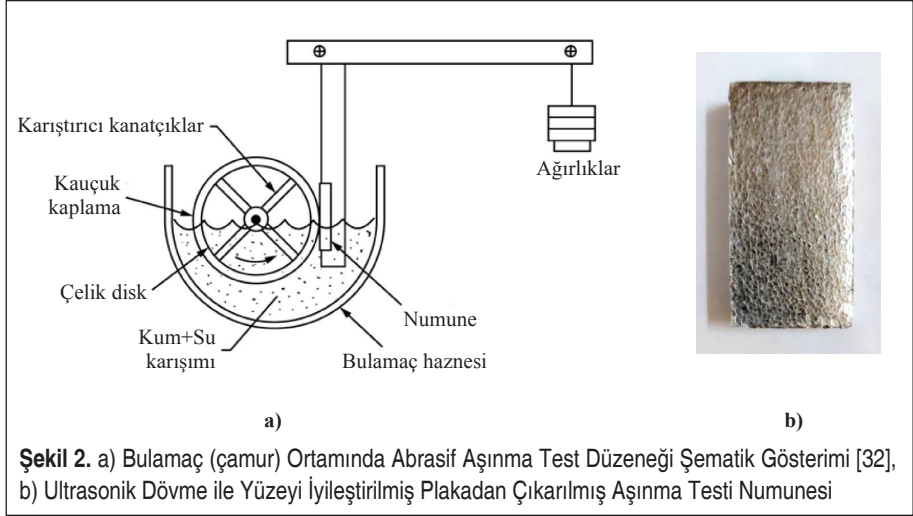
1000 d/d ile 3 dk boyunca karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra, döküm hızlı katılaşma nedeniyle olası çatlak oluşumunu önlemek için daha önceden 550 °C'ye ısıtılmış çelik kalıba yapılmıştır. Döküm süresince ergimiş kompozitin ve çelik kalıbın sıcaklıkları sırasıyla 725±5 °C ve 500±10 °C olarak ölçülmüştür. Döküm sonrası soğuma işlemi oda sıcaklığında yapılmıştır.

Karıştırmalı döküm ile elde edilen A356+SiC_p kompozit plakalara iki farklı yaşlandırma süresi kullanılan T6 ısıl işlemi uygulanmıştır. T6 ısıl işlemi (çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma) ASTM B917 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Plakalar 540 oC'de 4 saat boyunca çözeltiye alındıktan sonra oda sıcaklığındaki suda su verilmiştir. Yaşlandırma işlemleri ise 155 °C'de 2 ve 5 saat boyunca gerçekleştirilmiştir.

Ultrasonik dövme yöntemi 5 mm çapa sahip yarı küresel formda tek pimli başlık ile karıştırmalı döküm sonrası elde edilen plaka yüzeyinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 1b). Dövme süresince kullanılan frekans ve darbe süresi değerleri sırasıyla 24,8 kHz ve 17,5 µm'dir. Dövme yöntemi kompozit yüzeyinde 1,5 sn/mm²'lik parametre ile düzenli olarak gerçekleştirilmiştir. Dövme işleminde yüzeyde oluşan pimin darbe kuvvetlerine ekstra bir karşı kuvvet uygulanmamış, sadece dövme cihazının kendi ağırlığı bu amaçla kullanılmıştır. İşlemden sonra kompozit yüzeyi parlak ve homojen dağılmış küçük girintilerden oluşan bir görünüme sahip olmuştur (Şekil 2b).



Şekil 1. Çalışmada Kullanılan Yöntemlere Ait Şematik Gösterimler; a) Karıştırmalı Döküm Yöntemi, b) Ultrasonik Dövme Yöntemi

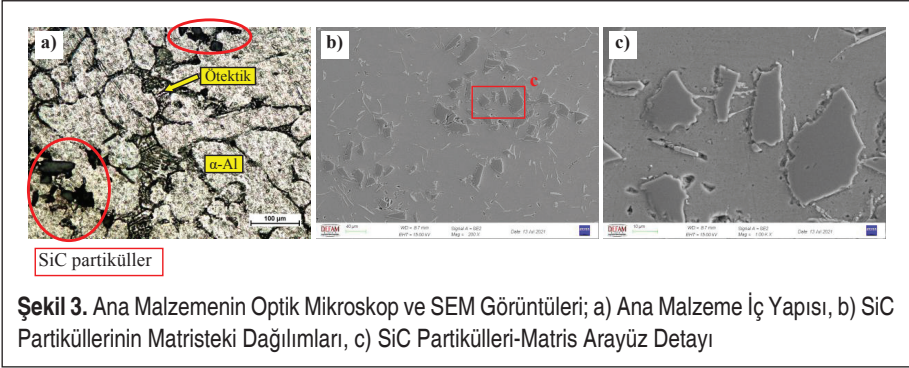


Mikroyapı incelemeleri için hazırlanan numunelerin yüzeyleri parlatıldıktan sonra % 0,5 HF çözeltisi içine daldırılarak kimyasal olarak dağlanmıştır. Numunelerin iç yapıları optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobunda (SEM) incelenmiştir. Numunelere ait sertlik ölçümleri mikro Vickers sertlik cihazıyla 100 gr yük altında ve 15 sn bekleme süresi ile gerçekleştirilmiştir.

Bulamaç (çamur) ortamında abrasif aşınma testleri ASTM G105-20 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Test düzeneğine ait şematik görünüm Şekil 2a'da verilmiştir. Aşındırıcı partiküllerin bulunduğu bulamaçlı (çamurlu) ortamı oluşturmak için 1,5:1 oranında kuvars kumu ve saf su karışımı kullanılmıştır. Testlerde aşınma numuneleri 222 N'luk yük altında kauçuk diske temas ettirilmiştir. Testlerde her numune farklı sertlik değerlerine sahip (sırasıyla 50, 60, 70 Shore A) 3 kauçuk disk kullanılarak aşındırılmıştır. Her kauçuk disk 245 d/d ile 1000 devir boyunca kullanılmıştır. Tüm numunelerin aşınma testleri oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

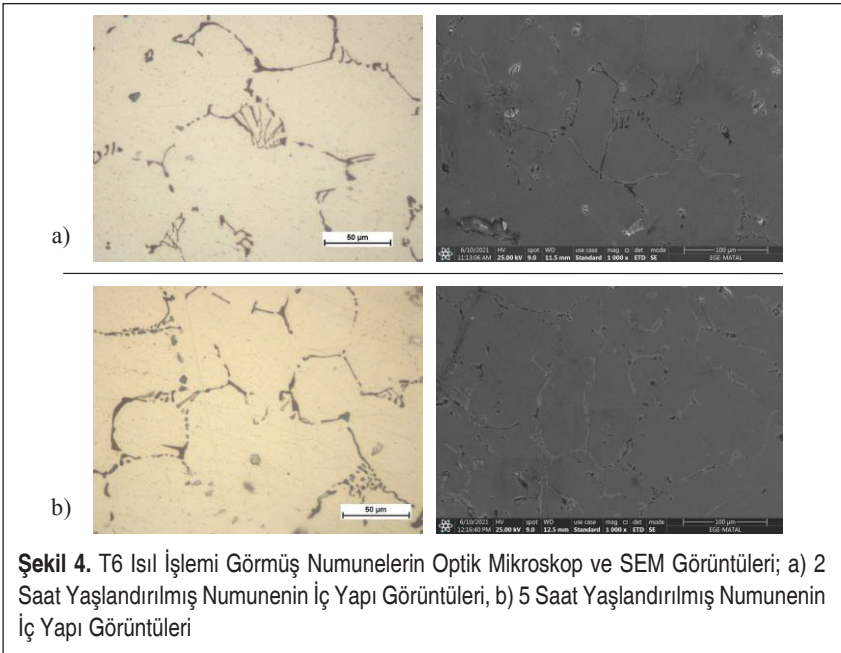
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

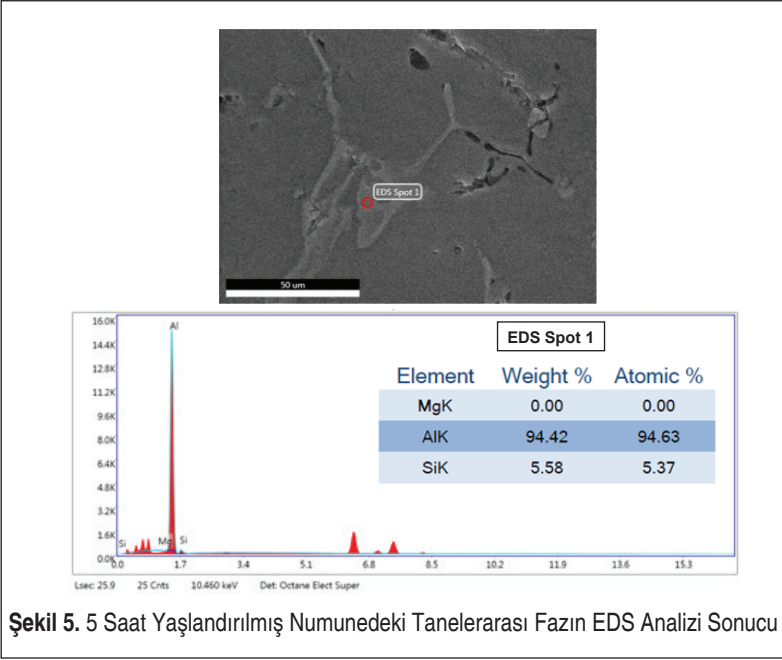
Döküm sonrası elde edilen plakanın iç yapısının iri α -Al dendritlerinden ve dendritlerarası iğne-şekilli Si ötektik fazından oluştuğu gözlemlenmiştir (Şekil 3a). SiC partiküllerin matris metali tarafından iyi şekilde ıslatılabilmesinin ve matris-partikül arayüzünde oluşan bağ kuvvetinin, partiküllerin matris içindeki dağılımını etkilediği bilinmektedir [22, 33, 34]. Şekil 3b'de MMK yapı içinde ikinci faz SiC partikülleri makro kümelenmeler oluşturmadan yüksek oranda homojen dağıldığı görülmektedir. Bu durum, matrisin partikülleri uygun şekilde ıslatabildiğini göstermektedir. Elde edilen SiC takviyeli kompozitin matris-partikül arayüzü Şekil 3c'de gösterilmiştir. Arayüzün düzgün şekilde oluşması ve matrisin partikülleri tamamen sarması, matris-



partikül arasında uygun bağlanmanın da gerçekleştiğini göstermektedir. Ancak elde edilen MMK plakanın bazı bölgelerinde partiküllerin mikro ölçekte kümelenmeleri sebebiyle matrisin partikülleri tamamen saramadığı ve bu sebeple porozite oluşumunun gerçekleştiği de tespit edilmiştir.

Elde edilen kompozit plakaya, gevrek ve iri ötektik fazın küreselleşmesi, α -Al dendritlerinin homojenleşmesi ve çözünen atomların çöktürülerek kompozitinin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi için T6 ısıtma işlemi uygulanmıştır. Lu ve ekb.'nin yaptığı çalışmaya benzer şekilde, T6 ısıtma işlemi sonrası ana malzemedeki ötektik fazın büyük çoğunluğunun küreselleştiği ve yapı içinde daha homojen dağıldığı gözlemlenmiştir.





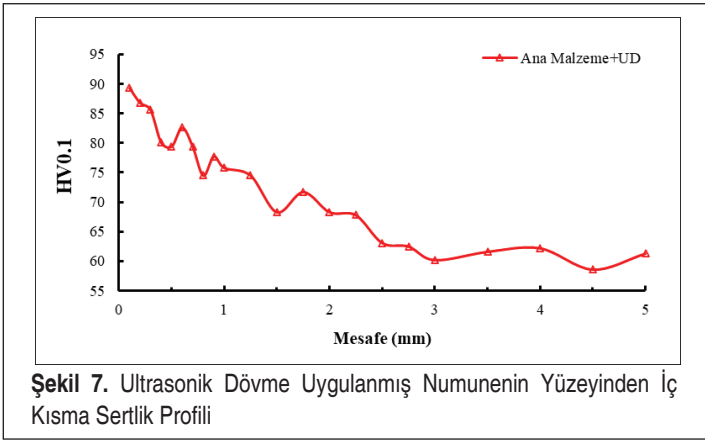
Şekil 5. 5 Saat Yaşlandırılmış Numunedeki Tanelerarası Fazın EDS Analizi Sonucu

(Şekil 4) [5]. Buna ilaveten, ana malzemede ki α -Al dendritleri de ısıl işlem sonrası daha küresel hale gelmiştir. T6 ısıl işlemi gören numunelerin iç yapıları kıyaslandığında, yaşlandırma süresinin artmasıyla oluşan ötetik fazın relatif olarak arttığı ve irileştiği tespit edilmiştir. 5 saat yaşlandırılmış numunenin SEM görüntüsündeki belirtilen noktada (açık gri) gerçekleştirilen EDS analizine göre; bu noktada Al ve Si'nin birlikte bulunuşu ötetik yapıya işaret etmektedir (Şekil 5). Ötetik yapının T6 ısıl işlemi gören numunelerdeki dağılımı Şekil 4'deki SEM görüntülerinden net şekilde görülebilmektedir.

Ultrasonik dövme işlemi görmüş ana malzemenin mikro ölçekte dalgalı yüzeye sahip olduğu Şekil 6'da görülmektedir. Çalışmada ana malzemenin yüzey mekanik özelliklerini geliştirmek ve dolayısıyla aşınma direncini arttırmak için uygulanan ultrasonik dövme işlemi, çelik pim darbelere şeklinde yüzeye uyguladığı basma gerilmeleri ile, malzemede darbe yönüyle belirgin derecede açı yapan (dik/dike yakın) doğrultu boyunca plastik deformasyon oluşturur ve tanelerin bu yönde kristalografik olarak yönlendirilerek deforme olmasına sebep olur [35]. Şekil 6a-c'den görüleceği üzere dövülmüş yüzeydeki deformasyon sonucu tanelerdeki yönlendirme, ötetik fazın dövme yönüne göre belirgin bir açı yaparak yönlendirilmesinden net bir şekilde görülebilmektedir. Bu bölgede ultrasonik dövmenin etkisiyle taneler deforme olarak yönlendirilirken, yapıdaki tanelerarası ötetik Al-Si fazında kırılmalar gerçekleşmiş ve bu faz küçük parçalara bölünmüştür. Numunenin yüzeyinden iç kısma doğru gidildikçe plastik deformasyon



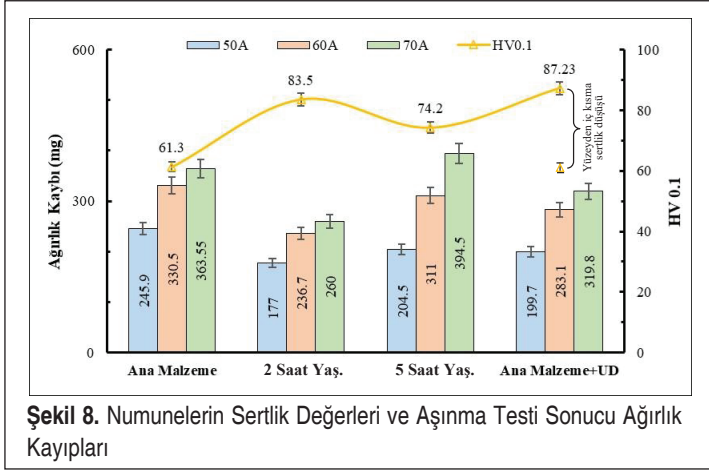
Şekil 6. Ultrasonik Dövme İşlemi Uygulanmış Numunenin Yüzey Kesiti; a) Optik Mikroskop Görüntüsü, b-c) SEM Görüntüleri



Şekil 7. Ultrasonik Dövme Uygulanmış Numunenin Yüzeyinden İç Kısma Sertlik Profili

sonucu gerçekleşen yönlendirme giderek azaldığı ve yaklaşık $40 \mu\text{m}$ 'den sonra oluşmadığı gözlemlenmiştir. Bu noktadan sonra soğuk deformasyonun bir sonucu olarak iç kısımlarda artık gerilmeler oluşur. Bu bölge, ana malzemeye kıyasla daha yüksek sertlik değerlerinden kolaylıkla anlaşılabilir [36]. Ultrasonik darbeler bu bölgede belirgin bir deformasyona ve dolayısıyla mikroyapısal değişikliklere neden olamaz, ancak önemli miktarda sıkıştırma artık gerilmeleri oluşturmaya neden olur [37].

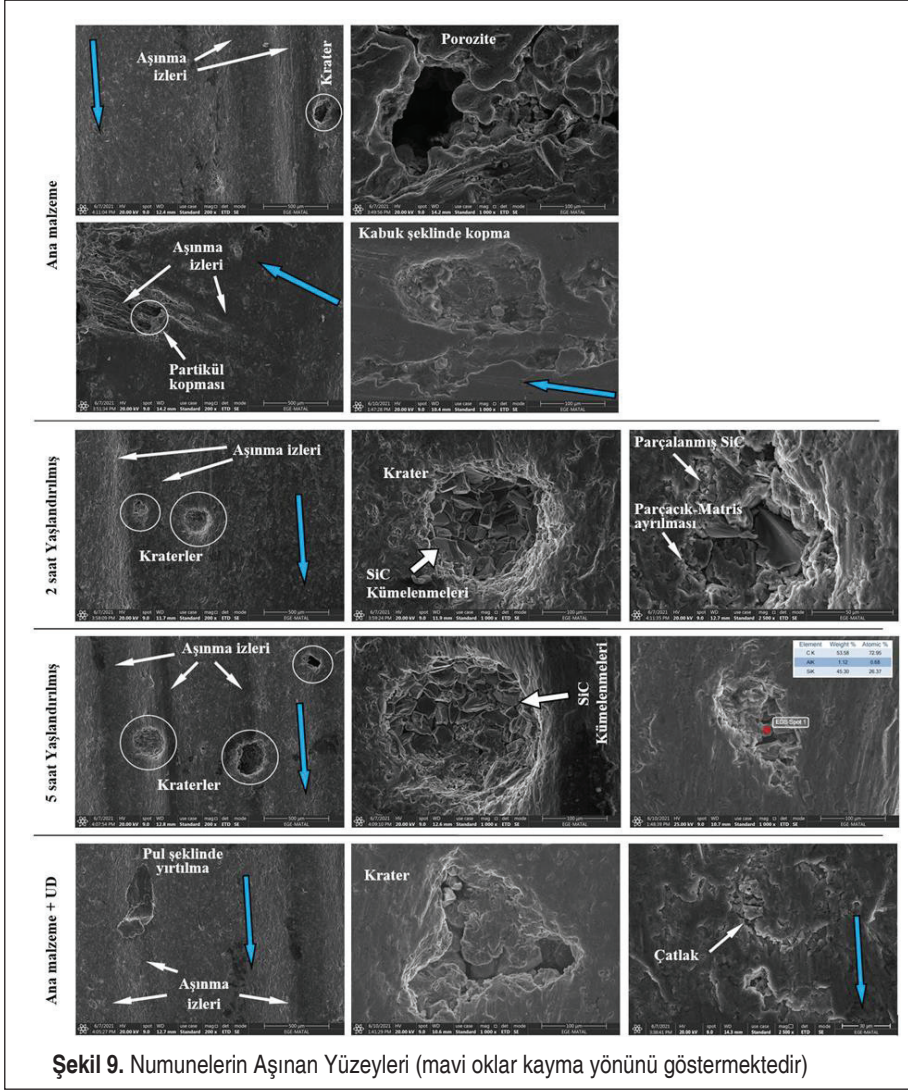
Şekil 7, ultrasonik dövme işlemi uygulanmış ana malzemenin yüzey kesitine ait sertlik profilini göstermektedir. Ultrasonik dövme işlemi ana malzeme sertliğini ($61,3 \pm 1,4 \text{ HV}$) yüzeyin ilk $300 \mu\text{m}$ 'lik bölgesinde ortalama $87,23 \pm 1,5 \text{ HV}$ 'ye getirecek, %42,3'lük belirgin bir sertlik artışına sebep olmuştur. Yüzeyden iç kısma doğru sertlik hızla düşerken, yöntem ile yaklaşık 2 mm 'yi aşan derinliğe kadar sertlik artışı gerçekleştirilmiştir. Ana malzemeye uygulanan T6 ısıtma işlemi ile 2 ve 5 saat yaşlandırılmış numunelerde sertlik değerlerinin sırasıyla $83,5 \pm 2,2 \text{ HV}$ ve $74,2 \pm 1,5 \text{ HV}$ olarak ölçülmüştür. Yaşlandırma süresindeki artış, 5 saat yaşlandırılan numunenin daha düşük sertliğe sahip olmasına sebep olmuştur. Ancak yine de farklı yaşlandırma süreleri kullanılarak uygulanan T6 ısıtma işleminin bu numunelerde ana malzemeye göre %36,2 ve %21 oranında sertlik artışı gerçekleştiği tespit edilmiştir.



Şekil 8. Numunelerin Sertlik Değerleri ve Aşınma Testi Sonucu Ağırlık Kayırları

Numunelerin ASTM G105-20 standardına göre gerçekleştirilen bulamaç (çamur) ortamında aşınma testi sonuçları, aşınma direnci olarak kabul edilen ağırlık kaybı şeklinde Şekil 8’de verilmiştir. Testler sonunda en yüksek ağırlık kaybı (~940 mg) ana malzemede gerçekleşmiştir. Ultrasonik dövme işlemiyle yüzey sertliğinin artırılması ve deformasyon ile yüzeyde daha yoğun tabaka elde edilmesi aşınma direncini ana malzemeye göre %14,6 geliştirmiştir. Yüzeydeki sertlik diğer numunelere göre daha yüksek olmasına rağmen şiddetli aşınma şartları (222 N yük altında) bu sert tabakanın hızla aşınmasına sebep olarak numunenin aşınma direncini hızla düşürmüştür. Yüzeyde gerçekleşen şiddetli aşınma ile derinleşen oluklar/çizikler aşınma testi boyunca bu numunede yüzeye göre daha yumuşak tabakalara ulaşsa da, ultrasonik dövme işlemi ile 2 mm derinliği aşan bölgeye kadar gerçekleşen sertlik artışı aşınma direncinin ana malzemeden yüksek olmasını sağlamıştır.

T6 ısıtılmasıyla 2 ve 5 saat yaşlandırılmış numunelerdeki toplam ağırlık kayıpları sırasıyla 673,7 ve 910 mg olarak ölçülmüştür. Uygulanan ısıtılması bu numunelerde gerçekleştirdiği sertlik artışı ile aşınma dirençlerinde ana malzemeye göre 2 saat yaşlandırılmış numunede %28,3; 5 saat yaşlandırılmış numunede ise %3,2 ‘lik artış sağlamıştır. 5 saat yaşlandırılmış numune, her ne kadar sertliği ana malzemeye yüksek olsa da, testlerde kullanılan ilk iki diskte ana malzemeye göre daha az aşınırken, 70 Shore A sertliğe sahip son diskle yapılan aşınma testinde ana malzemeden daha fazla aşınmıştır. Son diskle yapılan aşınma testi sonunda 5 saat yaşlandırılmış numunede 394,5 mg’lık ağırlık kaybı yaşanırken, ana malzemede bu değer 363,55 mg olarak ölçülmüştür. Bu durumun, üretim sırasında MMK plakada oluşan porozitelerin ve mikro ölçekte SiC partikülleri kümelenmesinin 5 saat yaşlandırılmış numunede aşınmayı domine ederek oluştuğu gözlemlenmiştir. Özellikle partiküllerin kümelenmiş bölgelerde gerçekleşen kopmalar, matrisle birlikte SiC partiküllerinin de yapıdan



ayrılmasıyla hem ağırlık kaybını ve hem de yüzeyde gerçekleşen 3 cisimli abrasif aşınmayı daha da arttırmıştır. Bu durum, tüm numunelerde gözlemlenmiş olsa da aşınan yüzeyler incelendiğinde (Şekil 9) oluşan bu derin kraterlerin 5 saat yaşlandırılmış numunede relatif olarak daha fazla sayıda olduğu görülmüştür. Yük taşıma kapasitesi matris malzemesinden yüksek olan SiC partiküllerinin kompozit yapının sertliğini artırarak ve yüzeye gelen yükün büyük kısmını karşılayıp matris malzemesinin aşınmasını azaltarak kompozit aşınma direncini arttırdığı bilinmektedir [38]. Ancak bu seramik partiküllerin üretim sırasında kümelenmeleri ve özellikle şiddetli aşınma



koşulları altında yapıdan toplu olarak ayrılmaları halinde, kompozit yapıya kazandırdıkları aşınma direnci yine kendileri sebebiyle düşebilmektedir.

4. SONUÇ

Çalışmada SiC partikül takviyeli A356 kompoziti karıştırmalı döküm yöntemiyle başarılı bir şekilde üretilmiştir. Elde edilen kompozitin iç yapısının iyileştirilmesi ve bulamaç (çamur) ortamındaki abrasif aşınma davranışının geliştirilmesi için geleneksel bir yöntem olan ısıtıl işlem ve modern bir uygulama olan ultrasonik dövme yöntemi kullanılmıştır. Kompozite uygulanan işlemlerle elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak kıyaslanmıştır. Buna göre;

1. Döküm yapıdaki mekanik özellikleri olumsuz etkileyen iğne-şekilli ötektik Al-Si fazı farklı yaşlandırma süreleriyle uygulanan T6 ısıtıl işlemi sonrasında küreselleştirilmiştir.
2. T6 ısıtıl işlemleri sonunda kompozit yapının sertliği 2 ve 5 saat yaşlandırılmış numunelerde sırasıyla %36,2 ve %21 oranında artmıştır.
3. Ultrasonik dövme yöntemi yüzeyde gerçekleştirdiği soğuk deformasyon ile kompozitin sertlik değerini 87,23 HV'ye çıkartmıştır. Yöntemin kompozitin sertliğini yüzeyden 2 mm'yi aşan derinliğe kadar arttırdığı tespit edilmiştir.
4. Ultrasonik dövme ile döküm yapıda bulunan iğne-şekilli ötektik faz yüzey bölgesinde kırılarak küçük parçalara bölünmüştür.
5. Numunelerin bulamaç ortamındaki abrasif aşınma dirençleri işlem görmemiş kompozit yapıya göre daha yüksek çıkmıştır. 5 saat yaşlandırılan numunedeki üretim kaynaklı mikro süreksizliklerin, bu numunede aşınma miktarını arttırarak sertliğin yüksek olması avantajının önüne geçebileceğini göstermiştir.

TEŞEKKÜR

Mak. Müh. Anıl Şeker ve Vansan Makina San. ve Tic. A.Ş.'ye çalışmamıza desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

1. **Gülcan, O., Tekkanat, K., Çetinkaya, B.** 2019. "Fiber Metal Laminatlar ve Uçak Sanyaiinde Kullanımı Üzerine Bir İnceleme," Mühendis ve Makina, vol. 60, no. 697, p. 262-288.
2. **Şenel, M. C., Gürbüz, M., Koç, E.** 2018. "Toz Metalürjisi Metoduyla Üretilen Al-Si₃N₄ Metal Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi," Mühendis ve Makina, vol. 59, no. 693, p. 33-46.
3. **Gecu, R., Acar, S., Kısasoz, A., Guler, K. A., Karaaslan, A.** 2018. "Influence of T6 Heat Treatment on A356 and A380 Aluminium Alloys Manufactured by Thixoforging



Combined with Low Superheat Casting,” Transactions of Nonferrous Metals Society of China, vol. 28, no. 3, p. 385–392. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(18\)64672-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(18)64672-2)

4. **More, S. R., Bhatt, D. V., Menghani, J. V.** 2019. “Effect of Microstructure and Hardness on Slurry Erosion Behaviour of A356 Alloy Using Slurry Pot Test Rig,” Transactions of the Indian Institute of Metals, vol. 72, p. 3191–3199. <https://doi.org/10.1007/s12666-019-01784-z>
5. **Lu, S-p., Du, R., Liu, J-p., Chen, L-c., Wu, S-s.** 2018. “A New Fast Heat Treatment Process for Cast A356 Alloy Motorcycle Wheel Hubs,” China Foundry, vol. 15, no. 1, p. 11–16. <https://doi.org/10.1007/s41230-018-7058-x>
6. **Youn, S. W., Kang C. G.** 2006. “Characterization of Age-Hardening Behavior of Eutectic Region in Squeeze-Cast A356-T5 Alloy Using Nanoindenter and Atomic Force Microscope,” Materials Science & Engineering A, vol. 425, no. 1-2, p. 28-35. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.03.042>
7. **Zhang, L. Y., Jiang, Y. H., Ma, Z., Shan, S. F., Jia, Y. Z., Fan, C. Z., Wang, W. K.** 2008. “Effect of Cooling Rate on Solidified Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum A356 Alloy,” Journal of Materials Processing Technology, vol. 207, no. 1-3, p. 107-111. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.059>
8. **Çetin, A.** 2015. “Alüminyum-Silisyum Döküm Alaşımlarına Genel Bir Bakış,” <https://dokumhane.net/kutuphane/aluminyum-silisyum-dokum-alasimlarina-genel-bir-bakis/> , 16.07.2021.
9. **Boschetto, A., Costanza, G., Quadrini, F., Tata, M. E.** 2007. “Cooling Rate Inference in Aluminum Alloy Squeeze Casting,” Materials Letters, vol. 61, no. 14-15, p. 2969-2972. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.10.048>
10. **Moller, H., Govender, G., Stumpf, W. E.** 2008. “The T6 Heat Treatment of Semi-Solid Metal Processed Alloy A356,” The Open Materials Science Journal, vol. 2, p. 6-10. <https://doi.org/10.2174/1874088X00802010006>
11. **Zhu, M., Jian, Z., Yang, G., Zhou, Y.** 2012. “Effects of T6 Heat Treatment on The Microstructure, Tensile Properties, and Fracture Behavior of The Modified A356 Alloys,” Materials & Design, vol. 36, p. 243-249. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.11.018>
12. **Jiang, W-m., Fan, Z-t., Liu, D-j.** 2012. “Microstructure, Tensile Properties and Fractography of A356 Alloy Under As-Cast and T6 Obtained with Expendable Pattern Shell Casting Process,” Transactions of Nonferrous Metals Society of China, vol. 22, supplement 1, p. 7-13. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(12\)61676-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(12)61676-8)
13. **Qayyum, M. S.** 2015. “Production of a Permanent Mold Gravity Die Cast A356.0 Aluminum Alloy Motorbike Shock Absorber through Casting Simulation,” Key Engineering Materials, vol. 659, p. 676-680. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.659.676>
14. **Makhlouf, M. M., Guthy, H. V.** 2001. “The Aluminum-Silicon Eutectic Reaction: Mechanisms and Crystallography,” Journal of Light Metals, 2001, vol. 1, no. 4, p. 199-218. [https://doi.org/10.1016/S1471-5317\(02\)00003-2](https://doi.org/10.1016/S1471-5317(02)00003-2)



15. **Gürbüz, M., Mutuk, T.** 2019. "Karbon Esaslı Malzeme Takviyeli Titanyum Kompozitler ve Grafen Üzerine Yeni Eğilimler," *Mühendis ve Makina*, vol. 60, no. 695, p. 101-118.
16. **Thiyagesan, G., Vigneshwaran, S., Beer Mohammed, S., Srinivasan, S. A., Thirumaran, B., Kumaresh Babu, S. P.** 2020. "Investigation on The Erosive Wear Resistance of Squeeze Cast AA7150 Under Slurry Conditions," *Materials Today: Proceedings*, vol. 27, no. 3, p. 2529-2532. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.230>
17. **Sharifitabar, M., Sarani, A., Khorshahian, S., Afarani, M. S.** 2011. "Fabrication of 5052Al/Al₂O₃ Nanoceramic Particle Reinforced Composite via Friction Stir Processing Route," *Materials and Design*, vol. 32, no. 8-9, p. 4164-4172. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.04.048>
18. **Kraiklang, R., Onwong, J., Santhaweesuk, C.** 2020. "Multi-Performance Characteristics of AA5052 + 10% SiC Surface Composite by Friction Stir Processing," *Journal of Composites Science*, vol. 4, no. 2. <https://doi.org/10.3390/jcs4020036>
19. **Prabu, S. B., Karunamoorthy, L., Kathiresan, S., Mohan, B.** 2006. "Influence of Stirring Speed and Stirring Time on Distribution of Particles in Cast Metal Matrix Composite," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 171, no. 2, p. 268-273. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.06.071>
20. **Sukumaran, K., Pai, B. C., Chakraborty, M.** 2004. "The Effect of Isothermal Mechanical Stirring on an Al-Si Alloy in The Semisolid Condition," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 369, no. 1-2, p. 275-283. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.11.036>
21. **Lashgari, H. R., Zangeneh, Sh., Shahmir, H., Saghafi, M., Emamy, M.** 2010. "Heat Treatment Effect on The Microstructure, Tensile Properties and Dry Sliding Wear Behavior of A356-10%B4C Cast Composites," *Materials & Design*, vol. 31, no. 9, p. 4414-4422. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.04.034>
22. **Ghandvar, H., Idris, M. H., Ahmad, N., Moslemi, N.** 2017. "Microstructure Development, Mechanical and Tribological Properties of a Semisolid A356/XSiCp Composite," *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 15, no. 6, p. 533-544. <https://doi.org/10.1016/j.jart.2017.06.002>
23. **Nagarajan, S., Dutta, B., Surappa, M. K.** 1999. "The Effect of SiC Particles on The Size and Morphology of Eutectic Silicon in Cast A356/SiCp Composites," *Composites Science and Technology*, vol. 59, no. 6, p. 897-902. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(98\)00131-6](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(98)00131-6)
24. **Shafiei-Zarghani, A., Kashani-Bozorg, S. F., Zarei-Hanzaki, A.** 2011. "Wear Assessment of Al/Al₂O₃ Nano-Composite Surface Layer Produced Using Friction Stir Processing," *Wear*, vol. 270, no. 5-6, p. 403-412. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.12.002>
25. **Wang, C. T., Gao, N., Wood, R. J. K., Langdon, T. G.** 2011. "Wear Behavior of an Aluminum Alloy Processed by Equal-Channel Angular Pressing," *Journal of Materials Science*, vol. 46, no. 1, p.123-130. <https://doi.org/10.1007/s10853-010-4862-0>
26. **Thuong, N. V., Zuhailawati, H., Seman, A. A., Huy, T. D., Dhindaw, B. K.** 2015. "Microstructural Evolution and Wear Characteristics of Equal Channel Angular Pressing



Processed Semi-Solid-Cast Hypoeutectic Aluminum Alloys,” *Materials & Design*, vol. 67, p. 448-456. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.11.054>

27. **Palacios, M., Bagherifard, S., Guagliano, M., Pariente, I. F.** 2014. “Influence of Severe Shot Peening on Wear Behaviour of an Aluminium Alloy,” *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 37, no. 7, p. 821-829. <https://doi.org/10.1111/ffe.12210>
28. **Mao, X., Sun, J., Feng, Y., Zhou, X., Zhao, X.** 2019. “High-Temperature Wear Properties of Gradient Microstructure Induced by Ultrasonic Impact Treatment,” *Materials Letters*, vol. 246, p. 178-181. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.03.059>
29. **Vasylyev, M. A., Chenakin, S. P., Yatsenko, L. F.** 2016. “Ultrasonic Impact Treatment Induced Oxidation of Ti6Al4V Alloy,” *Acta Materialia*, vol. 103, p. 761-774. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.10.041>
30. **Liu, Y., Wang, D., Deng, C., Xia, L., Huo, L., Wang, L., Gong, B.** 2014. “Influence of Re-Ultrasonic Impact Treatment on Fatigue Behaviors of S690QL Welded Joints,” *International Journal of Fatigue*, vol. 66, p. 155-160. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2014.03.024>
31. **Yuan, K.L., Sumi Y.** 2015. “Modelling of Ultrasonic Impact Treatment (UIT) of Welded Joints and Its Effect on Fatigue Strength,” *Frattura ed Integrità Strutturale (Fracture and Structural Integrity)*, vol. 34, p. 476-486. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.34.53>
32. ASTM G105-20. “Standard Test Method for Conducting Wet Sand/Rubber Wheel Abrasion Tests,” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020. <https://doi.org/10.1520/G0105-20>
33. **Ghandvar, H., Farahany, S., Idris, J.** 2015. “Wettability Enhancement of SiCp In Cast A356/SiCp Composite Using Semisolid Process,” *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 30, no. 12, p. 1442-1449. <https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1004687>
34. **Hashim, J., Looney, L., Hashmi, M. S. J.** 2001. “The Wettability of SiC Particles by Molten Aluminium Alloy,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 119, no. 1-3, p. 324-328. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00975-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00975-X)
35. **Perlovich, Y. A., Gol'tsev, V. Y.** 1992. “Changes In The Texture of The Plastic Deformation Zone at The Tip of a Moving Crack,” *Materials Science*, vol. 27, p. 479-483. <https://doi.org/10.1007/BF00726460>
36. **Todaka, Y., Umemoto, M., Tsuchiya, K.** 2004. “Comparison of Nanocrystalline Surface Layer in Steels Formed by Air Blast and Ultrasonic Shot Peening,” *Materials Transactions*, vol. 45, no. 2, p. 376-379. <https://doi.org/10.2320/matertrans.45.376>
37. **Kahraman, F.** 2018. “Surface Layer Properties of Ultrasonic Impact-Treated AA7075 Aluminum Alloy,” *The Journal of Engineering Manufacture*, vol. 232, no. 12, p. 2218-2225. <https://doi.org/10.1177/0954405416685386>
38. **Shabani, M. O., Mazahery, A.** 2012. “Application of Finite Element Model and Artificial Neural Network in Characterization of Al Matrix Nanocomposites Using Various Training Algorithms,” *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 43, p. 2158-2165. <https://doi.org/10.1007/s11661-011-1040-1>

Kısıtlı Mühendislik Problemlerinin Karşılaştırmalı Ağırlık ve Maliyet Optimizasyonu

Aybike Özyüksel Çiftçioğlu¹

ÖZ

Mühendislik alanındaki gerçek dünya problemleri genellikle doğrusal olmayan veya kısıtlı tasarım problemleridir. Pek çok nedenden ötürü, bir mühendis yalnızca uygun şekilde çalışan herhangi bir tasarımı değil, en iyi tasarımı elde etmek ister. En iyi tasarımı belirleme sürecine optimizasyon denir. Optimizasyon ile mevcut kısıtlayıcıları sağlayarak belirli bir amaç fonksiyonunu elde edecek şekilde problemin en iyi tasarımı belirlenir. Bu çalışmada çeşitli eşitlik ve eşitsizlik kısıtlamaları olan çekme/basınç yayı, kaynaklı giriş ve basınçlı kap tasarımları olmak üzere üç gerçek dünya mühendislik tasarım problemi optimize edilmeye çalışılmış, tasarım problemlerinin optimum değişkenleri belirlenmiştir. Optimizasyon sürecinde sekiz farklı algoritma kullanılmış, gerçek mühendislik problemlerine ait en iyi tasarımlar oluşturulmaya çalışılmıştır. Optimizasyon algoritmaları, meta-sezgisel algoritmaların alt dallarından olan evrimsel tabanlı, sürü tabanlı, matematik tabanlı ve fizik tabanlı algoritmalarından seçilmiştir. Bunların yanı sıra, algoritmaların sonuçları yakınsama eğrileri ve kutu grafikler yardımıyla birbirleri ile kıyaslanmıştır. Gri kurt algoritması her üç problemde de en başarılı performans gösteren algoritma olmuştur. Bunun yanı sıra, sürü tabanlı, fizik tabanlı ve matematik tabanlı algoritmalar gerçek mühendislik problemlerini optimize etmede diğer algoritmalarından daha iyi sonuç vermiştir.

Anahtar Kelimeler: Basınçlı kap tasarımı, çekme- germe yay tasarımı, kaynaklı giriş tasarımı, optimizasyon

Comparative Weight and Cost Optimization of Constrained Engineering Problems

ABSTRACT

Real-world problems in engineering are often nonlinear or constrained design problems. For many reasons, an engineer wants to get the best design, not just any that works properly. The process of determining the best design is called optimization. With optimization, the best design of the problem is determined to achieve a specific objective function by providing the current constraints. In this study, three real-world engineering design problems are tried to be optimized, namely tension/compression spring, welded beam, and pressure vessel designs with various equalities and inequality constraints. In the optimization process, eight different algorithms are used, the best designs are created, and the optimum variables of the problems are determined. Optimization algorithms are selected from evolutionary-based, swarm-based, mathematics-based, and physics-based algorithms, which are sub-branches of metaheuristic algorithms. In addition, the results of the algorithms are compared with each other with the help of convergence curves and box graphs. The grey wolf algorithm is the algorithm that showed the most successful performance in all three problems. Besides, swarm-based, physics-based, and math-based algorithms performed better than other algorithms in optimizing real engineering problems.

Keywords: Pressure vessel design, tension/compression spring design, welded beam design, optimization

Geliş/Received : 27.07.2021
Kabul/Accepted : 30.08.2021

¹ Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Manisa
aybike.ozyuksel@cbu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4424-7622



EXTENDED ABSTRACT

Introduction/ Background

Meta-heuristic methods are often inspired by simple concepts such as physical phenomena, animal behavior, evolutionary trends. They are easily adaptable to different types of problems. The optimization process starts with random solutions and they have a superior ability to avoid local optima compared to traditional optimization techniques. Meta-heuristic methods are generally divided into two main classes: single solution-based and population-based. The search process for single solution-based meta-heuristics starts with a candidate solution. This single candidate solution is developed through iterations. However, population-based metaheuristics perform the optimization using a set of solutions (populations). In this case, the search process starts with a random initial population (multiple solutions), and this population is developed throughout iterations. Population-based meta-heuristics have a broader knowledge of the search space by having more than one solution. In addition, they have advantages in terms of avoiding local optima more easily and having a wider research area compared to single solution-based methods. Some of the population-based meta-heuristics are: Swarm Intelligence, Physics-Based, Mathematics Based, Evolutionary based, etc. are algorithms. The main complexity in many real engineering problems comes from the size of the problem, its constraints, and the interaction of variables. In this study, three different real engineering problems with various constraints were optimized using eight different optimization algorithms, namely Gravitational Search Algorithm (GSA), Particle Swarm Optimization (PSO), Biogeography-Based Optimization (BBO), Genetic Algorithm (GA), Differential Evolution (DE), Salp Swarm Algorithm (SSA), Sine Cosine Algorithm (SCA), and Grey Wolf Optimizer (GWO), and optimum variables of the problems were obtained. Besides, the performance comparison of eight algorithms was made by drawing convergence curves and boxplots.

Objectives/ Research Purpose

The study has two main objectives: First, to obtain the best variable values by optimizing three real engineering problems (welded beam design problem, tension-compression spring problem, pressure vessel design problem) with various equality and inequality constraints, and then to compare the performances of eight different metaheuristic algorithms over these problems using various methods like convergence curves and boxplots.

Methods/ Methodology

Three real engineering design problems with various equality and inequality constraints are used: welded beam, tension/compression spring, and pressure vessel designs. Each design problem was solved with eight different optimization algorithms (GSA, PSO, BBO, GA, DE, SSA, SCA, and GWO). It has been tried to obtain optimum cost in welded beam and pressure vessel designs, and optimum weight in tension/compression spring design. During the optimization, 30 simulations were made for each algorithm so that the best, worst and average values of each algorithm were compared with each other. For each problem, the performances of the algorithms were compared within themselves with the help of convergence curves and box plots, and the best variable values giving the optimum objective functions were determined.

Results/ Findings

Optimum results of engineering problems are illustrated in Table 8. According to the table, optimum values found for h (thickness of the weld), l (length of the welded joint), t (width of the beam), and b (thickness of the beam) values, which give the lowest cost in the welded beam design problem, were 0.21, 3.29, 9.04, and 0.21, respectively. The d (wire diameter), D (mean coil diameter), N (number of active coils) variable values giving the optimum weight of the tension-compression spring design problem were 0.05, 0.33, and 13.14, respectively. Optimum Ts (shell thickness), Th (thickness of the head), R (inner radius) and L (length of the cylindrical section of the vessel) variable values giving the optimum cost in the pressure vessel de-

sign problem were 0.74, 0.37, 40.32 and 200, respectively. While GWO was the algorithm that gave the best results in the welded beam and pressure vessel design problems, it was the second-best algorithm by finding a value very close to the PSO algorithm, which found the best value in the tension/compression spring design problem. However, in the same problem, GWO found the most successful result in terms of average and worst (highest) results. The GA, BBO, and DE algorithms were the most unsuccessful algorithms by finding the highest results in all three problems in the best, worst and average values.

Table 8. Optimum Results Of Engineering Problems

	Welded Beam Design	Spring Design	Pressure Vessel Design
x_1	0.21	0.05	0.74
x_2	3.29	0.33	0.37
x_3	9.04	13.14	40.32
x_4	0.21	-	200.00
$f(x)$	1.701	0.01269	5735.54

Results/ Findings

Optimum results of engineering problems are illustrated in Table 8. According to the table, optimum values found for h (thickness of the weld), l (length of the welded joint), t (width of the beam), and b (thickness of the beam) values, which give the lowest cost in the welded beam design problem, were 0.21, 3.29, 9.04, and 0.21, respectively. The d (wire diameter), D (mean coil diameter), N (number of active coils) variable values giving the optimum weight of the tension-compression spring design problem were 0.05, 0.33, and 13.14, respectively. Optimum T_s (shell thickness), T_h (thickness of the head), R (inner radius) and L (length of the cylindrical section of the vessel) variable values giving the optimum cost in the pressure vessel de



1. GİRİŞ

Meta-sezgisel yöntemler genellikle fiziksel olaylar, hayvanların davranışları, evrimsel eğilimler gibi basit kavramlardan ilham alırlar. Farklı problem türlerine kolayca uyarlanabilirler. Optimizasyon süreci rastgele çözümlerle başlar ve geleneksel optimizasyon tekniklerine kıyasla yerel optimumdan kaçınma konusunda üstün yeteneklere sahiptirler. Bununla birlikte, her problem tipi için optimum sonucu veren bir meta-sezgisel yöntem yoktur [1]. Bazı meta-sezgiseller bir problem setinde en iyi sonucu verirken farklı bir problem setinde kötü sonuç verebilir. Her problem tipine göre en başarılı algoritmanın değişmesi, yeni meta-sezgisel algoritmaların oluşturulmasına ya da mevcutların geliştirilmesine imkan tanır. Literatürde optimizasyon algoritmalarının geliştirilmiş (iyileştirilmiş) versiyonları ile ilgili [2–5], algoritmaların birleştirilmesi ile oluşturulan hibrit algoritmalar [4–9] ile ilgili ya da yeni oluşturulan algoritmalarla ilgili çalışmalara rastlamak mümkündür.

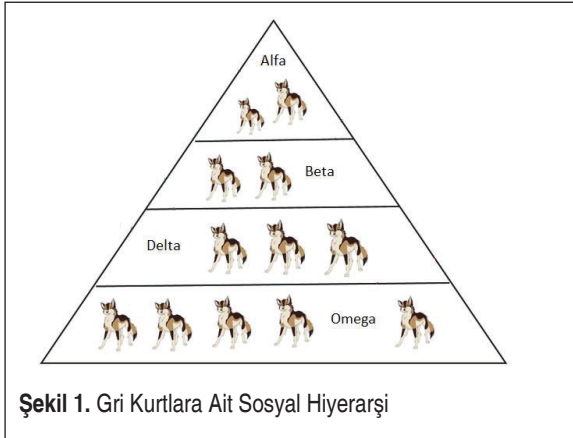
Meta-sezgisel yöntemler genel olarak tek çözüm tabanlı ve popülasyon tabanlı olmak üzere iki ana sınıfa ayrılabilir [10]. Tek çözüm tabanlı meta-sezgisellerin arama süreci bir aday çözümle başlar. Bu tek aday çözüm iterasyonlar boyunca geliştirilir. Bununla birlikte, popülasyon tabanlı meta sezgiseller, optimizasyonu bir dizi çözüm (popülasyon) kullanarak gerçekleştirir. Bu durumda arama süreci rastgele bir başlangıç popülasyonu (birden çok çözüm) ile başlar ve bu popülasyon iterasyonlar boyunca geliştirilir [11]. Popülasyon tabanlı meta-sezgiseller, birden fazla çözüme sahip olmaları ile arama uzayı hakkında daha geniş bilgiye sahip olurlar. Bunun yanı sıra yerel optima- lardan daha rahat kaçınabilmeleri ve tek çözüm tabanlı yöntemlere kıyasla daha geniş araştırma alanına sahip olmaları açısından üstünlüklere sahiptirler. Popülasyon tabanlı meta-sezgisel yöntemlerden bazıları: Sürü Zekalı, Fizik Tabanlı, Matematik Tabanlı, Evrimsel tabanlı vb. algoritmalarıdır. [5] Sürü zekası basit bireylerden ortaya çıkan kolektif grup zekasıdır. Sürü zekalı tekniklerden bazıları: gri kurt (GWO) [10], parçacık sürü (PSO) [12], salp sürüsü (SSA) [13], karınca kolonisi (ACO) [14], güve-alevi (MFO) [15], yarasa (BA) [16] algoritmalarıdır. Fizik tabanlı tekniklerden bazıları: yerçekimi arama (GSA) [17], büyük patlama- büyük çöküş (BBBC) [18] algoritmalarıdır. Matematik tabanlı algoritmalarından bazıları: sinüs kosinüs (SCA) [19], stokastik fraktal arama (SFS) [20] algoritmalarıdır. Evrimsel algoritmalarından bazıları ise: genetik algoritma (GA) [21], diferansiyel evrim (DE) [22], biyocoğrafya tabanlı (BBO) [23] algoritmalarıdır.

Çok amaçlı ve kısıtlayıcılara sahip problemlerin optimize edilmesi optimizasyon alanında hala önemli bir zorluk olarak kabul görür. Literatürde çok amaçlı ve kısıtlayıcılara sahip çeşitli problemlerin optimizasyonu ile ilgili yapılan çalışmalara her geçen gün bir yenisi eklenmektedir [24–27]. Algoritma performansını ölçmenin en önemli yolu algoritmaları benchmark problemleri üzerinden kıyaslamaktır. [28–31] çalışmalarında çeşitli benchmark problemleri üzerinden optimizasyon algoritmalarını kıyas-

lamışlardır. Birçok gerçek mühendislik problemlerindeki ana karmaşıklık ise problemin boyutu, kısıtlayıcılara sahip olması ve değişkenlerin birbirleri ile etkileşiminden kaynaklanır [32–36]. Bu çalışmada GSA, PSO, BBO, GA, DE, SSA, SCA ve GWO olmak üzere sekiz farklı optimizasyon algoritması kullanılarak çeşitli kısıtlayıcılara sahip üç farklı gerçek mühendislik problemi optimize edilmiş ve problemlere ait optimum değişkenler elde edilmiştir. Bunun yanı sıra sekiz algoritmanın performans kıyaslanması, yakınsama eğrileri ve kutu grafikleri çizilerek yapılmıştır.

2. GRİ KURT OPTİMİZASYON ALGORİTMASI

Gri kurt optimizasyon algoritması (GWO), Mirjalili [6] tarafından önerilen yeni bir meta sezgisel algoritmadır. GWO, doğadaki gri kurtların sosyal davranışlarını taklit eder. Şekil 1, doğadaki gri kurtların sosyal hiyerarşisi gösterilmektedir.



Alfa, sürüdeki kararların çoğundan sorumlu olan grup lideridir. Beta ve Delta, Alfa'nın karar vermesine ve sürüyü yönetmesine yardımcı olur. Omega kurtları, sürüdeki diğer üç baskın kurda saygı duyar ve gri kurt sürüsünün en düşük seviyededirler. Gri kurtların avlanmaları için avını bulmaları ve çevrelemeleri gerekir. GWO'da gri kurtlar, aşağıdaki denklemleri kullanarak avın etrafındaki konumlarını günceller.

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (1)$$

$$\vec{X}(t + 1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (2)$$

Burada \vec{C} ve \vec{A} katsayılarıdır. \vec{X}_p avın konumunu, \vec{X} ise gri kurtların konumunu gösterir. Optimizasyon işlemi sırasında arama yarıçapı optimize edilmelidir, bu amaçla yukarıdaki formülasyonlarda kullanılan iki katsayının değeri aşağıdaki gibi hesaplanır.



$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (3)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (4)$$

Yukarıda belirtilen denklemler, gri kurtların av etrafındaki konumlarını güncelleme-lerini sağlar. Avlama işlemini gerçekleştirmek için aşağıdaki denklemler kullanılır.

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}|, \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}|, \vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}| \quad (5)$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot \vec{D}_\alpha, \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot \vec{D}_\beta, \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot \vec{D}_\delta \quad (6)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (7)$$

GWO'ya ait sözde kod Şekil 2'de gösterildiği gibidir.

```

Gri kurt popülasyonunu başlat Xi (i = 1,2,...,n)
a, A ve C'yi başlat
Her avcının amaç fonksiyonu değerini hesapla
Xa=en iyi avcı
Xβ=ikinci en iyi avcı
Xδ=üçüncü en iyi avcı
while t < iterasyon sayısı
  for her avcı için
    mevcut avcının pozisyonunu güncelle
  end for
  a, A ve C'yi güncelle
  Bütün avcılarının amaç fonksiyonu değerlerini hesapla
  Xa, Xβ ve Xδ'yi güncelle
  t=t+1;
end while
return Xa

```

Şekil 2. GWO Algoritması Sözde Kodu

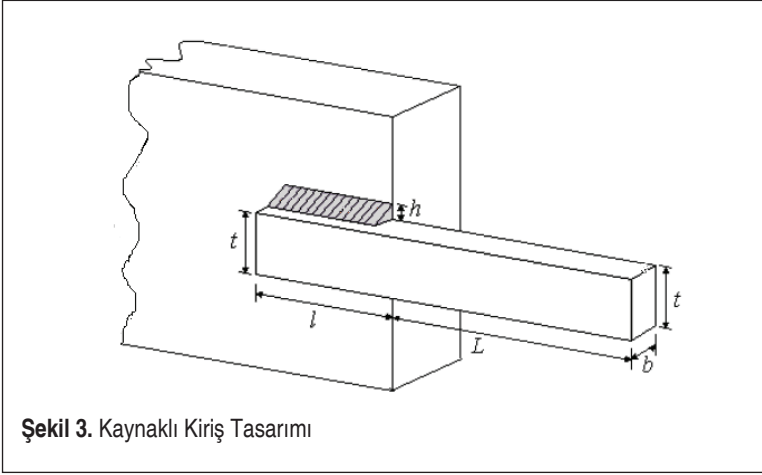
3. KISITLI MÜHENDİSLİK PROBLEMLERİNİN OPTİMUM BOYUTLANDIRILMASI

Bu bölümde çeşitli eşitlik ve eşitsizlik kısıtlamaları olan üç gerçek mühendislik tasarım problemi kullanılmıştır: kaynaklı kiriş, germe/sıkıştırma yay ve basınçlı kap tasarımları. Kaynaklı kirişler, kat döşemeleri, çalışma platformları, köprüler, vinç kirişleri ve diğer çelik yapılarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Germe- sıkıştırma yayları otomobillerden (gövdeye eğilmek ve konforu artırmak için koltuklarda, araç hareket halindeyken yolun sert darbelerini emmek için süspansiyonda ve hatta otomotiv hortumlarına destek sağlamak amacıyla) uçaklara (hava türbinleri, yönlendirme sistemleri, motor kontrolleri, tekerlekler, frenler, sayaçlar, yakıt hücreleri ve dizel motorlar gibi bir çok yerde), tıbbi cihazlardan (cerrahi aletler ve ortopedik aletler

gibi tıbbi aletlerin yanı sıra kateterler, valfler, tekerlekli sandalyeler, endoskopik cihazlar ve diğer birçok tıbbi ekipman yapımında) ateşli silahlara pek çok alanda geniş bir kullanıma sahiptir. Basıncılı kap, gazları veya sıvıları ortam basıncından önemli ölçüde daha yüksek veya daha düşük bir basınçta tutmak için tasarlanmış kapalı bir kaptır. Sterilizatörler, sıkıştırılmış gaz silindirleri, kompresörler (soğutma dahil), vakum odaları ve özel olarak tasarlanmış laboratuvar kapları basınçlı kapların kullanım alanlarına örnek olarak gösterilebilir. Her tasarım problemi sekiz farklı optimizasyon algoritması (GSA, PSO, BBO, GA, DE, SSA, SCA ve GWO) ile çözülmüş, kaynaklı kiriş ve basınçlı kap tasarımlarında optimum maliyet, germe/sıkıştırma yay tasarımında ise optimum ağırlık elde edilmeye çalışılmıştır. Optimizasyon yapılırken her algoritma için 30 simülasyon yapılmış ([10]) böylece her algoritmanın en iyi, en kötü ve ortalama değerleri birbirleriyle kıyaslanmıştır. Her bir problem için algoritmaların performansları kendi içinde kıyaslanarak, optimum amaç fonksiyonlarını veren en iyi değişken değerleri belirlenmiştir.

3.1 Kaynaklı Kiriş Tasarım Problemi

Bu problemin amacı Şekil 3'te görülen kaynaklı kirişin üretim maliyetini en aza indirmektir. Problemden, kaynak kalınlığı (h), kaynak boyu (l), kiriş genişliği (t) ve kiriş kalınlığı (b) olmak üzere 4 adet değişken mevcuttur. Ayrıca tüm kiriş uzunluğu ($l+L$) ile ifade edilebilir.



Problemin matematiksel tanımı aşağıdaki gibidir [10] :

Minimize

$$f(x) = 1.10471x_1^2x_2 + 0.04811x_3x_4(14.0 + x_2) \quad (8)$$



Kısıtlayıcılar

$$g_1(x) = \tau(x) - \tau_{max} \leq 0 \quad (9)$$

$$g_2(x) = \sigma(x) - \sigma_{max} \leq 0 \quad (10)$$

$$g_3(x) = \delta(x) - \delta_{max} \leq 0 \quad (11)$$

$$g_4(x) = x_1 - x_4 \leq 0 \quad (12)$$

$$g_5(x) = P - P_c(x) \leq 0 \quad (13)$$

$$g_6(x) = 0.125 - x_1 \leq 0 \quad (14)$$

$$g_7(x) = 1.10471x_1^2 + 0.04811x_3x_4(14.0 + x_2) - 5.0 \leq 0 \quad (15)$$

Değişken aralıkları:

$$0.1 \leq x_1 \leq 2 \quad (16)$$

$$0.1 \leq x_2 \leq 10 \quad (17)$$

$$0.1 \leq x_3 \leq 10 \quad (18)$$

$$0.1 \leq x_4 \leq 2 \quad (19)$$

burada:

$$\tau(x) = \sqrt{(\tau')^2 + 2\tau' \tau'' \frac{x_2}{2R} + (\tau'')^2} \quad (20)$$

$$\tau' = \frac{P}{\sqrt{2x_1x_2}}, \tau'' = \frac{MR}{J}, M = P \left(L + \frac{x_2}{2} \right) \quad (21)$$

$$R = \sqrt{\frac{x_2^2}{4} + \left(\frac{x_1 + x_3}{2} \right)^2} \quad (22)$$

$$J = 2 \left\{ \sqrt{2}x_1x_2 \left[\frac{x_2^2}{4} + \left(\frac{x_1 + x_3}{2} \right)^2 \right] \right\} \quad (23)$$

$$\sigma(x) = \frac{6PL}{x_4x_3^2}, \delta(x) = \frac{6PL^3}{Ex_3^2x_4} \quad (24)$$

$$P_c(x) = \frac{4.013E \sqrt{\frac{x_3^2x_4^6}{36}}}{L^2} \left(1 - \frac{x_3}{2L} \sqrt{\frac{E}{4G}} \right) \quad (25)$$

$$P = 6000 \text{ lb}, L = 14 \text{ in.}, \delta_{max} = 0.25 \text{ in.} \quad (26)$$

$$E = 30 * 10^6 \text{ psi}, G = 12 * 10^6 \text{ psi} \quad (27)$$

$$\tau_{max} = 13600 \text{ psi}, \sigma_{max} = 30000 \text{ psi} \quad (28)$$

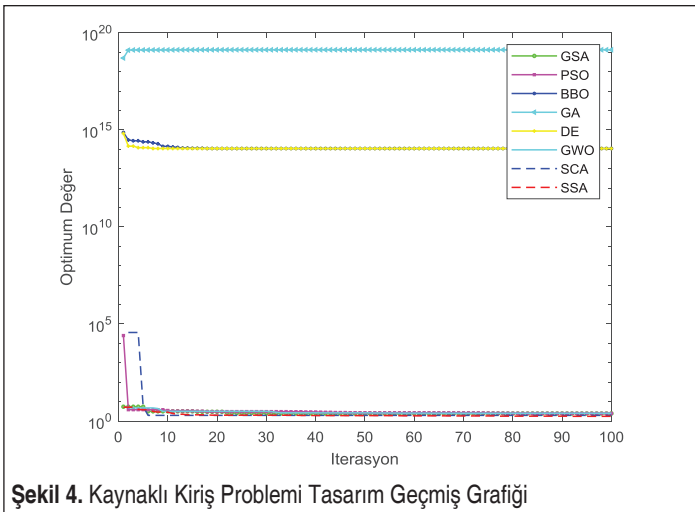
Tablo 1. Kaynaklı Kiriş Tasarımı Simülasyon Sonuçları

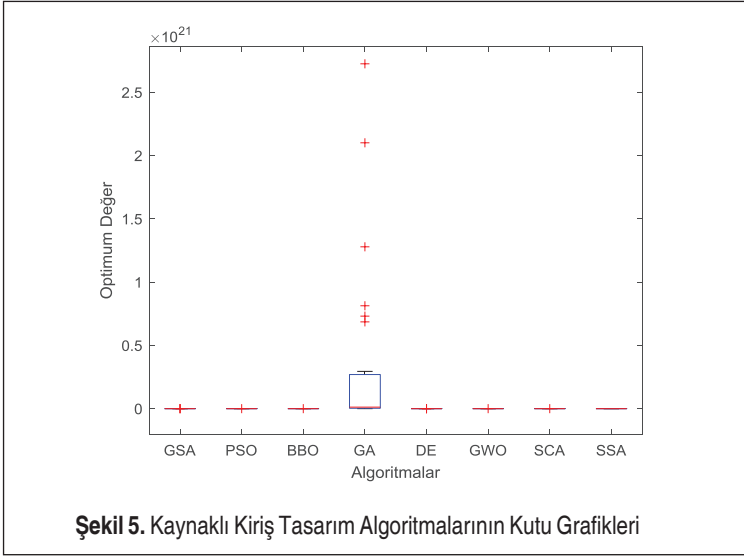
	GSA	PSO	BBO	GA	DE	SSA	SCA	GWO
1	2.429	2.490	1.1E+14	2.1E+21	1.1E+14	2.406	2.059	1.708
2	2.823	2.483	1.1E+14	2.35E+17	1.1E+14	1.995	2.289	1.708
3	4.130	2.648	1.1E+14	7.31E+20	1.1E+14	1.767	1.869	1.706
4	2.408	2.552	1.1E+14	4.44E+18	1.1E+14	3.779	2.207	1.705
5	4.177	2.483	1.1E+14	6.2E+18	1.1E+14	1.739	1.914	1.714
6	2.119	2.483	1.1E+14	6.86E+20	1.1E+14	1.822	1.944	1.706
7	2.348	2.561	1.1E+14	3.21E+18	1.1E+14	2.044	2.085	1.729
8	3.061	2.718	1.1E+14	4.91E+19	1.1E+14	2.044	2.044	1.728
9	3.006	2.483	1.1E+14	3.05E+18	1.1E+14	2.049	2.050	1.716
10	2.284	2.651	1.1E+14	2.7E+20	1.1E+14	2.004	1.884	1.726
11	2.235	2.483	1.1E+14	1.05E+19	1.1E+14	1.738	1.964	1.705
12	2.174	2.484	1.1E+14	1.08E+19	1.1E+14	2.029	2.257	1.710
13	2.620	2.483	1.1E+14	1.39E+18	1.1E+14	2.488	1.809	1.732
14	2.316	2.490	1.1E+14	1.28E+21	1.1E+14	2.447	2.006	1.751
15	2.221	2.614	1.1E+14	6.92E+17	1.1E+14	2.026	2.269	1.707
16	2.067	2.645	1.1E+14	8.13E+20	1.1E+14	2.367	1.890	1.734
17	2.640	2.483	1.1E+14	4.66E+17	1.1E+14	1.783	1.987	1.701
18	3.331	2.484	1.1E+14	4.97E+19	1.1E+14	2.252	1.893	1.718
19	2.248	2.531	1.1E+14	2.95E+20	1.1E+14	1.796	2.096	1.713
20	2.656	2.483	1.1E+14	1.56E+20	1.1E+14	1.806	1.783	1.711



21	2.553	2.568	1.1E+14	4.17E+19	1.1E+14	1.963	1.908	1.729
22	2.231	2.483	1.1E+14	9.19E+18	1.1E+14	2.357	2.532	1.712
23	2.926	2.484	1.1E+14	2.73E+21	1.1E+14	1.957	1.946	1.709
24	2.380	2.483	1.1E+14	2.6E+18	1.1E+14	2.555	1.895	1.720
25	5.660	2.487	1.1E+14	1.56E+20	1.1E+14	2.059	1.860	1.727
26	2.275	2.484	1.1E+14	7.75E+18	1.1E+14	2.086	1.845	1.716
27	2.454	2.483	1.1E+14	7.98E+16	1.1E+14	1.856	2.003	1.711
28	2.485	2.588	1.1E+14	1.4E+19	1.1E+14	1.826	1.912	1.707
29	2.241	2.483	1.1E+14	7.16E+17	1.1E+14	1.911	2.191	1.725
30	2.450	2.483	1.1E+14	1.33E+19	1.1E+14	2.522	1.959	1.751
en iyi	2.067	2.483	1.1E+14	7.98E+16	1.1E+14	1.738	1.783	1.701
en kötü	5.660	2.718	1.1E+14	2.73E+21	1.1E+14	3.779	2.532	1.751
ort.	2.698	2.525	1.1E+14	3.15E+20	1.1E+14	2.116	2.012	1.718

Problem sekiz farklı optimizasyon algoritması ile 30 defa simüle edilmiş, karşılaştırma sonuçları Tablo 1’de verilmiştir. Buna göre GWO’nun en iyi, en kötü ve ortalama sonuçlar açısından en küçük değeri bularak diğer algoritmalara kıyasla daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. En iyi değeri bulma bakımından GWO’yu takip eden algoritmalar sırasıyla SSA, SCA, GSA ve PSO’dur. En büyük değer ve ortalama





değer açılarından ise GWO'dan sonra en iyi performansı sırasıyla SCA, SSA, PSO ve GSA takip etmektedir. Bu problem için en kötü performansı GA göstermiştir. BBO ve DE aynı sonuçları bularak GA'dan sonra ikinci en kötü performans gösteren algoritmalar olmuştur. Şekil 4'te verilen yakınsama grafiğinden ise en iyi yakınsama performansının en iyi değeri bulan GWO, SSA, SCA, GSA ve PSO'ya ait olduğu görülür. Şekil 5'te algoritmaların kutu grafikleri verilmiştir. Buradan GWO'nun en iyi sonucu bulmanın yanı sıra dar ve ince bir kutu grafiğe sahip olarak kendi içinde de tutarlı bir algoritma olduğu sonucuna varılır. Aynı şekilden GA dışındaki diğer algoritmaların da kendi içerisinde tutarlı sonuçlar verdiği görülmektedir.

Kaynaklı kiriş probleminin değişkenleri için algoritmaların bulduğu optimum değerler Tablo 2'de sunulmuştur. Buna göre en düşük maliyeti bulan GWO'nun h , l , t ve b değerleri için bulduğu optimum değerler sırası ile, 0.21, 3.29, 9.04, 0.21 olmuştur.

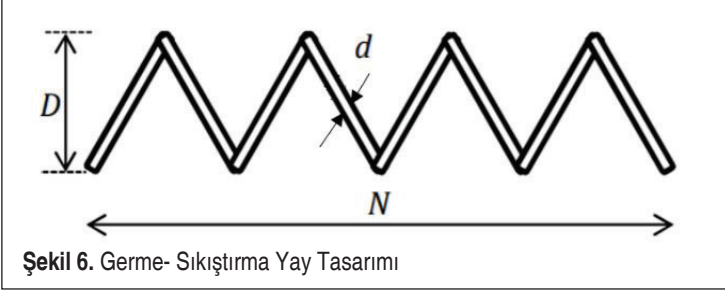
Tablo 2. Kaynaklı Kiriş Tasarımının Karşılaştırma Sonuçları

	GSA	PSO	BBO	GA	DE	SSA	SCA	GWO
$x_1(h)$	0.14	0.21	0.80	0.89	0.79	0.19	0.18	0.21
$x_2(l)$	6.14	9.04	1.96	4.43	2.00	3.61	3.89	3.29
$x_3(t)$	8.39	9.04	2.00	1.08	2.00	8.95	8.84	9.04
$x_4(b)$	0.24	0.21	2.00	0.47	2.00	0.21	0.22	0.21
$f(x)$	2.07	2.49	1E+14	8E+16	1E+14	1.74	1.79	1.70



3.2 Germe- Sıkıştırma Yay Tasarım Problemi

Bu problemin amacı, Şekil 6'da gösterilen germe- sıkıştırma yay ağırlığını en aza indirmektir. Problem, tel çapı (d), ortalama bobin çapı (D) ve aktif bobin sayısı (N) olmak üzere üç adet tasarım değişkenine sahiptir.



Şekil 6. Germe- Sıkıştırma Yay Tasarımı

Problemin matematiksel tanımı aşağıdaki gibidir [10]:

Minimize

$$f(x) = (x_3 + 2)x_2x_1^2 \quad (29)$$

Kısıtlayıcılar:

$$g_1(x) = 1 - \frac{x_2^3x_3}{71785x_1^4} \leq 0 \quad (30)$$

$$g_2(x) = \frac{4x_2^2 - x_1x_2}{12566(x_2x_1^3 - x_1^4)} + \frac{1}{5108x_1^2} - 1 \leq 0 \quad (31)$$

$$g_3(x) = 1 - \frac{140.45x_1}{x_2^2x_3} \leq 0 \quad (32)$$

$$g_4(x) = \frac{x_1 + x_2}{1.5} - 1 \leq 0 \quad (33)$$

Değişken aralıkları:

$$0.05 \leq x_1 \leq 2 \quad (34)$$

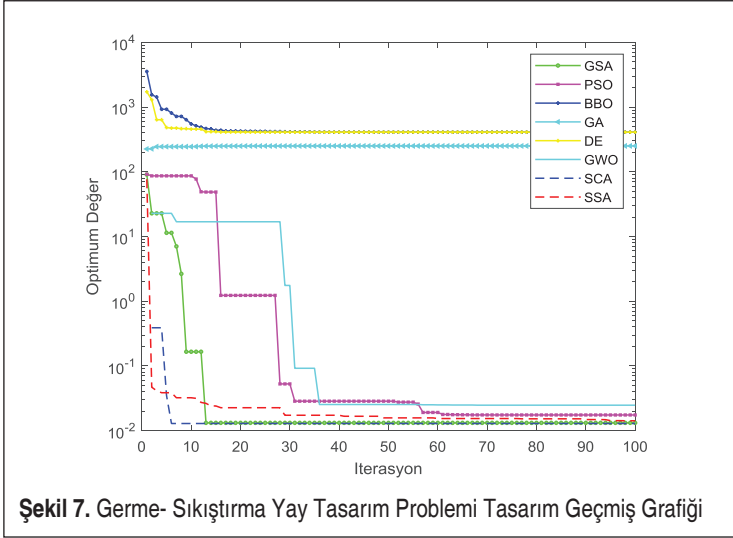
$$0.25 \leq x_2 \leq 1.3 \quad (35)$$

$$2 \leq x_3 \leq 15 \quad (36)$$

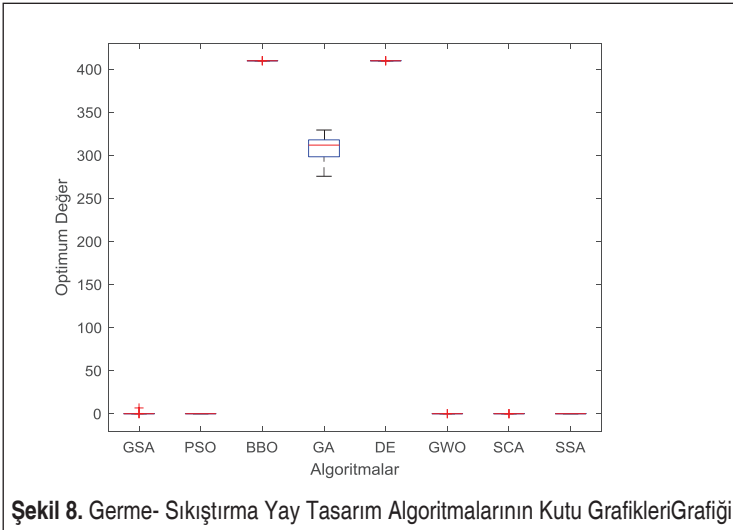
Germe- sıkıştırma yay tasarım problemi 8 farklı optimizasyon algoritması ile 30 defa simüle edilmiş, karşılaştırma sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. Buna göre bu problem için en iyi (en düşük) değeri çok yakın değerlerle bulan PSO ve GWO'yu sırasıyla SSA, GSA, SCA algoritmaları takip etmiştir. Ortalama ve en kötü sonuçlar bakımın-

Tablo 3. Germe- Sıkıştırma Yay Tasarım Simülasyon Sonuçları

	GSA	PSO	BBO	GA	DE	SSA	SCA	GWO
1	0.01283	0.01770	409.77505	313.04340	409.77499	0.01274	0.01290	0.01271
2	0.01303	0.01268	409.79687	318.78718	409.77499	0.01272	0.01297	0.01270
3	0.01307	0.01285	409.78515	295.44667	409.77499	0.01278	0.01306	0.01269
4	0.01284	0.01770	409.78242	324.39039	409.80343	0.01282	0.01315	0.01269
5	0.01308	0.01340	409.77593	320.51704	409.77499	0.01283	0.01302	0.01271
6	0.01305	0.01770	409.77727	358.30356	409.77499	0.01272	0.01309	0.01282
7	0.01286	0.01565	409.77601	282.09296	409.77499	0.01302	0.01323	0.01272
8	0.01300	0.01770	409.77771	282.28586	409.77499	0.01277	0.01297	0.01272
9	0.01283	0.01275	409.78132	317.40720	409.77499	0.01281	0.01306	0.01269
10	0.01301	0.01331	409.77522	316.20756	409.77499	0.01298	0.01303	0.01272
11	0.01273	0.01297	409.77830	320.43729	409.80343	0.01276	0.01311	0.01271
12	0.01291	0.01315	409.77745	308.96701	409.77499	0.01281	0.01296	0.01272
13	0.01279	0.01270	409.77512	324.67059	409.77499	0.01304	0.01296	0.01270
14	0.01301	0.01624	409.77516	384.01078	409.77499	0.01290	0.01313	0.01272
15	0.01283	0.01370	409.79626	299.62341	409.77499	0.01276	0.01320	0.01267
16	0.01321	0.01266	409.77500	318.68800	409.77499	0.01269	0.01320	0.01272
17	0.01309	0.01281	409.77613	293.44965	409.77499	0.01288	0.01278	0.01273
18	0.01292	0.01321	409.79829	304.56746	409.80343	0.01273	0.01296	0.01272
19	0.01278	0.01707	409.77574	327.05307	409.77499	0.01293	0.01311	0.01269
20	0.01285	0.01280	409.78362	305.42083	409.80343	0.01272	0.01284	0.01271
21	0.01297	0.01310	409.77691	276.59454	409.77499	0.01279	0.01303	0.01279
22	0.01286	0.01283	409.77930	319.34484	409.77499	0.01284	0.01302	0.01272
23	0.01277	0.01346	409.77760	328.70629	409.77499	0.01275	0.01297	0.01272
24	0.01299	0.01267	409.78270	314.40699	409.77499	0.01301	0.01312	0.01272
25	0.01314	0.01770	409.77501	313.31879	409.77499	0.01283	0.01292	0.01271
26	0.01304	0.01268	409.77559	317.08702	409.80343	0.01301	0.01288	0.01272
27	0.01281	0.01433	409.78025	300.42008	409.77499	0.01302	0.01295	0.01270
28	0.01289	0.01712	409.82080	306.62959	409.80343	0.01272	0.01277	0.01272
29	0.01283	0.01308	409.77516	313.84367	409.77499	0.01285	0.01312	0.01272
30	0.01285	0.01271	409.77629	307.56736	409.77499	0.01289	0.01290	0.01268
en iyi	0.01273	0.01266	409.77500	276.59454	409.77499	0.01269	0.01277	0.01267
en kötü	0.01321	0.01770	409.82080	384.01078	409.80343	0.01304	0.01323	0.01282
ortalama	0.01293	0.01428	409.78112	313.77630	409.78068	0.01284	0.01301	0.01271



dan ise sırasıyla GWO, SSA, GSA, SCA, PSO en başarılı performansı sergilemiştir. Bu problem için tüm kriterler açısından en kötü sonuçları bulan algoritmalar birbirlerine çok yakın değerlerle BBO ve DE algoritmaları olmuş, GA da onları takip ederek en başarısız üçüncü algoritma olmuştur. Şekil 7’de verilen yakınsama eğrilerine bakıldığında GA dışındaki algoritmaların yakınsama performanslarının iyi olduğu söylenebilir. Şekil 8’deki kutu grafiklerinden ise GSA ve GA dışındaki algoritmaların da kendi içinde tutarlı olduğu gözlenir.



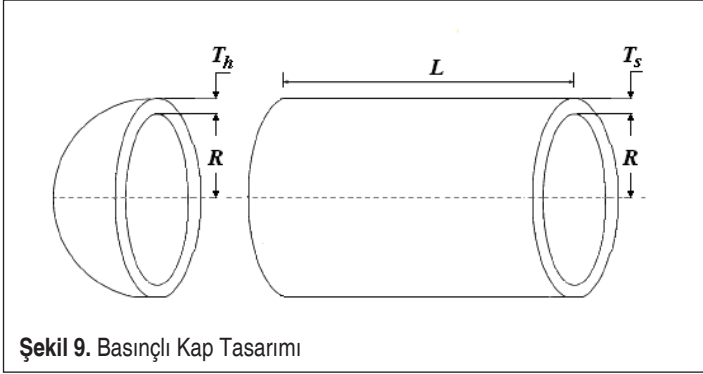
Tablo 4. Germe- Sıkıştırma Yay Tasarımı Karşılaştırma Sonuçları

	GSA	PSO	BBO	GA	DE	SSA	SCA	GWO
$x_1(d)$	0.05	0.05	2.00	1.88	2.00	0.05	0.05	0.05
$x_2(D)$	0.32	0.36	2.00	1.18	2.00	0.33	0.32	0.37
$x_3(N)$	14.05	10.94	2.00	14.71	2.00	13.14	13.99	10.71
$f(x)$	0.01273	0.01266	409.775	276.594	409.775	0.01269	0.01277	0.01267

Bunlara ek olarak germe-sıkıştırma yay tasarım probleminin optimum ağırlığı veren değişkenleri için algoritmaların bulduğu optimum değerler Tablo 4’te sunulmuştur.

3.3 Basıncı Kap Tasarım Problemi

Bu problemin amacı, Şekil 9’da gösterilen her iki ucu kapalı ve başı yarım küre şeklinde olan silindirik bir kabın malzemesi, biçimlendirilmesi ve kaynaklanmasından oluşan toplam maliyetini en aza indirmektir. Kabuk kalınlığı (T_s), baş kalınlığı (T_h), iç yarıçap (R) ve baş kısmı dikkate alınmadan silindirik bölümün uzunluğu (L) olmak üzere dört farklı değişken vardır.



Problemin matematiksel tanımı aşağıdaki gibidir [10]:

Minimize

$$f(x) = 0.6224x_1x_3x_4 + 1.7781x_2x_3^2 + 3.1661x_1^2x_4 + 19.84x_1^2x_3 \quad (37)$$

Kısıtlayıcılar

$$g(x) = 0.0193x_3 - x_1 \leq 0 \quad (38)$$



$$g_2(x) = 0.00954x_3 - x_2 \leq 0 \quad (39)$$

$$g_3(x) = 1296000 - \pi x_3^2 x_4 - \frac{4}{3} \pi x_3^3 \leq 0 \quad (40)$$

$$g_4(x) = x_4 - 240 \leq 0 \quad (41)$$

Değişken aralıkları:

$$0 \leq x_1 \leq 99 \quad (42)$$

$$0 \leq x_2 \leq 99 \quad (43)$$

$$10 \leq x_3 \leq 200 \quad (44)$$

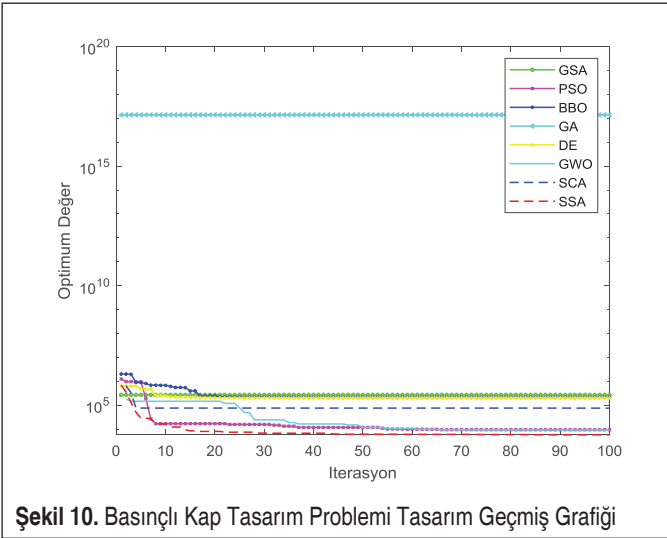
$$10 \leq x_4 \leq 200 \quad (45)$$

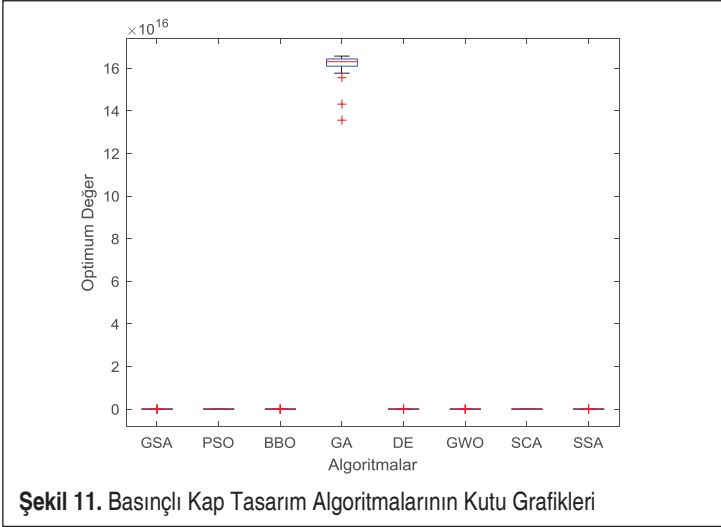
Tablo 5. Basıncılı Kap Tasarım Simülasyon Sonuçları

	GSA	PSO	BBO	GA	DE	SSA	SCA	GWO
1	53497.384	9441.233	204360.515	1.64E+17	204323.556	6.04E+03	6.16E+03	7.06E+03
2	7610.210	9441.233	205250.09	1.64E+17	204323.705	5.80E+03	1.98E+04	5.74E+03
3	33622.301	9441.233	204329.563	1.58E+17	204324.896	7.12E+03	1.98E+04	5.74E+03
4	7283.770	9441.233	204433.652	1.58E+17	204322.985	6.16E+03	1.97E+04	5.74E+03
5	7137.312	9441.233	205919.341	1.59E+17	204325.743	6.31E+03	7.58E+04	5.74E+03
6	7752.253	9441.233	204731.114	1.65E+17	204322.746	5.91E+03	1.96E+04	5.74E+03
7	26586.222	9441.233	209563.405	1.64E+17	204323.659	6.27E+03	1.95E+04	5.74E+03
8	120698.340	9441.233	207658.741	1.64E+17	204323.638	9.01E+03	2.04E+04	5.74E+03
9	7138.314	9441.233	208571.117	1.64E+17	204323.460	5.99E+03	7.56E+04	5.74E+03
10	6357.448	9441.233	204327.241	1.61E+17	204324.364	6.17E+03	7.54E+04	5.74E+03
11	6678.758	9441.233	211009.149	1.56E+17	204327.000	5.91E+03	7.54E+04	5.74E+03
12	6179.866	9441.233	205675.177	1.63E+17	204323.534	5.83E+03	2.00E+04	6.35E+03
13	7167.224	9441.233	204325.691	1.62E+17	204323.016	5.79E+03	7.54E+04	5.87E+03
14	138240.834	9441.233	205212.769	1.62E+17	204324.339	5.90E+03	1.97E+04	5.74E+03
15	76245.247	9441.233	204816.5	1.64E+17	204323.943	5.78E+03	1.99E+04	5.74E+03
16	6882.867	9441.233	206492.487	1.61E+17	204322.406	5.77E+03	2.02E+04	5.74E+03
17	26372.768	9441.233	207919.819	1.36E+17	204323.235	5.82E+03	7.54E+04	5.74E+03
18	11770.012	9441.233	204916.579	1.61E+17	204325.312	5.78E+03	7.54E+04	5.74E+03
19	7189.355	9441.233	204343.445	1.65E+17	204326.432	7.39E+03	6.24E+03	5.74E+03
20	6288.499	9441.233	204451.691	1.65E+17	204322.672	5.80E+03	7.54E+04	5.74E+03

21	7887.630	9441.233	204501.524	1.63E+17	204323.112	6.14E+03	7.54E+04	5.74E+03
22	151221.506	9441.233	204813.97	1.43E+17	204323.487	6.28E+03	1.99E+04	5.74E+03
23	6737.775	9441.233	218042.281	1.58E+17	204323.900	6.12E+03	7.54E+04	5.74E+03
24	6144.007	9441.233	204497.364	1.64E+17	204324.694	5.79E+03	1.98E+04	5.74E+03
25	6911.481	9441.233	204691.877	1.63E+17	204323.603	5.90E+03	7.54E+04	5.74E+03
26	7004.493	9441.233	204600.764	1.62E+17	204322.306	5.74E+03	1.98E+04	5.74E+03
27	8325.455	9441.233	205362.301	1.63E+17	204322.953	5.75E+03	7.54E+04	6.91E+03
28	8035.951	9441.233	206018.379	1.65E+17	204322.204	6.18E+03	1.96E+04	1.94E+04
29	7470.613	9441.233	204970.919	1.62E+17	204324.326	5.86E+03	6.88E+03	5.74E+03
30	7833.913	9441.233	204328.454	1.66E+17	204329.400	5.78E+03	1.98E+04	6.91E+03
en iyi	6144.007	9441.233	204325.69	1.356E+17	204322.2	5737.874	6157.699	5735.545
en kötü	151221.506	9441.233	218042.28	1.657E+17	204329.4	9008.867	75755.978	19440.810
ort.	26275.727	9441.233	206004.53	1.609E+17	204324.02	6136.329	40740.592	6341.371

Problem 8 farklı optimizasyon algoritması ile simüle edilmiş, karşılaştırma sonuçları Tablo 5’te verilmiştir. Buna göre en iyi (en düşük) sonucu bulan algoritmalar sırası ile GWO, SSA, GSA, SCA ve PSO olmuştur. En kötü (en yüksek) sonuç açısından bakıldığında SSA en iyi performansı göstermiş, PSO, GWO ve SCA onu takip etmiştir. Ortalama sonuç açısından ise SSA, GWO ve PSO sırasıyla en düşük değeri bularak en başarılı algoritmalar olmuştur. Bu problem için en iyi, en kötü ve ortalama değerlerin her üçü açısından da en kötü performansa sahip algoritma GA olurken BBO ve DE kötü performans açısından GA’yı takip eden diğer başarısız algoritmalar olmuştur.





Şekil 10'dan GA dışındaki algoritmaların yakınsama eğrilerinin başarılı olduğu söylenebilir. Şekil 11'deki kutu grafiklerinden ise GA dışındaki algoritmaların kendi içinde tutarlı olduğu sonucuna varılabilir.

Bunlara ek olarak basıncılı kap tasarım probleminin optimum maliyeti (2775.342) veren değişkenleri için algoritmaların bulunduğu optimum değerler Tablo 6'da sunulmuştur. Buna göre en başarılı performansa sahip olan SSA algoritmasının bulunduğu T_s , T_h , R ve L değişken değerleri sırası ile 1.09, 0.06, 65.23 ve 10 olmuştur.

Tablo 6. Basıncılı Kap Tasarımı Karşılaştırma Sonuçları

	GSA	PSO	BBO	GA	DE	SSA	SCA	GWO
$x_1(T_s)$	0.93	1.03	10.00	74.02	10.00	0.74	0.79	0.74
$x_2(T_h)$	0.45	1.03	10.00	89.88	10.00	0.37	0.43	0.37
$x_3(R)$	49.66	56.13	53.53	28.71	53.66	40.40	41.22	40.32
$x_4(L)$	101.10	56.13	72.56	12.53	71.69	198.93	193.40	200.00
$f(x)$	6144.01	9441.23	204325.69	1.356E+17	204322.20	5737.87	6157.70	5735.54

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada üç kısıtlı gerçek mühendislik probleminin (kaynaklı kiriş, germe/sıkıştırma yay ve basıncılı kap) optimal tasarımları hedeflenmiştir. Bu amaçla GSA, PSO, BBO, GA, DE, SSA, SCA ve GWO olmak üzere sekiz farklı optimizasyon algoritması ele alınan mühendislik problemlerine uyarlanmıştır. Kaynaklı kiriş tasarım probleminin

de en düşük maliyeti (1.70) veren h , l , t ve b değerleri için bulunan optimum değerler sırası ile, 0.21, 3.29, 9.04, 0.21 olmuştur. Germe-sıkıştırma yay tasarım probleminin optimum ağırlığı (0.01269) veren d , D , N değişken değerleri sırası ile 0.05, 0.33 ve 13.14 olmuştur. Basıncılı kap tasarım probleminde optimum maliyeti (5735.54) veren optimum T_s , T_h , R ve L değişken değerleri ise sırası ile 0.74, 0.37, 40.32 ve 200 olmuştur. GWO kaynaklı kiriş ve basıncılı kap tasarımı problemlerinde de en iyi sonucu veren algoritma olurken germe- sıkıştırma yay tasarım probleminde en iyi değeri bulan PSO algoritmasına çok yakın değer bularak ikinci en iyi sonucu bulan algoritma olmuştur. Bununla birlikte aynı problemde ortalama ve en kötü (en yüksek) sonuçlar açısından en başarılı sonucu bulmuştur. GA, BBO ve DE algoritmaları her üç problemde de en iyi, en kötü ve ortalama değerlerin hepsinde en yüksek sonuçları bularak en başarısız algoritmalar olmuştur. Problemlerin bulunan optimum sonuçları Tablo 7'de literatür sonuçları ile kıyaslanmıştır. Buna göre her üç mühendislik probleminde de diğer çalışmalara kıyasla daha iyi sonuç elde edildiği görülmektedir. Çeşitli kısıtlayıcılara sahip üç gerçek mühendislik probleminin optimum tasarımından elde edilen sonuçlara bağlı olarak algoritmalar başarılarına göre gruplandırılacak olursa, evrimsel tabanlı algoritmaların (GA, BBO, DE) en kötü sonuçları verdiği, sürü tabanlı (GWO, PSO), matematik tabanlı (SSA, SCA) ve fizik tabanlı algoritmaların ise (GSA) ise en başarılı sonuçları bularak en iyi performans sergileyen algoritmalar olduğu savunulabilir. Bununla birlikte problem çeşidine göre bu gruplamanın değişebileceği de göz ardı edilmemelidir. Gelecek çalışmalar için optimizasyon algoritmalarının performansının algoritma parametrelerine bağlı oluşu göz önünde bulundurularak problem sayısı ve algoritma sayısı arttırılabilir ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılabilir.

Tablo 7. Tasarım Problemleri Optimum Sonuç Kıyaslanması

		Optimum Sonuç
Kaynaklı Kiriş Tasarımı	GWO	1.701
	Lee ve Geem [37]however, reveal a limited approach to complicated real-world optimization problems. If there is more than one local optimum in the problem, the result may depend on the selection of an initial point, and the obtained optimal solution may not necessarily be the global optimum. This paper describes a new harmony search (HS	2.3807
	Deb [38]	2.38
Germe- Sıkıştırma Yay Tasarım	PSO	0.01266
	He ve Wang [39]	0.01268
	Mahdavi [40]	0.01267
Basıncılı Kap Tasarımı	GWO	5735.545
	He ve Wang [39]	6061.0777
	Montes ve Coello [41]	6059.7456



KAYNAKÇA

1. **Wolpert, D.H., W.G. Macready**, 1997. “No free lunch theorems for optimization,” IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 1, no. 1, p.67–82.
2. **Dogan, E., A.O. Ciftcioglu, F. Erdal**, 2017. Optimum design of cellular beams via bat algorithm with levy flights, In OPTIMA-2017 Conf., .
3. **Erdal, F., E. Dogan, M.P. Saka**, 2011. “Optimum design of cellular beams using harmony search and particle swarm optimizers,” Journal of Constructional Steel Research, vol. 67, no. 2, p.237–247.
4. **Khalilpourazari, S., H. Hashemi Doulabi, A. Özyüksel Çiftçiöglu, G.W. Weber**, 2021. “Gradient-based grey wolf optimizer with Gaussian walk: Application in modelling and prediction of the COVID-19 pandemic,” Expert Systems with Applications, vol. 177, .
5. **Khalilpourazari, S., B. Naderi, S. Khalilpourazary**, 2020. “Multi-Objective Stochastic Fractal Search: a powerful algorithm for solving complex multi-objective optimization problems,” Soft Computing, vol. 24, no. 4, p.3037–3066.
6. **Khalilpourazari, S., S. Khalilpourazary**, 2019. “An efficient hybrid algorithm based on Water Cycle and Moth-Flame Optimization algorithms for solving numerical and constrained engineering optimization problems,” Soft Computing, vol. 23, no. 5, p.1699–1722.
7. **Khalilpourazari, S., S. Khalilpourazary**, 2018. “SCWOA: an efficient hybrid algorithm for parameter optimization of multi-pass milling process,” Journal of Industrial and Production Engineering, vol. 35, no. 3, p.135–147.
8. **Khalilpourazari, S., S. Khalilpourazary**, 2016. “Optimization of production time in the multi-pass milling process via a Robust Grey Wolf Optimizer,” Neural Computing and Applications, vol. 29, no. 12, p.1321–1336.
9. **Rather, S.A., N. Sharma**, 2018. “Gsa-Bbo Hybridization Algorithm,” no. December,.
10. **Mirjalili, S., S.M. Mirjalili, A. Lewis**, 2014. “Grey Wolf Optimizer,” Advances in Engineering Software, vol. 69, p.46–61.
11. **Dogan, E.** 2010. Optimum design of rigid and semi-rigid steel sway frames including soil-structure interaction. PhD Thesis, Middle East Technical University, Ankara.
12. **Kennedy, J., R. Eberhart**, 1995. Particle Swarm Optimization, In IEEE Int. Conf. Neural Networks, IEEE Press, pp: 1942–1948.
13. **Mirjalili, S., A.H. Gandomi, S.Z. Mirjalili, S. Saremi, H. Faris, S.M. Mirjalili**, 2017. “Salp Swarm Algorithm: A bio-inspired optimizer for engineering design problems,” Advances in Engineering Software, vol. 114, p.163–191.
14. **Dorigo, M., M. Birattari, T. Stützle**, 2006. “Ant colony optimization: artificial ants as a computational intelligence technique,” IEEE Computational Intelligence Magazine, vol. 1, p.28–39.
15. **Mirjalili, S.** 2015. “Moth-flame optimization algorithm: A novel nature-inspired heuristic paradigm,” Knowledge-Based Systems, vol. 89, p.228–249.

16. **Yang, X.S.** 2010. A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm, In Nat. Inspired Coop. Strateg. Optim., Springer, pp: 65–74.
17. **Rashedi, E., H. Nezamabadi-pour, S. Saryazdi,** 2009. “GSA: A Gravitational Search Algorithm,” Information Sciences, vol. 179, no. 13, p.2232–2248.
18. **Erol, O.K., I. Eksin,** 2006. “A new optimization method: Big Bang–Big Crunch,” Advances in Engineering Software, vol. 37, no. 2, p.106–111.
19. **Mirjalili, S.** 2016. “SCA: A Sine Cosine Algorithm for solving optimization problems,” Knowledge-Based Systems, vol. 96, p.120–133.
20. **Salimi, H.** 2015. “Stochastic Fractal Search: A powerful metaheuristic algorithm,” Knowledge-Based Systems, vol. 75, p.1–18.
21. **Bonabeau, E., M. Dorigo, G. Theraulaz,** 1999. Swarm intelligence: from natural to artificial systems: OUP.
22. **Storn, R., K. Price,** 1997. “Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces,” Journal of Global Optimization, vol. 11, no. 4, p.341–359.
23. **Ma, H., D. Simon,** 2010. Biogeography-Based Optimization with Blended Migration for Constrained Optimization Problems, In Proc. 12th Annu. Conf. Genet. Evol. Comput., Association for Computing Machinery, pp: 417–418.
24. **Güler, T., M. Kılıç,** 2019. “Klimatik Kontrollü Treyler İçerisindeki Hava Akışının Optimizasyonu Optimization of Air Flow in Refrigerated Semi-Trailer,” vol. 60, no. 697, p.289–302.
25. **Tekelioğlu, S., S. Eldek, H. Gümüş, A. Sarıgöl, Ş. Ayhan,** 2020. “Hidrolik Yüksek Basınç Hattı Filtre Gövdesinin Tasarımı , Optimizasyonu , Üretimi ve Test Edilmesi Design , Optimization and Fabrication of Body of Hydraulic High- Pressure Filter and Experimental Validation,” p.0–2.
26. **Alinaghian, M., E.B. Tirkolaee, Z.K. Dezaki, S.R. Hejazi, W. Ding,** 2021. “An augmented Tabu search algorithm for the green inventory-routing problem with time windows,” Swarm and Evolutionary Computation, vol. 60, no. November 2020, p.100802.
27. **Tirkolaee, E.B., A. Mardani, Z. Dashtian, M. Soltani, G.W. Weber,** 2020. “A novel hybrid method using fuzzy decision making and multi-objective programming for sustainable-reliable supplier selection in two-echelon supply chain design,” Journal of Cleaner Production, vol. 250, p.119517.
28. **Meneghini, I.R., M.A. Alves, A. Gaspar-Cunha, F.G. Guimarães,** 2020. “Scalable and customizable benchmark problems for many-objective optimization,” Applied Soft Computing Journal, vol. 90, p.106139.
29. **Varelas, K., O.A. El Hara, D. Brockhoff, N. Hansen, D.M. Nguyen, T. Tušar, A. Auger,** 2020. “Benchmarking large-scale continuous optimizers: The bbob-largescale testbed, a COCO software guide and beyond,” Applied Soft Computing Journal, vol. 97, p.106737.
30. **Shabani, A., B. Asgarian, M. Salido, S. Asil Gharebaghi,** 2020. “Search and rescue



optimization algorithm: A new optimization method for solving constrained engineering optimization problems,” *Expert Systems with Applications*, vol. 161, p.113698.

31. **Muthusamy, H., S. Ravindran, S. Yaacob, K. Polat**, 2021. “An improved elephant herding optimization using sine–cosine mechanism and opposition based learning for global optimization problems,” *Expert Systems with Applications*, vol. 172, no. October 2020, p.114607.
32. **Gucuyen, E., R.T. Erdem**, 2014. “Corrosion effects on structural behaviour of jacket type offshore structures,” *Gradjevinar*, vol. 66, no. 11, p.981–986.
33. **Dagli, B.Y., Y. Tuskan, D. Uncu**, 2019. “Investigation of fluid-structure interaction by using solidity ratio,” *Eurasian Journal of Civil Engineering and Architecture*, vol. 3, no. 2, p.41–47.
34. **Rather, S.A., P.S. Bala**, 2020. “Hybridization of Constriction Coefficient Based Particle Swarm Optimization and Gravitational Search Algorithm for Function Optimization,” *SSRN Electronic Journal*, p.1–10.
35. **Kanwal, S., A. Hussain, K. Huang**, 2021. “Novel Artificial Immune Networks-based optimization of shallow machine learning (ML) classifiers,” *Expert Systems with Applications*, vol. 165, no. September 2019, p.113834.
36. **Jin, X.-B., G.-S. Xie, K. Huang, A. Hussain**, 2018. “Accelerating Infinite Ensemble of Clustering by Pivot Features,” *Cogn. Comput.*, vol. 10, no. 6, p.1042–1050.
37. **Lee, K.S., Z.W. Geem**, 2005. “A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: harmony search theory and practice,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 194, no. 36–38, p.3902–3933.
38. **Deb, K.** 2000. “An Efficient Constraint Handling Method for Genetic Algorithms,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 186, p.311–338.
39. **He, Q., L. Wang**, 2007. “An effective co-evolutionary particle swarm optimization for constrained engineering design problems,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 20, no. 1, p.89–99.
40. **Mahdavi, M., M. Fesanghary, E. Damangir**, 2007. “An improved harmony search algorithm for solving optimization problems,” *Applied Mathematics and Computation*, vol. 188, no. 2, p.1567–1579.
41. **Mezura-Montes, E., C.A.C. Coello**, 2008. “An empirical study about the usefulness of evolution strategies to solve constrained optimization problems,” *International Journal of General Systems*, vol. 37, no. 4, p.443–473.



Yangın Söndürme İçin Alternatif Bir Tasarım: Akıllı Yangın Söndürme Bombası

Murat Toptaş^{1*}, Mehmet Yılmaz²

ÖZ

Yangınlar başta ormanlar olmak üzere, gaz ve petrol nakil hatları, kimyasal madde ve mühimmat depolama alanları gibi birçok noktada ortaya çıkabilmektedir. Bu durumlarla mücadelede günümüzde kullanılmakta olan karadan ve havadan yangınlarla mücadele yöntemleri çoğu durumda etkisiz kalmaktadır. Bu çalışmada havadan yangınlarla mücadele operasyonlarında kullanılacak bir ürünün tasarımı önerilmiştir. Akıllı Yangın Söndürme Bombası olarak adlandırılan bu tasarım yeni ve etkili bir üründür. Bu ürün NATO üyesi ülkelerin envanterlerinde bulunan bir harp mühimmatı türü olan MK-82 (havadan yere genel maksat bombası) tip mühimmatın tasarımına benzer bir tasarıma sahiptir. Havacılık ve yangın söndürme endüstrisine kazandırılması amaçlanan akıllı yangın söndürme bombasının mesken alanları dışındaki açık saha yangınlarında etkin bir şekilde kullanılması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yangın söndürme, yangın söndürme bombası, akıllı yangın söndürme mühimmatı, havadan yangınlarla mücadele

An Alternative Design for Fire Extinguishing: Smart Fire Extinguishing Bomb

ABSTRACT

Fires can occur at many points such as gas and oil transmission lines, chemical substance and ammunition storage areas, especially in forests. The land and aerial firefighting methods, which are used today in combating these situations, are ineffective in most cases. In this study, the design of a product that can be used in aerial firefighting operations is proposed. This design, called Smart Fire Extinguisher, is a new and effective product. This product has a design similar to the MK-82 (air-to-ground general purpose grenade) type ammunition, a war ammunition type found in the inventory of NATO member countries. It is expected that the smart firefighting bomb, which is intended to be brought to the aviation and firefighting industry, will be used effectively in open field fires outside of residential areas.

Keywords: Fire extinguishing, fire extinguishing bomb, smart fire extinguishing ammunition, aerial fire fighting

* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 22.04.2021

Kabul/Accepted : 31.08.2021

¹ İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Battalgazi, Malatya
murat.toptas@inonu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9368-5675

² İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Battalgazi, Malatya,
m.yilmaz@inonu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-5025-1842



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Aerial firefighting methods are complementary to land firefighting methods. In this method, extinguishing agents such as water, foam and soil are left on fires from an air vehicle. However, the the right amount of extinguishing material does not reach its target because of the air resistance and airflows caused by the heated air, it flows caused by the heated air. This study aims to solve this problem and bring a new product to the firefighting industry. The designed and developed product was named as smart fire extinguishing bomb.

Objectives

The idea of a fire extinguishing bomb emerged as a result of the necessity of a product that would strengthen the methods of air firefighting and significantly increase the effectiveness of this method. It has been decided that the requirements and design criteria of the product are as follows: (a) The product to be designed should eliminate some design and capacity deficiencies of similar products that have emerged in this field before it and serve the same purpose and should be able to meet the needs in a significant amount. (b) The product will be used in fires that occur at points such as forest, oil and gas transmission lines, ammunition and chemical storage areas that occur in open areas other than residential areas. (c) In the design of the product, the products previously known in the firefighting sector and used in aviation should be taken as a reference, that is, the product should have certain standards accepted in the aviation and firefighting industry. (d) The product should contain an extinguishing agent in its body and, if possible, the extinguishing agent should also have a cooling feature. In addition, this substance should not have any toxicity that may harm living health and the environment. (e) The product should be able to work with new types of extinguishing chemicals that may arise in the future in the fire extinguishing sector. (f) The product must have an aerodynamic structure that can be thrown from aircraft and must be able to move to its target quickly and unguided (by the free fall method). (g) The design of the product should not necessitate any significant modification to the aircraft for its installation on or in aircraft. (h) The product must have a construction with strength values that can safely transfer the extinguishing material contained in it up to the fire point in all weather conditions. (i) It should include the design of a simple mechanism that will distribute the extinguishing material to the environment in a fast and accurate amount. (j) It should be used separately for forest fires both at an appropriate point on the flames and for fires continuing on the ground. (k) In order not to cause any possible accidents, the product should have some automatic control mechanisms both during its presence in the aircraft and after it is released while moving towards the point of duty. (l) Upon leaving the aircraft, the product should be able to fulfill its mission autonomously for the entire time until it fulfills its mission. (m) The cost of the product must be competitive compared to other quenching methods. (n) The product must be environmentally friendly.

Methods

The product was named as smart fire extinguishing bomb, taking into account a number of electronic equipment and software that makes the product autonomous. The smart fire extinguishing bomb consists of the following parts: (a) bomb body, (b) wings, (c) nose cone, (d) extinguishing agent, (e) explosive substance, (f) fuze, (g) electronic equipment, and (h) software. In order to realize the design goals and requirements, the product was designed with the dimensions of MK-82 air-to-ground general-purpose NATO ammunition. To design and create the three dimensional product, a computer-aided design software (Catia V.5) was used. Structural, flow and explosion analyses of the product were performed with ANSYS software. The software of the product was written in the C programming language.

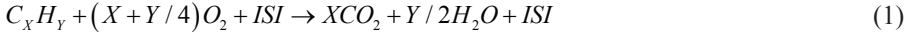
Results and Discussion

Smart fire extinguishing bomb is a new product for both the firefighting industry and the aviation industry. If the product goes into mass production, a combat tool that will make significant contributions in fighting fires will be obtained. Extinguisher-coolant can be left on the fire in the right amount, so that while the fires are extinguished, there will be no damage to the environment due to the use of excessive chemicals. In addition, considering both the efficiency of the product and the speed factors of the aircraft, fires can be controlled without spreading over large areas as before.

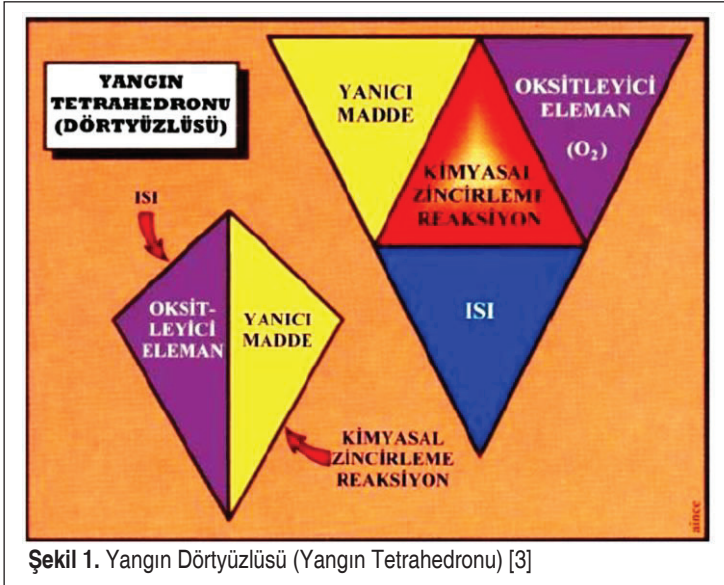
1. GİRİŞ

Yanma, yanıcı maddelerin ateşle tutuşturulmasından sonra oksijenle beslenerek hızlı bir şekilde reaksiyona girmesi ile yanıcı madde içinde depolanmış bulunan enerjinin, ısı enerjisi biçiminde açığa çıktığı kimyasal bir işlemdir. Bu işlem sırasında çıkan enerji, genellikle sıcak gazlar şeklinde olmasına rağmen, çok küçük miktarlarda elektromanyetik (ışık), elektrik (serbest iyonlar ve elektronlar) ve mekanik (ses) enerjiler şeklinde de ortaya çıkmaktadır [1]. Yüksek sıcaklığa sebep olan yangın ise katı, sıvı ve/veya gaz halindeki maddelerin kontrol dışı yanması olayıdır [2]. Yangın, hukuki olarak “Tehlike doğuran, söndürülemediği sürece mala, cana ve sağlığa zarar meydana getiren kontrol dışı yanma olayıdır” şeklinde tanımlanmaktadır [3].

Yangın, ekzotermik kimyasal yanma sürecinde bir malzemenin hızlı oksitlenmesidir, ışık, ısı ve farklı reaksiyon ürünleri açığa çıkarır [3]:



Reaksiyon tutuşma sıcaklığına kadar endotermik safhadadır, bu noktadan sonra ekzotermiktir. Isı kaynağı çekilse bile reaksiyon kendini besler [3]. Alev, yangının gözlenebilir kısmıdır. Yangının meydana gelebilmesi için dört unsurun bir arada olması gerekmektedir. Bu unsurlar yanıcı madde, oksitleyici eleman, ısı ve kimyasal zincir reaksiyonudur. Unsurlardan herhangi birisinin bulunmaması veya yeterli miktarda olmaması halinde yanma olayı meydana gelmez. Buna yangın dörtyüzlüsü (yangın tetrahedronu) adı verilmektedir (Şekil 1). Yerinde ve doğru oranlarda tüm bu unsurlardan yoksun bırakılırsa yangın var olamaz.



Şekil 1. Yangın Dörtyüzlüsü (Yangın Tetrahedronu) [3]

**Tablo 1.** Yangının Türleri [3, 4]

Yangın Sınıfı	Tipi
A Sınıfı	Normal olarak kor şeklinde yanan genellikle organik yapıdaki katı madde yangınlarını kapsar (Ahşap, Kâğıt, Plastik).
B Sınıfı	Sıvı veya sıvılaşabilen katı madde yangınlarını kapsar (benzin, tiner, yağ).
C Sınıfı	Gaz yangınlarını kapsar (metan, propan, bütan, LPG, asetilen, havagazı, doğalgaz vb.).
D Sınıfı	Metal yangınlarını kapsar (lityum, magnezyum, titanyum vb.).
E Sınıfı	Enerji verilmiş elektrik kabloları veya ekipmanı yangınlarını (akım taşıyan kablo, elektrik motoru, bilgisayarlar ve elektronik cihazlar) kapsar.
F Sınıfı	Bitkisel ve hayvansal pişirme yağlarının yangınlarını kapsar (yemeklik yağ, gres).

Yangının türü yanmakta olan maddeye göre değişir. A, B, C, D, E ve F sınıfı yangınlar olmak üzere altı sınıf yangın bulunmaktadır (Tablo 1).

Yangınlar başta ormanlar olmak üzere, gaz ve petrol nakil hatları, kimyasal madde ve mühimmat depolama alanları gibi birçok noktada ortaya çıkabilmekte ve çoğu durumda geride ciddi hasarlar bırakmaktadır. Bu durumlarla mücadelede günümüzde kullanılmakta olan karadan ve havadan yangınlarla mücadele yöntemleri çoğu durumda etkisiz kalmaktadır. Bu çalışmada havadan yangınlarla mücadele amacıyla kullanılabilir yeni bir ürünün tasarım önerilmiştir. Akıllı Yangın Söndürme Bombası (AYSB) olarak adlandırılan bu tasarım yangınlarla havadan mücadele yöntemlerinde kullanılabilir yeni ve etkili bir üründür. Bu ürün NATO üyesi ülkelerin envanterinde bulunan bir harp mühimmatı olan MK-82 (havadan yere genel maksat bombası) tip mühimmatın tasarımına benzer tasarıma sahiptir. Tasarım ölçülerinin var olan bir harp mühimmatına benzemesi onu hava araçları üzerinde herhangi bir iyileştirme veya değiştirme yapmadan doğrudan hava aracına yükleme imkânı vermektedir. Havacılık ve yangın söndürme endüstrisine kazandırılması amaçlanan akıllı yangın söndürme bombasının mesken alanları dışındaki petrokimya tesisleri, petrol ve gaz iletim hatları ve mühimmat depoları gibi açık saha yangınlarında etkin bir şekilde kullanılması beklenmektedir.

2. YANGINLARLA MÜCADELE YÖNTEMLERİ

Günümüzde yangınlarla mücadelede karadan ve havadan müdahale yöntemleri kullanılmaktadır. Bu iki yöntem birbirlerinin alternatifi olmayıp her biri diğerinin etkinliğini artıran, eksikliklerini tamamlayan ve yangınların zamanında söndürülebilmesi için ortaya çıkmış müdahale yöntemleridir. Karadan müdahale yöntemlerinde iş makineleri olan kamyon, pikap, arazöz benzeri motorlu araçların gücünden yararlanılmaktadır [3]. Karadan müdahale yöntemi coğrafi koşullara bağlı olarak yürütülmektedir.

Bu nedenle yangının meydana geldiği ve ulaşılması zor yerlerde bu yöntem yetersiz kalmaktadır.

Havadan müdahale yöntemi ise coğrafi koşullardan bağımsız olarak yangınlara müdahale imkânı sağlamaktadır. Bu müdahale yönteminde kara personelinin nakli yanında söndürücü madde ile yangının bombardımanı da gerçekleştirilebilmektedir. Yukarıdan yapılan bombardımanda hava araçlarından yangın üzerine su, köpük, jel veya yanmayı geciktirici bazı maddeler atılır [5]. Bu söndürücüler genel olarak yangın noktasının 60 m kadar üzerinden bırakılırlar [6]. 60 metreden daha yüksekten bırakılan söndürücü maddeler hava direnci ve yangın üzerinde meydana gelen hava akımları nedeni ile hedefine ulaşamamaktadır. Daha alçaktan yapılacak uçuşlarda ise hava araçlarının yükselen alevlerden etkilenmeleri söz konusudur. Ayrıca alçak uçuşlar sırasında bırakılan söndürücü maddelerin uyguladığı çarpma kuvveti ile bazı ölümlü kazaların yaşandığı da kimi ülkelerin yangın söndürme teşkilatları tarafından rapor edilmiştir. Havadan yangınlara müdahale yöntemlerini güçlendirmek ve bu yöntemin etkinliğini artırmak için bir takım araçlar geliştirilmekte veya mevcut araçlar yangın söndürme faaliyetlerinde kullanılmak üzere modifiye edilmektedir.

2.1 Yangınlarla Havadan Müdahalede Kullanılan Hava Araçları

2.1.1 Yangın Söndürme Uçakları

Uçaklar ilk olarak 1950'li yıllarda Kanada ve ABD'de yangınlarla mücadelede kullanılmaya başlanmış olup bugün tüm dünyada söndürme faaliyetlerinde etkin olarak kullanılmaktadır (Şekil 2). Uçağın hız avantajı, arazi koşullarından bağımsız olması ve tüm yangın alanını yukarıdan gözlemleyebilme yeteneği, bu yangınla mücadele yönteminin kısa sürede başarılı olmasını sağlamıştır.



Şekil 2. Yangın Söndürme Faaliyetinde Kullanılmakta Olan Uçaklar

2.1.2 Yangın Söndürme Helikopterleri

Helikopterler yangın söndürme faaliyetinde kullanılan bir diğer hava aracıdır. Söndürücü madde taşıma şekillerine göre mücadelede kullanılan helikopterler iki çeşittir (Şekil 3). İlkinde helikopter içerisinde söndürücü maddenin taşındığı bir tank mevcuttur ve genellikle buna helitank adı verilir. Söndürücü madde bu tanka helikopter yerde iken pompalanır veya son yıllarda geliştirilen bir teknik olan pompanın helikopter



üzerinde olduğu ve bir su kaynağı üzerine yaklaşan helikopterin bir hortum vasıtası ile suyu kaynağından vakumlayarak helitankına doldurduğu yöntemdir. Diğer türü ise helikopter içerisinde bir tank yerine helikoptere bağlı ve kova adı verilen büyükçe bir haznenin olduğu durumdur. Helikopter bir su kaynağı üzerinde alçak uçuş yaparak kovayı suya daldırır ve tekrar yükselerek bu suyu yangın bölgesine intikal ettirir.



Şekil 3. Los Angeles İtfaiyesine Ait Sikorsky S-70C Tip Tanklı Bir Helikopter ve Kovalı Helikopterler

Ülkemizde orman yangınlarıyla mücadelede helikopter kullanımı ilk defa 1986 yılında kiralama yöntemi ile olmuştur. 1987 yılında ise 6 adet helikopter satın alınarak 14 pilot ile 7 makinist sözleşmeli olarak istihdam edilmiştir [7].

2.1.3 Yangın Söndürme Dronları

Dron teknolojisinin ortaya çıkması ve gelişimi ile birlikte dronlar trafik, sağlık, askeri ve çeşitli mühendislik alanlarında birçok projede kullanılmaya başlanmıştır. Dronların büyük bir etkiye sahip olabileceği uygulama alanlarından birisinin de yangınla mücadele olduğu vurgulanmış ve dronların yangın söndürme faaliyetlerinde kullanımını etkileyen farklı yönler incelenmiştir. Acil durum yönetim döngüsünün farklı aşamalarında dronların potansiyel kullanımının bir analizi yapılmıştır [8]. Champagnie ve Simonis [9] yangın söndürme topunu tutmak için dört pervaneye bağlı bir kafes ve bir ray içeren yenilikçi bir tasarım ortaya koymuştur. 2020 yılında Çin’de özel sektöre ait bir firma (Ehang) tarafından büyük boyutlarda ve tamamen otonom olarak çalışabilen bir yangın söndürme dronunun (EHang 216F) imalatı gerçekleştirilerek bölgenin itfaiye teşkilatına teslim edilmiştir (Şekil 4). Bu drone 130 km/h hıza ulaşabilmekte ve tam yükte 21 dakika havada kalabilmektedir. Yangın istasyonu çevresinde



Şekil 4. Ehang 216F (Çin Menşeli) Yangın Söndürme Dronu [10]

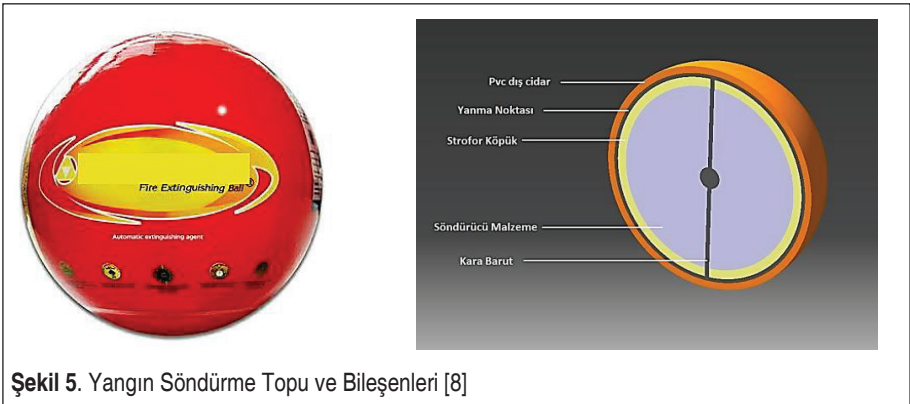
bulunan 5 km çaplı alan içerisinde ortaya çıkması muhtemel tüm yangınlara havadan hızlıca erişerek söndürme görevini yerine getirebilmektedir.

2.2 Havadan Müdahalede Kullanılan Diğer Araçlar

2.2.1 Yangın Söndürme Bombaları (Topları)

İçerisinde söndürücü sıvılar içeren yangın söndürme küreleri 19. yüzyılda Avrupa’da kullanılmıştır. O dönemde üretilen küreler camdan imal edilmişlerdir. Yangın üzerine fırlatılan cam küre kırılır ve söndürücü sıvı yangını sönmeye zorlardı. Daha sonra Alman mühendis Malay Modak [11], geniş doğal alanlara yayılan yangınları kontrol etmek amacıyla sıkıştırılmış karbondioksit ve nitrojenle doldurulmuş ve cam yerine pleksiglastan üretilen kürelerin yanma alanlarına bırakıldığında yangın söndürücü gazlar salgılayarak etkili yangın söndürücüler olarak hizmet edebileceğini öne sürmüştür. Günümüzde ise yangın söndürme topları adı verilen PVC ile sarılmış strofor köpük bir çepere sahip, içerisinde söndürücü madde olarak mono amonyum fosfat ve söndürücü maddeyi dağıtmakla yükümlü bir miktar barut bulunan toplar mevcuttur (Şekil 5). Bu toplar içerisinde genellikle 1 kg kadar söndürücü madde olup topların toplam ağırlıkları 1.5 kg’ın altındadır.

Yangınlara havadan yapılan müdahale yangınların söndürülmesinde karadan yapılan müdahaleye destek olan oldukça önemli bir yöntem olmakla birlikte, söndürücü elemanların yeterli miktarda, doğru noktalara ve güvenli bir mesafeden bırakılması çözülmeyi bekleyen önemli bir sorundur. Bu problemin çözümü amacıyla farklı ülkelerde bir takım çalışmalar yürütülmüştür. Bunlardan biri 2004 yılında Rusya’da geliştirilen ve ASP-500 adı verilen üründür. Bu ürün söndürücü bir maddenin varil benzeri ve polietilenden imal edilmiş silindirik bir yapı içerisinde yangın üzerine bırakılmasını esas almaktadır [12]. Yangın bölgesinde yere çarpan yapı içerisinde bulunan dağıtıcı mekanizma söndürücü malzemenin etrafa saçılmasını sağlamaktadır. Ancak ürünün birçok dezavantajı bulunmaktadır Bunlardan en dikkat çekici olanı sistemin





çalışabilmesi için yere çarpma zorunluluğunun bulunmasıdır. Ağaç benzeri engellerin bulunduğu yangın alanlarında engellere çarpan söndürücü madde yeteri kadar uzağa ulaşamamakta ve etkisini yitirmektedir. Ayrıca özellikle orman yangınlarında alevlerin bir kısmı ağaçların tepe noktalarında bir ağaçtan diğerine atlamaktadır. Buna benzer tasarımsal birçok eksiklik, ürünü, yangın üzerine bırakılan basit söndürücü madde paketlerine dönüştürmüştür.

2.2.2 Yangın Söndürme Roketleri

Yangınlarla havadan mücadele amacıyla geliştirilen bir diğer ürün 2017 yılında Çin’de ortaya çıkmıştır. Ürün esasında itfaiye aracı veya drone üzerinde bulunan kaideye monteli çok namlulu bir roketatardan ateşlenir (Şekil 6). 3.6 kg ağırlığında söndürücü madde ihtiva eden roketler maksimum 300 m ötede bulunan ve en fazla 60 m³ hacme sahip kapalı hacimlerde ortaya çıkan yangınları söndürmek için tasarlanmışlardır [13]. Bu ürün katı yakıtlı bir roket motoruna sahip karadan karaya bir sevk roketi kullanmaktadır. Katı yakıtlı roket motorları ateşlendiklerinde tüm yakıt bitene kadar yanmayı sürdürürler. Yanmakta olan bir roketi yangın bölgesine ateşlemenin oldukça olumsuz neticeleri olabilir. Ayrıca 3.6 kg bir söndürücü maddeyi hedefine sevk etmek için bunun 10 katı kadar ağırlıkta ve ucuz olmayan roket yakıtı kullanılmaktadır. Roket üzerinde hedeflemede kullanılan bir takım lazer sensörler ve tüm mekanizma hesaplandığında 60 m³ bir hacimde meydana gelen bir yangının söndürülmesi için bu ürün oldukça maliyetli bir çözüm sunmaktadır.

Literatür taraması yangın söndürme roketlerine ilişkin birkaç patent alındığını göstermektedir [14-16]. Regan [14] tarafından 2007 yılında “yangın geciktirici akıllı bomba” ismi ile alınan patent, yangın alanındaki mevcut oksijeni absorbe eden kimyasal toprak taşıyan bir ürüne ilişkindir. Ürün bir uçak tarafından bir orman yangını üzerine bırakılır. Daha spesifik olarak buluş, çok sayıda alt mühimmat içeren bir dağıtıcı, füze veya roketten oluşan mühimmat ile ilgilidir. Her bir mühimmat, füyve üzerindeki altimetre aktüatörleri aracılığıyla hedef bölge üzerinde önceden belirlenmiş bir yükseklikte patlatmak üzere çalıştırılır ve her dağıtıcı, mühimmatın coğrafi konumuna göre mühimmat yükünü dağıtmak için tetiklenir. Dodla [15] tarafından 2014 yılında Kanada’da alınan patent “anti yangın füzesi” ismini taşımaktadır. Ürün, alevlerin yayılımını geciktirmek ve yangınları etkili bir şekilde söndürmek amacıyla geliştirilen bir yangınla mücadele cihazıdır. Katı yakıtlı roket motoru taşıyan füzeler hedeflerine bu motorun itkisi ile yaklaşırlar ve genellikle roketlerin taşıdıkları söndürücü kimyasal miktarı çok azdır. 2018 yılında Çin Halk cumhuriyeti BEIJING SHENGTAI FIRE FIGHTING EQUIPMENT CO LTD tarafından uzaktan yangın söndürme sistemi (remote fire extinguishing systems) başlığı ile bir faydalı model alınmıştır [16]. Faydalı model, roket taşıyıcı yükleyici de dâhil olmak üzere uzaktan yangın söndürme sistemlerini açıklar. Katı yakıtlı roket motoru bulunduran roketler çok sayıda yangın söndürme bombasını taşıyan çok namlulu bir roket atardır. Engebeli dağ ormanlarında meydana gelen yangınlar için geliştirilmiştir.



Şekil 6. İtfaiye Aracı Üzerinde Bulunan Kaideye Yüklenmiş Yangın Söndürme Roketleri [13]

3. ALTERNATİF BİR TASARIM: AKILLI YANGIN SÖNDÜRME BOMBASI

Yangın söndürme bombası fikri havadan yangınlara yapılan müdahale yöntemlerini güçlendirecek ve bu yöntemin etkinliğini önemli ölçüde arttıracak bir ürünün gerekliliği neticesinde ortaya çıkmıştır. Ürünün gereklilik ve tasarım kriterlerinin şu şekilde olmasına karar verilmiştir;

- Tasarımı yapılacak olan ürün kendinden önce bu alanda ortaya çıkmış olan ve aynı amaca hizmet etmekte olan benzer ürünlerin bir takım tasarım ve kapasite eksikliklerini gidermeli, ihtiyaca önemli miktarda cevap verebilmelidir.
- Ürün yerleşim alanları dışındaki açık alanlarda meydana gelen orman, petrol ve gaz nakil hatları, mühimmat ve kimyasal depolama alanları gibi noktalarda ortaya çıkan yangınlarda kullanılacaktır.
- Ürünün tasarımında yangın söndürme sektöründe daha önce bilinen ve havacılıkta kullanılan ürünler referans alınmalı yani ürün havacılık ve yangın söndürme sektöründe kabul görmüş belirli standartlara sahip olmalıdır.
- Ürün, kendi içerisinde söndürücü madde ihtiva etmeli mümkünse söndürücü maddenin aynı zamanda soğutucu özelliği de bulunmalıdır. Ayrıca bu maddenin canlı sağlığına ve çevreye zarar verebilecek herhangi bir toksisitesi de bulunmamalıdır.
- Ürün yangın söndürme sektöründe ileride ortaya çıkabilecek yeni tip söndürücü kimyasallarla da çalışabilmelidir.



- f) Ürün hava araçlarından atılabilir nitelikte bir aerodinamik yapıya sahip olmalı ve hedefine hızlı ve güdümsüz olarak (serbest düşme yöntemi ile) ilerleyebilmelidir.
- g) Ürünün tasarımı onun hava araçları üzerine veya içerisine montajı için hava araçları üzerinde ciddi anlamda bir değişiklik yapılmasına gerek bırakmamalıdır
- h) Ürün, içerisinde barındırdığı söndürücü malzemeyi her tür hava koşulunda yangın noktasına kadar güvenle transfer edebilecek mukavemet değerlerinde bir konstrüksiyona sahip olmalıdır.
- i) Söndürücü malzemeyi ortama hızlı ve doğru miktarda dağıtacak basit bir mekanizmanın tasarımını içermelidir.
- j) Orman yangınlarında hem alevlerin üzerinde uygun bir noktada ve hem de zeminde devam etmekte olan yangınlar için ayrı ayrı kullanılabilir.
- k) Olması muhtemel bir takım kazalara sebebiyet vermemek için ürün gerek hava aracında bulunduğu esnada ve gerekse bırakıldıktan sonra görev noktasına doğru ilerlerken bir takım otomatik denetim mekanizmalarına sahip olmalıdır.
- l) Hava aracından ayrılması akabinde görevini icra edinceye kadar olan tüm zaman boyunca ürün görevini otonom olarak yerine getirebilmelidir.
- m) Ürünün imalatı yapılırken gerek ürünün konstrüksiyonu ve gerekse söndürücü malzeme ve diğer tüm alt sistemlerin imalatında yüksek oranda yerlilik ve geri dönüştürülebilirlik olmalıdır.
- n) Ürünün maliyeti diğer söndürme yöntemlerine kıyasla rekabetçi olabilmelidir.
- o) Ürün çevreci olmalıdır.

4. YANGIN SÖNDÜRME BOMBASININ TASARIMI

Yukarıda sayılan tüm şartları yerine getirebilmesi amacıyla NATO üyesi ülkelerin hava kuvvetlerine ait mühimmat envanterlerinde bulunan ve havadan yere genel maksat bombası olarak isimlendirilmiş olan Mark serisi (MK-82, 83, 84) (Şekil 7) serbest düşüm mühimmatlarının ölçüleri referans alınarak, gerçek harp mühimmatından tamamen farklı ve yangın söndürmede kullanılabilecek yeni bir ürünün tasarımına gidilmiştir.



Şekil 7. Mark Serisi Bir Genel Maksat Mühimmatına Ait Görsel

Ürün sahip olduğu bir takım elektronik ekipman ve ürünü otonom hale getiren yazılım da dikkate alınarak “akıllı yangın söndürme bombası (AYSB)” olarak isimlendirilmiştir. Buna göre AYSB şu kısımlardan meydana gelmektedir:

- a) Bomba gövdesi
- b) Kanatlar
- c) Burun konisi
- d) Söndürücü madde
- e) Patlayıcı madde
- f) Fünye
- g) Elektronik ekipmanlar
- h) Yazılım.

4.1 Bomba Gövdesi

AYSB tasarlanırken ölçülerinin kullanımda olan bir bombadan alınmasının birçok avantajı olmuştur. Bunlardan ilki ürünün boyutlarının hava araçları için uygun olmasıdır. Ayrıca ürünün araca yüklenmesini sağlayan süspansiyon askılarının cinsi, iki askı arasında bırakılması gereken aralık ölçüleri gibi birçok problem tasarım başlamadan önce çözüm bulmuştur. Yine de harp mühimmatının tüm ölçüleri bire bir taklit edilmemiş, ürünün görev amacına uygun olarak bir takım tasarım iyileştirmeleri yapılmıştır. Bunları kısaca şu şekilde özetlemek mümkündür. Öncelikle Mark serisi harp mühimmatlarına ait gövde şarapnel etkisi meydana getirerek hedef bölgede en fazla tahribatı meydana getirmek üzere döküm malzemedan üretilmektedirler. AYSB’de ise böyle bir ihtiyaç ve durum söz konusu değildir. Gövdenin üretimi kolay, ucuz, hızlı ve geri dönüştürülebilir bir termoplastikten yapılmıştır. Gövde, burun ve kuyruk konilerinin bağlandığı ayrıca ürünün hava aracına bağlandığı süspansiyon askılarını da ihtiva eden elemandır. Söndürücü madde ürün gövdesi içerisinde taşınmaktadır ve bu maddenin kolay ve hızlı bir şekilde yangın alanına dağılmasını sağlayacak bir tasarıma sahiptir.

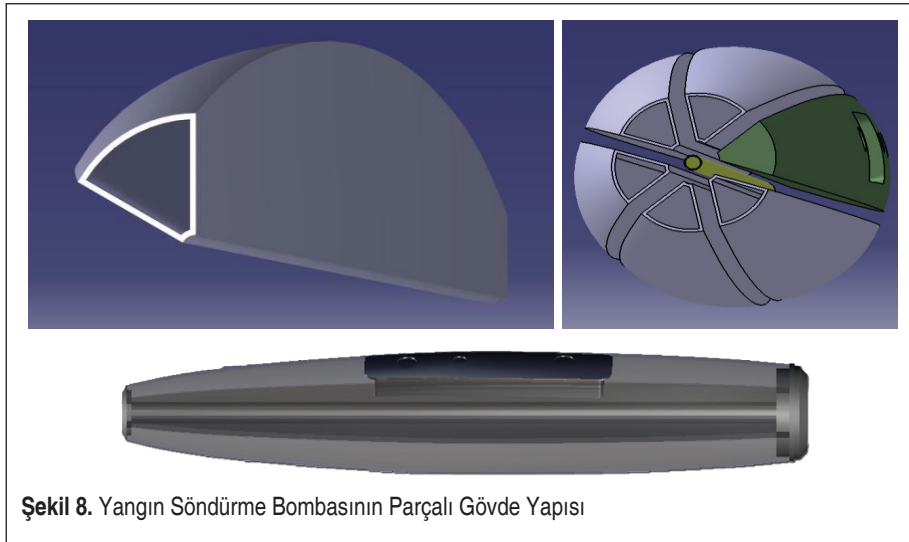
AYSB içerisinde bulunan söndürücü malzeme patlayıcı kullanılarak yangın bölgesine dağıtılmaktadır. Bilgisayar ortamında gerçekleştirilen patlama analizleri Ansys 16.0 Explicit modülü ile gerçekleştirilmiştir. Analizler, silindirik formda bir patlayıcı etrafına dilimli ve dilimsiz yapıda iki ayrı gövde için yapılmıştır. Her iki gövde yapısı da söndürücü-soğutucu malzemeyi simüle etmesi maksadı ile kum malzeme kullanılarak yapılmıştır. Patlayıcı cinsi olarak TNT, saçılımı gözlemlenen malzeme kum ve dış cidar S-tip cam elyafından seçilmiştir. Detonasyon noktası kuyruk tarafından (arka kısımdan) verilmiş patlama bitiş süresi olarak 0.1 saniye olarak girilmiştir. Bu analiz-



ler, gövdenin tek parça yerine birden fazla parçadan oluşacak şekilde dilimli bir yapıda olmasının söndürücü malzemenin çok daha etkili olacak bir şablonu takip ederek yangın ortamına saçılacağını göstermiştir. Bu nedenle bombaya ait gövde yapısının aralarında 60'ar derece açı bulunan altı parçanın merkezi bir silindir etrafında dizilimi ile meydana getirilmesinin uygun olacağına karar verilmiştir (Şekil 8). Bundan az olacak segment sayısı istenilen şablonu sağlayamamakta, fazla sayı ise üretim ve çalışma mekanizması açısından bir takım problemlere neden olmaktadır. Parçalardan her biri 1504 mm uzunluğa sahip olup içlerinde söndürücü maddelerin konulmasına imkân sağlayan boşluklara sahiptir. Altı parça bir araya geldiğinde merkezde 32 mm çapında silindirik bir boşluk ortaya çıkmaktadır. Burası patlayıcı madde haznesidir. Altı boşluklu yapıdan beşi söndürücü madde haznesi altıncısı ise AYSB'nin otonom görev yapmasını sağlayan bir takım elektronik donanımların (devre kartları ve batarya gibi) yerleştirildiği haznedir.

4.2 Kanatlar

Harp mühimmatlarının birçoğu üzerinde kanatlar bulunur. Alçak irtifada gerçekleştirilen saldırılarda hava araçları tarafından atılan mühimmatın patlaması neticesinde ortaya çıkan patlayıcı etkisiyle (blast effect) hava araçları kendi attıkları mühimmatın dolayı hasar görebilmektedirler. Bunun önüne geçebilmek için harp mühimmatları üzerine bombanın inişini yavaşlatarak hava aracının patlamadan kaçmasına izin veren geciktiriciler, paraşütler veya açılır yüzgeçler takılır (Şekil 9). Ayrıca mühimmatın sürüklenme kuvvetini azaltmak ve mühimmatın daha istikrarlı bir seyir izleyerek öngörülen yatay atış yörüngesini takip etmesini sağlamak amacıyla bombalar üzeri-

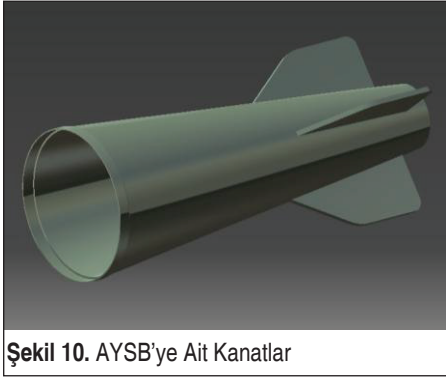


Şekil 8. Yangın Söndürme Bombasının Parçalı Gövde Yapısı



Şekil 9. Paveway II İsimli Mühimmata Ait Yavaşlatma Elemanları [14]

ne kanatlar takılmaktadır. Tüm bu amaçlarla AYSB üzerine de kanatlar eklenmiştir (Şekil 10). 90° ar derece açı ile konumlandırılmış dört adet sacdan imal edilmiş kanat kuyruk kısmında bulunan koni üzerine konumlandırılmışlardır. Kanatlar NACA benzeri herhangi bir profil yapısına sahip değildir.



Şekil 10. AYSB'ye Ait Kanatlar



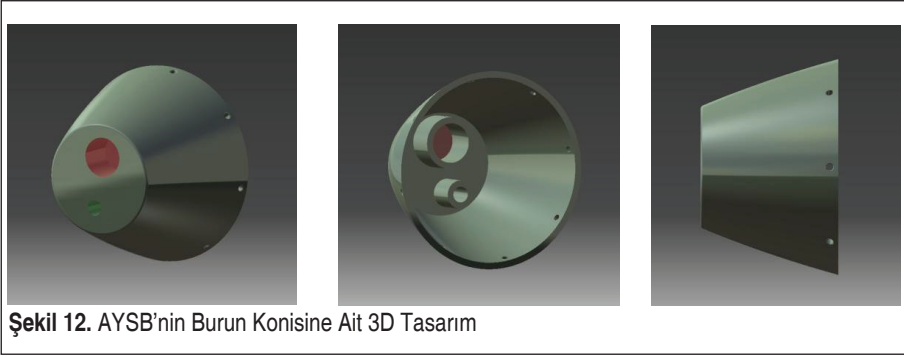
Şekil 11. MK-82'ye Ait Konik Kanat

4.3 Burun Konisi

Bir akışkan içerisinde hareket etmekte olan cisimler akışkanın teması neticesinde hareketlerine zıt yönde bir direnç kuvveti ile karşılaşılır. Bu direnç için sürükleme kuvveti tabiri kullanılır ve sürükleme kuvvetleri akışkan içerisinde hareket etmeye çalışan nesnelerin performanslarını olumsuz yönde etkilerler. Sürükleme kuvveti tüm hava araçları, roketler, ateşli silahlardan çıkan mermi çekirdekleri veya su altında hareket etmekte olan denizaltı benzeri her araca etkir. Çoğu durumda sürükleme kuvvetleri aracın takip etmesi gereken yörüngeden sapmasına neden olur. Sürükleme kuvvetlerinin araçlar üzerindeki etkileri anlaşıldığından beri mühendisler bu olumsuz etkileri kırmak amacıyla aracın akışkan ile ilk temas ettiği noktalar üzerinde bir takım



düzenlemelere gitme gereği duymuşlardır. Burun kısmının koniye yakın geometrilerde tasarlanması da yapılan bu çalışmalardan biridir. Havacılık sektörü için oldukça önemli hale gelen bu iyileştirme faaliyetine burun konisi tasarımı denir. Konu ile ilgili yapılan literatür araştırmaları çok farklı şekillerde burun konisi tiplerinin üretildiğini ve bu konunun oldukça detaylı çalışıldığını göstermektedir. AYSB'ye ait burun konisi kesik tip (truncated nose cone) bir burun konisidir (Şekil 12). Burun konisinin bu şekilde seçilmesinin nedeni ürünün üzerinde bulunması gereken mesafe algılama ve çarpma sensörlerinin bombanın en ön kısmında bir düzlem üzerinde ve dış ortama ile temasta bulunması zorunluluğudur. Burun konisi içerisinde alev algılama, mesafe ölçüm ve çarpma sensörleri bulunmaktadır. AYSB burun konisi fiber katkılı Naylon 12 malzemeden imal edilmiştir.



4.4 Söndürücü - Soğutucu Malzeme

AYSB içerisinde üretimi ülkemizde yapılmakta olan, bor minerali katkılı ve toksisitesi olmayan toz formda bir kimyasal bulunur (Tablo 2). Bu kimyasal madde sektörde bilinen diğer yangın söndürücülerden farklı olarak soğutma görevi de görmektedir. Bu maddenin orman yangınlarında kullanılan ve toz formda olan tipine ait testlerde malzemenin üzerine atıldığı alevleri söndürmesinin akabinde yanan yüzeyin sıcaklığını çok kısa bir zaman aralığında (10 saniye gibi) 450 °C'den oda sıcaklıklarına kadar düşürdüğü gözlemlenmiştir. Bu kimyasal madde yerli ve özel bir şirket tarafından üretilmiş patentli bir üründür. Bu ürün şirkete ait test laboratuvarlarında Ekim 2018 ve Ocak 2019 yıllarında test edilerek sonuçlar görsel olarak kayıt altına alınmıştır [18]. Yangınlarla mücadelede söndürülmüş yangının soğutulmaması neticesinde tekrar alev alma ve yangının devam ettiği durumlar göz önüne alındığında AYSB'nin söndürücü maddeye bağlı olarak sahip olacağı bu özelliğin önemi büyüktür. Tek seferde yangını söndürerek aynı zamanda soğutma faaliyetini de tamamlayabilmek birçok açıdan yangınlarla mücadelede belki de şu an için ulaşılabilecek en iyi noktadır. Ürünün farklı yangın tipleri için (kimyasal madde kaynaklı ve metal yangınları gibi) olanları da ülkemizde üretimde olup AYSB içerisinde aynı şekilde kullanılabilir.

Tablo 2. Söndürücü – Soğutucu Malzemenin Bileşim İçeriği [18]

Bileşen	CAS No	Konsantrasyon
Borakspendahidrat	12179-04-3	%10-20
Silikat	112926-00-8	< %2

4.5 Patlayıcı Madde

AYSB dilimleri gövdeyi oluşturmak üzere bir araya getirildiklerinde yapının merkezinde 32 mm çapında ve gövde boyunca uzanan bir silindirik boşluk ortaya çıkmaktadır. Bu boşluk söndürücü-soğutucu maddenin bomba gövdesini yırtarak dışarı çıkmasını sağlayacak olan patlayıcı maddenin bulunduğu haznedir. Bilgisayar ortamında yapılan sanal patlama analizleri neticesinde patlayıcı tipi olarak dinamit seçilmiştir. Patlayıcı maddeye ait teknik özellikler Tablo 3’te verilmiştir.

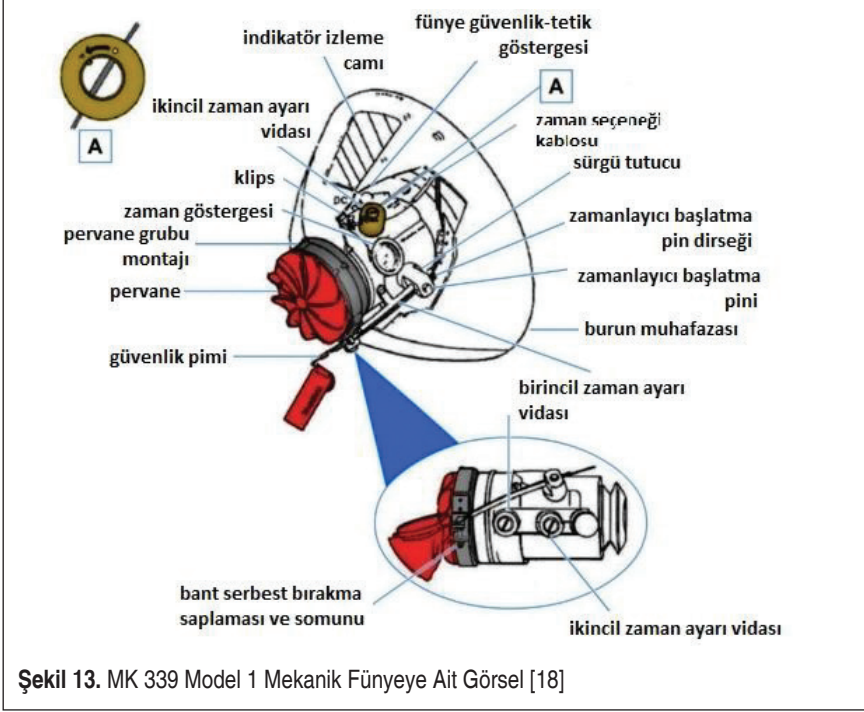
Tablo 3. Dinamite ait 40 mm Çelik Boru İçindeki Test Sonuçları [16]

Detonasyon hızı (m/s)	6000
Enerji (MJ/kg)	4,5
Suya Direnç	Kuvvetli
Yoğunluk (g/)	1.15-1.25
Gaz hacmi (L)	917

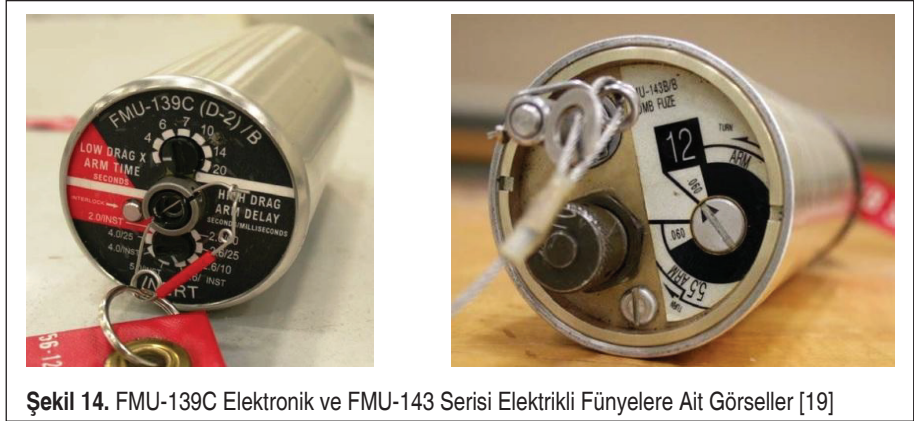
4.6 Fünye

Bombalar bir fünye ile patlatılırlar. Fünyeler belirli koşullar sağlandığında kısa bir zaman aralığı içerisinde (gecikme milisaniyelerle ifade edilir) bombanın patlamasını sağlayacak enerjiyi ortaya çıkaran elemanlardır. Fünye içerisinde patlama zincir reaksiyonunu başlatıcı hassas patlayıcı maddeler (PETN, RDX, Pentolite gibi) bulunur [17]. Fünyeler genel olarak mekanik ve elektrikli fünyeler olmak üzere ikiye ayrılırlar. Mekanik fünyeler bir tel yardımı ile tetiklenirler. Tel çoğunlukla kurulu bir mekanizmayı serbest bırakmak için kullanılır. Serbest kalan mekanizma dönerek bir kinetik enerji üretir ve bu sayede fünye tetiklenmiş olur (Şekil 13).

Elektrikli fünyeler de mekanik fünyelere benzer birçok eleman barındırır. Ancak elektrikli fünyelerde tetikleme işi bir elektrik sinyali veya veri gönderimi vasıtasıyla olmaktadır. Hava araçlarından atılan mühimmatlar için bu durum, güvenlik gerekçeleri nedeniyle mühimmatın hava aracından ayrıldığı anda gerçekleşir. Günümüzde kullanılmakta olan modern fünyelere aslında birer elektronik ekipman demek uygun



olur. AYSB'ye ait patlayıcı madde de FMU-139C tip elektronik fünnyeye benzer elektronik bir elemanla patlatılacaktır (Şekil 14).



4.7 Elektronik Donanım

AYSB'nin görevini icra edebilmesi için bombanın yüklü olduğu hava aracından ayrıldığı, anlık ivmesini, açılma hızını, hedef bölgedeki alevleri, yere yaklaştığında yer

ile arasında kalan mesafeyi, ayrıca zemine temas ettiğini (çarpma) algılayabilmesi gerekir. Bu amaçla AYSB üzerinde altı eksen ivme ve gyro sensörleri, çarpma ve alev algılama benzeri bir takım sensörler bulunur. Sensörlerden gelen verilerin işlendiği bir algoritmanın olduğu denetleyici bir kart da AYSB üzerinde mevcuttur. Denetleyici kart ve sensörlerin güç gereksinimi 12V 1.3A bir bataryadan karşılanmaktadır.

4.8 Yazılım

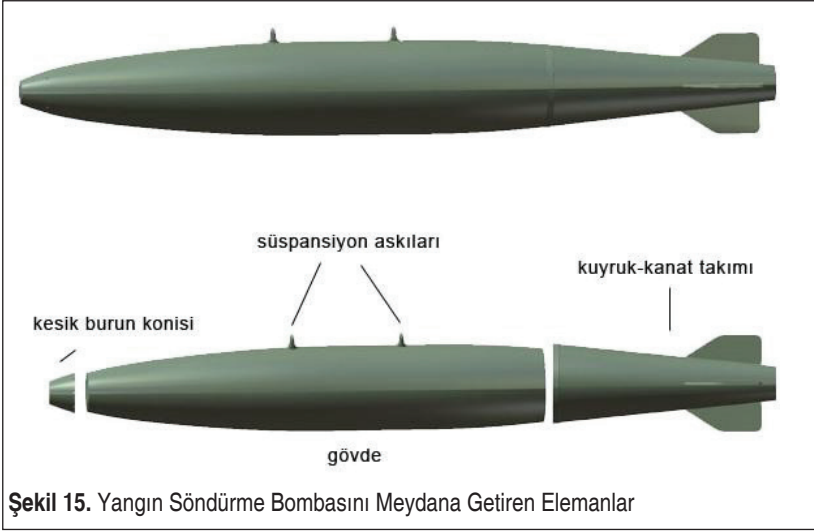
AYSB'nin görevini tam anlamıyla icra edebilmesi için bir takım otonom kararlar alabilmesi şarttır. AYSB bu kararları alırken sensörlerinden almış olduğu verileri hızlı ve doğru bir biçimde yorumlayan bir yazılım algoritmasına başvurur. Bu yazılım C programlama dili ile yazılmıştır. Algoritma kısaca şu şekilde çalışır;

- Öncelikle pilot tarafından gelen sinyale bağlı olarak AYSB'ler yukarı bir noktada mı yoksa zemine çarparak mı patlayacak bu belirlenir. Yani bombaları görev türüne göre işaretlenir.
- AYSB'nin hava aracından ayrılıp ayrılmadığı denetlenir.
- Hava aracından ayrıldığı onaylanan bombanın kısa bir zaman sonra sensörleri aktif hale gelir ve denetçi kart bu sensörlerden gelen verileri kısa zaman aralıklarında yorumlar. Böylece bombanın hızı, açısı ve yangın bölgesine olan mesafesi hakkında bilgi edinilir.
- Yukarıda patlatılacak bombalar için alev sensörleri ve mesafe sensörlerine ait veriler yorumlanır.
- Zeminde patlayacaklar bombalar için çarpma ve mesafe sensörlerinden gelen sinyale bakılır.
- Uygun görülen noktada veya çarpmaya bağlı olarak gelen sinyal ile elektronik fünye aktif hale getirilir ve tetik sinyali gönderilerek mühimmat patlatılır.

AYSB tasarımının geliştirilmesi amacıyla çeşitli teorik/sayısal çalışmalar yapmakta-
yız. Bu kapsamda insansız bir hava aracına yüklü AYSB'nin, araca ait maksimum hız koşullarında ortaya çıkaracağı sürüklenme katsayısının tespiti, AYSB'nin gövdesi üzerinde ortaya çıkacak basınç ve hız profillerinin belirlenerek görselleştirilmesi amaçlarıyla sayısal çalışmalar yapılmış ve sonuçlar [23] nolu kaynakta yayınlanmıştır. Ayrıca farklı burun konisi tasarımlarının akıllı yangın söndürme mühimmatının yörüngesi ve vuruş açısı üzerine etkileri incelenmiş ve sonuçlar [24] nolu kaynakta yayınlanmıştır.

5. YANGIN SÖNDÜRME BOMBASININ İMALATI

Yangın söndürme bombasını meydana getiren elemanlar Şekil 15'de gösterilmiştir.



Şekil 15. Yangın Söndürme Bombasını Meydana Getiren Elemanlar

5.1 Burun Konisinin İmalatı

AYSB'ye ait burun konisinin ilk örnek imalatı döküm polyamidin (kestamid) torna ve freze tezgâhlarında işlenmesi ile elde edilmiştir. Seri üretiminin ise granül polikarbonatın kalıp içerisine enjeksiyon yöntemi ile sıkıştırılmasıyla yapılması düşünülmektedir.

5.2 Gövdenin İmalatı

AYSB gövdesinin de yine burun konisinde olduğu gibi polikarbonat malzemeden yapılması düşünülmektedir. Ancak burada yöntem plastik enjeksiyon yöntemi değil şişirme metodudur. İmalat malzemesi olarak polikarbonatın tercihinde şu hususlar öne çıkmıştır.

- Polikarbonat plastik çok dayanıklı bir malzemedir. Ürünlerin yüksek performanslı olması istenildiğinde tercih edilen bir malzemedir.
- Mükemmel mekanik, fiziksel özellikler ve üstün işlenebilirlik özelliklerine sahiptir.
- Polikarbonat, yüksek darbe direnci sayesinde, güvenilirlik ve yüksek performans sağlar.
- Polikarbonat hafif bir malzeme olduğu için hava araçlarında kullanımı uygundur.
- Polikarbonat plastik mükemmel ısı direnç sağladığından dolayı diğer plastik türlerine nazaran daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilir.

- f) Granül polikarbonatın 2021 yılı itibari ile kilogram fiyatı 2 dolar civarındır. Bombaya ait boş gövde ve burun toplam ağırlığının 20 kg'ı dahi bulmadığı düşünülürse bu ucuz plastik türü enjeksiyon yöntemi ile imal edilecek AYSB'lerin birim maliyetlerini ciddi oranda azaltacaktır.
- g) Polikarbonatdan imal edilen ürünler mekanik veya hammadde olarak %100 geri dönüştürülebilir ve çöp yakma tesislerinde enerji geri kazanımı sağlanabilir.

5.3 Kanat ve Koni İmalatı

Gerek ilk örnek ve gerekse seri üretimde kanat ve bağlı olduğu koni kısmının sac malzemenin şekillendirilmesi ve kanatların bu malzeme üzerine çözülemez bir bağlantı türü olan kaynak yöntemi ile eklenmesinin uygun olacağı düşünülmektedir.

5.4 Elemanların Montajı

Burun konisi ve kanat takımı gövdeye vidalar ile bağlanır. Gövdeyi meydana getiren dilimler ise birbirlerine yapıştırıcı malzeme ile bağlanarak akıllı yangın söndürme bombasını oluştururlar.

6. MALİYET VE FAYDA ANALİZİ

Bir adet AYSB'nın üretilmesi ve montajının yapılması için gerekli maliyetler hesaplanmıştır. Çarpma etkisi ile çalışacak AYSB'nın bir adedinin üretimine ait maliyet analizi Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 4'deki fiyatlar, her ürün için 3 fiyat teklifi alınıp fiyatların ortalaması alınarak elde edilen fiyatları göstermektedir. Maliyet analizinin enflasyon oranından daha az etkilenmesi için fiyatlar \$ cinsinden verilmiştir. Görüldüğü gibi bir adet AYSB'nın perakende fiyatlar ile üretim maliyeti yaklaşık 372 \$'dır.

Diğer taraftan Tepe AYSB'nda alev algılama ve mesafe sensörleri kullanılarak AYSB havada istenilen koordinatta patlatılmaktadır. Tepe AYSB'nda ek olarak alev algılama ve mesafe sensörleri kullanıldığından AYSB'nın maliyeti artmaktadır. Bu sensörlerin maliyetleri göz önüne alındığında Tepe AYSB'nın maliyeti çarpma etkisi ile çalışan AYSB'nın maliyetinden yaklaşık %50 daha fazla çıkmaktadır. Bu durumda bir adet Tepe AYSB için üretim maliyeti yaklaşık 560 \$ olmaktadır.

AYSB'nın maliyeti, hava araçlarından yangın üzerine su, köpük, jel veya yanmayı geciktirici bazı maddelerin atıldığı diğer havadan müdahale yöntemlerinden daha yüksek olmaktadır. İleri ve akıllı teknolojilerin kullanıldığı AYSB'nın maliyetinin diğer klasik yöntemlere göre olan maliyetten daha yüksek çıkması beklenen bir sonuçtur. Ancak AYSB'nı diğer havadan müdahale yöntemleri ile karşılaştırırken "maliyeti" ile birlikte "yangın söndürme etkinliği"nin göz önüne alınması ve "fayda analizi"nin yapılması oldukça önemlidir. Aşağıda öz olarak AYSB'na ait fayda analizi verilmiştir:



Tablo 4. Çarpma Etkisi İle Çalışan AYSB'nın Üretiminde Kullanılan Malzemelere Ait Perakende Fiyatlar

No	Malzeme Cinsi	Kullanıldığı Yer / İşlevi	Birimi	Miktarı	Fiyatı (\$)	Tutarı (\$)
1	% 15 cam elyaf takviyeli polikarbonat ham madde	Gövde imalatı	kg	18	2.70	48.60
2	Bor esaslı söndürücü / soğutucu madde	Söndürme / Soğutma	kg	50	1.50	75.00
3	Süspansiyon askısı	Bombayı taşıyan askı	adet	2	2.00	4.00
4	Bağlantı soketleri	Kart, sensörler ve enerji kaynağı arasında	adet	5	1.00	5.00
5	12V 1.3A kuru tip akü	Enerji kaynağı	adet	1	4.25	4.25
6	Mikroişlemci ve kart	Uçuş-görev kontrol	adet	1	41.00	41.00
7	Darbe sensörü	Burun kısmında çarpma algılama	adet	1	14.00	14.00
8	6 eksen ivme ve gyro sensörü (MPU6050)	Bomba ivme ve açış algılama	adet	1	3.00	3.00
9	Dinamit patlayıcı	Söndürücü maddelerin saçılımı	kg	1.8	65.00	117.00
10	Montaj & Üretim maliyeti	Ürünün montajı	adet	1	60.00	60.00
Toplam						371.85

- AYSB, havadan yangınlara müdahalede kullanılmak üzere tasarlanmış inovatif bir üründür. AYSB, karada yangınlara müdahalede kullanılan söndürme tüpleri veya benzeri ürünlerin alternatifi değildir.
- AYSB, hava araçlarından yangın üzerine bırakılan, su, toprak veya fosfat temelli kimyasallar yerine kullanılacaktır. Hava aracının zaten kullanılacağı bu tür operasyonlarda AYSB ile söndürücü/soğutucu madde doğru miktarda, doğru noktalara emniyetli mesafeden atılarak yangınların önüne geçilmiş olacaktır. Böylece AYSB söz konusu maddelerden çok daha etkili bir söndürme ve soğutma sağlayacaktır. Tüm bunlar yangınların oluşturacağı can ve mal kayıpları ile ekolojik zararlar göz önüne alındığında önemli mali kazanımlar sağlayacaktır.
- Mühimmat depoları ve benzeri noktalarda ortaya çıkan yangınlarda şarapnel ve patlama etkisi nedeni ile yangın bölgelerine yaklaşılacaktır. Bu yangın-

larda itfaiyecilerin, kara ve hava araçlarının patlamakta olan mühimmat alanına yangınların söndürülmesi amacıyla gönderilmesi çok tehlikeli sonuçlar doğurabilir. Ayrıca hava araçları kırım geçirebilir. Bu durumlarda söndürücü materyalin geleneksel yöntemler ile hava araçları kullanılarak yangın bölgesi üzerine bırakılması mümkün olmadığından söndürücü maddenin güvenli bir mesafeden yangın bölgesine sevk edilmesi gerekir. Günümüzde bu görevi yerine getirebilecek dünyada geliştirilmiş hiçbir yöntem bulunmamaktadır. AYSB, bu tip görevleri ifa etmek amacıyla tasarlanmış inovatif bir üründür. AYSB, yangın bölgesine belirli bir yükseklikten yatay atış hareketi yapacak şekilde güvenli bir mesafeden bırakılmakta, böylece hava aracı patlama ve yangının devam ettiği bölgeye girmeden uzaktan, söndürücü maddeler ile yangını bombardıman etmektedir.

- d) Sınırlarımız dışında ülkemize petrol ve doğalgaz taşıyan nakil hatlarında bir takım teknik nedenler ve/veya sabotaj nedeni ile çıkan yangınlarda ülke itfaiyesinin bölgeye gönderilmesi mümkün değildir. Başka alternatiflerin bulunmadığı bu gibi durumlarda AYSB, yangınları söndürmek amacıyla kullanılabilir. Bu ise önemli lojistik ve mali kazanımlar sağlayabilir.
- e) Sabotaj ile gerçekleştirilen orman yangınları genellikle eş zamanlı olarak ve çoklu noktalarda ortaya çıkmaktadır. Bu durumlarda mevcut söndürme araçları ve insan gücü birden fazla bölgeye dağılarak söndürme güç ve kapasitesinin bölünmesine yol açmakta ve yangını kontrol altına almak zorlaşmaktadır. Bu tür yangınlarda AYSB'leri taşıyan hava araçları arazi şartlarından bağımsız olarak gökyüzünde tüm bölgeyi gözlemleyebilecek ve sabote edilen her noktaya AYSB'lerini atarak etkin bir söndürme faaliyeti gerçekleştirecektir. Böylece sabotaj ile elde edilmesi amaçlanan yangına müdahale etkinliğini azaltma planları devre dışı bırakılacak, can/mal kayıpları engellenecek ve ülkemizin maddi/manevi kaynaklarının heba edilmesi önlenecektir.
- f) Başta orman yangınları olmak üzere, birçok yangın türü artık insansız hava araçları (İHA) ile tespit ve takip edilmektedir. İHA'ların havada kalma süreleri ve uçuş maliyetleri helikopter ve uçak benzeri pilotlu sistemlere göre çok daha avantajlıdır. Bu nedenle AYSB'lerini taşıyacak hava aracı olarak uçaklar yerine İHA'ların kullanılması önemli mali kazanımlar sağlayabilir.
- g) İHA'lar yangınlarla mücadelede tespit, müdahale ve söndürme süresini kısaltmaktadırlar. Orman Genel Müdürlüğü yurt içi imkânlarla üretilen birkaç çeşit İHA'yı envanterine katarak bu amaçla kullanmaya başlamıştır. Bu teknolojinin kullanımı ile birlikte 2003 yılında 40 dakika olan yangına müdahale süresi 2019'da 12 dakikaya kadar indirilebilmiştir [25]. Akıllı yangın söndürme bombaları İHA'lar ile taşınabilir. Bu gerçekleştiğinde yangını tespit eden İHA'lar yangın bölgesine anında müdahale imkânı kazanacaklardır. Yangınların büyümesini



önleyecek bu erken müdahale yangın söndürme faaliyetlerinin maliyetini oldukça azaltacaktır.

7. SONUÇLAR

Akıllı yangın söndürme bombası hem yangın söndürme sektörü ve hemde havacılık sektörü için yeni bir üründür. Ürünün seri üretime geçmesi durumunda yangınlarla mücadelede önemli katkılar sağlayacak bir mücadele aracı elde edilmiş olacaktır. Söndürücü-soğutucu madde doğru miktarlarda yangın üzerine bırakılabilecek böylece yangınlar söndürülürken çevreye fazlaca kimyasal madde kullanımı kaynaklı bir takım zararlar verilmemiş olacaktır. Ayrıca gerek ürünün etkinliği ve gerekse hava araçlarının hız faktörleri göz önüne alındığında yangınlar eskiden olduğu kadar çok büyük alanlara yayılmadan kontrol altına alınabileceklerdir. Benzer bir ürünün dünyada henüz kullanılmıyor olması bu alanda ülkemizi öncü konuma getirecektir. Ülkemize ait olan bu yerli ürünün yurtdışına satışı neticesinde ciddi bir döviz girdisi sağlanacaktır.

Ürünün geliştirilmesi önünde herhangi bir problem bulunmamakla birlikte, gövde malzemesinin farklı seçenekler ile de denenmesi, farklı tip hava araçları için farklı büyüklüklerde ürün tasarımlarının yapılması, söndürücü-soğutucu malzemenin saçılım şablonunun iyileştirilmesi gibi konular, üzerinde daha fazla çalışılması gereken başlıklardır.

TEŞEKKÜR

Bu makalede önerilen tasarım, TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı tarafından düzenlenen 2242 Üniversite Öğrencileri Araştırma Proje Yarışmaları'na Savunma, Uzay ve Havacılık kategorisinden katılmış, 17-22 Eylül 2019 tarihleri arasında yapılan Final Yarışması'nda Türkiye İkincilik Ödülü kazanmıştır. Tasarım için Türk Patent ve Marka Kurumu'na patent başvurusu yapılmıştır. Patent başvurusuna desteklerinden dolayı İnönü Üniversitesi Rektörlüğüne teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

1. **Eyriboyun, M.** 2009. "Yanma ders notları", Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, 1-3.
2. **Genç, R., Pekey, H.** 2014. "Endüstriyel Tesislerde Ortaya Çıkabilecek Yangın Risklerinin Bir Değerlendirmesi: Kocaeli Örneği", Elektronik Mesleki Gelişim ve Araştırma Dergisi (EJOIR), Cilt:2 Özel Sayı, 55-66
3. **İnce, A.** 2019. "Yangına Karşı Alınacak Güvenlik Tedbirleri", <http://www.abdurrahmanince.net>, son erişim tarihi. 21.04.2021
4. Ege Linyit İşletmeleri. 2020. "Yangın Güvenliği, Eli Yangın Söndürme Kursu Ders Notu", http://www.eli.gov.tr/depo/yanagin_guvenligi_ders_notlari.pdf, son erişim tarihi 21.04.2021

5. **Alder, R.** (1990). "Fighting Bush fires from the air", Institute of Fire Engineers, Aralık 1990, Adelaide, Avustralya.
6. **Dowling, S.** 2015. "The jaw-dropping missions of firefighting pilots," <https://www.bbc.com/future/article/20150821-the-jaw-dropping-missions-of-fire-fighting-pilots> son erişim tarihi: 22.04.2021
7. **Küçükosmanoğlu, A.** (1993). "Türkiye Orman Yangınlarına Ait Bazı Verilerin Değerlendirilmesi", İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, 43, 94.
8. **Radu, V. T.** 2019. "Use of drones for firefighting operations. Master Thesis Report", Aalborg University, Esbjerg, Denmark.
9. **Champagnie, B., Simonis, A.** 2013. "EML 4905 Senior Design Project Prepared in Partial Fulfillment of the Highway Wind Turbines".
10. EHang Company. 2020. "EHang Launches Intelligent Aerial Firefighting Solution", <https://www.ehang.com/news/670.html> son erişim tarihi: 22.04.2021
11. **Arthur H. P.** 2009. "Bombing Forest Fires: A Proposed Technology," Environmental Conservation, Volume 11, Issue 2, Summer 1984, sayfa 183
12. **Korenkov, Vladimir K.** 2004. "ASP-500 Fire-extinguishing Air System", Revue Militaire Suisse, 149, 32.
13. **Lei, Z.** 2017. "Chinese rockets aimed at high-rise fires", https://www.chinadaily.com.cn/china/2017-02/14/content_28190425.htm son erişim tarihi 22.04.2021
14. **Regan, C.** 2007. "Fire Retardent Smart Bombs. United States Patent Application", US 2007/0007021 A1.
15. **Dodla, J. E.** 2014. "Anti-Fire Missile. Canadian Patent Application", CA 2802582 A1 2014/07/10.
16. BEIJING SHENGTAI FIRE FIGHTING EQUIPMENT CO LTD. 2018. "Remote fire extinguishing systems", CN 207101684 U. 2018.03.16.
17. **Monniaux, D.** 2007. "Enhanced GBU-12, and a Laser-Guided Training Round", Paris Havacılık Fuarı, Fransa
18. Demircan Yangın. 2018. "Fireborex çok Amaçlı D tip Kuru Kimyasal Toz MSDS", Demircan Yangın Sistemleri San. Tic. LTD. Şti İzmir, Türkiye.
19. Nitro Teknik Patlayıcı Maddeler San. Tic. A.Ş. 2020. "Teknik Patlayıcı Teknik Patlayıcı Madde Elektronik Kataloğu", <http://www.teknikpatlayici.com.tr/upload/dosya/teknikpatlayici-tr-katalog.pdf> son erişim tarihi 22.04.2021
20. National Park Service. 1999. "Handbook for the Storage, Transportation, and Use of Explosives", www.nps.gov/parkhistory/online_books/nps/explosives son erişim tarihi 22.04.2021
21. NAVEDTRA. 2001. "Aviation Ordnanceman", 14313, Naval Education And Training Professional Development And Technology Center, Dallas, ABD



22. CNATT. 2006. “Bombs, Fuzes, and Associated Components”, Center for Naval Aviation Technical Training, Dallas, ABD.
23. **Toptaş M, Yılmaz M** 2021. “Akıllı yangın söndürme mühimmatının sayısal analizi”, JAV, 5(1): 22-35.
24. **Toptaş M, Yılmaz M**. 2021. “Effects of Different Nose Cone Designs on Trajectory and Impact Angle of Smart Fire Extinguishing Ammunition NATURENGS”, MTU Journal of Engineering and Natural Sciences 2:2 (2021) 1-15.
25. **Çalkaya, M.** 2021. “Orman Yangınlarıyla Mücadelede İHA Atağı”, <https://www.aa.com.tr/tr/turkiye/orman-yanginlariyla-mucadelede-iha-atagi/2269156>
26. **Özada Yangın.** 2021. “Yangın Söndürme Topu”, <http://www.ozadayangin.com/portfolio-item/yangin-sondurme-topu>

Helikopterlerde Kullanılan Bir Piston-Prop Motorun Enerji, Ekserji, Termoeekolojik, Sürdürülebilirlik, Termoeekonomik ve Eksergoekonomik Performans Analizleri

Halil Yalçın Akdeniz¹

ÖZ

Bu çalışmada, helikopterlerde kullanılan piston-prop motorlar için enerji, ekserji, termoeekolojik, sürdürülebilirlik, termoeekonomik ve eksergoekonomik analizler açıklanmış ve 190 SHP güce sahip bir piston-prop motor üzerinde bu analizler uygulanmıştır. İlk olarak piston-prop motor bir termodinamik sistem olarak ele alınmış olup buna göre sistemin kontrol hacmi, giriş ve çıkış akışları, denge denklemleri ve ölü hal koşulları belirlenmiştir. Elde edilen bulgulara göre sistemin enerji verimi % 15.51 olarak bulunurken, ekserji verimi % 11 olarak hesaplanmıştır. Sistemin entropi üretimi, sürdürülebilirlik indeksi, termoeekolojik performans katsayısı, termoeekonomik parametre değeri, kayıp ekserjisine bağlı eksergoekonomik parametre değeri, yıkım ekserjisine bağlı eksergoekonomik parametre değeri ve toplam eksergoekonomik parametre değeri sırasıyla 2,940 W/K, 1.124, 0.161, 2.20 W/TL, 1.29 W/TL, 2.50 W/TL ve 3.79 W/TL bulunmuştur. Analizler sonucunda sisteme giren yakıtın oluşturduğu enerjinin büyük ölçüde kayba ve yıkıma uğradığı görülmüştür. Elde edilen analiz sonuçlarından hareketle, motorun verim ve performansının yükseltilmesine ek olarak sistemdeki kayıpların ve tersinmezliklerin azaltılabilmesi açısından, bu tipteki motorların soğutma teknolojilerinin iyileştirilmesi ile buradaki kayıpların azaltılması ve genel sistem performansının optimize edilmesi önerilebilir.

Anahtar Kelimeler: Helikopter motorları, enerji, ekserji, sürdürülebilirlik, termoeekonomik analiz

Energy, Exergy, Thermoeological, Sustainability, Thermoeconomic And Exergoeconomic Performance Analyses of A Piston-Prop Engine Used in Helicopters

ABSTRACT

In this study, energy, exergy, thermoeological, sustainability, thermoeconomic and exergoeconomic analyses for piston-prop engines used in helicopters are explained and these analyses are applied on a piston-prop engine with 190 SHP power. Firstly, the piston-prop engine is considered as a thermodynamic system and accordingly the control volume, inlet and outlet flows, balance equations and dead state conditions of the system are determined. According to the findings, the energy efficiency of the system is found as 15.51%, while the exergy efficiency is calculated as 11%. The system's entropy production, sustainability index, thermoeological performance coefficient, thermoeconomic parameter value, exergoeconomic parameter value due to loss exergy, exergoeconomic parameter value due to destruction exergy and total exergoeconomic parameter value are found as 2,940 W/K, 1.124, 0.161, 2.20 W/TL, 1.29 W/TL, 2.50 W/TL ve 3.79 W/TL, respectively. As a result of the analyses, it is noticed that the energy generated by the fuel entering the system is largely lost and depleted. In view of the obtained results, in addition to increasing the efficiency and performance of the engine, in order to reduce the losses and irreversibility in the system, it can be recommended to improve the cooling technologies of this type of engines.

Keywords: Helicopter engines, energy, exergy, sustainability, thermoeconomic analysis

Geliş/Received : 08.08.2021

Kabul/Accepted : 31.08.2021

¹ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir Meslek Yüksek Okulu, Makine Programı, Eskişehir halilyalcinakdeniz@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2101-6151



EXTENDED ABSTRACT

Introduction and Objectives

For the concept of cost-effective and environmentally friendly aviation, system efficiency should be maximized and the cost generation and environmental impacts of aircraft engines should be minimized. In order to achieve these goals, it is important to operate the engine in the optimum operating mode, to select the quality fuel, to reduce the fuel consumption rate and loss and destruction rates, and the parameters such as the capital cost ratio should be minimized. In this regard, thermodynamic (energy and exergy), exergoeconomic, sustainability and environmental analysis methods are used to evaluate the performance of aviation engines and to create optimization models [4,5].

Even though it is seen that there are many studies in the literature including the thermodynamic analysis of aero gas turbine aviation engines such as turbofan, turbojet, and turboshaft, it has been seen that engines with piston-prop type of helicopter engines are dealt with relatively limited. In this regard, main objective of this study is to explain energy, exergy, thermoecological, sustainability, thermoeconomic and exergoeconomic analyses for piston-prop engines used in helicopters and to apply these analyses on a sample piston-prop helicopter engine with 190 SHP power.

Methodology and Analyses

In this study, firstly, the piston-prop helicopter engine is considered as a thermodynamic system and accordingly the control volume, inlet and outlet flows, balance equations and dead state conditions of the system are determined. Afterwards, the thermodynamic system is modeled in view of thermodynamic principles. The mass equations, energy equations and exergy equations in terms of first and second law of thermodynamics are adapted in accordance with the scope of the study. Thereafter, to measure and observe the thermoecological, sustainability, thermoeconomic and exergoeconomic performance of the system, some useful performance metrics which are available in the literature have been adapted to the thermodynamic system. In the last stage, the results are obtained and discussed in line with the determined objectives.

Results and Discussions

In this study, energy, exergy, thermoecological, sustainability, thermoeconomic and exergoeconomic analyses are applied to a piston-prop engine used in general purpose light helicopters. According to the findings, the energy efficiency of the system is found as 15.51%, while the exergy efficiency is calculated as 11%. The system's entropy production, sustainability index, thermoecological performance coefficient, thermoeconomic parameter value, exergoeconomic parameter value due to loss exergy, exergoeconomic parameter value due to destruction exergy and total exergoeconomic parameter value are found as 2,940 W/K, 1.124, 0.161, 2.20 W/TL, 1.29 W/TL, 2.50 W/TL ve 3.79 W/TL, respectively. When the all analyses are reviewed together, it has been noticed that the energy generated by the fuel entering the system is largely lost and depleted. In view of the useful outputs of this study, in addition to increasing the efficiency and performance of the engine, in order to reduce the losses and irreversibility in the system, it can be recommended to improve the cooling technologies of this type of engines.

1. GİRİŞ

Son yıllarda yaşanan teknolojik gelişmelere paralel olarak insanların hava yolu ile ulaşım olanaklarının artması, ticari havacılığa olan talebi artırmış ve havacılık sektörü dünya ekonomisinin temel bileşenlerinden biri haline gelmiş durumdadır. Ancak talepteki bu büyük artışla oluşan sektör büyümesi, sürdürülebilir büyüme süreçleri ile birlikte ele alındığında, enerji kaynaklarının hızlı tükenmesi ve artan maliyetleri, sektörel yakıt talebinin karşılanabilmesi ve özellikle fosil yakıtların tüketimine bağlı oluşan sera gazı emisyonları gibi tehditleri de gündeme getirmiştir [1]. Havacılık sektörünün paydaşları sektördeki bu tehditleri azaltabilmeye yönelik son zamanlarda politikalar geliştirmeye başlamıştır. Örneğin dünyada sivil havacılığın uluslararası anlamda en üst otoritesi olan Uluslararası Sivil Havacılık Organizasyonu (ICAO)'nun 2010 yılında 37.'si düzenlenen toplantısının sonucunda havacılık sektörünün sürdürülebilir olarak büyümesine dair iki temel hedef belirlenmiştir. Bunlardan ilki 2020 yılına kadar yıllık ortalama %2 oranında yakıt tüketimi verimliliğinin iyileştirmesi ve hedeflenen %2'lik yakıt verimliliğinin 2021 yılından 2050 yılına kadar her yıl elde edilmesidir. Toplantı sonucunda onaylanan ikinci hedef ise 2020 yılından itibaren karbon nötr bir büyüme elde etmektir [2,3].

Maliyet etkin ve çevre dostu bir havacılık konsepti için, sistem verimliliği maksimumda tutulmalı, uçak motorlarının maliyet oluşumu ve çevresel etkileri en aza indirilmelidir. Bu hedeflere ulaşabilmek için motorun optimum operasyon modunda çalıştırılabilmesi, kaliteli yakıtın seçilmesi, yakıt tüketim oranı ve kayıp ve tahribat oranlarının düşürülmesi önem arz etmekte olup, sermaye maliyeti oranı gibi parametreler de en aza indirilmelidir. Bu doğrultuda havacılık motorlarının performans değerlendirmelerini yapmak ve optimizasyon modellerini oluşturmak için termodinamik (enerji ve ekserji), eksergoekonomik, sürdürülebilirlik ve çevresel analiz yöntemleri kullanılmaktadır [4,5].

Havacılık tipi gaz türbinli motorlar, aralarında mekanik, aerodinamik, termal, ısı ve kütle transferi ve diğer birçok etkileşim biçiminin bulunduğu çoklu alt sistem gruplarından oluşan karmaşık termodinamik sistemlerdir [6]. Sadece termodinamiğin birinci yasasına dayanan enerji analizi, farklı enerji biçimlerinin dönüşümünü, transferini, kullanımını ve kaybını ortaya çıkarabilir. Bununla birlikte, geleneksel enerji analizi tabanlı yaklaşım yardımıyla yalnızca her bir alt sistem tarafından kullanılan enerji miktarı elde edilebilirken tüm sistem boyunca enerji akışının kalitesi elde edilememektedir. Dolayısıyla sadece bu analiz yöntemiyle çıkarılan sonuçlar, havacılık motorları gibi enerji aktarım mekanizmalarının derinlemesine anlaşılabilmesi için yetersiz kalabilmektedir. Sonuç olarak, yalnızca sınırlı performans analizi için kullanılabilirken entegre ve kompleks bir havacılık motorunun tasarımına rehberlik etmek için kullanılamamaktadır. Havacılık motorlarında, enerji akışının iş potansiyelini doğru bir şekilde değerlendirebilmek ve sistemin ekonomik veya çevresel performansını



iyileştirmenin uygun yollarını bulabilmek için ekserji analizi kullanılmaktadır. Termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarının bir kombinasyonu olan ekserji, enerjinin nicelik, kalite ve niteliğini sentezlemektedir. Bu anlamda sistemin zayıflıklarını gösterebilmekte ve enerji kalitesi hakkında bilgi verebilmektedir. Ekserji analizi yöntemi geleneksel enerji analizi yöntemiyle karşılaştırıldığında, termodinamik süreçlerdeki tersinmezlikler nedeniyle doğru sonuçlara ulaşmaya daha yakındır. Böylece havacılık tipi gaz türbinli motorların tasarımı ve optimizasyonu için daha değerli bilgiler sağlayabilir [7–10].

Havacılıkta kullanılan gaz türbinli motorlar temel olarak turboprop, turbojet, turboşaft, turbofan ve ramjet olarak gruplandırılabilir. Her birinin kullanım alanlarına göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Turboşaft tipindeki gaz türbinli motorlar genel olarak turboprop motorlara benzemektedir fakat sıcak kısımdaki gazlar serbest türbin veya güç türbinine genişletilmekte ve bunun sonucunda daha fazla şaft gücü sağlamaktadırlar. Bir turboşaft motor yüksek şaft gücü üretmek üzere tasarlanmıştır ve helikopterlerde, gemilerde, trenlerde, tanklarda, pompa ünitelerinde ve çeşitli endüstriyel gaz türbini uygulamalarında kullanılır. Endüstriyel gaz türbinleri uçak gaz türbinleri dışındaki tüm gaz türbinleri olarak tanımlanmaktadır. Temelde ise endüstriyel gaz türbinleri turboşaft motorlardır. Turboşaft uçak motorları, helikopterlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Turbojetler ve turboşaftlar arasındaki tek fark, turboşaftların güçlerinin çoğunu itme gücü üretmek yerine türbini döndürmek için kullanmasıdır. Turboşaft motor ile turbojet motorlar birbirine benzer, ancak turboşaft motorlarda ön kısım ile arka kısmı bağlayan büyük bir şaft bulunmaktadır. Çoğu turboşaft motorlar helikopterlerde kullanıldığından dolayı, şaft rotor kanadının (blade) aktarma organına bağlanır. Bu motorun çoğu komponenti bir turbojet motoruyla aynı prensiple çalışır. Türbinleri, rotor kanat iletimine güç sağlamak için bir şaft ile donatılmıştır. Rotorun rolü, dönüşü şafttan rotor kanadına aktarmaktır. Turboşaft motorlar, pistonlu motorlar ile kıyaslandığında biraz daha küçüktür ve pistonlu motorlara göre daha yüksek ağırlık oranına sahiptir. Bu motorların dişli sistemlerinin karmaşık olması ve kolayca bozulması gibi dezavantajları bulunmaktadır [11–15].

Helikopterde, kaldırma (lift) ve itki (thrust) oluşturmak için yatay olarak dönen rotorlar bulunmakta ve rotorlar sayesinde dikey olarak uçmakta ve havada kalmaktadırlar. Rotorlar, motordan gelen dönme gücüne ihtiyaç duymaktadır. Helikopterlerde turboşaft tipindeki motorlar yaygın olarak kullanılıyor olmasına rağmen, bazı tip helikopterlerde piston-prop motorlar tercih edilmektedir. Hatta üst düzey performans amaçlandığı helikopterlerde iki veya üç adet turboşaft motorun kullanıldığı da görülmektedir. Ancak hafif ve nispeten küçük ölçekli helikopterler belirli bir kullanım amacına yönelik faaliyetler icra etmekte ve piston-prop motorlara ihtiyaç duymaktadır. Bu piston-prop motorların da kendi aralarında farklı konfigürasyonlara sahip tipleri bulunmaktadır [16].

Literatürde, helikopterler ve piston-prop uçaklarda kullanılan motorların performanslarına yönelik gerçekleştirilen çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir.

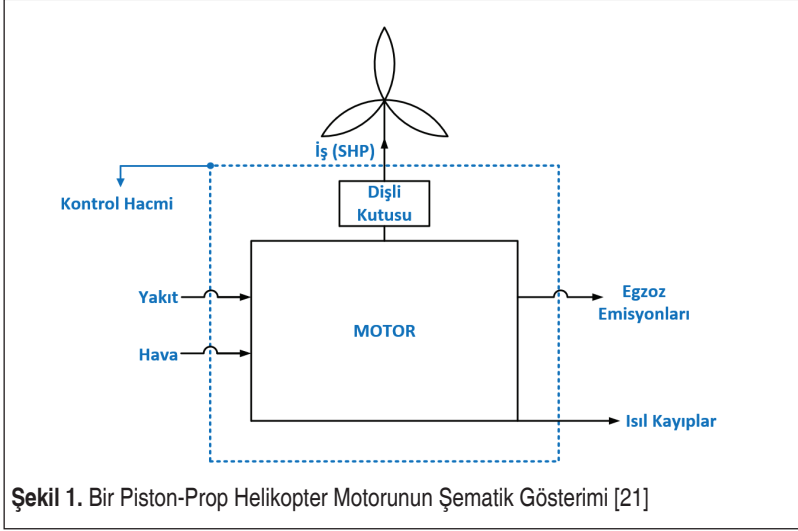
Koruyucu ve diğ. [17], bir piston-prop helikopter motorunda 150 SHP ile 600 SHP (Şaft Beygir Gücü) arasında değişen farklı motor gücü değerleri için enerji analizlerine dayalı sürdürülebilirlik analizi yapmışlardır. Hesaplamalar sonucunda 250 SHP gücünde en yüksek ekserji sürdürülebilirlik endeksi 0.15 ve en düşük çevresel etki faktörü değeri 6.86 olarak bulunmuştur. En düşük atık ekserji oranı ve en düşük ekserji yıkım faktörü sırasıyla %87.28 ve %66.77 olarak hesaplanmıştır. Altuntas ve diğ. [18], bir piston-prop uçak motorunun eksergoçevresel analizini yapmışlardır. Yazarlar maksimum spesifik çevresel etkiyi ve nispi çevresel fark değerlerini uçuşun yaklaşma aşamasında gözlemlemiştir. Bu değerler, spesifik çevresel etki için %18.8 mPts/MJ olarak hesaplanırken, nispi çevresel fark için ise %208,9 olarak hesaplanmıştır. Motorun maksimum spesifik çevresel etki değeri; uçak seyir uçuşu aşamasında, 3000 metre irtifada, 15.1 hava-yakıt oranında ve %65 nominal güçte iken 12.2 mPts/MJ değer ile elde edilmiştir. Altuntas ve diğ. [19] tarafından kaleme alınan bir başka çalışmada, bir piston-prop uçak motorunun termodinamik temellere dayalı exergoekonomik ve çevresel performansının optimizasyonu gerçekleştirmiştir. Elde edilen optimizasyon sonuçlarına göre, sistem en iyi performansı maksimum ekserji verimliliğinin %19.54 ile %19.80 arasında olduğunda, minimum birim yakıt ekserji maliyetinin 126.30 \$/GJ ile 127.23 \$/GJ arasında olduğunda ve minimum spesifik çevresel etki değerlerinin ise 8.70 mPts/MJ – 9.59 mPts/MJ aralığında olduğunda elde edilmiştir. Son olarak, elde edilen bulgular ışığında, optimum koşulların elde edilmesi için düşük hava-yakıt oranları, yüksek güç değerleri ve düşük irtifalı uçuşların seçilmesi gerektiği belirtilmiştir. Koruyucu [20], paralel hibrit mimariye sahip piston-prop ve elektrik motoru kullanan hafif genel maksat helikopterin yakıt tüketimi, karbon dioksit üretimi, insan sağlığı ve ekosistem kalitesi gibi enerji ve çevresel etkilerini uçuşun kalkış fazında ve çeşitli irtifa koşulları altında analiz etmiştir. Çalışmada sistem %6 hibridizasyon derecesinde iken yakıt tüketimi ve karbon dioksit üretim değerlerinde maksimum %3.91'lik bir düşüş gözlemlenmiştir. Ek olarak, aynı irtifa ve hibridizasyon düzeylerinde insan sağlığının %3.27 ve ekosistem kalitesinin %2.92 oranında daha az etkilendiği belirtilmiştir.

Yapılan literatür incelemesi neticesinde, turbofan, turboprop, turbojet veya turboşaft mimariye sahip gaz türbinli havacılık motorlarının termodinamik temelli analizlerini içeren çok sayıda faydalı çalışmanın literatürde bulunmasına rağmen, piston-prop mimariye sahip helikopter motorlarının bu çalışmalara kıyasla çok daha az ele alındığı görülmüştür. Bu kapsamda, helikopterlerde kullanılan piston-prop motorlar için enerji, ekserji, termoeolojik, sürdürülebilirlik, termoeekonomik ve eksergoekonomik analizlerin açıklanması ve örnek bir motora bu analizlerin uygulanarak sonuçların tartışılması ve olası iyileştirme önerilerinin sunulması bu çalışmanın birincil motivasyonunu ve temel amacını oluşturmaktadır.



2. YÖNTEM VE ANALİZ

Bu çalışmada, piston-prop helikopter motoru bir termodinamik sistem olarak ele alınmış olup Şekil 1’de şematik olarak gösterilmiştir.



Referans çevre sıcaklığı ve basıncı standart olarak sırasıyla 298 K ve 101.33 kPa kabul edilirken, sistemden çıkış sıcaklığı 1200 K ve soğutma havası sıcaklığı 330 K olarak kabul edilmiştir [21]. Örnek uygulama olarak, 190 SHP (Şaft Beygir Gücü) güce sahip bir motor esas alınmıştır.

Termodinamik prensipler ışığında bir kontrol hacminde kütle korunumu esasına dayalı olarak belirli bir zaman sürecinde kontrol hacmine giren veya kontrol hacminden çıkan kütle akışının, aynı zaman sürecinde kontrol hacmindeki toplam kütle değişimine eşit olduğu ifade edilmektedir. Bu bağlamda, sürekli akışlı sistemlerde kontrol hacmindeki toplam kütle sabit olup zamanla değişmemektedir. Buradan hareketle birden çok girdiye ve çıktıya sahip genel bir sürekli akış sistemi için kütle korunumunu denklem 1’deki gibi ifade etmek mümkündür [21,22]:

$$\sum \dot{m}_{giriş} = \sum \dot{m}_{çıkış} \quad (1)$$

Burada $\dot{m}_{giriş}$ sisteme giren kütle akışını temsil ederken, $\dot{m}_{çıkış}$ sistemden çıkan kütle akışını ifade etmektedir.

Benzer şekilde sürekli akışlı açık sistemlerde kontrol hacmindeki toplam enerji de-

ğişimi sıfır olup kontrol hacmine giren ve kontrol hacminden çıkan enerji miktarları eşittir. Enerjinin korunumu esası aşağıdaki denklemlerdeki gibi ifade edilebilir [21,22].

$$\dot{E}_{giriş} = \dot{E}_{çıkış} \quad (2)$$

Burada $\dot{m}_{giriş}$ sisteme giren enerji akışını gösterirken $\dot{m}_{çıkış}$ sistemden çıkan enerji akışıdır.

$$\dot{Q}_{giriş} + \dot{W}_{giriş} + \sum_{giriş} \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) = \dot{Q}_{çıkış} + \dot{W}_{çıkış} + \sum_{çıkış} \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (3)$$

Sistemdeki ısı kayıpları da dikkate alarak enerji dengesi aşağıdaki gibi yazılabilir [21,22]:

$$\dot{E}_{yakıt} = \dot{Q}_{kayıp} + \dot{W} \quad (4)$$

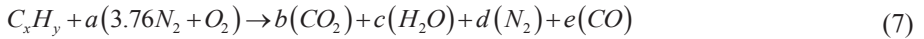
Burada $\dot{E}_{yakıt}$ sisteme giren enerji akışıdır ve Denklem (5) yardımıyla hesaplanır. $\dot{Q}_{kayıp}$ kullanılan yakıtın yanma esnasındaki ısı kaybını temsil ederken, \dot{W} ise motorun gücünü temsil etmektedir [21,22].

$$\dot{E}_{yakıt} = \dot{m}_{yakıt} LHV_{yakıt} \quad (5)$$

Burada $\dot{m}_{yakıt}$ kullanılan yakıtın kütle akışını göstermektedir ve $LHV_{yakıt}$ kullanılan yakıtın ait alt ısı değeri ifade etmektedir [21,22].

Kullanılan yakıtın kütle akışı hesabı için Denklem (6), eksik yanma kabulüyle yanma denklemi için ise Denklem (7) kullanılmıştır [21,23]. Kullanılan yakıtın kimyasal formülü $C_{7.68}H_{16.8}$ olup alt ısı değeri 43496 kJ/kg olarak kabul edilmiştir [24,25].

$$\dot{m}_{yakıt} \approx 19 \times 10^{-12} \times SHP^4 - 10^{-9} \times SHP^3 + 2.6 \times 10^{-7} \times SHP^2 + 4 \times 10^{-5} \times SHP + 0.006 \quad (6)$$



Burada a havanın mol kesrini, b CO_2 'nin mol kesrini, c H_2O 'nun mol kesrini, d N_2 'nin mol kesrini ve e ise CO 'nun mol kesrini temsil etmektedir. Standart atmosferik şartlar altındaki gazların fiziksel karışımına ait referans çevre Tablo 1'deki gibi kabul edilmiştir [21,22].

Sistemin ısı verimi aşağıdaki denklem yardımıyla bulunmaktadır [21,22].

$$\eta = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{E}_{toplam}} \quad (8)$$



Tablo 1. Referans Çevre

Bileşen	Mol oranı (%)
N ₂	75.6700
O ₂	20.3500
CO ₂	0.03450
H ₂ O	3.03000
CO	0.00070
SO ₂	0.00020
H ₂	0.00005
Diğerleri	0.91455

Burada \dot{W}_{net} işe dönüştürülen net gücü temsil etmektedir, $\dot{E}_{toplama}$ ise toplam giren enerji akışıdır.

Sistemin genel ekserji denge denklemi aşağıdaki şekilde yazılır [21,22].

$$\sum \dot{E}x_{giris} - \sum \dot{E}x_{cikis} = \sum \dot{E}x_{yikam} + \sum \dot{E}x_{kayıp} \quad (9)$$

Burada $\sum \dot{E}x_{giris}$ sisteme giren toplam ekserji akışını temsil etmekte olup Denklem (10), (11) ve (12)'deki denge denklemleriyle ifade edilir, $\sum \dot{E}x_{cikis}$ sistemden çıkan toplam ekserji akışını temsil etmektedir, $\sum \dot{E}x_{kayıp}$ sistem sınırlarından veya kontrol hacminden çevreye kaybolup tekrar kullanılmayan toplam ekserji akışını temsil etmektedir, $\sum \dot{E}x_{yikam}$ ise sistemdeki tersinmezliklerden kaynaklanan toplam ekserji yıkımıdır [21,22,26–29].

$$\sum \dot{E}x_{giris} = \dot{E}x_{cikis} \quad (10)$$

$$\sum \dot{E}x_{giris} = \dot{E}x_{egzoz} + \dot{E}x_W + \dot{E}x_{kayıp} + \dot{E}x_{yikam} \quad (11)$$

$$\sum \dot{m}_{giris} \varepsilon_{giris} = \sum \dot{m}_{cikis} \varepsilon_{cikis} + \dot{W} + \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_{cat}} \right) \dot{Q} + \dot{E}x_{yikam} \quad (12)$$

Burada ε spesifik akış ekserjisidir, T_0 referans ölü hal sıcaklığıdır, T_{cat} soğutma havası sıcaklığıdır 330 K olarak alınmıştır, \dot{Q} ise soğutma havası nedeniyle dışarıya atılan

ısı akışıdır ve aşağıdaki gibi yazılabilir [21,22,26,30,31]:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{yakıt} LHV_{yakıt} - (\dot{W} + \dot{m}_{çıkış} \Delta h_{çıkış}) \quad (13)$$

Burada Δh egzoz gazlarının çıkış sıcaklığındaki entalpi değerleri ile ölü hal sıcaklığındaki entalpi değerlerinin farkıdır. Yakıt ekserji akışı aşağıdaki gibi bulunabilir [21,22,26,30]

$$\dot{E}x_{yakıt} = \dot{m}_{yakıt} LHV_{yakıt} \varphi \quad (14)$$

Burada φ kimyasal ekserji faktörü olup sıvı yakıtlar için aşağıdaki gibi hesaplanır [21,22,26,30].

$$\phi = 1.0401 + 0.0432 \left(\frac{o}{c} \right) + 0.1728 \left(\frac{h}{c} \right) + 0.2169 \left(\frac{s}{c} \right) \left(1 - 2.0628 \frac{h}{c} \right) \dot{E}x_{yakıt} = \dot{m}_{yakıt} LHV_{yakıt} \varphi \quad (15)$$

Burada $\left(\frac{o}{c} \right)$, $\left(\frac{h}{c} \right)$ ve $\left(\frac{s}{c} \right)$ sıvı yakıtlar için sırasıyla oksijen/karbon, hidrojen/karbon ve sülfür/karbonun oranlarıdır. Çıkış (egzoz) ekserjisi aşağıdaki gibi bulunabilir [21,22,26,30].

$$\dot{E}x_{egzoz} = \sum \dot{m}_i \left(\varepsilon_{kimyasal} + \varepsilon_{termomekanik} \right)_i \quad (16)$$

Burada $\varepsilon_{kimyasal}$ her bir yanma ürünü için spesifik kimyasal ekserji olup Denklem (17)'deki gibi hesaplanır, $\varepsilon_{termomekanik}$ her bir yanma ürünü için spesifik termomekanik ekserji olup Denklem (18)'deki gibi hesaplanır [21,22,26,30]

$$\varepsilon_{kimyasal} = \bar{R} T_0 \ln \left(\frac{y}{y^e} \right) \quad (17)$$

Burada \bar{R} evrensel gaz sabitidir ve 8.31447 kJ/kmolK olarak alınmıştır. y egzoz gaz bileşeninin mol kesridir. y^e referans çevredeki komponentin mol kesridir [21,22,26,30].

$$\varepsilon_{termomekanik} = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \quad \bar{R} \quad (18)$$

Burada s spesifik entropi, h spesifik entalpiyi temsil etmektedir. 0 ise ölü hal koşuldur [21,22]. Kayıp ekserji aşağıdaki gibi bulunabilir [21,22,26,30]

$$\dot{E}x_{kayıp} = \left(1 - \frac{T_o}{T_{cat}} \right) \dot{Q} \quad (19)$$

Sistemin ekserji verimi aşağıdaki gibi yazılır [21,22].

$$\psi = \frac{\dot{W}}{\dot{E}x_{giriş}} \quad (20)$$



Sistemin toplam entropi üretimi ($\dot{S}_{ür}$) aşağıdaki şekilde hesaplanır [32].

$$\dot{S}_{ür} = \frac{\dot{E}x_{yıkım}}{T_0} \quad (21)$$

Sürdürülebilirlik indeksi (SI) [32]:

$$SI = \frac{1}{1 - \psi} \quad (22)$$

Bu çalışmada termoekonomik ve eksergoekonomik analiz olarak Ekserji-Maliyet-Enerji-Kütle Analizi yaklaşımını ele alan EXCEM yöntemi esas alınmıştır. Termoekonomik analiz enerji temelli olup eksergoekonomik analiz ise ekserji analizini baz almaktadır. Termoekonomik analizde R_{en} olarak ifade edilen termoekonomik analiz göstergesi kullanılabilir. Sistemin enerji kaybının ($\dot{E}x_{kayıp}$) toplam motor maliyetine (M) oranlanmasıyla bulunabilmektedir [32,33]. Burada motor maliyeti yaklaşık olarak 350000TL kabul edilmiştir [34].

$$R_{en} = \frac{\dot{E}x_{kayıp}}{M} \quad (23)$$

Eksergoekonomik analizde R_{ex} olarak ifade edilen eksergoekonomik analiz göstergesi kullanılabilir. Sistemin ekserji kaybının ($\dot{E}x_{kayıp}$) ve ekserji yıkımının ($\dot{E}x_{yıkım}$) toplam motor maliyetine oranlarının toplamı olarak bulunur [32,33].

$$R_{ex} = R_{ex,kayıp} + R_{ex,yıkım} = \frac{\dot{E}x_{kayıp}}{M} + \frac{\dot{E}x_{yıkım}}{M} \quad (24)$$

Termodinamik analiz, ekolojik performans göstergesi (ECOP) ile belirlenebilmektedir. Bu da sistemin net faydalı ekserji çıkışının ekserji yıkımına oranı olarak bulunur [32,35].

$$ECOP = \frac{\Delta \dot{E}x_w}{\dot{E}x_{yıkım}} \quad (25)$$

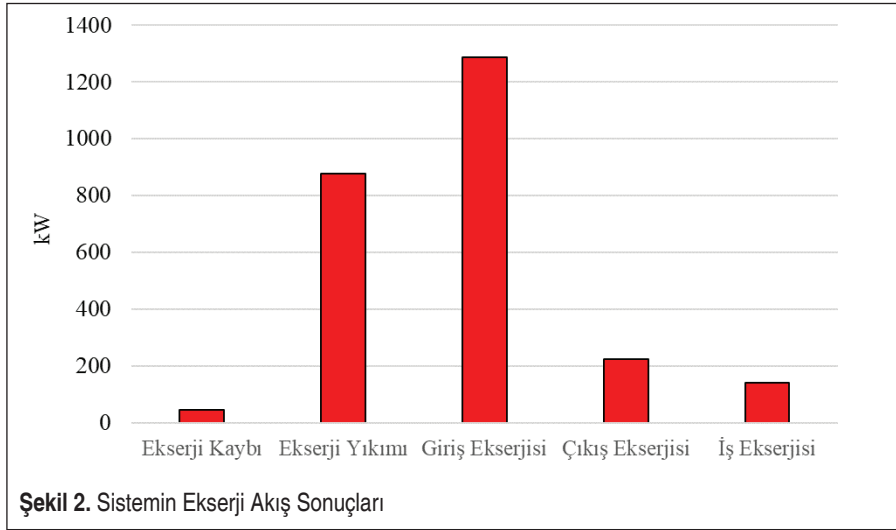
3. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Sisteme enerji, ekserji, sürdürülebilirlik, termodinamik, termoekonomik ve eksergoekonomik analizler uygulanmıştır. Sistemin enerji ve ekserji analizi sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. Buna göre sistemin enerji verimi % 15.51 olarak hesaplanmıştır. Sistemin ekserji kaybı 45.24 kW, sistemin ekserji yıkımı 876.19 kW, sisteme giriş ekserjisi 1287.90 kW, egzoz gazları nedeniyle sistemden çıkış ekserjisi 224.73 kW ve iş ekserjisi 141.74 kW olarak hesaplanmıştır.

Tablo 2. Enerji ve Ekserji Analizi Sonuçları

Parametre	Değer	Birim
Termal Verim	15.51	%
Ekserji Kaybı	45.24	kW
Ekserji Yıkımı	876.19	kW
Giriş Ekserjisi	1287.90	kW
Çıkış Ekserjisi	224.73	kW
İş Ekserjisi	141.74	kW
Ekserji Verimi	11.00	%
Sürdürülebilirlik İndeksi	1.124	-
Entropi Üretimi	2,940	W/K

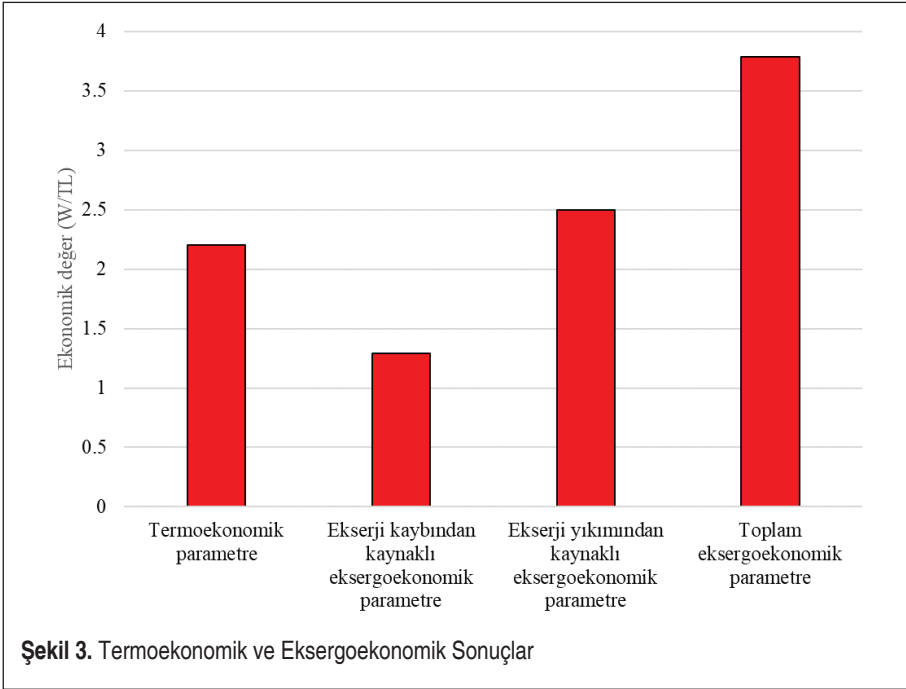
Toplam entropi üretimi 2,940 W/K olarak hesaplanmıştır. Sistemin ekserji verimi % 11.00 olarak hesaplanırken sistemin sürdürülebilirlik indeksi 1.124 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca sistemin giriş, kayıp, yıkım, çıkış ve iş ekserjisi akış değerlerine ilişkin sonuçlar Şekil 2’de sunulmuştur.



Sistemin termoekonomik parametre değeri 2.20 W/TL, ekserji kaybından kaynaklı eksergoekonomik parametre değeri 1.29 W/TL, ekserji yıkımından kaynaklı eksergoekonomik parametre 2.50 W/TL, toplam eksergoekonomik parametre ise 3.79 W/TL olarak bulunmuştur. Sistemin termoekolojik performans katsayısı olan ECOP değeri

**Tablo 3.** Termoekonomik, Termoeolojik ve Eksergoekonomik Sonuçlar

Parametre	Değer	Birim
ECOP (Termoeolojik Performans Katsayısı)	0.161	-
Termoekonomik parametre	2.20	W/TL
Ekserji kaybına bağlı eksergoekonomik parametre	1.29	W/TL
Ekserji yıkımına bağlı eksergoekonomik parametre	2.50	W/TL
Toplam eksergoekonomik parametre	3.79	W/TL



0.161 olarak bulunmuştur. Termoekonomik ve eksergoekonomik sonuçlar Tablo 3 ve Şekil 3'te yer almıştır.

Bu çalışmada genel maksat hafif tip helikopterlerde kullanılan bir piston-prop motorun performansını belirlemek amacıyla, motora enerji, ekserji, termoeolojik, sürdürülebilirlik, termoekonomik ve eksergoekonomik analizler uygulanmıştır. Tüm analizler birlikte değerlendirildiğinde sisteme giren yakıtın oluşturduğu enerjinin büyük ölçüde kayba ve yıkıma uğradığı görülmüştür. Motorun verim ve performansının yükseltilmesine ek olarak sistemdeki kayıpların ve tersinmezliklerin azaltılması açısından bu tip motorların soğutma teknolojilerinin iyileştirilmesi önerilebilir.

KAYNAKÇA

1. **Sogut MZ, Seçgin Ö, Ozkaynak S.** Investigation of thermodynamics performance of alternative jet fuels based on decreasing threat of paraffinic and sulfur. *Energy* 2019;181:1114–20. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.136>.
2. International Civil Aviation Organization. Assembly resolutions in force: (as of 8 October 2010). Montreal: International Civil Aviation Organization; 2011.
3. **Kharina A, Rutherford D.** Fuel efficiency trends for new commercial jet aircraft: 1960 to 2014. *Int Counc Clean Transp* 2015. n.d.
4. **Balli O.** Exergetic, Exergoeconomic, Sustainability and Environmental Damage Cost Analyses of J85 Turbojet Engine with Afterburner. *International Journal of Turbo & Jet Engines* 2020;37:167–94. <https://doi.org/10.1515/tjj-2017-0019>.
5. **Balli O, Hepbasli A.** Exergoeconomic, sustainability and environmental damage cost analyses of T56 turboprop engine. *Energy* 2014;64:582–600. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.09.066>.
6. **Rosen MA, Etele J.** Aerospace systems and exergy analysis: applications and methodology development needs. *IJEX* 2004;1:411. <https://doi.org/10.1504/IJEX.2004.005786>.
7. **Pavelka M, Klika V, Vágner P, Maršík F.** Generalization of exergy analysis. *Applied Energy* 2015;137:158–72. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.071>.
8. **Pellegrini LF, Gandolfi R, Silva G, de Oliveira Jr. S.** Exergy Analysis as a Tool to Decision Making in Aircraft Design. 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2007. <https://doi.org/10.2514/6.2007-1396>.
9. **Zhang J, Wang Z, Li Q.** Thermodynamic efficiency analysis and cycle optimization of deeply precooled combined cycle engine in the air-breathing mode. *Acta Astronautica* 2017;138:394–406. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.06.011>.
10. **Dong Z, Li D, Wang Z, Sun M.** A review on exergy analysis of aerospace power systems. *Acta Astronautica* 2018;152:486–95. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.09.003>.
11. El-Sayed AF. Aircraft propulsion and gas turbine engines. Boca Raton: CRC Press; 2008.
12. Saravanamuttoo HH, Rogers GFC, Cohen H. Gas turbine theory. 5th ed. Harlow, England ; New York: Prentice Hall; 2001.
13. **Turan Ö, Aydın H.** Numerical calculation of energy and exergy flows of a turboshaft engine for power generation and helicopter applications. *Energy* 2016;115:914–23. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.09.070>.
14. **Team E.** The 5 Main Types of Aircraft Jet Engines. *Aero Corner* 2019. <https://aerocorner.com/blog/types-of-aircraft-engines/> (accessed February 2, 2021).
15. **Saraçyakupoğlu T.** Bir Gaz Türbin Motoru Kompresör PalesininTi6Al4V Alaşımından Eklemeli Üretim Yöntemi ile İmalatı ve Boyutsal Doğrulaması. *Mühendis ve Makina* 2021. <https://doi.org/10.46399/muhendismakina.865357>.
16. **Team E.** 7 Different Types of Helicopter Engines. *Aero Corner* 2020. <https://aerocorner.com>



com/blog/types-of-helicopter-engines/ (accessed February 2, 2021).

17. **Yildirim E, Altuntas O, Karakoc TH, Mahir N.** Sustainability Assessment in Piston-Prop Helicopter Engine. In: Karakoc TH, Ozerdem MB, Sogut MZ, Colpan CO, Altuntas O, Açıkcalp E, editors. Sustainable Aviation, Cham: Springer International Publishing; 2016, p. 115–23. https://doi.org/10.1007/978-3-319-34181-1_11.
18. **Altuntas O, Karakoc TH, Hepbasli A.** Exergoenvironmental analysis of piston-prop aircrafts. *IJEX* 2012;10:290. <https://doi.org/10.1504/IJEX.2012.046816>.
19. **Altuntas O, Karakoc TH, Hepbasli A.** Exergoeconomic Environmental Optimization of Piston-Prop Aircraft Engines. *International Journal of Green Energy* 2015;12:41–50. <https://doi.org/10.1080/15435075.2014.889009>.
20. **Koruyucu E.** Hibrit (piston prop-elektrik) tahrikli hafif genel maksat helikopterin enerji ve çevresel etkilerinin matematiksel incelenmesi. Yayımlanmamış Doktora Tezi. BİLEÇİK ŞEYH EDEBALİ ÜNİVERSİTESİ, 2018.
21. **Yildirim E, Altuntas O, Mahir N, Karakoc TH.** Energy, exergy analysis, and sustainability assessment of different engine powers for helicopter engines. *International Journal of Green Energy* 2017;14:1093–9. <https://doi.org/10.1080/15435075.2017.1358626>.
22. **Çengel YA, Boles MA.** Thermodynamics: an engineering approach. Eighth edition. New York: McGraw-Hill Education; 2015.
23. Theo Rindlisbacher, Lucien Chabbey. Guidance on the determination of helicopter emissions. Federal office of civil aviation (FOCA). Edition 2, Dec. 2015 reference: COO.2207.111.2.2015750” 2015.
24. **Topal A, Turan O.** Thermo-Efficiencies of a Tubular Combustor Under Different Inlet Conditions. *International Journal of Turbo & Jet-Engines* 2021;38:185–92. <https://doi.org/10.1515/tjj-2018-0005>.
25. SAE International. Procedure for the Analysis and Evaluation of Gaseous Emissions from Aircraft Engines. SAE International Gaseous Committee- E-31G; n.d. <https://doi.org/10.4271/ARP1533C>.
26. **Altuntas O, Karakoc TH, Hepbasli A.** Exergetic, exergoeconomic and sustainability assessments of piston-prop aircraft engines. *J Therm Sci Technol* 2012;32:133–43.
27. **Akdeniz HY, Balli O.** Effects of Bypass Ratio Change Trend on Performance in a Military Aircraft Turbofan Engine With Comparative Assessment. *Journal of Energy Resources Technology* 2021;143:120905. <https://doi.org/10.1115/1.4051297>.
28. **Akdeniz HY, Balli O.** Energetic and exergetic assessment of operating biofuel, hydrogen and conventional JP-8 in a J69 type of aircraft turbojet engine. *J Therm Anal Calorim* 2021. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10879-z>.
29. **Akdeniz HY, Balli O.** Impact of different fuel usages on thermodynamic performances of a high bypass turbofan engine used in commercial aircraft. *Energy* 2021:121745. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121745>.
30. **Caliskan H, Tat ME, Hepbasli A.** Performance assessment of an internal combustion engine at varying dead (reference) state temperatures. *Applied Thermal Engineering* 2009;29:3431–6. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.05.021>.

31. **Caliskan H.** Energy, exergy, environmental, enviroeconomic, exergoenvironmental (EXEN) and exergoenvironmental (EXENEC) analyses of solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2017;69:488–92. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.203>.
32. **Caliskan H.** Güneş Kollektörlerinin Enerji, Ekserji, Termoeekolojik, Sürdürülebilirlik, Termoeekonomik Ve Eksergoekonomik Analizleri. *Mühendis ve Makina* 2020;61:228–40. <https://doi.org/DOI : 10.46399/muhendismakina.774277>.
33. **Diñer İ, Rosen MA.** Exergy energy, environment, and sustainable development. Amsterdam; Boston: Elsevier; 2007.
34. Lycoming Part No. O9867 Overhauled HIO-360-D1A - Lycoming Engines - Air Power, Inc. n.d. <http://www.airpowerinc.com/productcart/pc/TLEngineDetail.asp?catID=33&prodID=10264> (accessed February 2, 2021).
35. **Ust Y, Sahin B, Kodal A, Akcay IH.** Ecological coefficient of performance analysis and optimization of an irreversible regenerative-Brayton heat engine. *Applied Energy* 2006;83:558–72. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2005.05.009>

Effect of Humidity and Temperature on Composite Plates With Different Fiber Orientations

Gurbet Örcen^{1*}, Engin Koyun²

ABSTRACT

In this study, the effect of humidity and temperature on glass fiber reinforced epoxy composite plates with different fiber reinforcement angles and different widths were experimentally investigated. For this purpose, composite plates with fiber reinforcement angles of $[0^\circ]_8$ and $[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ]_8$ were prepared in 25 mm and 30 mm dimensions and kept in hot water at 40 °C, 60 °C and 80 °C for 15, 30 and 45 days. At the end of the duration, the moisture absorption rates and strengths of the specimens were obtained. The obtained data were compared among themselves and with that of dry specimens. In addition, the morphologies of the specimens were visualized with the help of Scanning Electron Microscope (SEM) and the effects of humidity and temperature on failure behavior were examined. It was determined that the strength of the $[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ]_8$ fiber orientations specimens was lower than the strength values obtained from the $[0^\circ]_8$ fiber orientations specimens. It has been determined that when the waiting time and temperature increase, the matrix/fiber structure of the specimens deteriorates and the strength values decrease accordingly.

Keywords: Moisture effect, temperature effect, failure load, composite plate, SEM

Farklı Fiber Dizilimlerine Sahip Kompozit Levhalar Üzerinde Nem ve Sıcaklık Etkisi

ÖZ

Bu çalışmada, farklı fiber takviye açlarına ve farklı genişliklere sahip cam fiber takviyeli epoksi kompozit levhalar üzerinde nem ve sıcaklık etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla, fiber takviye açıları $[0^\circ]_8$ ve $[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ]_8$ olan kompozit levhalar, 25 mm ve 30 mm ölçülerinde hazırlanarak 40 °C, 60 °C ve 80 °C sıcak suyun içerisinde, 15 gün, 30 gün ve 45 gün süre ile bekletilmiştir. Süre bitiminde numunelerin nem emilim oranları ve dayanımları elde edilmiştir. Elde edilen verilerin kendi aralarında ve kuru numuneler ile karşılaştırılması yapılmıştır. Ayrıca Taramalı Elektronik Mikroskop (SEM) yardımıyla numunelerin morfolojileri görüntülenerek, nem ve sıcaklığın hasar davranışları üzerindeki etkileri incelenmiştir. $[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ]_8$ fiber dizilimli numunelerin dayanımının, $[0^\circ]_8$ fiber dizilimli numunelerden elde edilen dayanım değerlerinden daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bekleme süresi ve sıcaklık derecesi arttıkça zaman numunelerin matris/fiber yapısında bozulmaların meydana geldiği, buna bağlı olarak da dayanım değerlerinin düştüğü tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Nem etkisi, sıcaklık etkisi, hasar yükü, kompozit levha, SEM

* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 07.07.2021

Kabul/Accepted : 08.09.2021

¹ Department of Mechanical Engineering, Dicle University, Diyarbakır, Turkey
gurbetorcen@dicle.edu.tr, ORCID: 0000-0002-8329-8142

² Mechanical Engineering, Diyarbakır, Turkey, engin.kyun@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8685-731X

1. INTRODUCTION

Factors such as composite materials' suitable design flexibility, geometries, load carrying capacity, low cost, lightness, etc. place them in an advantageous position, hence, many application areas for composite materials are available in various sectors such as automotive, aviation, maritime and industry. On the other hand, environmental effects have a significant impact on composite materials. However, the results of these effects are not always clear and in order to clarify the results, researches are carried out continuously in the abovementioned area. For this reason, it is significant for engineering purposes to analyze the effects of humidity and temperature well and to make appropriate designs accordingly.

Many studies have been conducted in the literature [1-26, 28, 29] on the effect of humidity and temperature on composites. Mouzakis et al. [1] investigated the damage behavior of glass fiber/polyester composite materials exposed to different environmental conditions. They stated that the tensile strength of the specimens decreased as the parameters such as temperature, humidity, thermal aging, and waiting time increased. Leveque et al. [2] investigated the effects of thermal aging on polymer matrix composites. In the study, it was stated by the researchers that when carbon epoxy composites with different reinforcement angles were exposed to thermal aging under the effect of 120 °C constant temperature for the durations in between 720 and 4400 hours, mechanical properties of the composites changed. Tsotsis et al. [3] investigated the mechanical behavior of carbon/epoxy composite plates at 121 °C at different pressures (0.101, 0.345, 1.03, and 1.72 MPa) for 5000 hours. They determined that these processes affect mechanical behavior. Alcock et al. [4] investigated the change of mechanical performance of polypropylene tapes exposed to temperatures between -50 and 120 °C. They determined that increasing temperatures have a negative effect on the tensile strength. Dlouhy et al. [5] investigated the effects of thermal aging on fracture toughness and mechanical properties of glass matrix composite sheets reinforced with short carbon fibers. They determined that the thermal aging process reduces the tensile strength. Hu and Sun [6] investigated the creep behavior of carbon/epoxy composite plates thermally aged for certain durations of time. Belaid et al. [7] investigated the effects of thermal aging on the mechanical behavior of glass fiber/polyester composite plates. The specimens, which were kept at a constant temperature of 80 °C for 30, 60, 90, and 120 days, were subjected to the tensile test. They determined that an increase in the duration decreased the tensile strength. Sauder et al. [8] investigated the mechanical properties of various carbon fibers up to 2400 °C. In the study, they stated that Young's modulus decreased and the tensile strength increased as the temperature increases. Nikolaev et al. [9] investigated the effect of temperature in cycles ranging from 120 °C to 196 °C on specimens produced from CFRP. In particular, they obtained results on strength, linear expansion coefficient, and hardness on specimens produced with different winding angles. Eric et al. [10]; investigated the



changes in the mechanical properties of the porous-Matrix Ceramic composites kept at 1000 °C, 1100 °C, 1200 °C for 1000 hours. In their study, they stated that the elasticity modulus of the $[0^\circ/90^\circ]$ orientation composite slightly increased after a heat treatment at 1200 °C is being applied. Plecnik [11] investigated the strength of epoxy resin by performing compression, tensile, and shear tests at elevated temperatures. In the tests, he stated that the strength decreases at temperatures close to the glass transition temperature, and reaches a constant value when the glass transition temperature is exceeded. Parker [12]; investigated the strength of CFRP-CFRP joints bonded with epoxy adhesives and the effect of hot and humid environments on failure types. He stated that the strength of the joints decreased with increasing both the moisture absorption and the test temperature. Park et al. [13] investigated the effect of environmental conditions on the strength of single-acting lap joint carbon epoxy composites. They stated that high temperature and humidity increase the strength of the layer, yet decrease the adhesive shear strength. Soykok [14] investigated the behavior of single-lap glass fiber reinforced epoxy composites, obtained with the help of adhesive, in water at certain temperature ranges. He stated that water absorption reduces strength. Assarar et al. [15] studied the effect of water on the mechanical properties of flax and glass fiber reinforced composites. They stated that the tensile modulus of flax fiber composites was affected slightly as the immersion time increased, while the tensile strength of glass fiber reinforced composites decreased. Mariam et al. [16] investigated the effects of glass fiber reinforced epoxy composites, obtained as a single-lap through bonding, by keeping them in 50 °C hot water for 20, 40, 60, 80, 100, and 120 days. They stated that as the waiting time in hot water increases, their strength decreases. Budhe et al. [17] presented a study discussing the influence of many parameters in composite bonds. They stated the failure effect on the connections, especially when humidity and temperature applied together. Li et al. [18] demonstrated that the fiber structure of the unidirectional linen woven epoxy composite is disrupted by water absorption. Sang et al. [19] experimentally and analytically investigated the effects of hydrothermal aging on the mechanical strength of short carbon fiber reinforced polyamide 6 composites at 20 °C, 40 °C, and 60 °C. They stated that the tensile stress and elastic modulus decrease linearly as the temperature increases. Abdesselam et al. [20] investigated the effect of hydrothermal aging on glass fiber reinforced polyester composite morphology. SEM analyzes were conducted and observations were made in the microstructure. Zhang et al. [21] investigated the effect of hydrothermal conditions on composite structures using experimental and progressive failure analysis. They stated that hydrothermal environments did not affect the tensile properties of the composite plates at all, but significantly reduced their compression behavior. Dhakal et al. [22] experimentally investigated the effects of water absorption on mechanical properties of hemp fiber reinforced unsaturated polyester composites. They stated that the tensile and bending properties of the specimens decreased with the increase of moisture uptake percentage. Scida et al. [23] investigated the hydrothermal effect of

semi-unidirectional flax fiber reinforced epoxy (FFRE) composite on the mechanical properties and failure behavior. They stated that there were decreases in Young's modulus and tensile strength and were affected by the hydrothermal environment. Beura et al. [24] kept glass fiber reinforced epoxy composite specimens in distilled water and seawater. They stated that hydrothermal aging causes degradation in the material and a longer aging process causes further deterioration of the composite structure. Wang et al. [25] investigated the effects of hydrothermal conditions on the bending behavior of 3D-printed composites reinforced with continuous glass fibers. They stated that glass and matrix fractures occur in composite specimens with high glass density due to the hydrothermal effect. Mansouri et al. [26] investigated the effect of hydrothermal aging on the mechanical behavior of short fiber/woven composite laminates. In addition to the effect of temperature, water absorption was also reported to be effective in the degradation of composites.

The combined effect of humidity and temperature in composite plates and consequences of the combined effect create an important area of research. For this purpose, the combined effect of humidity and temperature on composite plates with two different reinforcement angles and two different widths was investigated. This effect has been investigated especially under close consecutive times and temperatures. Pursuing this further, failure loads and moisture absorption rates were obtained from the specimens kept at 40 °C, 60 °C, 80 °C for 15, 30 and 45 days. The data obtained at the end of the waiting period were compared among themselves and with that of the dry specimen results. In addition, the combined effect on the specimens was examined and compared thanks to the SEM images. These results are important in terms of creating a database for designs to be made in these intervals.

2. EXPERIMENTAL STUDY

2.1 Specimen Preparation and Experimental Stages

In this study, glass fiber epoxy composite plates with fiber orientations of $[0^\circ]_8$ and $[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$ were produced by İzoreel Composite Insulation Materials Industry

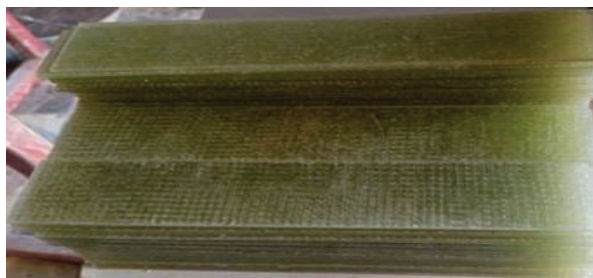


Figure 1. Specimen Preparation

and Trade Ltd. Co. Composite plates are produced with a thickness of 2 mm (t). The length (L) of the composite plates with both fiber orientations was taken as 175 mm and their widths were prepared as (w) 30 mm and (w) 25 mm (Figure 1). Three specimens were prepared from each geometry.

In addition, specimens were formed by gluing additional pieces of the same material using adhesive to prevent the formation of stress concentrations in the compression regions during in the tensile test. Composite specimens with both geometric dimensions and fiber orientations were placed in closed boilers filled with hot water in which thermostats adjusted to 40 °C, 60 °C, and 80 °C. Additional hangers were made for the placement of the specimens in the boilers (Figure 2). They were kept at each temperature for 15, 30, and 45 days.



Figure 2. Placing Specimens in a Thermostated Hot Water Boiler

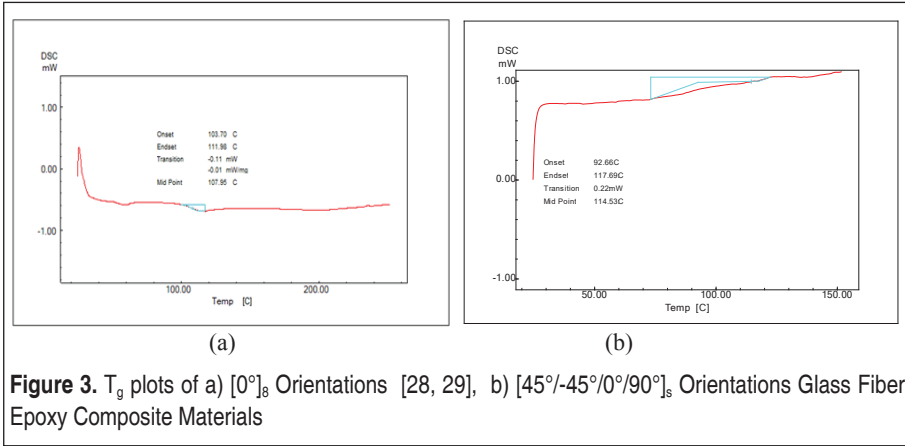
At the end of the test period, the excess water on the specimens removed from the water was wiped and their weights were measured with a precision balance with a capacity of 0.01 g. Moisture absorption rates of each specimen were calculated by comparing the measured weights with their weights before being placed in hot water. For the moisture absorption rate (M_t) of each specimen, the formulation we used is given below, and the initial weights of the specimens (w_o) are the measured weights after removal from the water (w_s) [27].

$$M_t = [(w_s - w_o) / w_o] \times 100 \quad (27)$$

The weighted specimens were then subjected to the tensile test. Tensile test was carried out thanks to Instron brand's 10 kN test device, and 1 mm/min tensile speed was realized.

2.2 Detection of Glass Transition Temperature

The composites used in the study are epoxy-containing materials. The mechanical



properties of these materials may vary at different temperatures, -especially below or above the glass transition temperature. Therefore, the glass transition temperatures (T_g) of the plates in both fiber orientations were determined by Differential Scanning Calorimetry (DSC) analysis in order to better understand the effects of humidity and temperature. This analysis was carried out with Shimadzu DSC-60 type device by increasing the temperature by 10 °C per minute. As a result of DSC analysis, T_g of glass fiber reinforced epoxy composite materials with $[0^\circ]_s$ and $[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$ fiber reinforcements were 107.95 °C, 114.53 °C respectively (Figure 3).

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Water Absorption

Since, three pieces of each specimen were produced, the average value was taken and the moisture absorption rates of the specimens were transferred to Table 1.

The greater the infiltration of water into the resin matrix, the greater the susceptibility to moisture absorption at higher temperatures [17]. In this study, the highest moisture absorption occurred in the specimens with the $[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$ orientation at 80 °C (Table 1). The moisture absorption rate of the specimens with a 30 mm width $[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$ orientation kept at 80 °C for 45 days; it was determined that the rate obtained from the specimen with the $[0^\circ]_s$ orientation was 158.5% higher than the that of specimen which has the same width and was kept at the same waiting time and the same temperature.

When the specimen with 25 mm width and $[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$ orientation is kept at 80 °C for 45 days, the moisture content obtained was calculated to be 73.89% higher than the that of $[0^\circ]_s$ orientation specimen stored under the same conditions.

Table 1. Moisture Absorption Rates (%) of Specimens According to Fiber Orientations

Waiting time		w:30 mm		w:25 mm	
		[0°] _s	[45°/-45°/0°/90°] _s	[0°] _s	[45°/-45°/0°/90°] _s
40 °C	15 days	0.36	1.42	0.73	1.58
	30 days	0.72	1.78	1.01	1.97
	45 days	0.91	2.08	1.11	2.10
60 °C	15 days	0.40	1.03	0.78	1.09
	30 days	0.63	1.36	1.23	1.84
	45 days	0.79	1.41	1.28	2.07
80 °C	15 days	1.23	3.15	1.92	3.07
	30 days	1.25	3.69	2.01	3.26
	45 days	1.47	3.80	2.03	3.53

It was determined that the moisture absorption rates increased when the previous temperature and waiting time were taken into account (Table 1).

3.2 Effect of Failure Loads

The values obtained as a result of the tensile test of glass fiber reinforced composite specimens and the standard deviation rates of these values are given in Table 2. Load-displacement plots obtained according to fiber orientations and specimen width are given in Figure 4 over the maximum waiting time (45 days). At the same time, the waiting times of composite specimens in hot water - with regard to their fiber orientations - and the load values obtained at the end of these periods are given in Figure 5 and Figure 6 comparatively.

The failure load value obtained from the specimens (30 mm) with [0°]_s and [45°/-

Table 2. Failure Load Values Obtained Depending on Temperature and Waiting Times

Environmental conditions		Dry	40 °C				60 °C			80 °C		
		Waiting time	0	15 days	30 days	45 days	15 days	30 days	45 days	15 days	30 days	45 days
w=30 mm	[0°] _s (N)	29816.25	27337	26276	26214.5	26068.8	25850.1	25120.5	24541	23477.5	22506.5	
	Std.Dev. (%)	3.17	5.11	5.36	3.04	4.07	6.09	4.51	5.66	4.88	4.56	
	[45°/-45°/0°/90°] _s (N)	12201	11437	10145.2	9891.45	10901.7	10084.8	9366.08	6759.82	6187.06	6044.7	
	Std.Dev. (%)	5.45	4.03	3.02	5.15	4.16	5.72	5.8	5.64	4.19	5.26	
w=25 mm	[0°] _s (N)	20041	19354	16282.9	15980.1	16444.1	14307.2	13881.3	11471.3	11019.2	10697.1	
	Std.Dev. (%)	2.52	4.2	4.6	4.23	5.26	5.96	4.35	5.45	5.21	5.03	
	[45°/-45°/0°/90°] _s (N)	10244.2	9388	9019.46	8739.3	9187.38	8983	8647	6075.93	5468.7	5355.25	
	Std.Dev. (%)	4.63	5.12	3.72	4.65	5.2	3.81	5.64	4.27	3.65	4.81	

45°/0°/90°_s orientations are kept at 80 °C for 45 days is found to be lower respectively by 14.14% and 38.38% compared to the failure loads values obtained from the specimens kept at 40 °C for 45 days (Table 2, Figure 5). Similarly, for the specimens with [0°]_s and [45°/-45°/0°/90°]_s orientations (30 mm); It was determined that the failure load values obtained when kept at 60 °C for 45 days decreased by 15.74% and 17.37%, respectively, compared to the failure load values obtained from the dry specimens (Table 2, Figure 5).

The failure load values obtained when the 25 mm wide specimens with the [0°]_s and [45°/-45°/0°/90°]_s fiber orientations are kept at 80 °C for 45 days is found to be decreased respectively by 33.06% and 38.72% compared to that of specimens that were kept at 40 °C for 45 days. (Table 2, Figure 6). For the specimens with [0°]_s and [45°/-45°/0°/90°]_s orientations and 25 mm width; It was determined that the failure load values obtained when kept at 60 °C for 45 days decreased by 30.73% and 15.59%, respectively, compared to the failure load values obtained from the dry specimens. (Table 2, Figure 6).

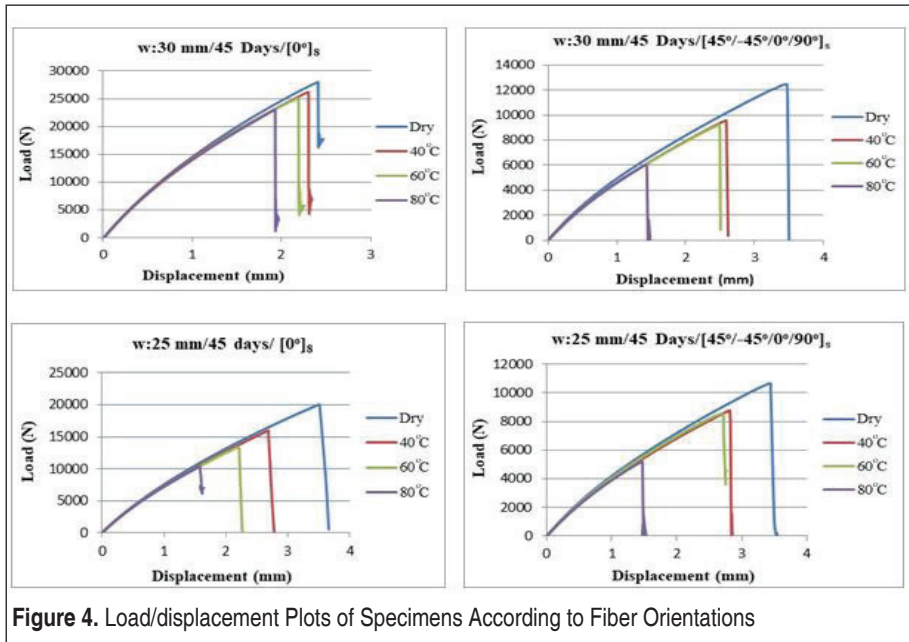


Figure 4. Load/displacement Plots of Specimens According to Fiber Orientations

The amount of free water absorbed increases due to immersion parameters (temperature, time). Indeed, temperature contributes significantly to the excitation of water molecules, hence, allows them to acquire an increasingly significant kinetic energy. This also allows the water to disperse into the specimen more easily and quickly [20]. Considering the water absorption, it is seen that with the increase of water uptake,

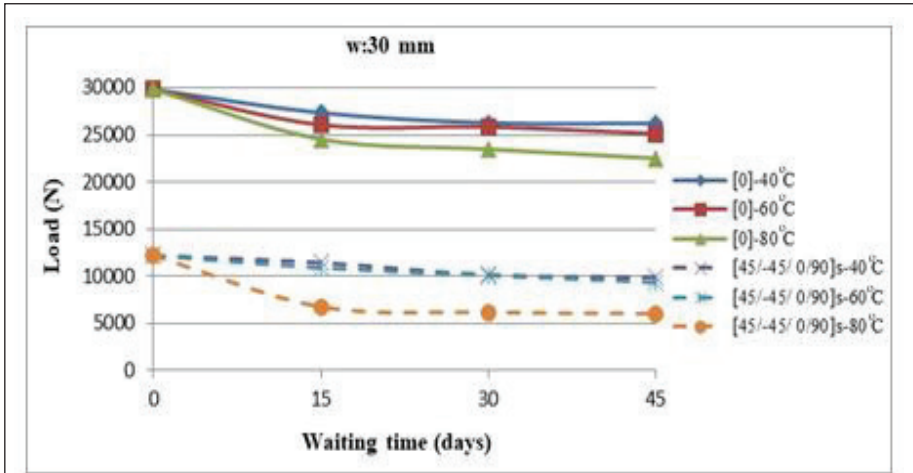


Figure 5. Waiting Time and Load Relationship Graph

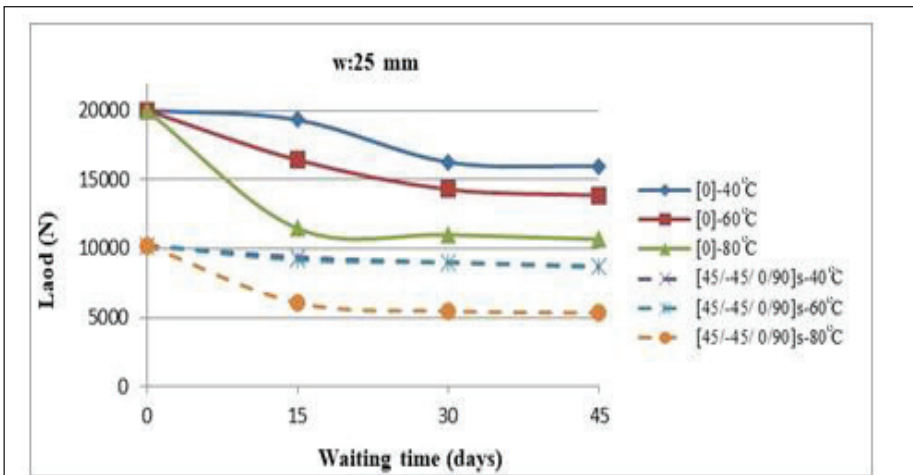


Figure 6. Waiting Time and Load Relationship Graph

the material strength tends to decrease significantly due to the plasticization of the epoxy [18]. In our study, the strength values of the composites with $[0]_8$ and $[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$ orientations decreased depending on the waiting time in hot water and the amount of moisture absorbed during these periods. Specimens with both orientations and widths presented a significant decrease at 80 °C (Table 2, Figure 5 and Figure 6).

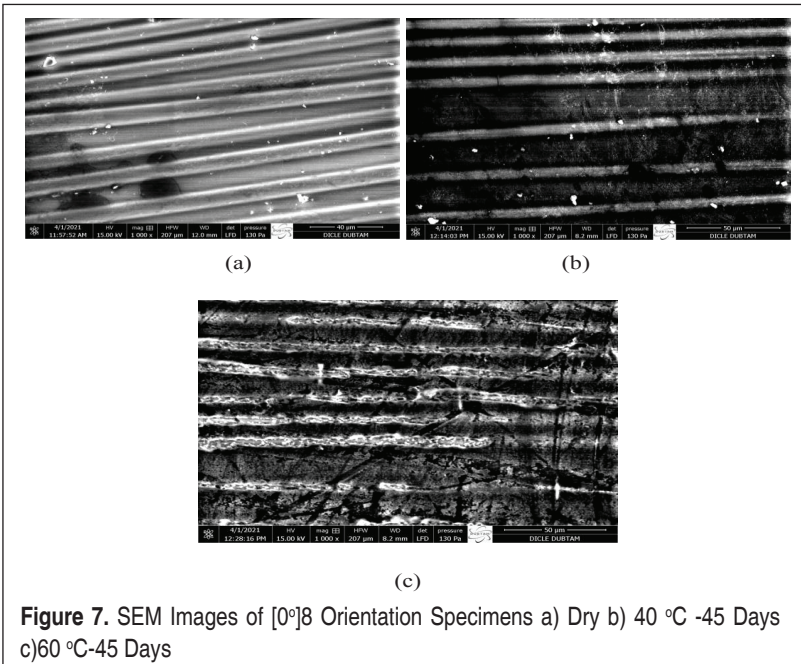
3.3 SEM Images

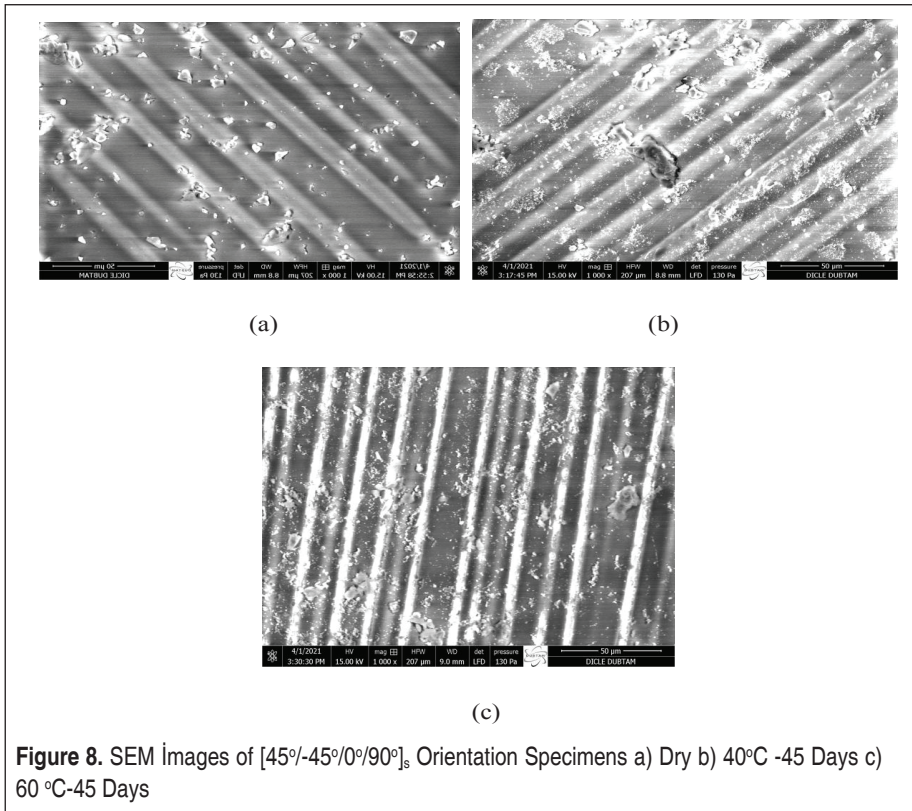
Increasing the time and temperature parameters also affect the morphological aspect

of the material [20]. In particular, these cause an active attack of water molecules on the interface and, as a result the separation of the bonds for the fiber and the matrix occurs [22]. Therefore, the images of the specimens were observed with the help of SEM for the evaluation of the hydrothermal failures. These images were captured using the Quanta FEG 250 type SEM device. SEM images were for captured for the specimens that were kept for a maximum of 45 days and have a width of 30 mm to observe the effects of temperature and humidity, and the abovementioned images are given in Figure 7, Figure 8, and Figure 9.

Figure 7 (b) shows SEM images of $[0^\circ]_8$ orientation specimens with 0.91% moisture absorption and 26214.5 N failure load when kept at 40 °C for 45 days. In Figure 7 (c), SEM images of $[0^\circ]_8$ orientation specimens with 0.79% moisture absorption and 25120.5 N failure load when kept at 60 °C are shown. In Figure 8 (b), SEM images of specimens with 9891.45 N failure load and $[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ]_8$ orientation that presents 2.08% moisture absorption when kept at 40 °C for 45 days are presented. In Figure 8 (c), SEM images of specimen - with the same orientation - that displayed 9366.08 N failure load due to the 1.41% moisture absorption rate when kept at 60 °C are presented.

In Figure 7 (b, c) and Figure 8 (b, c), deterioration stages that occur in the matrix or at the interface, depending on the temperature and humidity changes, are presented. This deterioration is more evident, especially for specimens with higher moisture ab-

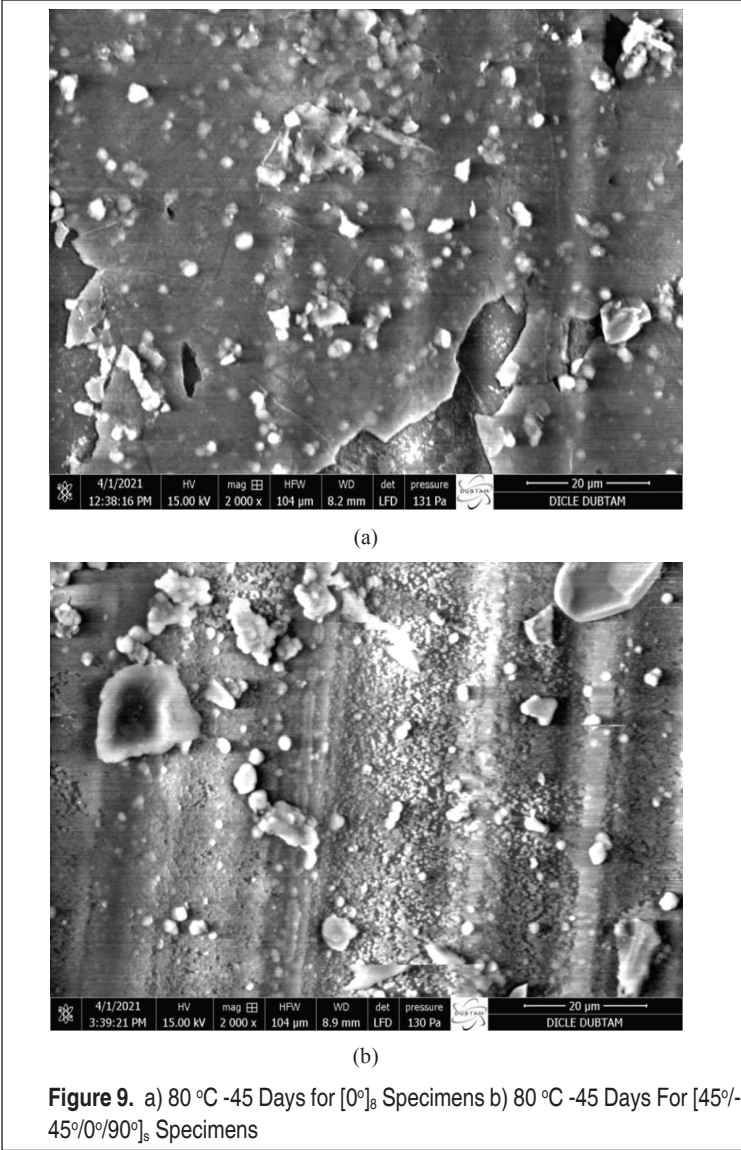




sorption rates and $[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$ orientation, in the SEM images and the images are presented in Figure 8 (b, c).

This clearly reveals that the low strengths are the result of humidity, and temperature, hence, humidity and temperature effects are more evident for the specimens that are kept at 80 °C for 45 days. In particular, it was observed that the deterioration in these specimens was clearer (Figure 9). Therefore, SEM images- with 2000x magnitude - of specimens in the given range and with two different fiber orientations are displayed in Figure 9 (a,b).

In Figure 9 (a), SEM images of the $[0^\circ]_s$ orientation specimen with a failure load of 22506.5 N and a moisture absorption rate of 1.47% at 80 °C are presented. In Figure 9 (b), SEM images of the $[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$ orientation specimen with 3.8% moisture absorption rate and 6044.7 N failure load at 80 °C is presented. In Figure 9 (a)' and Figure 9 (b), it is seen that particles in the form of fractures/cracks are formed in the matrix material along with the interfacial deterioration as a result of moisture rates. It is observed that the effects of humidity are especially greater on the resin, a new interface is formed and the resin incurred losses due to fractures (Figure 9a). It was



determined that the interface formed in Figure 9 (b) deteriorated more due to moisture absorption. These interface defects caused by moisture absorption weakened the stress transfer from the matrix to the fibers, hence, resulted a reduction in tensile strength [19].

Among the literature researches, especially in the studies conducted by the authors [14], [15], [22], [23], it was stated that the increase in the moisture absorption time



caused a decrease in the failure loads of the specimens. In this study, we obtained results that are compatible with the abovementioned situation. In this sense, it has been determined that the experimental results are compatible with the SEM images.

4. CONCLUSION

In this study, the combined effect of humidity and temperature on glass fiber reinforced epoxy composite specimens with fiber orientations $[0^\circ]_8$, $[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ]_8$ and widths of 30 mm, 25 mm was investigated with regard to different temperatures and waiting times. For this purpose, the specimens were kept in water at 40 °C, 60 °C and 80 °C for 15 days, 30 days and 45 days. The following results were obtained from the study.

- Depending on the fiber orientations, the moisture absorption rates were increased correspondingly with the temperature and waiting time, yet their strength decreased.
- The lowest strength with the highest absorption rate was obtained from the specimens kept in 80 °C water for 45 days.
- It was determined that the strength of the 25 mm wide dry specimen with the $[0^\circ]_8$ orientation was 95.63% higher than the strength of the specimen with the same width and $[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ]_8$ orientation.
- It was determined that the strength of the 30 mm wide dry specimen with the $[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ]_8$ orientation was 144.38% lower than the strength of the specimen in the same geometry and with the $[0^\circ]_8$ orientation.
- The $[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ]_8$ orientation specimens were affected most by humidity and temperature, hence, the resulting deterioration was more severe.
- It has also been determined by the SEM images that the combined effect of humidity and temperature has a significant effect on the deterioration of composites.
- Considering the parameters used in this study, the results of the experiments created a database that can be used as a reference for the composites investigated in the study.

ACKNOWLEDGEMENT

This study was carried out with the support of DUBAP, ENGINEERING.17.018.

REFERENCES

1. Mouzakis, D.E., Zoga, H., Galiotis, C. 2008. "Accelerated Environmental Ageing Study of Polyester/Glass Fiber Reinforced Composites (GFRPCs)", Composites: Part B, 39, 467–475.



2. **Leveque, D., Schieffer, A., Mavel, A., Maire, J.F.** 2005. "Analysis of How Thermal Aging Affects The Long-Term Mechanical Behavior and Strength of Polymer-Matrix Composites", *Composites Science and Technology* , 65 ,395-401.
3. **Tsotsis, T.K., Keller, S., Lee ,K., Bardis, J., Bish J.** 2001. "Aging of Polymeric Composite Specimens for 5000 Hours at Elevated Pressure and Temperature", *Composites Science and Technology*, 61, 75-86.
4. **Alcock, B., Cabrera, N.O., Barkoula, N.M., Reynolds, C.T., Govaert, L.E., Peijs, T.** 2007. "The Effect of Temperature and Strain Rate on the Mechanical Properties of Highly Oriented Polypropylene Tapes and All-Polypropylene Composites", *Composites Science and Technology*, 67, 2061-2070.
5. **Dlouhy, I., Chlup, Z., Boccaccini, D.N., Atiq, S., Boccaccini, A.R.** 2003. "Fracture Behaviour of Hybrid Glass Matrix Composites: Thermal Ageing Effects", *Composites: Part A*, 34, 1177-1185.
6. **Hu, H., Sun, C.T.** 2000. "The Characterization of Physical Aging in Polymeric Composites", *Composites Science and Technology* , 60 ,2693-2698.
7. **Belaid, S., Chabira, S.F., Bolland, S.P., Sebaa, M., Belhouideg, S.** 2015. "Thermal Aging Effect on The Mechanical Properties of Polyester Fiberglass Composites", *J. Mater. Environ. Sci.*, 10, 2795-2803.
8. **Sauder, C., Lamon, J., Paille, R.** 2004. The Tensile Behavior of Carbon Fibers at High Temperatures up to 2400 OC, *Carbon*, 42 , 715-725.
9. **Nikolaev, V.P., Myshenkova, E.V., Pichugin, V.S., Sinitsyn, E.N., Khoroshev, A. N.** 2014. "Temperature Effect on the Mechanical Properties of Composite Materials", *Inorganic Materials*, 50, 15, 1511-1513.
10. **Eric, A.V.C, Fujita, H., Yang, J.Y., Zok, F.W.** 2002. "Effects of Thermal Aging on the Mechanical Properties of a Porous-Matrix Ceramic Composite", *J. Am. Ceram. Soc.*, 85,3, 595-602.
11. **Plecnik, J.** 1980. "Temperature Effects on Epoxy Adhesives", *Journal of Structural Division*, 106(1), 99-113.
12. **Parker B.M.** 1986. "Some effects of moisture on adhesive-bonded CFRP-CFRP joints", *Composite Structures Volume 6, Issues 1-3*, 123-139.
13. **Park Y.B., Song M.G., Kim J.J., Kweon J.H., Choi J.H.** 2010." Strength of carbon/epoxy composite single-lap bonded joints in various environmental conditions", *Composite Structures* 92 , 2173-2180.
14. **Soykok I.F.** 2015. "Degradation of single lap adhesively bonded composite joints due to hot water ageing." *The Journal of Adhesion*.<http://dx.doi.org/10.1080/00218464.2015.1076340>
15. **Assarar, M., Scida, D., El Mahi, A., Poilâne, C., Ayad, R.** 2011. "Influence of water ageing on mechanical properties and damage events of two reinforced composite materials: Flax-fibres and glass-fibres", *Materials and Design* 32, 788-795.
16. **Mariam, M., Afendi, M., Abdul Majid, M.S., Ridzuan, M.J.M., Azmi, A.I., Sultan,**



- M.T.H. 2019. "Influence of hygrothermal ageing on the mechanical properties of an adhesively bonded joint with different adherends", *Composites Part B: Engineering*, 165, pp. 572-585.
17. **Budhe, S., Banea, M.D., Barros, S., Silva, L.F.M.** 2017. "An updated review of adhesively bonded joints in composite materials", *International Journal of Adhesion & Adhesives* 72, 30-42.
 18. **Li, Y., Xue, B.** 2016. "Hydrothermal ageing mechanisms of unidirectional flax fabric reinforced epoxy composites", *Polymer Degradation and Stability* 126, 144-158.
 19. **Sang, L., Wang, C., Wang, Y., Hou, W.** 2018. "Effects of hydrothermal aging on moisture absorption and property prediction of short carbon fiber reinforced polyamide 6 composites", *Composites Part B* 153, 306-314.
 20. **Abdessalem, A., Tamboura, S., Fitoussi, J., Daly, H.B., Tcharkhtchi, A. Meraghni, F.** 2021. "Microstructure investigation of hydrothermal damage of aged SMC composites using Micro-computed tomography and scanning electron microscopy", *Engineering Failure Analysis* 121, 105177.
 21. **Zhang, J., Qi, D., Zhou, L., Zhao, L., Hu, N.** 2015. "A progressive failure analysis model for composite structures in hygrothermal environments", *Composite Structures* 133, 331-342.
 22. **Dhakal, H. N., Zhang, Z.Y., Richardson, M.O.W.** 2007. "Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites", *Composites Science and Technology* 67, 1674-1683.
 23. **Scida, D., Assarar, M., Poilâne, C., Ayad, R.** 2013. "Influence of hygrothermal ageing on the damage mechanisms of flax-fibre reinforced epoxy composite", *Composites: Part B*, 48,51-58.
 24. **Beura, S., Chakraverty, A.P., Thatoi, D.N., Mohanty, U.K., Mohapatra, M.** 2021. "Failure modes in GFRP composites assessed with the aid of SEM fractographs", *Materials Today: Proceedings* (41), 172-179.
 25. **Wang, K., Chen, Y., Long, H., Baghani, M., Rao, Y., Peng, Y.** 2021. "Hygrothermal aging effects on the mechanical properties of 3D printed composites with different stacking sequence of continuous glass fiber layers", *Polymer Testing*, In Press, Journal Pre-proof.
 26. **Mansouri, L., Djebbar, A., Khatir, S., Abdel Wahab, M.** 2019. "Effect of hygrothermal aging in distilled and saline water on the mechanical behaviour of mixed short fibre/woven composites", *Composite Structures*, 207, 816-825.
 27. **ASTM D5229/D5229M-14.** Standard Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials, 2004.
 28. **Örçen, G., Turan K., Bingöl, S.** 2020. "Mechanical Properties of Composite Plates at Different Conditions", *European Journal of Technique*, Volume 10, Issue 1, Pages: 13-24.
 29. **Örçen G, Koyun E.** 2021. "The Effects of Environmental Conditions on Single-Lap Adhesively Bonded Composites". *DUJE* ;12:263-273.

2021 YILI MAKALE DİZİNİ

TMMOB Makina Mühendisleri Odası tarafından ülke sanayisinin, toplumun, Odamıza üye olan meslek disiplinlerinin ve meslektaşlarımızın ihtiyaçlarını karşılamak üzere 1957'den bugüne değeri yayımlanan Mühendis ve Makina Dergisi'nde 2021 yılında yer alan makalelerin dizinini siz değerli okurlarımızla paylaşıyoruz. 3 aylık periyotlar ile yayımlanan, ülkemizin konusundaki önde gelen dergilerinden olan Mühendis ve Makina, yeni teknolojileri, bilimsel araştırmaları ve inceleme konularını ve mühendisliğe ilişkin birikimleri saygılarına taşıyarak Oda üyelerine ve ilgili kesimlere bu birikimlerini ulaştırma çabasıdadır. Dergimizde üniversiteler ve bilim-araştırma kurumlarından gelen makalelerin yanı sıra, çeşitli sektörlerden gelen uygulamaya yönelik makalelere de yer verilmektedir.

2021 yılında dergimize makale gönderen bütün yazarlara teşekkür eder, 2022 yılında da değerli katkılarını bekleriz.

OCAK-MART 2021 702. SAYI

Ekleme İmalatla Üretilen İşlevsel Olarak Derecelendirilmiş Metal Yapılar

Metal Additive Manufactured Functionally Graded Structures
Orhan GÜLCAN, Uğur ŞİMŞEK, Barış KAVAS

Çatı Tipi Paket Klima Cihazı için Kondenser Tarafında Evaporatif Soğutma Uygulaması

Investigation of "Evaporative Pad" Application on the Condenser
Nisa ÖZÇAKIR, Hüseyin GÜNERHAN

Çift Ağlı Hidrojellerin Basma Yükü Altında Gerilme Gevşemesi Davranışı

Stress Relaxation Behavior of Double Network Hydrogels under Compressive Loading
Necmi DÜŞÜNCELİ

TIG Kaynağı Yapılan Alüminyum Bir Sac Parçanın Çarpılma Miktarının İncelenmesi

Investigation of the Impact Amount of an Aluminum Sheet With TIG Welding
Tugay KARAGÖZ

Güneş Enerjisi Depolama Malzemelerinin Bugünü, Yarını ve Geleceği

Today, Tomorrow, and the Future of Energy Storage Materials for Solar Energy
Dawar ALİ, Mehmet Fatih KAYA, Levent ŞENDOĞDULAR

Yenilikçi Ürün Tasarımında Fonksiyon Analizi ve Budama Yöntemi

Function Analysis and Trimming Method in Innovative Product Design
Ali KILIÇ, Orhan ERSÜRMEİLİ, Bahattin DABANIYASTI, Sadettin KAPUCU

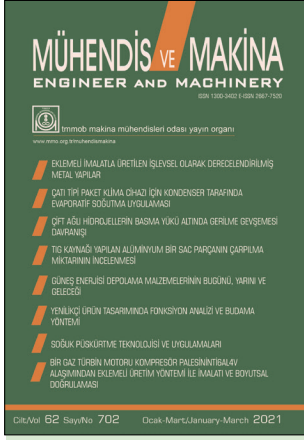
Soğuk Püskürtme Teknolojisi ve Uygulamaları

Cold Spray Technology and its Applications
Elif TEKİN, Serden UYUM, Buğra KARAHAN, Kadir Cihan TEKİN, Uğur MALAYOĞLU

Bir Gaz Türbin Motoru Kompresör Palesinin Ti6Al4V Alaşımından Ekleme Üretim Yöntemi ile İmalatı ve Boyutsal Doğrulaması

Manufacture and Dimensional Verification of a Gas Turbine Engine Compressor Blade Produced via Additive Manufacturing Method using Ti6Al4V
Tamer SARAÇYAKUPOĞLU

JANUARY-MARCH 2021 NO: 702





NİSAN-HAZİRAN 2021 703. SAYI

Hidrolik Pres Tasarımında Balans (Dengeleme) Silindiri Kullanarak Hidrolik Sistemin İyileştirilmesi

Improving The Hydraulic System by Using Counterbalance Cylinder in Hydraulic Press Design
Murat BEYPARS, Burak BEKİL

Yeşil Çatı Uygulamasının Örnek Bir Bina İçin Isıtma İhtiyacı ve Çevre Emisyonlarına Etkisinin İncelenmesi

Investigation of the Effect of Green Roof Application on Heating Requirement and Environmental Emissions for a Sample Building
Doğan Burak SAYDAM, Coşkun ÖZALP,
Ertaç HÜRDOĞAN, Cemre POLAT, Enes KAVUN

Dizel İçten Yanmalı Motorlarda Silindir İçindeki Hava Hareketlerinin İncelenmesi ve Ölçüm Metodlarının Karşılaştırılması

Investigation of Air Movement in Cylinder in Diesel Internal Combustion Engines and Comparison of Measurement Methods
Burak YELKEN, İsmail Hakkı SAVCI, Zafer DÜLGER

A CFD Assisted Study: Investigation of the Transformation of A Recuperative Furnace to Regenerative Furnace For Industrial Aluminium Melting

CFD Destekli Bir Çalışma: Endüstriyel Uygulamalarda Kullanılan Reküperatif Alüminyum Ergitme Fırınlarının Rejeneratif Sisteme Dönüştürülmesinin İncelenmesi
Ömür BOZKURT, Mehmet Fatih KAYA

Türkiye'nin Farklı İklim Koşullarında Isıl Konfor Sıcaklıklarına Bağlı Olarak Konutların Enerji Performanslarının Değerlendirilmesi

Assessment Of Building Energy Performance Depending On Thermal Comfort Temperatures At Turkey's Different Climate Conditions
Ebru HANCIOĞLU KUZGUNKAYA,
Nurdan YILDIRIM, Gulden Gokçen AKKURT

Asansör Kabini ve Yürüyen Merdiven El Bantlarının Yüzey Dezenfeksiyonu; Ultraviyole Işınlar

Surface Disinfection of Lift Car and Escalator Handrails; Ultravioletated Rays
Aydın ARAT, Hasan Basri ERCAN, Adem DOĞAN, Serdar TURAN,
Hasan KÜTÜK

Taguchi Yöntemleri Kullanılarak Frezeleme İşleminde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin Araştırılması

Investigation of the Effect of Cutting Parameters on Surface Roughness During Milling Operation Using Taguchi Methods
Ali MAMEDOV

Farklı Dış Ortam Sıcaklıklarında Kullanılan Bir Termoelektrik Jeneratör Sisteminin Isı Alıcısının Optimizasyonu

Optimization of the Heat Sink of a Thermoelectric Generator System Used at Different Outdoor Temperatures
Ali GÜRCAN, Gülay YAKAR

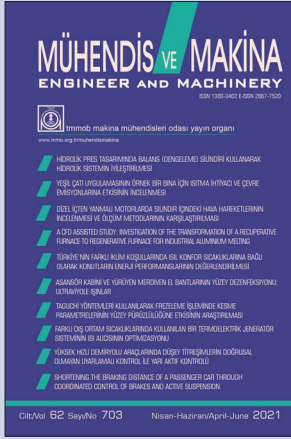
Yüksek Hızlı Demiryolu Araçlarında Düşey Titreşimlerin Doğrusal Olmayan Uyarlamalı Kontrol ile Yarı Aktif Kontrolü

Nonlinear Adaptive Control of High-Speed Railway Vehicle Vibrations by Magnetorheological Damper
Muzaffer METİN, Fırat Can YILMAZ

Koordine Fren - Aktif Süspansiyon Kontrolü ile Aracın Frenleme Mesafesinin Kısaltılması

Shortening the Braking Distance of a Passenger Car through Coordinated Control of Brakes and Active Suspension
Kerem BAYAR

APRIL-JUNE 2021 NO: 703





TEMMUZ-EYLÜL 2021 704. SAYI

Ev Tipi Bir Buzdolabının Analitik İncelemesi ve Tasarım Parametrelerinin Elde Edilmesi

Analytical Examination of a Household Refrigerator and Obtaining Design Parameters

Merve AKKAYA, Ünal ÇAMDALI

İmplant-Çimento Arayüzeyinin Kesme Dayanımını Etkileyen Faktörlerin İncelenmesi

Investigation of Factors Affecting Shear Strength of Implant-Cement Interface

Sait KÖÇAK, Tezcan ŞEKERCIOĞLU

Mardin İlinin Hayvansal Gübre Kaynaklı Biyogaz Potansiyelinin Belirlenmesi

Determination of Biogas Potential from Animal Manure in Mardin Province

Süleyman ATILGAN, Adem YILMAZ

COVID19 Pandemisinin Havacılık Sektörü Üzerine Etkileri

The Effect of COVID19 Pandemic on Aviation Industry

Berke HOPANCI, Hamza AKDENİZ, Özlem ŞAHİN

Farklı Mesafeli ve Üçlü-Çapraz Yerleştirilmiş Çatısız Binalar Etrafındaki Akış Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi

Experimental Research of Flow Characteristics Around Buildings without Roof Placed Different Distance and Triple-Diagonal

Deniz GÖLBAŞI, Ertan BUYRUK, Koray KARABULUT

Performans Ölçütlerine Dayalı Bakım Yönetim Modülünün İş Süreçleri Yönetimi Yaklaşımı ile Modellenmesi

Modelling Performance Criteria Based Maintenance Management Module by Using Business Process Management Approach

Leyla Özgür POLAT, Aşkın GÜNGÖR

PLM Kullanımı ile Ürün Geliştirme Sürecinde Etkin Bilgi Akışının Sağlanması

Ensuring Effective Information Flow by Using PLM in Product Development Process

Gamze SARI, Sami SAYER

Üniversite Binalarının Enerji Performans Değerlendirmesi: MCBÜ Köprübaşı Meslek Yüksekokulu Örneği

Energy Performance Evaluation of University Buildings: MCBU Köprübaşı Vocational School Example

Ali Murat ATEŞ, Özer KESTANE, Koray ÜLGEN

Manyetik Levitasyon Sistemleri İçin Ağırlıklı Geometrik Merkez Yöntemi ile PI-PD Kontrolcü Tasarımı

PI-PD Controller Design for Magnetic Levitation Systems Via Weighted Geometrical Center Method

Cem ONAT, Mahmut DASKİN, Abdullah TURAN, Ömerülfaruk ÖZGÜVEN

Endüstri 4.0 ve 3 Boyutlu Yazıcıların Karşılaştırılması

Industry 4.0 and Comparison Of 3D Printers

Ahmet Fatih YURAN, İbrahim YAVUZ

Yük Kapasitesi Şase Yapısından Bağımsız Bir Otonom Mobil Robot Tasarımı ve Dayanım Analizi

Design and Strength Analysis of an Autonomous Mobile Robot Chassis Structure Independent of the Load Capacity

Alaattin E. GÜRKAL, Alpaslan Burak İNNER, Eylül ÖZER, Ali KİBAR

TiG Kaynağı ile Gerçekleştirilen Sert Dolgu Sırasında Oluşan Artık Gerilme ve Deformasyonların Modellenmesi

Modeling of Residual Stresses and Deformations During Hardfacing by Gtao

Atilla SAVAŞ





EKİM-ARALIK 2021 705. SAYI

Advisor Programıyla Hibrit Elektrikli Taşıtlarda Batarya Analizi
Battery Analysis in Hybrid Electric Vehicles With ADVISOR Program
Şule KUŞDOĞAN, Büşra ÖZEN

Santrifüj Pompa Tasarımında Sayısal Yöntemlerin (HAD/CFD) Kullanımı
The Usage of Numerical Methods (HAD/CFD) in The Design of Centrifugal Pumps
İsmail OVALI, Öner ATALAY, Ege YILMAZ

Sandviç Kompozit ve Metal Plakalar ile Oluşturulan Tek Bindirmeli Yapıştırma Bağlantılarının Mekanik Özelliklerinin Deneysel ve Nümerik Yaklaşım ile Belirlenmesi
Determination of Mechanical Properties of Single Lap Joints Having Sandwich Composite and Metal Adherend by Experimental and Numerical Approach
Engin ERBAYRAK

Sürtünme Karıştırma Prosesi ile Elde Edilen Yüzey Metal Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerini Geliştiren Çoklu Mekanizmalar
Multiple Mechanisms Improving The Mechanical Properties Of Surface Metal Matrix Composites Obtained By Friction Stir Processing
Gökçe Mehmet GENÇER

Farklı Saçak Tiplerine Sahip Yarı Küresel Çatılar Üzerinde Basınç Dağılımlarının İncelenmesi
Investigation of Pressure Distributions on Hemispherical Roofs With Different Eave Types
Tekmil CÜREBAL, Aleya AĞIRMAN KALCA, Yücel ÖZMEN

Modeling Study and Performance Investigation of a Thermoelectric Refrigerator
Termoelektrik Soğutucunun Modelleme Çalışması ve Performans İncelmesi
Haydar KEPEKÇİ, Ergin KOSA, Cüneyt EZGİ

Biyokömür-Soma Kömür Karışımlarının Oksijenleme Koşullarında Birlikte Yakulmasının Deneysel İncelenmesi ve Emisyonlar Üzerindeki Etkileri
Experimental Investigation of Co-combustion of Biocoal with Soma Lignite in Air and The Oxygen-enriched Air Atmospheres and Its Effects on Emissions
Babak KEİVANİ, Hayati OLGUN, Aysel T. ATIMTAY

Demiryolu Taşıtlarında Kullanılan Fren Disklerinin Isı ve Malzeme Yönünden Değerlendirilmesi
Assessment of Brake Discs Used Railway Vehicles in terms of Heat and Material
Beytullah BAŞEĞMEZ

SiCP/A356 Kompozitinin Aşınma Direncine Ultrasonik Dövme İşleminin ve Yaşlandırma Sertleşmesinin Etkilerinin Karşılaştırılması
Comparison Of The Effects Of Ultrasonic Impact Treatment and Age Hardening On Wear Resistance Of SiCp/A356 Composite
Gökçe Mehmet GENÇER, Coşkun YOLCU, Fatih KAHRAMAN, Melih BELEVİ

Kısıtlı Mühendislik Problemlerinin Karşılaştırmalı Ağırlık ve Maliyet Optimizasyonu
Comparative Weight and Cost Optimization of Constrained Engineering Problems
Aybike ÖZYÜKSEL ÇİFTÇİOĞLU

Yangın Söndürme İçin Alternatif Bir Tasarım: Akıllı Yangın Söndürme Bombası
An Alternative Design for Fire Extinguishing: Smart Fire Extinguishing Bomb
Murat TOPTAŞ, Mehmet YILMAZ

Helikopterlerde Kullanılan Bir Piston-Prop Motorun Enerji, Ekserji, Termoeolojik, Sürdürülebilirlik, Termoekonomik ve Eksergoekonomik Performans Analizleri
Energy, Exergy, Thermoeological, Sustainability, Thermoeconomic and Exergoeconomic Performance Analyses of A Piston-Prop Engine Used in Helicopters
Halil Yalçın AKDENİZ

Effect of Humidity and Temperature on Composite Plates With Different Fiber Orientations
Farklı Fiber Düzümlerine Sahip Kompozit Levhalar Üzerinde Nem ve Sıcaklık Etkisi
Gurbet ÖRÇEN, Engin KOYUN



OCTOBER-DECEMBER 2021 NO: 705



2021 YILINDA DERGİMİZ İÇİN MAKALE DEĞERLENDİREN HAKEMLER

Abdullah Engin Özçelik

Abdullah Sert

Adem Yılmaz

Ahmet Çağlar

Ahmet Mavi

Ahmet Özel

Ahmet Özsoy

Ali Çınar

Ali Kaya Gür

Alper Keleşoğlu

Altan Dombaycı

Andaç Batur Çolak

Apdulmutalip Şahinaslan

Atakan Tantekin

Atilla Bıyıkoğlu

Atilla Gencer Devocioğlu

Aybike Özyüksel Çiftçioğlu

Aykut Fatih Güven

Ayşegül Abuşoğlu

Babak Safaei

Banu Köz

Barış Gürel

Barış Keçeci

Batıkan Erdem Demir

Bedri Tuc

Berkant Dindar

Bilge Albayrak Çeper

Bilge Demir

Birol Şahin

Cahit Gürlek

Cemalettin Aygün

Ceyhun Köse

Selçuk Üniversitesi

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Batman Üniversitesi

Akdeniz Üniversitesi

Gazi Üniversitesi

Sakarya Üniversitesi

Süleyman Demirel Üniversitesi

Kocaeli Üniversitesi

Fırat Üniversitesi

Sistem Teknik Sanayi Fırınları A.Ş.

Pamukkale Üniversitesi

Botaş International A.Ş.

İnönü Üniversitesi

Atatürk Üniversitesi

Gazi Üniversitesi

Dicle Üniversitesi

Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Yalova Üniversitesi

İstanbul Teknik Üniversitesi

Doğu Akdeniz Üniversitesi

Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi

Süleyman Demirel Üniversitesi

Başkent Üniversitesi

Karabük Üniversitesi

Başkent Üniversitesi

Gaziosmanpaşa Üniversitesi

Erciyes Üniversitesi

Karabük Üniversitesi

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi

Cumhuriyet Üniversitesi

Karadeniz Teknik Üniversitesi

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi



Cihan Atar	Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi
Çağlar Üçler	Özyeğin Üniversitesi
Çisil Timuralp	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Deniz Ekmekçioğlu	Onokuz Mayıs Üniversitesi
Dilek Dursun	Esenyurt Üniversitesi
Dilşad Engin	Ege Üniversitesi
Doğan Acar	Karadeniz Teknik Üniversitesi
Doğan Engin Alnak	Sivas Cumhuriyet Üniversitesi
Duygu Sofuoğlu	Tarsus Üniversitesi
Edip Çetkin	Batman Üniversitesi
Edip Taşkesen	Şırnak Üniversitesi
Engin Gedik	Karabük Üniversitesi
Erdal Aydemir	Süleyman Demirel Üniversitesi
Erdal Karadeniz	Sakarya Üniversitesi
Erdinç Kaluç	Kocaeli Üniversitesi
Erdoğan Güner	Bayburt Üniversitesi
Erhan Pulat	Uludağ Üniversitesi
Erkan Bahçe	İnönü Üniversitesi
Erol Gültekin	Türk Hava Kurumu Üniversitesi
Erol Solmaz	Uludağ Üniversitesi
Ersin Bahçeci	İskenderun Teknik Üniversitesi
Ersin Haydaraslan	Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi
Eylem Yılmaz Ulu	Pamukkale Üniversitesi
Fatih Çolak	Uşak Üniversitesi
Fatma Nazlı Özsolak	Erciyes Üniversitesi
Ferhat Kılınç	Cumhuriyet Üniversitesi
Ferid Köstekçi	Hitit Üniversitesi
Feridun Karakoç	Dumlupınar Üniversitesi
Gökçen Akgün	Iğdır Üniversitesi
Gökhan Coşkun	Sakarya Üniversitesi
Gülay Yakar	Pamukkale Üniversitesi
Gülçin Özcan	Üsküdar Üniversitesi
Gürcan Atakök	Marmara Üniversitesi
Hakan Çalışkan	Uşak Üniversitesi
Hakan Karakaya	Batman Üniversitesi
Hakan Köylü	Kocaeli Üniversitesi
Halil Koruca	Süleyman Demirel Üniversitesi
İbrahim Yavuz	Afyon Kocatepe Üniversitesi



İsmet Çelik	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi
M. Emin Erdem	Hitit Üniversitesi
Mehmet İsmail Sarı	Gazi Üniversitesi
Mehmet Özgün Korukçu	Uludağ Üniversitesi
Meriç H. Gökdalay	Türk Hava Kurumu Üniversitesi
Muhammed Ordu	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi
Murat Altın	Gazi Üniversitesi
Murat Kıyak	Yıldız Teknik Üniversitesi
Mustafa Serdar Genç	Erciyes Üniversitesi
Muzaffer Metin	Yıldız Teknik Üniversitesi
Necmi Düşünceli	Aksaray Üniversitesi
Nejla Dikmen Özkan	Namık Kemal Üniversitesi
Neslihan Aydın	Uludağ Üniversitesi
Oğuz Girit	Marmara Üniversitesi
Oğuzhan Der	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi
Orhan Gülcan	General Electric Aviation
Öner Atalay	Pamukkale Üniversitesi
Özcan Mutlu	Pamukkale Üniversitesi
Özgür Ballı	1.'nci Hava Bakım Fabrika Müdürlüğü
Seda Hezer	Konya Teknik Üniversitesi
Serkan Apay	Düzce Üniversitesi
Sezan Orak	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Sezgin Ersoy	Marmara Üniversitesi
Süleyman Çınar Çağan	Mersin Üniversitesi
Tezcan Şekercioğlu	Pamukkale Üniversitesi
Utkucan Şahin	Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi
Ümit Ünver	Yalova Üniversitesi
Volkan Kiriççi	Eskişehir Teknik Üniversitesi
Yusuf Özbakış	Düzce Üniversitesi
Yusuf Şahin	Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi

2021 yılında Mühendis ve Makina dergisine katkılarından dolayı uzmanlarımıza teşekkür ederiz.

MÜHENDİS VE MAKİNA DERGİSİ YAZIM ESASLARI

Mühendis ve Makina dergisi, TMMOB Makina Mühendisleri Odası tarafından, ülke sanayisinin, toplumun, Odamıza üye meslek disiplinlerinin ve meslektaşlarımızın bilimsel, teknik ve mesleki konularda bilgi gereksinimlerini karşılamak, bilimsel ve teknik yönde gelişimlerine katkıda bulunmak üzere düzenli 3 aylık periyotlarla yayımlanan mesleki teknik bir yayın organıdır. "Mühendis ve Makina Dergisine" makina mühendisliği alanında aşağıda nitelikleri açıklanmış yazılar Türkçe ve İngilizce olarak kabul edilmektedir.

Araştırma Makalesi: Orijinal bir araştırmayı bulgu ve sonuçlarıyla yansıtan yazılardır. Çalışmanın bilime katkısı olmalıdır.

Tarama Makalesi: Yeterli sayıda bilimsel makaleyi tarayıp, konuyu bugünkü bilgi ve teknoloji düzeyinde özetleyen, değerlendirme yapan ve bulguları karşılaştırarak yorumlayan yazılardır.

SUNUŞ FORMATI

1. Yazı tümüyle (metin, çizelgeler, denklemler, çizimler) bilgisayarda düzenlenmeli ve baskıya hazır biçimde teslim edilmelidir. Yazı, A4 (210x297 mm) boyutlu kağıda, Word ortamında, 10 punto (ana başlık 15 punto) Times New Roman font kullanılarak, bir aralıkla yazılmalıdır.
2. Çizimler (şekiller) ve çizelgelerle (tablolar) birlikte, makaleler 25 sayfadan, kısa bildiriler 4 sayfadan daha uzun olmamalıdır.
3. Yazı, Online Makale Yönetim Sistemi (OMYS) üzerinden gerekli kayıtlar oluşturularak gönderilmelidir. Yüklenen makale, "makale adının ilk 2 ya da 3 kelimesi" şeklinde adlandırılmalıdır. OMYS'ye yüklenen makalede yazar bilgileri bulunmamalı, yazar bilgileri için ayrıca bir kapak sayfası oluşturularak sisteme yüklenmelidir. Kapakta makale adı ve yazar iletişim bilgileri (adı soyadı, adresi, e-postası, yazara ait ORCID* bilgisi varsa akademik unvanı) yer almalıdır.
4. Metin yalın bir dil ve anlatımla yazılmalı, Türkçe yazım kurallarına uygun olmalı, üçüncü tekil şahıs ve edilgen fiiller kullanılmalı, devrik cümleler içermemelidir.
5. Başlık mümkün olduğunca kısa (en çok 100 harf) ve açık olmalı, içeriği yansıtabilmelidir. İngilizce başlıktaki kelimeler ilk harfleri büyük ve gramer kurallarına uygun şekilde yazılmalıdır.
6. Bölümler (i) öz ve anahtar kelimeler, (ii) abstract ve keywords (İngilizce başlık, öz ve anahtar kelimeler), (iii) ana metin, (iv) semboller, (v) teşekkür (gerekliyse) ve (vi) kaynaklar sırası içinde düzenlenmelidir.
7. Öz (ve abstract) çalışmanın amacını, kapsamını, yöntemini ve ulaşılan sonuçları kısaca tanımlamalı ve 100 kelimeyi aşmamalıdır. En az üç tane Türkçe ve İngilizce anahtar kelime verilmelidir. Türkçe ve İngilizce Başlık, Öz (abstract) ve anahtar kelimeler (keywords) birinci sayfaya sığdırılmalı ve ana metin ikinci sayfadan başlatılmalıdır.
8. Bölüm ve alt bölüm başlıkları numaralandırılmalıdır (TS 1212 ISO 2145).
9. Semboller uluslararası kullanıma uygun seçilmeli; her bir sembol ilk kullanıldığı yerde tanımlanmalı, ayrıca metnin sonunda (Kaynaklardan önce) tüm semboller alfabetik sırayla (önce Latin alfabesi, sonra Yunan alfabesi) listelenmelidir.
10. Denklemler numaralandırılmalı ve bu numaralar satır sonunda parantez içinde gösterilmelidir.
11. Fotoğraflar tarayıcıdan geçirilerek çözünürlüğü en az 300 dpi olacak şekilde ve jpeg formatında bilgisayara ortamına aktarılmalıdır. Çizelgeler, çizimler ve fotoğraflar metin içine yerleştirilmeli, her birine numara ve başlık verilmeli, numara ve başlıklar çizim (şekil) ve fotoğrafların altına, çizelgelerin (tablo) üstüne yazılmalıdır.

12. Yazılarda yalnızca SI birimleri kullanılmalıdır.
13. Etik kuralları gereğince, alıntılar tırnak içinde verilmeli ve bir referans numarasıyla kaynak belirtilmelidir.
14. Teşekkür metni olabildiğince kısa olmalı, çalışmaya katkısı ve desteği bulunan kişi ve kuruluşlar belirtilmelidir.
15. Kaynaklar metinde köşeli parantez içinde numaralanmalı ve kaynaklar listesinde metin içinde verilmiş sırasına uygun biçimde belirtilmelidir. Kaynaklarda şu bilgiler verilmelidir:

Kaynak bir makale ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar. yıl. “makalenin tam başlığı,” derginin adı, cilt, sayı, başlama ve bitiş sayfaları.

Örnek 1: Kaçar, E. N., Erbay, L. B. 2013. "Isı Değiştiricilerin Tasarımına Bir Bakış," Mühendis ve Makina, cilt 54, sayı 644, s.14-43.

Örnek 2: Kaçar, E. N., Erbay, L. B. 2013. "A Design Review For Heat Exchangers," Engineer and Machinery, vol. 54, no. 644, p.14-43.

Kaynak bir kitap ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar. yayınlandığı yıl. kitabın adı, varsa cilt numarası, varsa editörü, yayın veya ISBN no, yayın evi, yayımlandığı yer.

Örnek: Lazzarin, R., Nalini, L. 2013. Havanın Nemlendirilmesi, ISBN: 978-605-01-0441-7, MMO/599, TMMOB MMO Yayını, İzmir.

Kaynak bildiri ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar. yıl. “bildirinin adı,” konferansın adı, tarihi, yapıldığı yer.

Kaynak tez ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi. yıl. “tezin adı,” derecesi, sunulduğu kurum, şehir.

Kaynak rapor ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar. yıl. raporun adı, türü, yayın numarası, kuruluşun adı, yayımlandığı yer.

Kaynak internet adresi ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar. yıl. “yazının adı,” internet bağlantısı, son erişim tarihi.

* Bilindiği üzere, araştırmacı, bilim insanı ve akademisyenlerin bilimsel çalışmalarındaki isim/kurum benzerliklerinden kaynaklanan bazı sorunların önüne geçilebilmesi amacıyla araştırmacı kimlik numaraları kullanılmaktadır. TÜBİTAK ULAKBİM ve YÖK arasındaki işbirliği ile yürütülen çalışmalar kapsamında, ORCID bilgisinin kullanılması karar verilmiştir. Bu bağlamda, makale yazarlarının uluslararası geçerliliği de bulunan “ORCID” bilgisine makalelerde yer verilmesi gerekmektedir. ORCID, Open Researcher ve Contributor ID’nin kısaltmasıdır. ORCID, Uluslararası Standart Ad Tanımlayıcı (ISNI) olarak da bilinen ISO Standardı (ISO 27729) ile uyumlu 16 haneli bir numaralı bir URL’dir. <http://orcid.org> adresinden bireysel ORCID için ücretsiz kayıt oluşturabilirsiniz.

YAYIN İLKELERİ

1. Yazıların telif hakkı devri, dergi internet sayfasında sunulan form doldurulup imzalanmak suretiyle alınır. İmzalı *Telif Hakkı Devir Formu*'nu göndermeyen yazarların yayınları değerlendirmeye alınmaz.
2. Yazılar, DergiPark sistemi <https://dergipark.org.tr/tr/pub/muhendismakina> üzerinden alınmaktadır. Her yazı, konusuyla ilgili en az iki hakem tarafından değerlendirilir. Hakem görüşlerinde belirtilen eksikler yazarlar tarafından tamamlandıktan sonra, dergide yayımlanabilecek nitelikte olanlar belirlenir ve yazara bilgisi verilir. Dergide basıldığı haliyle makale içinde bulunabilecek hataların sorumluluğu yazarlara aittir.
3. Yazar isimleri hakemlere bildirilmediği gibi, yazar/lar/a yazının hangi hakemlere gönderildiği de hiç bir şekilde bildirilmez. Yayınlanmayan yazılar istenildiğinde hakem raporlarıyla birlikte hakem isimleri belirtilmeden yazar/lar/a geri gönderilir.
4. Yayın Kurulu hakemlerden gelen eleştiriler doğrultusunda yazının derginin bir başka bölümünde yayımlanmasının uygun olduğuna karar verebilir ve bu kararı yazar/lar/ın onayına sunar. Yazar/lar/ın da uygun görmesi durumunda, yazı önerilen bölümde yayımlanır.
5. Dergiye gönderilen yazıların 'Yazım Esasları'na uygun olması gerekir. Esaslara uygunluk göstermeyen yazılar değerlendirmeye alınmadan yeniden düzenlenmesi için yazar/lar/a iade edilir.
6. Yayımlanan yazılar için yazar/lar/a ve değerlendirme yapan hakemlere derginin o sayısından birer kopya gönderilir.
7. Verilen süre içinde kendisine gönderilen yazıyı değerlendirmeyen ve dergi yayınında aksamaya neden olan hakemin, Yazı Değerlendirme (Hakem) Kurulu üyeliği gözden geçirilir.
8. Yayın Kurulu, gerekli gördüğü durumlarda yeni Yazı Değerlendirme (Hakem) Kurulu üyeleri atayabilir.
9. Araştırma ve tarama makalelerindeki görüşler yazarına, çevirilerden doğacak sorumluluk ise çevirene aittir.
10. Yazılar başka süreli yayınlarda yayımlanmamış olmalıdır. Herhangi bir toplantıda tebliğ olarak sunulmuş veya sunulacak ise bu açık olarak belirtilmelidir.
11. Hakem değerlendirme raporuna katılmayan yazar makalesini geri çekme hakkına sahiptir. Ancak geri çekme gereğini yazılı olarak yayın kuruluna sunmalıdır.
12. Dergideki yazılardan kaynak göstererek alıntı yapılabilir.
13. Yazılar için telif ücreti ödenmemektedir.
14. Yazılar araştırma ve yayım etiğine uyumlu hazırlanmalıdır. Etik kurallara aykırı davranışlarda (uydurma, çarpıtma, aşırma, tekrar yayım, dilimleme, destekleyen kuruluşu belirtmeme, haksız yazarlık, kaynak göstermeme vb.) bulunulmamalıdır.
15. Makalenin konusu ile ilgili şartlar;

Makalenin konusu TMMOB Genel Kurul ve Yönetim Kurulu kararlarıyla TMMOB Makina Mühendisleri Odasına kayıtlı mühendislik disiplinlerinin çalışma alanı ile ilgili olmalıdır.

“Makina, Uçak, Havacılık, Uzay, Mekatronik, Sistem, İmalat, Üretim, Üretim Tekniği, Üretim Sistemleri, Otomotiv, Endüstriyel Tasarım, Enerji Sistemleri, Makina ve İmalat ile Raylı Sistemler Mühendisliği

ABOUT ENGINEER AND MACHINERY JOURNAL AND ITS WRITING PRINCIPLES

Engineer and Machinery Journal is a vocational and technical publication that is published on a quarterly basis and aims at providing our country's industry, society, and disciplines and colleagues who are members of Chamber with their scientific, technical and vocational knowledge needs, as well as to contribute to their scientific, and technical development. The English and Turkish articles on mechanical engineering field with the following qualities written in the format stated below are accepted to "Engineers and Machinery Journal".

Research Article: It must reflect an authentic research with its findings and results. The research must contribute to science.

Literature Review Article: They must review an adequate number of scientific articles, summarize and evaluate the subject according to current knowledge and technological level, and compare their findings before interpreting them.

PRESENTATION FORMAT

- 1 The whole article (text, tables, equations, drawings) must be typed and arranged on computer and delivered as ready for publication. The article must be written on an A4 (210x297 mm) paper, via Word MS, in 10 font size (heading must be in 15 font size) of Times New Roman with single space.
2. Articles including their drawings and tables must not exceed 25 pages and short papers must not exceed 4 pages.
3. Articles must be sent via registration on Online Article Management System (OMYS). The uploaded article must be named as "article_the first 2 or 3 words of the title of article". The articles uploaded on OMYS should not contain any information about the author. The information about the author must be presented in a separate cover page, which must be also uploaded on the system. The cover page must demonstrate the name of the article and contact information of the author (name, surname, address, e-mail, academic title if there is one).
4. The article must be written in a plain language and style. It must comply with the spelling rules of the language used; third-person singular and deponent verbs must be used, whereas; inverted sentences must not be employed.
5. The title of the article must be clear and as short as possible (100 characters to the maximum) and also reflect the content. The first letters of English titles must be in capitals and titles must be written according to grammatical rules.
6. Chapters must be arranged in the following order: (i) abstract and keywords (in Turkish), (ii) abstract ve keywords (in English), (iii) main text, (iv) symbols, (v) acknowledgment (if necessary), and (vi) references.
7. Abstract must briefly define the objective, scope, method, and results of the study and must not exceed 100 words. At least three English and Turkish keywords must be provided. The first page must include the title in both Turkish and English, the abstract, and keywords; the main text must start from the second page.
8. The titles of chapters and sub-chapters must be numbered (TS 1212 ISO 2145).
9. Symbols must be employed according to international use; each symbol must be defined at their first use

in the text; at the end of the article (before References), all symbols used must be listed in alphabetical order (Latin Alphabet first, Greek alphabet second).

10. Equations must be numbered and these numbers must be indicated in parentheses at the end of line.
11. Photographs must be scanned, and transferred to computers in jpeg format with a resolution of 300 dpi at least. Drawings, tables, and photographs must be integrated into the text; each of them must be given a number and title; numbers and titles must be written under drawings (figures) and photographs, and above tables.
12. Only SI units must be used in articles.
13. As required by ethical rules, citations must be presented in quotes and its reference must be demonstrated via a reference number.
14. Acknowledgments must be as brief as possible and state the people and institutions having contributed to the study.
15. References must be numbered via brackets in the text; in the list of references, they must be indicated according to their order in the text. The references must include the following information:

If reference is an article: Author's surname, initial of his/her name., other authors. year. "full title of the article," name of the journal, volume, issue, start and end page.

If reference is a book: Author's surname, initial of his/her name., other authors. year of publication. name of the book, volume number (if available), editor (if available), publication or ISBN no, publishing house, place of publication.

If reference is a paper: Author's surname, initial of his/her name., other authors. year. "name of the paper," name of the conference, date, place.

If reference is a thesis: Author's surname, initial of his/her name., other authors. year. "name of the thesis," degree, presenting institution, city.

If reference is a report: Author's surname, initial of his/her name., other authors. year. name of the report, type of the report, publication number, name of the institution, place of publication.

If reference is a website: Author's surname, initial of his/her name., other authors. year. "name of the article," internet address, last date of access.day.month.year

PRINCIPLES OF PUBLICATION

1. The copyrights of articles are transferred by signing the form presented on the website of the journal. The articles of authors, who have not signed and sent the Form for Transfer of Copyrights, will not be taken into consideration.
2. Each article is sent to at least two arbitrators, who are experts in the subject of article. After authors revise their articles based on the suggestions of arbitrators, the ones that are deemed appropriate to be published on the journal are determined and authors are notified. The final version of articles are organized and sent by authors to the secretary of publication via dergipark. The errors that may be found in the article following its publication are the responsibility of the author.
3. Neither arbitrators are notified of the names of the authors, nor authors are notified of the names of arbitrators. The unpublished articles are sent back to authors with arbitration reports, upon author's request.
4. The Publication Committee may decide that the article be published in another section of the journal, based on the suggestions of arbitrators and may present their decision for the approval of author(s). If also deemed appropriate by author(s), the article is published on the presumed section.
5. The articles sent to the Journal must comply with the 'Principles of Writing'. The articles not complying with these principles will be returned to the author(s) for revision, without being evaluated.
6. A copy of the issue of the journal is sent to the authors of articles published in that issue and the arbitrators who evaluated those articles.
7. The membership to the Article Assessment Committee of the arbitrator, who have not evaluated the article within the due time and thereby caused delay in the publication of the journal, is reviewed.
8. The Publication Committee may appoint new members to the Article Assessment Committee, if/when they deem necessary.
9. The views stated in the research and literature review articles are the responsibility of the author, whereas; the consequences which may result from its translation are the responsibility of the translator.
10. The articles must be not published on any other periodical publications. It should be clearly stated if the articles were presented or are planned to be presented as a paper in any meeting.
11. The author(s), who do not agree with the report of the arbitrators, may withdraw his/her article. However, the author(s) must present the reason behind his/her withdrawal to the publication committee in a written manner.
12. It is allowed to cite the articles published in the journal as long as the source is stated.
13. A royalty (a fee for copyrights) is not paid for articles.
14. Articles must be written according to the ethics of scientific research and publication. Conducts against the ethical rules (fabrication, falsification, plagiarism, republication, salami slicing, excluding the supporting bodies of the work, undeserved authorship, excluding some/all references, etc.) must be avoided.
15. Conditions related to the subject of the article; The subject of the article should be related to the field of study of engineering disciplines registered in TMMOB Chamber of Mechanical Engineers with the decisions of TMMOB General Assembly and Board of Directors.

“Machinery, Aircraft, Aviation, Space, Mechatronics, System, Manufacturing, Production, Production Technique, Production Systems, Automotive, Industrial Design, Energy Systems, Machinery and Manufacturing and Rail Systems Engineering”

Please send your articles via the system at <https://dergipark.org.tr/tr/pub/muhendismakina>, in order to minimize the costs and time loss, which may result from the process of sending articles and evaluation by arbitrators.

Advisor Programıyla Hibrit Elektrikli Taşıtlarda Batarya Analizi <i>Battery Analysis in Hybrid Electric Vehicles With ADVISOR Program</i> Şule KUŞDOĞAN, Büşra ÖZEN	637
Santrifüj Pompa Tasarımında Sayısal Yöntemlerin (HAD/CFD) Kullanımı <i>The Usage of Numerical Methods (HAD/CFD) in The Design of Centrifugal Pumps</i> İsmail ÖVALI, Öner ATALAY, Ege YILMAZ	654
Sandviç Kompozit ve Metal Plakalar ile Oluşturulan Tek Bindirmeli Yapıştırma Bağlantılarının Mekanik Özelliklerinin Deneysel ve Nümerik Yaklaşım ile Belirlenmesi <i>Determination of Mechanical Properties of Single Lap Joints Having Sandwich Composite and Metal Adherend by Experimental and Numerical Approach</i> Engin ERBAYRAK	665
Sürtünme Karıştırma Prosesi ile Elde Edilen Yüzey Metal Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerini Geliştiren Çoklu Mekanizmalar <i>Multiple Mechanisms Improving The Mechanical Properties Of Surface Metal Matrix Composites Obtained By Friction Stir Processing</i> Gökçe Mehmet GENÇER	681
Farklı Saçak Tiplerine Sahip Yarı Küresel Çatılar Üzerinde Basınç Dağılımlarının İncelenmesi <i>Investigation of Pressure Distributions on Hemispherical Roofs With Different Eave Types</i> Tekmile CÜREBAL, Aleya AĞIRMAN KALCA, Yücel ÖZMEN	702
Modeling Study and Performance Investigation of a Thermoelectric Refrigerator <i>Termoelektrik Soğutucunun Modelleme Çalışması ve Performans İncelemesi</i> Haydar KEPEKÇİ, Ergin KOSA, Cüneyt EZGİ	715
Biyokömür-Soma Kömür Karışımlarının Oksijenlenme Koşullarında Birlikte Yakılmasının Deneysel İncelenmesi ve Emisyonlar Üzerindeki Etkileri <i>Experimental Investigation of Co-combustion of Biocoal with Soma Lignite in Air and The Oxygen-enriched Air Atmospheres and Its Effects on Emissions</i> Babak KEİVANİ, Hayati OLGUN, Aysel T. ATİMTAY	731
Demiryolu Taşıtlarında Kullanılan Fren Disklerinin Isı ve Malzeme Yönünden Değerlendirilmesi <i>Assessment of Brake Discs Used Railway Vehicles in terms of Heat and Material</i> Beytullah BAŞEĞMEZ	750
SiCP/A356 Kompozitinin Aşınma Direncine Ultrasonik Dövme İşleminin ve Yaşlandırma Sertleşmesinin Etkilerinin Karşılaştırılması <i>Comparison Of The Effects Of Ultrasonic Impact Treatment and Age Hardening On Wear Resistance Of SiCp/A356 Composite</i> Gökçe Mehmet GENÇER, Coşkun YOLCU, Fatih KAHRAMAN, Melih BELEVİ	768
Kısıtlı Mühendislik Problemlerinin Karşılaştırmalı Ağırlık ve Maliyet Optimizasyonu <i>Comparative Weight and Cost Optimization of Constrained Engineering Problems</i> Aybike ÖZYÜKSEL ÇİFTÇİOĞLU	784
Yangın Söndürme İçin Alternatif Bir Tasarım: Akıllı Yangın Söndürme Bombası <i>An Alternative Design for Fire Extinguishing: Smart Fire Extinguishing Bomb</i> Murat TOPTAŞ, Mehmet YILMAZ	806
Helikopterlerde Kullanılan Bir Piston-Prop Motorun Enerji, Ekserji, Termoeolojik, Sürdürülebilirlik, Termoekonomik ve Eksergoekonomik Performans Analizleri <i>Energy, Exergy, Thermoeological, Sustainability, Thermoeconomic and Exergoeconomic Performance Analyses of A Piston-Prop Engine Used in Helicopters</i> Halil Yalçın AKDENİZ	830
Effect of Humidity and Temperature on Composite Plates With Different Fiber Orientations <i>Farklı Fiber Dizilimlerine Sahip Kompozit Levhalar Üzerinde Nem ve Sıcaklık Etkisi</i> Gurbet ÖRÇEN, Engin KOYUN	845