



tmmob makina mühendisleri odası
uctea chamber of mechanical engineers

www.mmo.org.tr/muhendismakina

Mühendis ve Makina

Engineer and Machinery

Cilt 61

Volume 61

Sayı 698

Number 698

Ocak-Mart 2020

January-March 2020

TMMOB MAKİNA MÜHENDİSLERİ ODASI

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

Ocak-Mart / January-March 2020

Cilt / Vol: 61 Sayı / No: 698

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
Aylin Sıla AĞCA

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 / Cankaya University*

Yayın Danışma Kurulu / Editorial Advisory Board

Prof. Dr. C. Erdem İMRAK - *İstanbul Teknik Üniversitesi / Istanbul Technical University, İstanbul*
Prof. Dr. Erdinç 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), Güney Kore*
Prof. Dr. Basim AL-NAJJAR - *Linnaeus University, Sweden*
Prof. Dr. Barış ÖZERDEM - *İzmir Ekonomi Üniversitesi / Izmir University of Economics, İzmir*
Doç. Dr. Tunç APATAY - *Gazi Üniversitesi / Gazi University, Ankara*
Doç. Dr. Melih Cemal KUŞHAN - *ESOGÜ / Eskişehir Osmangazi University, Eskişehir*
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 ÖZERÇİYES - *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: 15 Mayıs 2020

Baskı Sayısı: 1.000

Mühendis ve Makina

Engineer and Machinery

Cilt 61
Volume 61

Sayı 698
Number 698

Ocak-Mart 2020
January-March 2020

İÇİNDEKİLER/CONTENTS

Araştırma/Research

- Model Tabanlı Tasarım ile Eş-Zamanlı Mühendislik: Mikro-Türbin Uygulama Örneği** 1
Concurrent Engineering With Model Based Design: A Micro-Turbine Application
Olca SARI, Orçun BULAT, Onur TUNÇER, Çağlar ÜÇLER

Araştırma/Research

- Krom Kaplamalı Parçalarda Termal Çevrim Analizi** 17
Thermal Cycle Analysis in Chromium-Plated Parts
Ali Ozan BAĞRIYANIK

Derleme/Review

- Pnömatik Sistemlerde Enerji Verimliliği** 31
Energy Efficiency in Pneumatic Systems
Arda ZAİM, Haydar ARAS

Araştırma/Research

- Ada Tipi Solenoid Valflerde Akış Analizi Yardımı ile Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi** 46
Determination of Design Parameters in Solenoid Valves Groups By Means of Flow Analysis
Kadir ÇAVDAR, Mustafa KARATAŞ, Hüseyin YAŞAR

Araştırma/Research

- Proton Değişim Membran Yakıt Hücreleri: Termodinamiği, Bileşenleri ve Uygulama Alanları** 57
Proton Exchange Membrane Fuel Cells: Thermodynamics, Components and Applications
Gamze KARANFİL

*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 dergimizde yer alan ilk makalemiz, **Olcay Sarı, Orçun Bulat, Onur Tunçer ve Çağlar Üçler**'in “Model Tabanlı Tasarım ile Eş-Zamanlı Mühendislik: Mikro-Türbin Uygulama Örneği” başlıklı çalışmasıdır. Mühendislik sistemlerinin tasarımı ve geliştirilmesi karmaşık bir süreçtir ve birbirine bağlı çok sayıdaki sistem parametresinin en iyi değerlere ulaşması gerekmektedir. Özellikle gaz türbinleri gibi birçok farklı alt sistemlerden oluşan sistemlerin en verimli tasarım noktasını elde etmek farklı disiplinlerden uzmanların ortak çalışmasını gerektirir. Eş-zamanlı mühendislik süreci boyunca V-döngülü sistem mühendisliği sayesinde kavramsal tasarımın oluşturulup tartışılması, alt istemlerin detay tasarımların gerçekleştirilip entegrasyonu sonrası test simülasyonları ile optimum tasarım noktasının elde edilmesi mümkündür. Bu çalışmada, tasarım süreçleri, birbirleri ile etkileşimleri ve örnek bir mikro-türbin sisteminin geliştirilme süreci, uygulama örneği olarak ele alınmaktadır.*

*İkinci makalemiz, **Ali Ozan Bağrıyanık**'in “Krom Kaplamalı Parçalarda Termal Çevrim Analizi” başlıklı çalışmasıdır. Bu çalışmada, krom kaplamalı plastik parçaların üzerinde sıcaklık nedeniyle oluşan çatlaklara neden olabilecek termal deformasyonların sonlu eleman yöntemiyle analiz edilebileceği bir yöntem geliştirilmiştir. Kaplamayı oluşturan katmanlar ayrı ayrı modellenip termal analiz yapılmıştır. Katmanların kalınlıklarının ve parça üzerindeki geometrik değişikliklerin termal yükler sonrası oluşan gerilme dağılımına etkisi incelenmiştir.*

*Üçüncü makalemiz, **Arda Zaim ve Haydar Aras**'in “Pnömatik Sistemlerde Enerji Verimliliği” başlıklı çalışmasıdır. Bu çalışmada, endüstride en çok kullanılan ikincil enerji kaynağı basınçlı havayla çalışan pnömatik sistemlerdeki enerji verimliliği uygulamaları ele alınmış ve deneysel çalışmalarla desteklenmiştir. Basınçlı hava sistemi tasarımında verimliliği artıran unsurlar belirlenmiş; kompresör, silindir ve vakum ejektörü gibi pnömatik iş elemanlarında işletme basınçlarının düşürülmesiyle elde edilebilecek tasarruf miktarları hesaplanmıştır. Ciddi maliyetler oluşturan hava kaçaklarının tespiti ve maliyeti konusunda fiziki bulgular incelenmiş, enerji tasarruf fonksiyonlu ürünlerin kullanımı için yol gösterilmiştir.*

*Dördüncü makalemiz, **Kadir Çavdar, Mustafa Karataş ve Hüseyin Yaşar**'in “Ada Tipi Solenoid Valflerde Akış Analizi Yardımı ile Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi” başlıklı çalışmasıdır. Bu çalışmada, valf pistonunun iki farklı konumu sonucunda oluşan ve akışkanın izlediği A ve B hatlarında, hat boyunca meydana gelen basınç değişiklikleri ve hız değişimleri analiz edilmiştir. A ve B hatları içinde valf üzerinde bazı tasarım değişiklikleri yapılarak bunların etkileri gözlenmiştir.*

*Beşinci makalemiz, **Gamze Karanfil**'in “Proton Değişim Membran Yakıt Hücreleri: Termodinamiği, Bileşenleri ve Uygulama Alanları” başlıklı çalışmasıdır.*

Uzun yıllardır süren araştırma ve geliştirme çalışmaları neticesinde ticarileşmeye başlayan PEM yakıt hücrelerinin geleneksel teknolojilere alternatif olabilmesi için hala aşılması gereken zorluklar vardır. Sürdürülebilirlik, dayanıklılık ve maliyet gibi zorlukların aşılması için PEM yakıt hücrelerinin çalışma prensibinin, termodinamiğinin ve araştırma çalışmaları hala devam eden bileşenlerinin görevlerinin detaylı olarak irdelenmesi; ayrıca potansiyel uygulama alanlarının bilinerek geliştirme çalışmalarının bu yönde devam etmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, PEM yakıt hücresinin teorisinin detaylı bir biçimde incelenmesinin yanı sıra; dünya literatüründe devam eden çalışmalar ile ilgili bilgi verilmiş ve keşfediliş tarihinden bu yana olan uygulama alanları özetlenmiştir.

Dergimize www.mmo.org.tr/muhendismakina adresinden ulaşabilir; makale ve görüşleriniz ile destek olabilirsiniz.

Bir sonraki sayımızda buluşmak üzere...

TMMOB Makina Mühendisleri Odası
Yönetim Kurulu

PRESENTATION

Esteemed Colleagues,

*The first article published in our journal Engineer and Machinery is the article titled “Concurrent Engineering With Model Based Design: A Micro-Turbine Application” by **Olcay Sarı, Orçun Bulat, Onur Tunçer and Çağlar Üçler**. Design and development of engineering systems is a complex process, requiring the optimization of interconnected system parameters. Especially, the determination of the design point of systems like gas turbines with distinct subsystems requires the collaboration of cross disciplinary experts. Consequently, mathematical models in model-based-software environment and concurrent engineering process can be used, where the V-cycle within system engineering enables the development of conceptual design, detailed design of subsystems, integration and the consequent optimization of the design with simulations aggregating in an optimum design point. In this study, the interaction of design processes with each other and the development process of the micro-turbine system are discussed as an application example.*

*The second article is titled “Thermal Cycle Analysis in Chromium-Plated Parts” by **Ali Ozan Bağrıyanık**. In this study, a finite element method is developed in order to analyze the thermal deformations which may lead cracks on chromium coated parts, The layers of the coating are modelled separately. The effects of the thickness of the layers and the geometric changes on the fracture were investigated.*

*The third article is titled “Energy Efficiency in Pneumatic Systems” by **Arda Zaim and Haydar Aras**. In this study, energy efficiency applications in compressed air pneumatic systems are discussed. The elements that increase efficiency in the design of the compressed air system were determined; savings that can be achieved by reducing operation pressures in pneumatic equipments such as compressor, cylinder and vacuum ejector have been calculated. Physical findings about the detection and cost of leakages that cause serious costs were examined and a way was provided for the use of products with energy saving functions. It is considered that the study will be a guide in the activities of reducing the energy density and the carbon footprint of our country, which is highly dependent on foreign energy.*

*The fourth article is titled “Determination of Design Parameters in Solenoid Valves Groups By Means of Flow Analysis” by **Kadir Çavdar, Mustafa Karataş and Hüseyin Yaşar**. In this study, the flow characteristics of a solenoid valve used in the pneumatic controls were analysed and the pressure and velocity changes along the line in the A and B lines which are formed as a result of two different positions of the valve piston are introduced. Some design changes were made on the valve in lines A and B and their effects were observed. The changes observed in the speed and pressure distribution provided by the design improvements were interpreted as an improvement in the flow losses occurring in the valve.*

*The fifth article is titled “Proton Exchange Membrane Fuel Cells Thermodynamics, Components and Applications” by **Gamze Karanfil**. PEM fuel cells, which have started commercializing as a result of long years of research and development, still have difficulties to overcome to be an alternative to traditional technologies. In order to overcome the difficulties such as sustainability, durability and cost, the detailed study of PEM fuel cells’ working principle, thermodynamics, and the tasks of the ongoing research studies; In addition, potential development areas should be known and development activities should continue in this direction. In this study, in addition to the detailed examination of the theory of PEM fuel cell; information on ongoing studies in the world literature has been given and the areas of application that have been in place since the discovery date are summarized.*

You can also view the journal on the web page www.mmo.org.tr/muhendismakina and support us with your articles and comments.

Best regards until our next issue...

UCTEA CHAMBER OF MECHANICAL ENGINEERS
Board of Directors

Model Tabanlı Tasarım ile Eş-Zamanlı Mühendislik: Mikro-Türbin Uygulama Örneği

Olca Sarı^{*1}, Orçun Bulat², Onur Tunçer³, Çağlar Üçler⁴

ÖZ

Mühendislik sistemlerinin tasarımı ve geliştirilmesi karmaşık bir süreçtir ve birbirine bağlı çok sayıda sistem parametresinin en iyi değerlere ulaşması gerekmektedir. Özellikle gaz türbinleri gibi birçok farklı alt sistemlerden oluşan sistemlerin en verimli tasarım noktasını elde etmek farklı disiplinlerden uzmanların ortak çalışmasını gerektirir. Netice olarak, model tabanlı yazılım ortamlarında matematiksel modellerinin geliştirilmesi ve eş-zamanlı mühendislik süreci uygulanabilir. Bu süreç boyunca V-döngülü sistem mühendisliği sayesinde kavramsal tasarımın oluşturulup tartışılması, alt istemlerin detay tasarımların gerçekleştirilip entegrasyonu sonrası test simülasyonları ile optimum tasarım noktasının elde edilmesi mümkündür. Bu tasarım süreçleri, birbirleri ile etkileşimleri ve örnek bir mikro-türbin sisteminin geliştirilme süreci bu yayın içerisinde uygulama örneği olarak ele alınmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Model-tabanlı tasarım, eş-zamanlı mühendislik, V-döngüsü sistem mühendisliği

Concurrent Engineering With Model Based Design: A Micro-Turbine Application

ABSTRACT

Design and development of engineering systems is a complex process, requiring the optimization of interconnected system parameters. Especially, the determination of the design point of systems like gas turbines with distinct subsystems requires the collaboration of cross disciplinary experts. Consequently, mathematical models in model-based-software environment and concurrent engineering process can be used, where the V-cycle within system engineering enables the development of conceptual design, detailed design of subsystems, integration and the consequent optimization of the design with simulations aggregating in an optimum design point. This design processes and associated trade-offs are explained here though a micro-turbine case study

Keywords: Model-based design, concurrent engineering, V-cycle system engineering

* İletişim Yazarı
Geliş/Received : 06.01.2019
Kabul/Accepted : 27.11.2019

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul - sariol@itu.edu.tr
ORCID: 0000-0002-3368-5603

² Roma Sapienza Üniversitesi, Makine ve Havacılık Mühendisliği Fakültesi, Roma - orcunbulat@gmail.com
ORCID: 0000-0001-8046-4363

³ Prof. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, İstanbul - tuncero@itu.edu.tr
ORCID: 0000-0002-2803-1146

⁴ Doç. Dr., Özyeğin Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, İstanbul - caglar.ueler@ozyegin.edu.tr
ORCID: 0000-0003-4209-7915



1. GİRİŞ

Mühendislik sistemlerinin tasarımı ve geliştirilmesi çok farklı disiplinlerden uzmanların ortak çalışmasını gerektirir. Eş-zamanlı ortamı kapsayan sistemin belirsiz ön tasarım aşamalarında gerek disiplinler arası, gerekse de geliştirilen sistemin alt yapıtaşları arasında bilgi ve ihtiyaç iletişimi gereklidir. Ancak bu sayede oluşturulan konfigürasyon ve ön tasarım evrilerek başarılı bir ürüne dönüşebilir. Disiplinler arası mühendislik çalışmaları için sistem temelinde model tabanlı tasarım yaklaşımı, taslak oluşturmayı ve farklı ekiplerin ortak çalışmasını kolaylaştıran bir modeldir. Böylece ihtiyaçlar üst seviyede belirlendikten sonra, model tabanlı tasarım ile disiplinler arası (akış, ısı, mekanik, elektrik-elektronik) ekipler, sistemin farklı parçaları üzerinde aynı anda beraber veya birbirlerinden bağımsız olarak V-döngüsü içinde çalışabilmektedir.

Sonuç olarak, sistemin her bir bölümü kendi iç kodlarıyla bağımsız olarak modellenir. Bağımsız olarak geliştirilen bu alt modellerin tümü, bileşenlerin tutarlılığını kontrol etmek için birbirlerine bağlanır ve çeşitli çalışma koşulları için sistemin yeterliliğini inceler. Başarılı bir entegrasyonun sağlanabilmesi için standart ve başlangıç parametreleri V-döngüsü boyunca ayarlanır. Bu şekilde, oluşturulan sanal model ile ya da sanal modelin kısmi prototiplere bağlanması ile gerçek zamanlı simülasyonlar yürütülebilir, eniyileme çalışmaları yapılabilir.

Bu çalışmada tabanlı tasarım ile eş-zamanlı tasarım anlatılarak, V-döngüsü sistem mühendisliği yaklaşımının uygulaması açıklanmaktadır. Akabinde bu yaklaşımlara bir örnek oluşturması için mikro-türbin sistemi geliştirme süreci ve bu tasarım metodlarının bu süreçteki etkileri de ayrıca paylaşılmaktadır.

2. MODEL TABANLI TASARIM

Model tabanlı tasarımın amacı, tasarımcıların etkileşimli yazılım uygulamalarını uygulama düzeyini derhal başlatmak yerine daha semantik odaklı bir seviyeden belirlemesine ve analiz etmesine olanak tanıyan üst düzey modelleri tanımlamaktır [1]. Ayrıca, karmaşık kontrol, sinyal işleme ve iletişim sistemlerinin tasarımı ile ilgili problemlerin odaklanması için matematiksel ve görsel bir yöntem olarak tanımlanmaktadır [2-4]. Bu yöntemle, tasarımcılar sürecin daha önemli yönlerine konsantre olurlar. Dolayısıyla, geliştirme ve iyileştirme süreçleri boyunca sık yapılan analizler sayesinde süreç daha sorunsuz bir şekilde yönetilebilmektedir. Buna ek olarak, tasarımcılar kısıtları karşılamak ve en iyi dengeyi bulmak için bu yöntemi kullanabilir [5].

Model tabanlı tasarım, diğer geleneksel yaklaşımlara kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır [1,3]. En önemlisi genel iletişim, veri analizi ve geliştirme ekipleri arasındaki sistem doğrulamalarını kolaylaştıran ortak tasarım ortamıdır [6-8]. Dahası, mühendislerin, sistem değişikliğinin zaman ve maddi etkisi azaltıldığında sistem tasarımının erken evrelerindeki hataları bulmaları ve düzeltmeleri mümkündür [6-8]. Bunun yanı sıra, bu teknik terfi (iyileştirme) ve türev sistemlerin kapasitelerini genişletmek için



tasarımın yeniden kullanılmasını kolaylaştırır [8]. Bu teknikle, sistemler ve ürünler piyasaya daha hızlı ulaşır ve geleneksel yöntemlere kıyasla daha düşük maliyetli olur [11]. Özellikle havacılık ve otomotiv uygulamaları arasında bu yöntemin kullanımı yaygındır, aynı zamanda gömülü yazılım tasarımı için de sıklıkla uygulanan bir metodolojidir [6,9,10].

Model tabanlı tasarım, geliştirme sürecini (V-diyagramı) desteklerken, tasarım süreci boyunca değişik disiplinlerden takımlar arasında iletişim için ortak bir yapı oluşturur [7]. Ürünün kontrol sistemlerinin de entegrasyonu model tabanlı tasarım ile yapılabilir. Bu, ürünün modellenmesi sonra kontrolcü analizi ve sentezini, çevrimdışı simülasyonu ve gerçek zamanlı simülasyonu, nihayetinde de gömülü kodun oluşturulup dağıtımını da içeren tümleşik bir yaklaşımdır [7,11,12].

Geleneksel tasarım yöntemleri ile model tabanlı tasarım paradigması arasındaki bir diğer fark ise karmaşık yapılar ve kapsamlı yazılım kodu yerine, model tabanlı tasarım yaklaşımının sürekli ve ayrık zamanlı yapı blokları kullanarak gelişmiş ve işlevsel özelliklere sahip modelleri tanımlayarak kullanıyor olmasıdır. Simülasyon yazılımları ile oluşturulmuş modeller, hızlı prototiplendirme, yazılım testleri ve sonuçları doğrulamaya yardımcı olabilir. Test ve doğrulama süreci gelişmiş olmakla kalmaz, aynı zamanda bazı durumlarda, yeni tasarım paradigması ile sistemdeki dinamik etkilerin geleneksel tasarım yöntemine kıyasla daha hızlı ve verimli bir şekilde elde edilmesini sağlar.

3. EŞ-ZAMANLI TASARIM

Entegre ürün geliştirme veya yinelemeli yöntem olarak da adlandırılan “eş-zamanlı mühendislik”, tasarım ve ürün geliştirme aşamalarının sürekli revize edilmesini sağlayan görevleri paralel hale getirmek için kullanılan sistematik bir yaklaşım olarak tanımlanabilir. Bu yöntemde müşterilerin beklentilerini karşılamak ve piyasaya yeni bir ürün sürmek için geçen süreyi azaltmak amaçlanmaktadır. Bu yaratıcı ve modern sistemin arkasındaki fikir, süreç boyunca yaşanan sorunların üzerinde fazla zaman ve ek mali kaynaklar harcamaksızın kolayca ayarlanabileceği veya yeniden düzenlenebileceği en hızlı ve en ucuz ürüne ulaşmaktır. Basit olarak ürün geliştirme aşamalarının eş-zamanlı yürütülmesini gerektirir [13,14].

Eş-zamanlı mühendislik ayrıca ürün etkenliği, imalat, montaj, test, bakım, güvenilirlik, maliyet ve kalite gibi unsurların bulunduğu tasarım aşamasında ürünün ömrü ile ilgili faktörlerin dikkate alınması olarak da açıklanmaktadır. Bu faktörler sadece bu yaklaşımı önemli kılmakla kalmaz, aynı zamanda ürün kalitesi ve maliyetinin hedeflerini genellikle başlangıçtan belirlenmesini sağlar. Eş-zamanlı etkinliklerin yanı sıra ekipler arasındaki işbirliği ürüne rekabet gücü sağlar ve karlılığındaki verimi artırır. Bu nedenle, eş-zamanlı mühendislik, organizasyonlara genel bir çerçeve sağlamayı ve genelde piyasa süresine, ürün maliyetine, pazar payına ve kaliteye dayalı verimliliği artırmayı amaçlamaktadır [15].

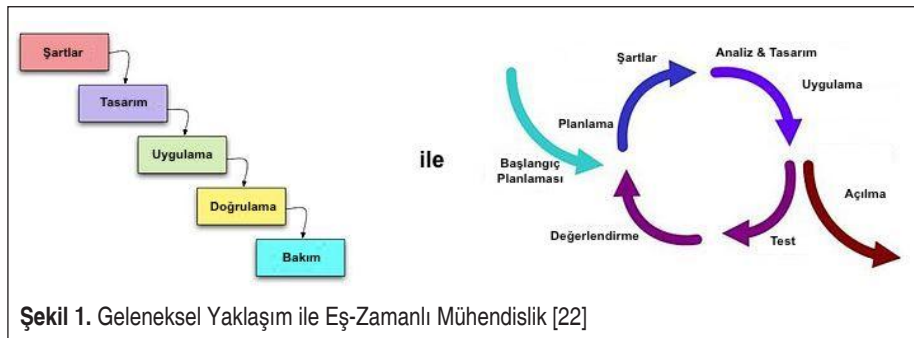
Eş-zamanlı mühendislik son dönemde hızla olgunlaşıp, mühendislik tasarım döngülerini optimize etmek için bilinen en etkili yaklaşımlarından biri haline gelmiştir [16]. Günümüzde eş-zamanlı mühendislik, ürün geliştirmede çok yoğun kullanılmaktadır. Eş-zamanlı mühendisliğin uğraştığı önemli sorunlarından biri, ürün geliştirme sürecinin erken aşamalarında nasıl karar verilebileceğidir [17]. Bu gibi kararlar için görevler ve fonksiyonlar arasındaki bağımlılıkları modelleyen programlar ile desteklenen tasarım ve gereksinim yönetimi gerekir [18, 19]. Bu erken aşama tasarım değerlendirmeleri esnasında, mühendisler ve ekipler arasındaki iletişim eksikliği problemlere sebep olabilir [20]. Eş-zamanlı bir tasarım süreci, pratikte zor olabilecek modellerin (bilgisayar destekli tasarım, sonlu elemanlar yöntemi, gömülü yazılım, simülasyon gibi) verimli bir şekilde etkileşimli kullanılmasını beklemektedir. Aksi halde, bu konular doğru bir şekilde ele alınmazsa, sistem işe yaramayabilir [21]. Bu noktada model tabanlı tasarımın eş-zamanlı mühendisliği destekler nitelikte olduğu görülmektedir.

Eş-zamanlı mühendislik, iki kavram etrafında vücut bulur:

- Ürün ömrü döngüsünün tüm unsurlarının fonksiyonellik, üretilebilirlik, montaj ve test edilebilirlik için değerlendirilmesi [20],
- Eş-zamanlı olarak tüm bu tasarım faaliyetlerinin gerçekleştirilmesi. Böylece gerektiğinde ihtiyaçlar yeniden düzenlenerek, ürün kalitesini artırılması, hızlı ama maliyet etkin tasarım hedeflenir [14].

Geleneksel doğrusal tasarımın aksine eş-zamanlı mühendislik, tasarımın tüm yönlerinin aynı anda hesaba katılmasıyla daha evrimsel bir yaklaşıma izin veren bir döngüde çalışır (bkz. Şekil 1) ve dört farklı unsurdan müteşekkildir [23]:

- Yazılım ve donanım tasarımı, imalat pazarlaması, finans gibi çeşitli disiplinlerden oluşan işlevsel ekipler,
- Değişik faaliyetlerin aynı anda yürütülmesi,
- Disiplinler arası işlevsel takımlar ile bilgi paylaşılması,



Şekil 1. Geleneksel Yaklaşım ile Eş-Zamanlı Mühendislik [22]



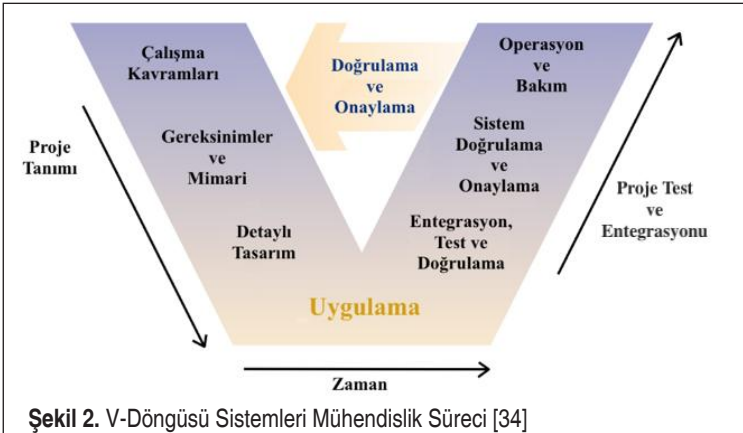
- Entegre proje yönetimi.

Eş-zamanlı mühendisliğin uygulanması için, takım temelli veya bilgisayar tabanlı yaklaşımlar kullanılabilir [24]. Ekip esaslı uygulamada ekip ve üyeleri, kapasitelerine ve ürüne potansiyel katkılarına göre seçilir. Donanım ve yazılım araçlarındaki ilerlemeler, üyelerin tasarımıdaki çeşitli niteliklerin, özellikle de son aşamadaki etkilerini göz önüne almasını sağlar. Bu ekip yaklaşımı sürecin başından sonuna kadar karışık sorunları çözme için uygun bir yoldur. Bilgisayar tabanlı uygulamada ise ek olarak kullanılan yazılımlar ile iletişim desteklenir ve yaşam döngüsünün tüm etkileri göz önüne alınır [25]. Kullanılan araçlar ile model oluşturma, simülasyon, hızlı prototipleme ve kontrol sistemleri geliştirmesi desteklenir.

Özellikle üretim, enerji ve havacılık endüstrilerinden, eş-zamanlı mühendislik sistemi başarıyla uygulanan birçok şirket ve kuruluş bilinmekle birlikte muhtemelen bu konuda lider alternatif tasarım setli eş zamanlı mühendislik (Set-Based Concurrent Engineering - SBCE) yaklaşımları ile Toyota'dır [26]. Toyota'nın eş-zamanlı mühendislik ve takım tabanlı eş-zamanlı mühendisliği hayata geçirme süreci, büyük otomobil üreticilerinin kazançlarını aşarak son derece etkili olmuştur ve günümüze kadar da çok ilerlemiştir [26,27]. Ayrıca havacılıkta Avrupa Uzay Ajansı (ESA)'nın Eş-zamanlı Tasarım Tesisi gibi kuruluşlarda SwissCube nano-satellite ve hibrit motosiklet gibi birçok başarılı proje başlatılmıştır [28,29]. Bu projelerin hepsinin ortak noktası olarak eş-zamanlı mühendisliği bilgisayar destekli ortamlarda etkinleştiren V-Döngüsü ve Sistem Mühendisliği aşağıda anlatılmıştır.

4. V-DÖNGÜSÜ SİSTEM MÜHENDİSLİĞİ

V-döngüsü doğrulama modeli olarak da adlandırılan V-döngüsü sistem mühendisliği, sistemlerle ilgili karmaşıklığı basitleştirmek üzere tasarlanmış kavramsal modelden oluşan tasarım yöntemidir [30-31]. Burada yaşam döngüsü modelleri ve proje





yönetimi modelleri üzerine odaklanılır. V döngüsü konsept ve kavram geliştirme ile başlayarak, tasarım, uygulama ve entegrasyon sonrası test ve operasyon ile ürünün tüm yaşam çevrimini temsil eder [32]. Eş-zamanlı mühendislik ile doğrusal tasarımı yerine, süreç V içerisinde her seviyede evrilerek ilerler. Böylece sol kısım kavram geliştirme, gereksinimlerin ve şartnamelerin oluşturulması sonrası tasarımı temsil ederken, sağda ise ilgili seviyelerde parçaların ve sonrasında sistemin entegrasyonu ile sol kol ile doğrulanmaları ve operasyonla bakım temsil edilmektedir; dolayısı ile zamana yayılan işlemler Şekil 2’de gösterilen V üzerinde ilerleyerek gerçekleştirilmektedir [31,33].

Sonuç olarak V-modeli, şirketlerin ve tasarımcıların projelerin planlanması ve gerçekleştirilmesi konusunda rehberlik etmelerine yardımcı olur. V-modeli kullanımı ile proje riskleri en aza indirgenerek, kalitenin iyileştirilmesi sağlanır ve güvence altına alınır; böylece sistem ömrü boyunca toplam maliyetin azaltılması ile tüm paydaşlar arasındaki iletişimin iyileştirilmesi hedeflenir [30]. V-döngüsü modeli, basit ve kolay kullanımı ile gerekliliklerin ve hedeflerin açıkça tanımlandığı projeler için çok iyi çalışır [35].

Günümüzde, V-döngüsü oldukça yaygın bir standart halini almıştır. İlk olarak AIBG firması tarafından zamanında Alman Federal Savunma Bakanlığı için geliştirilmiş olan model, günümüzde birçok ihale sürecinde de temel oluşturmaktadır [30]. V-döngüsü daha sonra Amerika’da da donanım, yazılım ve insan etkileşimi olan sistemlerde kullanılmaya başlanmıştır [31]. Hughes (şimdiki Raytheon Şirketi’nin bir parçası), 1982 yılında ilk V-modelini havacılık için FAA İleri Otomasyon Sistemi (AAS) programında kullanmıştır [36]. Günümüzde ise sistem mühendisliği süreci etkileşimleri için V-döngüsü yoğun olarak proje yaşam döngüsü ile birlikte mühendislik tasarımlarında kullanılmaktadır [32, 37, 38]. Bu sürecin örneklenebilmesi adına mikro-türbin özelinde yapılan bir çalışma aktarılmaktadır.

5. MİKRO-TÜRBİN UYGULAMA ÖRNEĞİ

Jenerik bir mikro-türbinin birçok karmaşık sistemi, doğrusal olmayan davranışları ile bağımsız olarak tasarlanıp sonradan bu sistemler birbirleri ile dijital ortamda entegre edilerek belirli bir performans düzeyinde uyum içerisinde çalıştırarak mikro-türbin sistemi tasarlanmıştır. Bu çalışmadaki alt sistemler kompresör ve türbini ikilisi, yanma odası, reküperasyon ve atık ısı geri kazanımı için gerekli eşanjörler, yağ ve su tankları, pompalar ve elektrik üretimi için gerekli alternatör olarak sıralanabilir.

Bu çalışmada çoğunlukla doğrusal olmayan sistemlerin tasarımında disiplinler arası simülasyon ortamı olan MATLAB/Simulink kullanılmıştır. Her bir alt sistem için ayrı matematiksel modelleme fiziksel prensiplere dayandırılarak geliştirilmiştir. Alt sistemler arasındaki tutarlılığı sağlamak amaçlı eş-zamanlı mühendislik süreci boyunca farklı disiplinlerden uzmanlar tasarım kapladığı yerden yani tasarım zarfından başla-

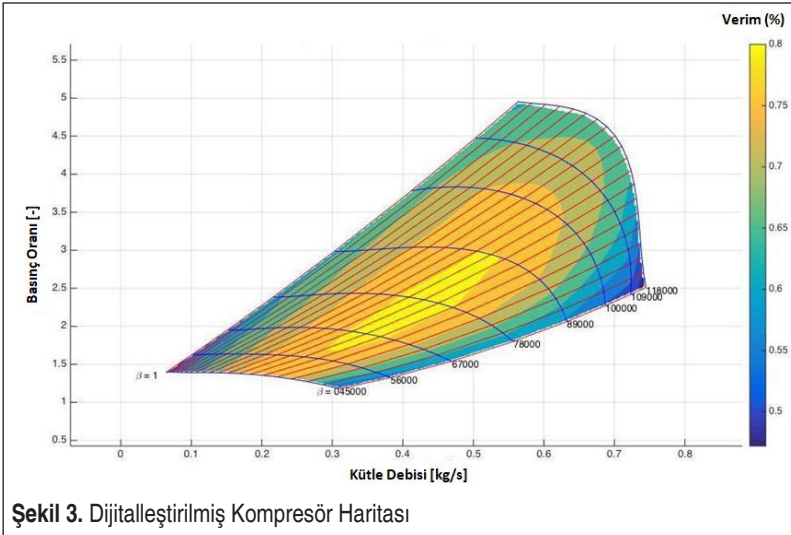


arak eşleşen modellerin ara yüzleri, enerji sarfiyatları, performansları gibi konuları da gözeterek parametrik bir şekilde modellemiştir. Alt sistemlerin kavramsal tasarımı tamamlandıktan sonra giriş, lüle ve eşanjörlerin modelleri tasarıma uygun olacak şekilde güncellenmiştir. Her güncelleme sonrasında, doğru çalışmayı sağlamak amaçlı doğrulama analizleri yapılmıştır. Ön geliştirme süreci sonrası, alt sistemler daha ileri analizler ve simülasyon için çift yönlü entegre edilmiştir.

Tasarımın isterleri doğrultusunda ilk önce dış tedarik yolu ile kullanılacak olan kompresör ve gaz türbini seti seçilmiştir. Bu sayede imalat gereksinimleri sağlanıp, performans isterleri de karşılanmıştır. Sonra tüm fiziksel sistemlerin matematiksel modelleri hazırlanarak Simulink modeli içerisinde entegre edilmiş ve parametrik mikro-türbin modeli oluşturulabilmiştir. Çalışmalarda kullanılan matematiksel modeller aşağıda özetlenmektedir.

5.1 Kompresör

Tasarımda başlangıç olarak ön tasarım parametreleri ve ilgili varsayımsal değerler, seçilen kompresörün haritasından tasarım hedeflerini gerçekleştirmek ve beklenen güç tüketimini sağlamak amacıyla uygun değerler alınarak seçilmiştir. Bu tasarım için seçilen varsayımsal değerler operasyon hızı, kütle debisi ve sıkıştırma oranını kapsamaktadır. Kompresör haritası, çalıştırma ve durdurma koşulları haricinde kompresörün seçilmiş çalışma eğrisine karşılık ne kadar güç ürettiğini belirli bir güç yüzdesinde gösterir. Santrifüj tipi kompresör olarak Honeywell-Garrett firmasının GTX4294R tipi kompresörü seçilmiştir. Üretici tarafından sağlanan kompresör haritası dijitalleştirildikten sonra, verimlilik değerleri basınç oranı ve kütle debisine göre grafikleştirilmiştir-



Şekil 3. Dijitalleştirilmiş Kompresör Haritası

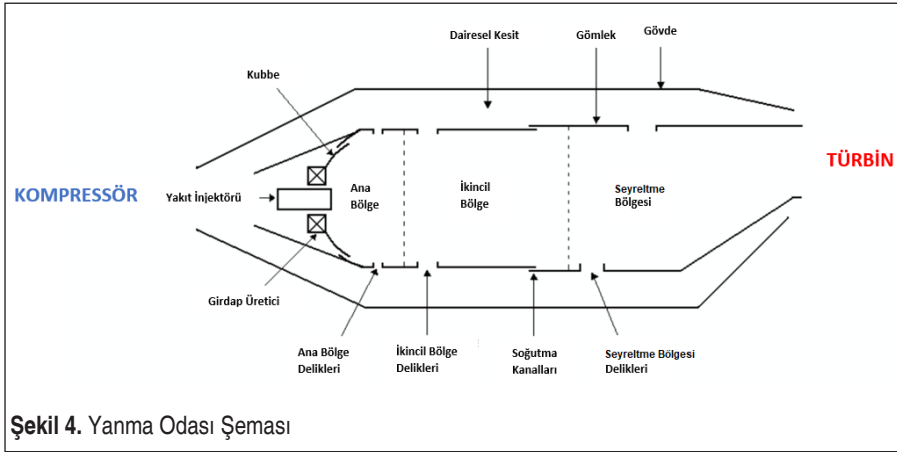
tir. En verimli çalışma noktasının seçilmesi ve tasarımıyla uyumu sağlandıktan sonra tasarım sürecinde bir sonraki noktaya geçilmiştir. Aşağıdaki grafikte, dijitalleştirilmiş kompresör haritası Şekil 3'te gösterilmektedir.

Modelin güvenilirliği açısından, dinamik simülasyonun başlangıç değeri Newton-Raphson iterasyonu ile durağan hal çözümüne yakınsatılmıştır. Kompresör modeli doğrulanması için ise kompresör haritasında mümkün olduğunca çok noktayı kontrol ederek ve programı çalıştırarak analiz edilmiştir. Bu şekilde yapılan analizle model %1 tork hataları hariç, kompresör davranışını çalışma aralığında güvenilir bir şekilde simüle edebilmektedir. Aynı zamanda, simülasyon modeli için MATLAB fonksiyon sayısı azaltılmış ve yazılan kodları C/C++ dillerine çevirerek Simulink'te çalışma süresini daha verimli hale getirilmiştir. Performans haritasındaki tüm çalışma koşullarının onaylanmasından sonra, dizayn metodolojisi gereği, kompresör modeli yanma odası modelinin geliştirilmesinde yardımcı olmak üzere sonlandırılmıştır.

5.2 Yanma Odası

Yanma odası tasarımı genellikle geliştirme ve modifikasyon sırasında oldukça fazla sayıda deneysel test gerektiren çok karmaşık, pahalı ve zaman alıcı bir süreçtir [39-40]. Yanma odası modelini geliştirmek için 1-Boyutlu "Ağ Modeli" esas alınmıştır. Buna neden olarak ise daha detaylı ve güvenilir yanma ve çıkış alev sıcaklığı verileri sağlaması gösterilir.

Öncelikle, yanma odası geometrisi ana bölgelere ayrılmıştır; birincil bölge, ikincil bölge ve seyreltme bölgesi ve de ayrıca sirkülasyon bölgesi olarak adlandırılan bir alt bölge bulunur (bkz. Şekil 4). Bu bölgelerin etrafını, alevin gelen havadan korunmasını sağlayan bir karter ve istikrarlı yanmanın gerçekleşmesi için uygun hava ilavesi görevini uygulayan gerekli alanlar oluşturur. Şekil 4'te, ana bölgeler ve yardımcı bölgeler başlıca olmak üzere yanma odasının genel bir gösterimi yapılmıştır.



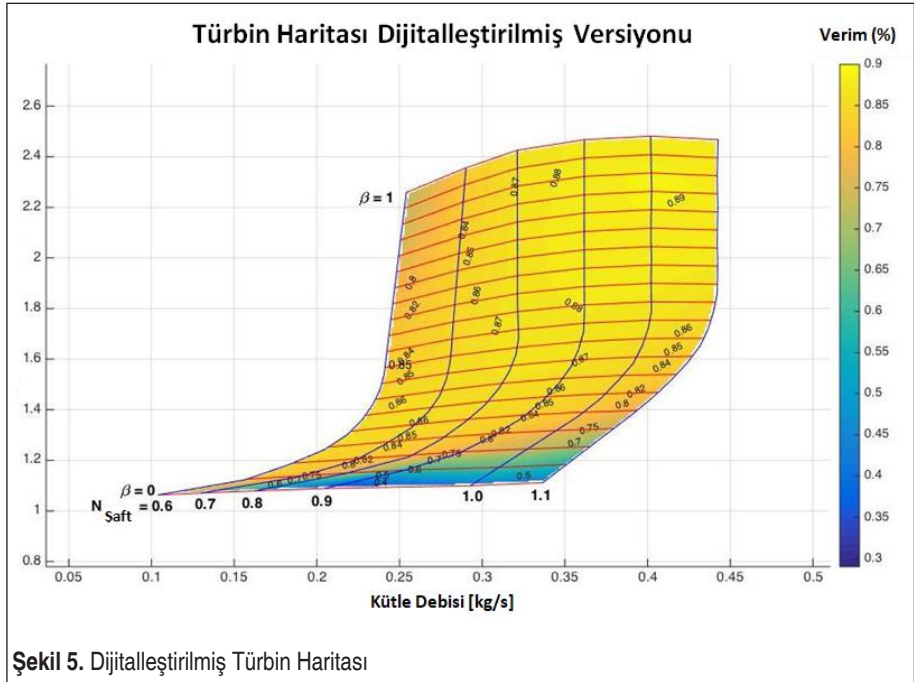
Şekil 4. Yanma Odası Şeması



Parametrik modelleme sayesinde farklı yakıt türleri seçilebilir. Literatürde karşılaştırılmalı modelleri olması sebebi ile ilk etapta Jet-A yakıtı seçilmiştir. Isı geçişi ve akışkanlar mekaniği temelleri uygulanarak geliştirilen model “girdap vanesi” tasarımı ile birleştirilmiş olup, yanma odası iteratif bir metotla türbinlere gereken gücü ve ısı değerleri gerçekleştirebilecek bir model tasarlanmıştır. Geliştirilen modelde, yanma geometrisi, bölge uzunluğu ve hava bölümleri, kubbe geometrisi için kanat sayısı ve kanat açısı gibi yanma odası tasarım parametrelerini gözetten çok sayıda analiz yapılmıştır. Kütle, momentum ve enerji korunumu yasaları kullanılarak oluşturulan ağ modeli, yanma odasının davranışını, çeşitli hava giriş koşullarına ve gelen kütle akışına karşılık gelen yakıt miktarına göre analiz edebilmektedir. Yanma odası modeli Simulink’e aktarıldıktan sonra, türbin tasarımı ve modellemesine geçilmiştir. Burada üretilen güç ise, aynı şafta bağlı olan alternatör ve diğer alt-sistemleri çalıştırmak için kullanılır.

5.3 Türbin

Türbin, kompresörün çalışmasına olanak sağlamak için gerekli yüksek basınç ve sıcaklıkta olan ve yanma odasında üretilen gazların genişmesi yoluyla kompresörle bağlantılı şaftı döndürülmesi ile sorumludur. Tasarımda başlangıç olarak, kompresör ve yanma odası modellerinden elde edilen verilerle eşleşme sağlaması için gerekli





ön tasarım parametreleri seçilmiştir. Sonra, sistemin tasarım hedeflerini karşılaması gereken tork ve gücü üretmek için bir endüstriyel performans haritası seçilmiştir.

Türbin haritası çalışma bakımından kompresör haritasıyla tamamen aynı olmakla birlikte, üretici tarafından sağlanan bir örnek olmaması dolayısıyla sistem ihtiyacına göre ölçeklendirilebilen bir türbin haritası oluşturulmuştur (bkz. Şekil 5). Sonrasında dijitalleştirilen bu harita, kompresör haritasında olduğu şekilde modele entegre edilmiştir. Sonuç olarak, tasarım noktası için basınç oranı ve kütle debisi değerleri, kompresör ve yanma odası arasındaki eşleşmeye yönelik mikro türbin sistemi tasarım değerlerine göre ölçeklendirilmiştir.

Türbin modelinin doğrulanması için türbin haritasındaki çok sayıda noktanın analiz edilmesi gerekmektedir. Tork hata noktalarıyla beraber analiz edilen harita, % 0,2 tork hataları hariç oldukça güvenilir ve güçlü bir doğrulukla sonuç vermektedir. Bu onaylama, türbin performansının simülasyon için güvenilir olduğunu gösterir. Son olarak ise, türbin modeli Simulink'e aktarılmıştır ve kompresör ve yanma odasının modellerine paralel olarak hızlı bir şekilde çözüme ulaşabilmektedir.

5.4 Eşanjör ve Reküperatör

Enerjinin korunumu presibi ve ısı geçişi bağıntıları kullanılarak oluşturulan eşanjörler, egzoz gazının yüksek sıcaklıklarda sistemi terk etmesini önlemenin yanı sıra, sistemde kullanılan suyun ısını yükselterek, sistemin sıcak su çıkışına sahip olmasını sağlamıştır. Reküperatör ise, atık ısıyı kazanmak üzere, sıkıştırılmış havanın yanma odasına girişinden önce ısıtılması ve böylelikle daha yüksek verimlerde çalışarak kullanılacak yakıtın azaltılmasını amaçlanmıştır. Temel olarak sıcak gazdan basınçlı havaya ısı geçişi sağlar ve bunun artırılması yüzey alanını ile doğru orantılıdır. Hem eşanjör hem de reküperatörün basit ısı geçişi bağıntılarıyla modellenmesi kolaylık sağlamakla beraber, sisteme uyumu da büyük ölçüde sağlamıştır. Diğer alt sistemler gibi, eşanjör ve reküperatör de Simulink ortamında modellenmiştir.

5.5 Alternatör

Alternatör, mekanik enerjiden, mikro-türbin tasarımında doğrudan şafttan, elektrik enerjisi üretmek amacıyla kullanılmıştır. Bunun gerçekleştirmek için, kompresörün devriyle alternatörün çalışma aralığı belirli bir zarf içerisinde kalmalıdır. Bundan ötürü türbin şaftına planet dişli sistemi ile bağlanmıştır. Bu alt sistemi modellemek için ve aynı zamanda bütün sistemin güvenilirliğini tümüyle gerçekçi kılmak amacıyla endüstriyel bir alternatör kullanılmıştır. Seçilen alternatör ise 5 kW anma gücünde ticari bir alternatördür. Planet dişlisinin kullanılmasının yanı sıra, alternatörün devir sayısını kompresörle eşlenmesinde aynı zamanda tork dengesi de ele alınmıştır. Bu nedenle, türbin, kompresör ve alternatör arasındaki torkları dengelemek için mikro-



türbin ancak % 60 veya daha yüksek devirlerde çalışırken alternatörü şafta angaje etmek üzere programlanmıştır.

5.6 Modellerin Birleştirilmesi ve Genel Sistemin Karşılaştırılması

Tüm alt bileşenler modellenip (bkz. Şekil 6), dinamik davranışları analiz edilmek üzere Simulink'e aktarılmıştır. Daha sonra tüm alt sistemler birbirleriyle karşılaştırılmış ve bileşenler arasındaki tutarlılığı sağlamak için eşzamanlı mühendislik metodu kullanılmıştır: Farklı disiplinler açısından tüm alt sistemlerin birbiri ile uyumlu çalışması, tasarım zarfına uyum ve performans çıktıları incelenmiştir.

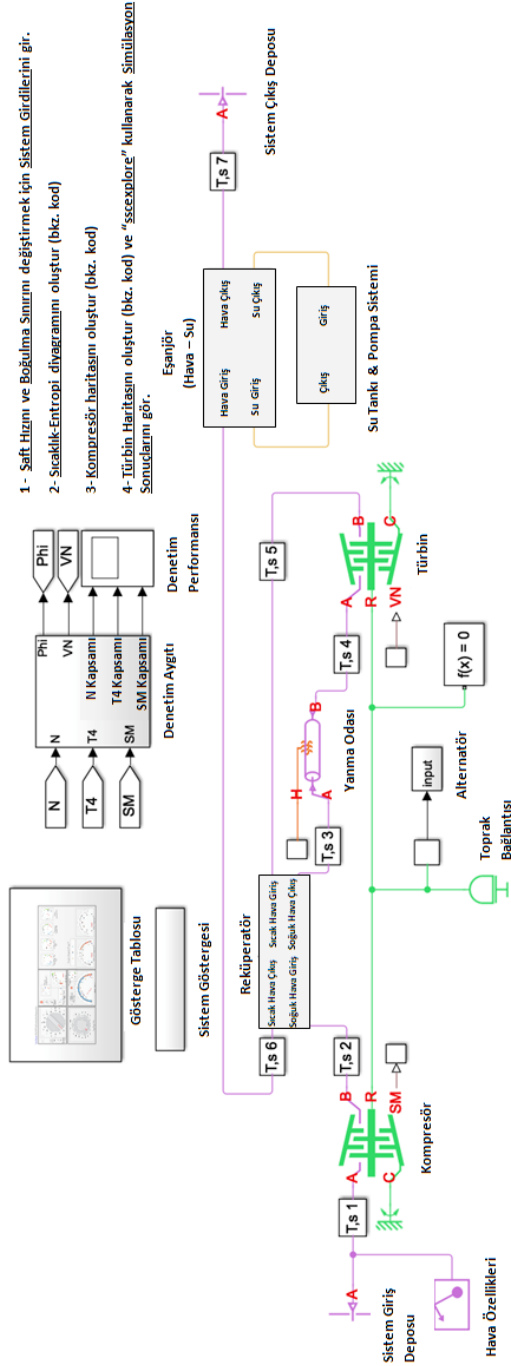
Şekil 6'da yer alan sistemde kompresör aracılığıyla sisteme giren hava reküperatörden geçerek ısıtılarak yanma odasına sokulmaktadır. Sonrasında türbin ile genişletilen sıcak hava kompresörden gelen soğuk havayı ısıtmak için reküperatörden geçerek akabinde başka bir ısı dönüştürücüsüne girmektedir. Burada da bir tanka bağlı dolaşımda olan suyu ısıtmak için son kez kullanılarak devreden çıkarılır. Aynı zamanda türbin hem alternatör hem de kompresör sistemine bağlı olan şaftı çevirerek enerji üretimini sağlamaktadır. Kompresörün ve türbin aynı şaft üzerinde yer aldığı için çalışma noktası tork dengelemesi metodu ile bir kök bulma problemi şeklinde ifade edilerek Newton-Raphson algoritması ile hesaplanmıştır. Haritalar (kompresör ve türbin) gücün ve dolayısı ile tork hesabında kullanılmaktadır. Bu sayede hava/yakıt oranı için doğrudan numerik girdi yapılmasına gerek olmadan girilen yakıt debisine cevap olarak sistemin devrini kendisinin tayin etmesi sağlanmıştır.

Bunun için öncelikle sistemin güvenilirliğini ve gerçekçiliğini test etmek amaçlı, endüstride kullanılmış ve verilerinden yararlanılabilen bir doğrulama gerekmektedir. Bu amaçla J-85 motoruna ait kompresör haritası kullanılmış olup, sonuçlar geliştirilmiş modelin her tür gaz türbini için kullanılabileceğini ve gerçekçi sonuçlar verdiğini doğrulamıştır. Modelin doğrulanması, artık mikro-türbin tasarımının gerçek-zamanlı bir simülasyon aracı olarak kullanılabilmesini ve farklı varyasyonlarda gerçekçi sonuçlar alınabilmesini sağlamıştır. Böylece parametrik deneme yanılgıları, alt sistemlerin farklı seçilmesi ya da farklı noktalarda çalıştırılması sonucu performans etkileşimlerinin incelenmesi mümkün kılınmıştır.

Mikro-türbin sisteminin limitleri belirlenerek basit bir kontrol algoritması eklenmesi ile model güncellenerek tam otonom dijital bir motor kontrolcüsüne (FADEC) yönelik çalışmaları da yapılabilecek bir ortam sunulmuştur. Kısa vadede FADEC'i temsil edebilmek için gösterge ve kontrol sisteminin kombinasyonu ile mikro-türbinin güçlü bir görsel sunumu sağlamıştır. Bu göstergeler sayesinde, kompresör ve türbin sıkıştırma/genleşme oranları, kütle debisi, çıkış sıcaklıkları, devir ve mikro-türbin iç sıcaklığının gösterimi sağlanmış olup tam otonom bir sistem geliştirilmiştir. Böylece daha ucuz ve daha kolay üretilebilen, otomotiv, havacılık ve diğer endüstrilerde kullanılması amaçlanan oldukça gerçekçi bir mikro-türbin modeli geliştirilmiştir.

Mikro Türbin Sistemi

- 1 - Sıft Hızını ve Boşalma Sınırını değiştirmek için Sistem Girdilerini gir.
- 2 - Sıcaklık-Entropi diyagramını oluşturun (bkz. kod)
- 3 - Kompresör haritasını oluşturun (bkz. kod)
- 4 - Türbin Haritasını oluşturun (bkz. kod) ve "sscxplore" kullanarak Simülasyonu Sonuçlarını gör.



Şekil 6. Mikro-Türbin Modeli Blok Diyagramı



6. SONUÇ

Model tabanlı tasarım ile eş-zamanlı mühendislik, çok disiplinli dalların etkileşimini ve çalışma süreçlerini etkili bir derecede kolaylaştıran bir yöntem olarak kullanılabilir. Özellikle yazılım ortamında geliştirilen matematiksel alt sistem modelleri, tüm işletim zarfında sistem dinamiklerini incelemek için kullanılabilmekte, ek olarak da en iyi tasarım noktasını bulmakta faydalı olmaktadır. Aynı zamanda eş-zamanlı tasarım süreci sistemin belirsiz ön aşamalarının sürekli devam eden bilgi paylaşımı ve etkileşimi sayesinde hızlı bir şekilde çözümlenmesinde yararlı olmaktadır. Bu sayede çoklu-disiplinli ekipler, sistemin farklı parçalarını aynı anda çalıştırabilmekte, dolayısıyla proje yönetimine hız ve bütçe korunumu sağlamaktadır. Tüm bunlara V-döngüsü sistem mühendisliği tasarım parametrelerinin süreç boyunda ayarlanmasını sağlayarak dâhil edildiğinde, gaz türbini gibi karmaşık sistemlerin tasarımı etkili bir şekilde yürütülebilmekte ve teknik istelere uygun bir şekilde sonuçlandırılabilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma sırasında sağladığı desteklerden dolayı Melina Aero Teknoloji Geliştirme ve Dizayn Bürosu A.Ş.'ne teşekkür ederiz. Finansal destek TÜBİTAK-TEYDEB tarafından 2150113 numaralı proje çerçevesinde sağlanmıştır. Proje için kuluçka ofisinde yer tahsis eden İTÜ-Arı Teknokent'e ayrıca şükranlarımızı sunarız.

KAYNAKÇA

1. **Paterno, P.** 1999. "Model-Based Design and Evaluation of Interactive Applications", Springer-Verlag, Londra, s. 11.
2. **Wang, S. and Shin, K. G.** 2006. "Task Construction for Model-Based Design of Embedded Control Software", IEEE Trans. Software Eng, Cilt 32, Sayı 4, sf. 254–265.
3. **Horner, N. C. and Topper, J. S.** 2013. "Model-Based Systems Engineering in Support of Complex Systems Development", Johns Hopkins APL Technical Digest, Cilt 32, Sayı 1, sf. 419–432.
4. **Plötzner, R., Hoppe, H. U., Fehse, E., Nolte, C. and Tewissen, F.** 2001. "Model-based Design of Activity Spaces for Collaborative Problem Solving and Learning", Proceedings of the European Conference on Artificial Intelligence in Education, Lizbon, Portekiz, sf. 372–378.
5. **Heemels, W. P. M. H. and Muller, G.** 2006. "Boderc: Model-based design of high-tech systems", Eindhoven Embedded Systems Institute, Hollanda.
6. **Yang, N., Hua, G. and Li-li, J.** 2016. "Model-Based Design Methodology for Sampling Rate Converter", International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering, Cilt 11, Sayı 5, sf. 83–92.
7. **Santos, M. M. D., Neme, J. H., Franco, F. R., Stevan, S. L., Torres, W., Lugli, A. B.,**



- Lagana, A. A. M. and Justo, J. F.** 2015. “Model-Based Design of Exterior Lighting Control Function for Automobile – MIL”, SIL and RCP, International Journal of Innovative Computing, Information and Control, Cilt 11, Sayı 5, sf. 1495–1507.
8. **Kirby, B., Zou, L., Cao, J., Kamwa, I., Heniche, A. and Dobrescu, M.** 2011. “Development of a Predictive Out of Step Relay Using Model Based Design”, Innovative Smart Grid Technologies – ISGT Europe Conference, IEEE, sf. 1–6.
9. **Chatterjee, S. and Kleijn, W. B.** 2011. “Auditory Model-Based Design And Optimization Of Feature Vectors for Automatic Speech Recognition”, IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, Cilt. 19, Sayı. 6, sf. 1813–1825.
10. **Miyajima, T., Fujimoto, H. and Fujitsuna, M.** 2013. “A Precise Model-Based Design Of Voltage Phase Controller for IPMSM”, IEEE Transactions on Power Electronics, Cilt. 28, Sayı. 12, sf. 5655–5664.
11. **Ahmadian, M., Nazari, Z. J., Nakhaee, N. and Kostic, Z.** 2005. “Model-Based Design and SDR”, 2nd IEEE/EURASIP Conference, sf. 19–99.
12. **Solano, S. S., Jimenez, M. B., Toro, E. D., Jimenez, P. B. and Baturone, I.** 2013. “Model-Based Design Methodology for Rapid Development of Fuzzy Controllers on FPGAs”, IEEE Transactions on Industrial Informatics, Cilt 9, Sayı 3, sf. 1361–1370.
13. **Fu, Y. and Gu, X.** 1997. “Discrete Maths And Its Application”, Publishing House of Electrical Industry, Beijing, China.
14. **Quan, W. and Jianmin, H.** 2006. “A Study on Collaborative Mechanism for Product Design in Distributed Concurrent Engineering”, Proceedings of the 7th International Conference on Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design - CAIDCD, sf. 1–5.
15. **Abdalla, H. S.** 1999. “Concurrent Engineering for Global Manufacturing”, International Journal of Production Economics, Cilt. 60–61, sf. 251–260.
16. **Ma, Y., Chen, G. and Thimm, G.** 2008. “Paradigm Shift: Unified and Associative Feature-based Concurrent Engineering and Collaborative Engineering”, Journal of Intelligent Manufacturing, Cilt 19, Sayı 6, sf. 625–641.
17. **Krishnan, V.** 1996. “Managing The Simultaneous Execution of Coupled Phases in Concurrent Product Development”, IEEE Transaction on Management, Cilt 43, Sayı 2, sf. 210–217.
18. **Assine, A., Falkenburg, D., and Chelst, K.** 1999. “Engineering Design Management: An Information Structure Approach”, International Journal of Product Research, Cilt 37, Sayı 13, sf. 2957–2975.
19. **Tang, D., Cheng, L., Li, Z., Li, D. and Zhang, S.** 2000. “Re-Engineering of The Design Process for Concurrent Engineering”, Computers and Industrial Engineering, Cilt 38, Sayı 4, sf. 479–491.
20. **Kusiak, A.** 1993. “Concurrent Engineering: Automation, Tools and Techniques”, John Wiley and Sons.



21. **Rosenblatt, A. And Watson, G.** 1991. "Concurrent Engineering", IEEE Spectrum, sf. 22–37.
22. **Mani, M., Manikandan, K. and Manikandan, M.** 2015. "Design for Manufacturing Based On Concurrent Engineering", International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Cilt 4, Sayı 2, sf. 128–131.
23. **Wolf, W.** 2001. "Computers as Components: Principles of Embedded Computing System", Elsevier, Burlington, MA.
24. **Sullivan, W. G. and Parsaei, H. R.** 1993. "Concurrent Engineering: Contemporary Issues and Modern Design Tools", Chapman and Hall.
25. **Bahler, D., Bowen, J., O'Grady, P. and Young, R. E.** 1990. "Issues in Design/Manufacturing Integration", Winter Annual Meeting of the ASME, Dallas, TX, November 25-30, sf. 59–67.
26. **Sobek, D. K., Ward, A. C. and Liker, J. K.** 1999. "Toyota's Principles of Set-Based Concurrent Engineering", MITSloan Management Review, Cilt 40, Sayı 2, sf. 67–83.
27. **Taylor A.** 1997. "How Toyota Defies Gravity", Fortune, Cilt 136, sf. 100–108.
28. **Ivanov, A., Noca, M., Borgeaud, M., Felloni, F., Guzman, E., Fueglistaler, A., Gallay, S. and Triguero-Baqtista, A.** 2010. "Concurrent Design Facility at the Space Center EPFL", SECESA.
29. **ESA,** 2011. "The ESA Concurrent Design Facility: Concurrent Engineering Applied to Space Mission Assessments", <http://esamultimedia.esa.int/docs/cdf/CDF-INFOPACK-2011.pdf>, son erişim tarihi: 24.04.2017.
30. **V-Modell®XT,** 1997. "Limits of the V Model", <http://v-modell.iabg.de/XThtmleng/index.html>, son erişim tarihi: 24.04.2017.
31. **Forsberg, K. and Mooz, H.** 1991. "The Relationship of System Engineering to the Project Cycle", Proceedings of the First Annual Symposium of National Council on System Engineering, sf. 57–65.
32. **Forsberg, K., Mooz, H. and Cotterman, H.** 2005. "Visualizing Project Management", 3. baskı, John Wiley and Sons, New York, Amerika Birleşik Devletleri.
33. **DeSpautz, J., Kovacs, K. S. and Werling, G.** 2008. "GAMP Standards For Validation of Automated Systems", Pharmaceutical Processing.
34. **Federal Highway Administration (FHWA),** 2005. "Clarus Concept of Operations", Publication Sayı FHWA-JPO-05-072.
35. **Narang, R.** 2015. "Software Engineering - Principles and Practices", Mc-Graw – Hill, New York, Amerika Birleşik Devletleri.
36. **Sobkiw, W.** 2008. "Sustainable Development Possible with Creative System Engineering", Cassbeth.
37. **Defense AT&L,** 2006. "A New Systems Engineering Model and an Old", Familiar



Friend; Figure 2 V-9 Process Interactions, p. 51, son erişim tarihi: 24.04.2017.

38. International Council On Systems Engineering (INCOSE), 2007. “Systems Engineering Handbook Version 3.1”, sf. 3.3 – 3.8.
39. **Lawson, R. J.** May 1993, “Computational Modeling of an Aircraft Engine Combustor to Achieve Target Exit Temperature Profiles”, ASME 1993 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition.
40. **Eccles, N. C. and Priddin, C. H.**, Accelerated, Sep 1999. “Combustion Design using CFD”, 14th International Symposium on Air Breathing Engines.

Krom Kaplamalı Parçalarda Termal Çevrim Analizi

Ali Ozan Bağrıyanık*

ÖZ

Araç içi ve dışında geniş kullanım alanına sahip krom kaplamalı parçalar, bulundukları konuma göre farklı dış etkilere maruz kalmaktadır. Yağmur, toz ve güneş nedeniyle parça üzerinde korozyon ve termal etkiler görülmektedir. Bu çalışmada, krom kaplamalı plastik parçaların üzerinde sıcaklık nedeniyle oluşan çatlaklara neden olabilecek termal deformasyonların sonlu eleman yöntemiyle analiz edilebileceği bir yöntem geliştirilmiştir. Kaplamayı oluşturan katmanlar ayrı ayrı modellenip termal analiz yapılmıştır. Katmanların kalınlıklarının ve parça üzerindeki geometrik değişikliklerin termal yükler sonrası oluşan gerilme dağılımına etkisi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Krom kaplama, termal analiz, sonlu elemanlar metodu, ısıl genleşme katsayısı, termal çevrim

Thermal Cycle Analysis in Chromium-Plated Parts

ABSTRACT

Chromium Coated parts which are widely used inside and outside of a vehicle are exposed to different external conditions. Corrosive and thermal effects can be observed on the part due to rain, dust and sun. In this study, a finite element method is developed in order to analyze the thermal deformations which may lead cracks on chromium coated parts, The layers of the coating are modelled separately. The effects of the thickness of the layers and the geometric changes on the fracture were investigated.

Keywords: Chromium coating, thermal analyses, finite element method, thermal expansion coefficient, thermal cycle.

* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 27.05.2019

Kabul/Accepted : 27.11.2019

¹ TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası Ar-Ge Merkezi, Bursa - aliozan.bagriyanik@tofas.com.tr
ORCID: 0000-0002-8512-3450

1. GİRİŞ

Otomotiv sektöründe artan rekabet nedeniyle müşteri ilgisini çekebilmek firmalar için hayati derecede önemli duruma gelmiştir. Müşteriler tarafından en çok dikkat edilen ve aracın satışına direkt olarak etkisi olan parçalara, farklı boyama çeşitleri ve kaplama çeşitleri uygulanmaktadır. Yumuşak dokunuşlu yüzeyler, parlak metalik boyalar, lazer ve kumaş kaplamalar bunlara örnek olarak verilebilir [1]. Günümüzde sıkça kullanılan bir yöntem de krom kaplama uygulamasıdır.

Krom kaplamanın araçlarda kullanılmasının sebebi estetik plastik parçalar üzerinde ayna parlaklığı ve metal görünümü elde etmektir. Bu parçalar aracın içinde ve dışında kullanılabilir. Bu parçalara örnek olarak iç ve dış kapı kolları, süs çitaları, torpido üzerindeki bazı paneller, tuşlar, radyatör gizleyici ızgaralar verilebilir. Bu parçalar direkt olarak müşteri tarafından görülebildiği veya kullanılabildiği için görsel durumları araç için önemli bir performans kriteri haline gelmektedir. Araç dışında kullanılan krom kaplamalı parçaların bazıları Şekil 1’de görülebilir.



Şekil 1. Krom Kaplamalı Parçalar [2]

Parçalar üzerinde yaşanan yüksek sıcaklık değişimleri, düzensiz şekil değişimleri meydana getirir ve kaplama üzerinde çatlaklar oluşumuna neden olmaktadır [3]. Bu gibi durumlarda firmalar birçok test ve değişim maliyetleri ile karşı karşıya kalmaktadır. Parça üzerinde oluşan bu çatlakları tasarım aşamasında yakalayıp önlemler almak, test ve değişim maliyetlerini oldukça indirmektedir.

Çatlak oluşumuna ilişkin yapılan bir çalışmada Ploypech vd [4], asit konsantrasyonu ve kaplama sıcaklığının çatlak oluşumuna etkisini incelemişlerdir. Khodadad ve Lei [5]



alüminyum bir yüzey üzerine yapılan krom kaplama kalınlıklarını cevap yüzey metodu ile istatistiksel olarak incelemiştir. Almotairi [6] ince ve kalın krom kaplamalı paslanmaz çelik numuneler üzerinde mekanik ve termal hasarları incelemiştir. Umesh vd [7] nikel ve krom alaşım ile spreyci yöntemiyle kaplanan bir çelik levha üzerinde, 3 nokta eğme testi sonucunda oluşan gerilmeleri sonlu eleman yöntemiyle analiz etmişlerdir. Yapılan çalışmada kaplama katmanı ve çelik ayrı ayrı modellenmiştir. Kaplama kalınlığı arttıkça eğilme yüklerinde parçanın performansının arttığı görülmüştür. Logan [8] krom kaplamanın çelik üzerindeki plastik deformasyona etkisini araştıran çalışmasında, kaplamalı parçalarda kaplamasız parçalara göre çekme testinde uzama değerlerinin azaldığını ortaya koymuştur. Plastik malzeme seçimi parçanın fonksiyonuna ve plastik malzemenin krom kaplama uygunluğuna göre yapılmalıdır. ABS plastikler, polikarbon ABS alaşımlı plastikler krom kaplama için kullanılan bazı malzemelerdir.

Bu çalışmada, araç dışında kullanılan krom kaplamalı bir parçada oluşabilecek çatlak başlangıç senaryolarını sonlu elemanlar metodu ile analiz edebilmek için bir metod geliştirilmiştir. Çatlak ilerlemesi ile ilgili bir çalışma yapılmamıştır. Kaplamadaki katmanlar modellenmiş ve termal genleşme analizleri yapılarak kalıcı deformasyon oluşma durumları incelenmiştir. Bu sayede kaplama üzerinde çatlak oluşabilecek bölgelerde, tasarım aşamasında gerekli değişiklikler yapıp, fiziksel testlerde çatlak oluşumunun önüne geçmek hedeflenmiştir.

2. KAPLAMA ÖZELLİKLERİ VE YAPILAN FİZİKSEL TESTLER

2.1 Kaplama Özellikleri

Krom kaplamalı parçalar, araç üzerinde bulundukları konum itibarı ile farklı ortam koşullarına maruz kalmaktadırlar. Örneğin, araç içi ve dışında, sıcaklık -30 ve $+80$ °C arasındaki değerlere ulaşabilmektedir [9]. Aynı zamanda yağmur, kar vb. hava koşullarına maruz kalan parçalarda korozif etkiler de görülebilmektedir. Bu nedenlerden dolayı kaplama özellikleri parçanın bulunduğu konuma ve müşteri tarafından kullanımına göre FIAT malzeme normunda [10] üç farklı sınıfa ayrılmıştır. Araç üzerinde kullanılan kaplama sınıfları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Kaplama Tipleri [10]

Kaplama Tipi	İçerik	Araçta Kullanım Alanı
I	Cu X Ni Y Cr	Direkt atmosferik etkilere maruz kalmayan ve elle kullanılmayan araç içi parçalar (çerçeveler, vb.)
II	Cu 2X Ni 2Y Cr	Direkt olarak atmosferik etkilere maruz kalmayıp elle kullanılan parçalar (tuşlar, kapı panelleri, torpido panelleri)
III	Cu 4X Ni 4Y Cr	Araç dışı parçalar (far çerçeveleri, kapı kolları vb.)

Tablo 2. Kaplama Kalınlıkları [10]

Tip	Minimum Lokal Kalınlık (μm)		
	Cu	Ni	Cr
I	2A	A	$A \times 10^{-1}$
II	4A	2A	$A \times 10^{-1}$
III	8A	4A	$A \times 10^{-1}$

Krom kaplamalar 3 farklı katmandan oluşmaktadır. Üretim prosesinde parça farklı kimyasal havuzlara daldırılır ve sırasıyla, bakır, nikel ve krom malzemeleri ile kaplanır. Tablo 1’de belirtilen tiplere göre, her bir katmanın sahip olması gereken kalınlık değeri de değişmektedir. FIAT normlarına göre kaplama katmanlarına ait nominal kalınlık değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Tablo incelendiğinde, araç dışında kullanılan Tip III kaplamalarda, bakır ve nikel katmanlarının diğer tiplere göre daha kalın olması gerektiği anlaşılmaktadır.

2.2 Yapılan Testler

Parçanın maruz kalabileceği zorlu durumlar, ardışık olarak yapılan termal ve korozyon testleri ile incelenir. Testlere başlanmadan önce katman kalınlıklarının kontrol edilmesi ve parçaların yüzey uygunluğunun onaylanması gerekmektedir. Kalınlık ve yüzey kontrolü onayı alan parçalar ilk olarak termal çevrim testine girer. Termal çevrim testi, FIAT normuna [10] göre aşağıda belirtilen şekilde yapılır.

- 80 ± 2 °C’de sıcak havaya 30 dakika maruz bırakılır.
- Oda sıcaklığında 45 dakika soğumaya bırakılır.
- -30 ± 2 °C’de soğuk havaya 30 dakika maruz bırakılır.
- Oda sıcaklığında 45 dakika soğumaya bırakılır.

Daha sonra alınan bu parçalar korozyon testine tabi tutulur. Burada asidik nem etkisine maruz bırakılır. Kaplama tipine göre maruz bırakılma süreleri Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Korozyon Testine Maruz Bırakılma Süreleri [10]

Tip	Süre (s)
I	6
II	24
III	48



Bu testler sonucunda parça üzerinde gözle kontrol yapıp çatlaklar ve korozyon etkileri gözlemlenir. Krom kaplanmış yüzeydeki yapısal bozukluklar, çatlaklar, kirlenici nesneler parçanın görüntüsünü ve performansını olumsuz yönde etkiler ve test sonucu negatif olarak belirlenir.



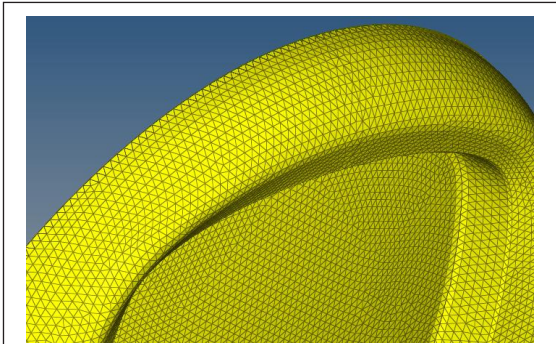
Şekil 2. Krom Kaplanmış Yüzeyde Test Sonrası Gözlenen Çatlaklar

Test sonucunda oluşan çatlaklara ait bir örnek Şekil 2’de gösterilmiştir. Fiziksel teste giren parçanın üst kısmında kaplama çatlağı tespit edilmiştir. Çalışmanın devamında bu parça ele alınmış ve kaplama üzerinde hasar oluşma durumlarının incelenmesi için bir sanal analiz metodu geliştirilmiştir.

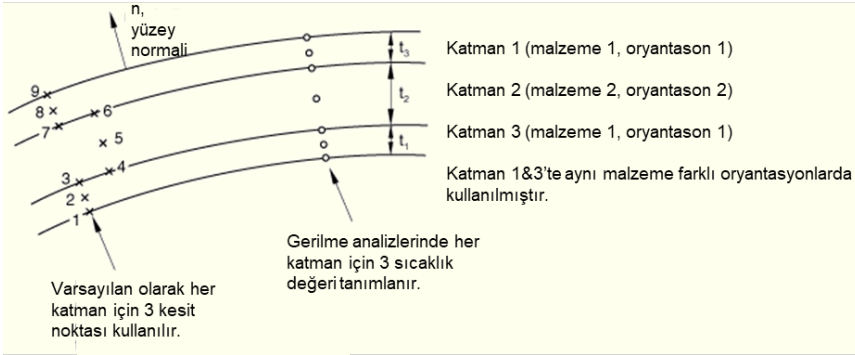
3. SONLU ELEMAN ANALİZLERİ

3.1 Sonlu Eleman Modeli ve Kaplama Tanımlanması

Sonlu eleman modeli iki farklı kısımdan oluşmaktadır. Kaplanan plastik parça 3 Boyutlu katı (tetra) elemanlar ile modellenmiştir. Ortalama eleman boyutu 1 mm olarak kullanılmıştır. Modellenen tetra elemanlar Şekil 3’te görülebilir.



Şekil 3. Sonlu Eleman Modeli



*SHELL SECTION, ELSET=kaplama, OFFSET= -0.5 , COMPOSITE

8A , 5, bakır,0

4A , 5, nikel,0

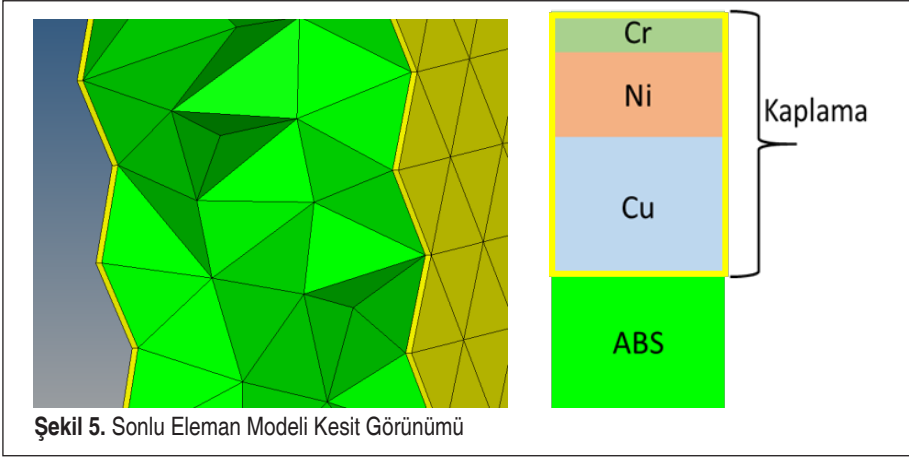
Ax10⁻¹, 5, krom,0

Şekil 4. Kompozit Katman Tanımlama [11]

Kaplama kendi içerisinde üç farklı malzeme ve kalınlıktan oluşmaktadır. Kaplama katmanları tek tek üç boyutlu katı olarak modellendiğinde kalınlıkları mikron seviyesinde olduğu için çok ince kalınlıkta elemanla ortaya çıkmış ve çözümün güvenli olması için yeterli eleman kriterleri sağlanamamıştır. Bu nedenle kaplama iki boyutlu kabuk elemanlar ile modellenmiştir. Kaplama, plastik parça modeline ait elemanların dış yüzeyleri kullanılarak oluşturulmuştur. Krom kaplama ve plastik parçanın dış yüzeyine ait düğümler ortaktır.

Geleneksel yöntemde her bir kabuk modellenen parçaya bit kalınlık ve malzeme girisi tanımlanmaktadır. Kaplama durumunda ise kabuk olarak oluşturulan kaplama modeline farklı kalınlık ve malzeme bilgilerinin atanması gerektiği için farklı bir metod ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Yapılan araştırmalarda kabuk elemanlara farklı kalınlık ve malzeme katmanları atanmasına imkân kılınan kompozit malzeme yaklaşımı, kaplama tanımlanmasında kullanılmıştır. Abaqus yazılımı içerisindeki, kompozit katman özelliği sayesinde kaplamayı tanımlayan üç farklı malzeme katmanı ve bu katmanlara ait kalınlıklar modele tanımlanmıştır. Kompozit katman özelliğinin şematik anlatımı Şekil 4'te görülebilir.

Geleneksek kabuk modellerinde, kalınlık orta yüzeyden (midsurface) eleman normalinde, pozitif ve negatif yönlerde yarım birim olarak tanımlanmaktadır. Çalışmada kullanılan yöntemde, öteleme (offset) özelliği kullanılarak katman kalınlığı eleman normalinde tek yönde tanımlanmıştır. Sonlu eleman modeline ait bir kesitteki kalınlık



Şekil 5. Sonlu Eleman Modeli Kesit Görünümü

durumu Şekil 5’te verilmiştir. Yeşil olarak belirtilen kısım ABS malzemeyi göstermektedir. Kaplama ise sarı olarak belirtilip, kaplama detayı açıklanmıştır.

Sonlu eleman analizinde kullanılması için fiziksel parça üzerinden kaplama kalınlığı ölçümü yapılmıştır. Fakat parça üzerindeki yüzeylerin çok küçük ve düzgün olmaması nedeniyle tüm bölgelerde kalınlık ölçümü yapılamamıştır. Ölçüm yapılan noktalarda da farklılıklar tespit edilmiştir. Tüm bu nedenlerden dolayı fiziksel parçadaki kaplama kalınları modele aktarılamamıştır ve Tablo 2’de belirtilen Tip III kaplama için sağlanması gereken minimum değerler tüm modele tanımlanmıştır.

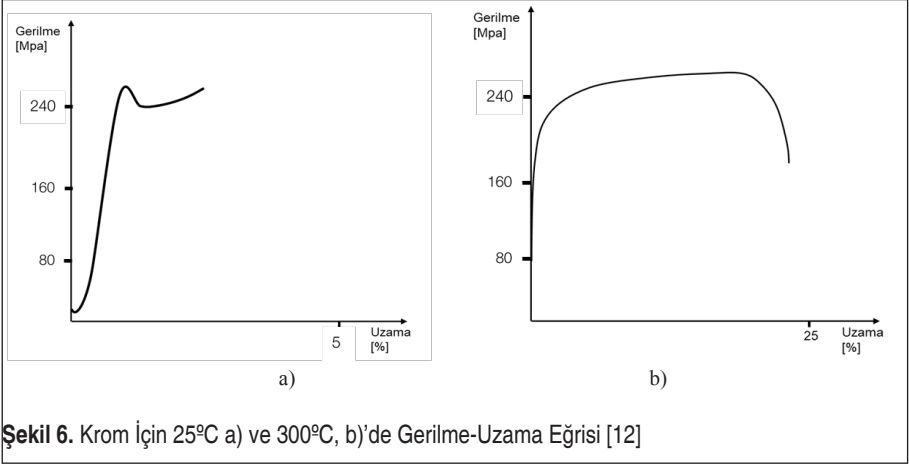
3.2 Malzeme Özellikleri

Yapılan sonlu eleman analizlerinde elastoplastik malzeme modeli kullanılmıştır. Malzemelere ait elastisite modülüne, poisson oranına, plastik bölgeye ait gerilme-uzama eğrilerine ve termal analiz için ısı genleşme katsayılarına ihtiyaç duyulmuştur. Yapılan literatür araştırmaları sonucu krom, bakır ve nikel a ait malzeme özellikleri elde edilmiştir. Analizlerde kullanılan gerilme-uzama eğrileri Şekil 6 ve Şekil 7’de verilmiştir.

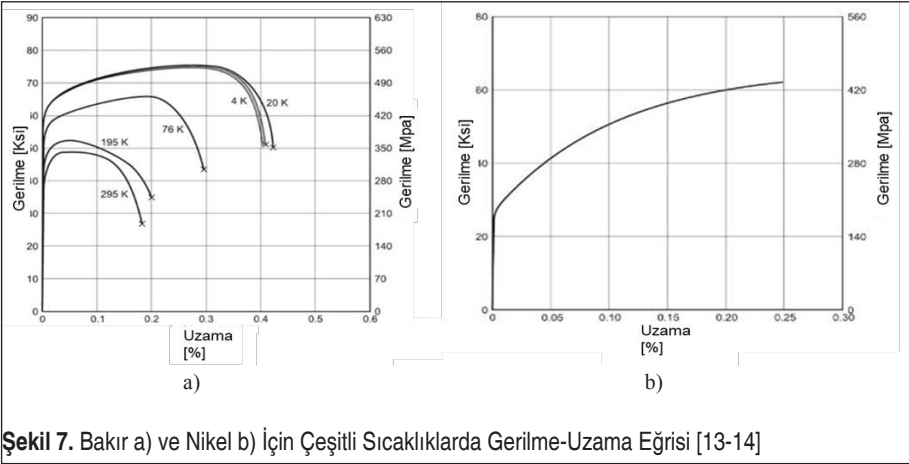
Plastik ABS için elastoplastik malzeme özellikleri ve ısı genleşme katsayısı tedarikçiden alınarak kullanılmıştır. Analizde kullanılan tüm malzemelerin ısı genleşme katsayıları arasındaki ilişki Tablo 4’te verilmiştir.

3.3 Sınır Koşulları ve Termal Çevrim

Fiziksel test sırasında parça araç üzerinde değil tekil olarak fırına koyulup test edilmektedir. Bu sebeple analizlerde parça tekil olarak incelenmiştir. Parçanın fırına yerleştirilme durumu göz önünde bulundurularak parçanın fırın yüzeyine değecek düğüm



Şekil 6. Krom için 25°C a) ve 300°C b)'de Gerilme-Uzama Eğrisi [12]



Şekil 7. Bakır a) ve Nikel b) için Çeşitli Sıcaklıklarda Gerilme-Uzama Eğrisi [13-14]

Tablo 4. Termal Genleşme Katsayıları

MALZEME	TERMALGENLEŞME KATSAYISI (10^{-6} m/(m K))
ABS	9.4 X
KROM	X
BAKIR	1.2 X
NİKEL	1.6 X



noktalarının tüm yönlerdeki öteleme ve dönme hareketleri kısıtlanmıştır.

Fiziksel testte parçalar, her bir sıcaklıkta belirli bir süre bekletilmektedir. Fakat malzemelere ait sürünme bilgileri elde edilemediği için analizlerde bekletilme durumu incelenememiştir. Bölüm 2.2 de belirtilen sıcaklık değişimleri, sonlu eleman analizinde dört ayrı termal statik yükleme adımında sırasıyla uygulanmıştır. Fiziksel test ve analizde uygulanan termal statik yükleme koşulu Şekil 8’de verilmiştir.

3.4 Termal Çevrim Analizleri

Analizlerde, termal yüklemeler sonucu oluşan gerilme dağılımı incelenerek hasar oluşabilecek bölgelerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Parça üzerinde kalınlık ölçümü yapılamadığı için inceleme senaryoları analiz edilmiştir. Buna ek olarak, sonlu eleman modelinde geometrik değişiklikler uygulanarak maksimum gerilme değerinin değişimi araştırılmıştır.

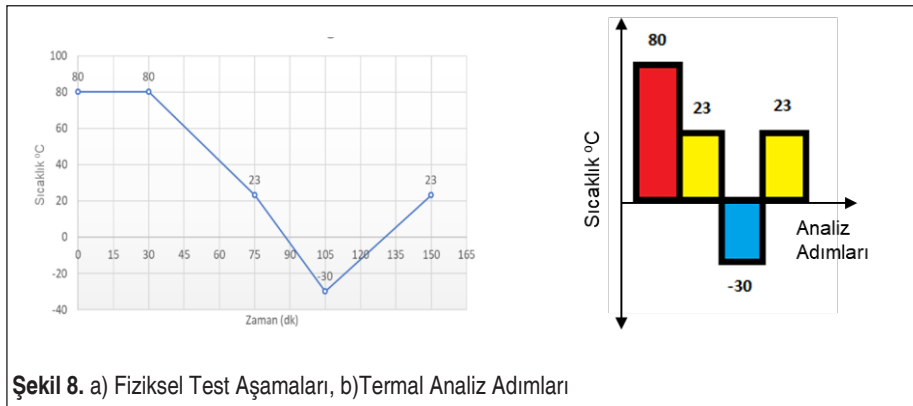
3.4.1 Nominal Kalınlık Analizleri

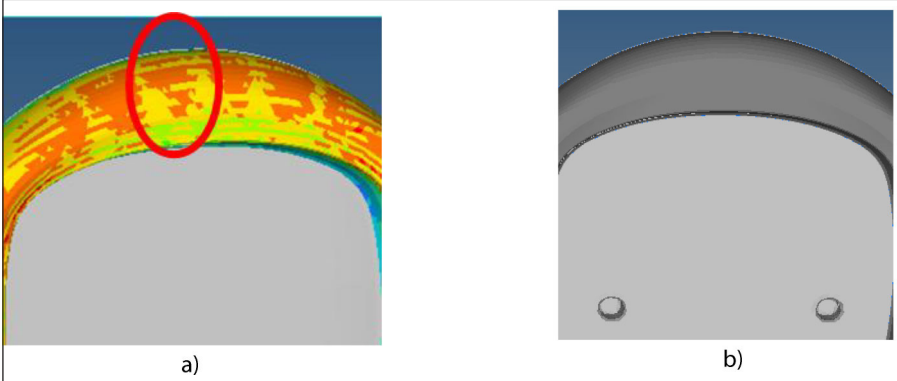
Normda belirtilen kalınlık bilgileri ile yapılan analizde sadece krom katmanına ait gerilme ve gerinim dağılımı sonuçları Şekil 9a’da görülmektedir. Hesaplanan maksimum gerilme değeri A MPa seviyesindedir ve malzemenin akma gerilme değerinin altında olduğu için kaplama üzerinde kalıcı deformasyon oluşmamıştır.

Gerilme dağılımı incelendiğinde, gerilme seviyesi arttığında düşey yönde kalıcı deformasyon oluşacağı ve kaplama üzerinde fiziksel teste benzer hasar oluşacağı öngörülmüştür. Bu nedenle Şekil 2’de görülen çatlak oluşma bölgesinde kalınlık incelenmesi senaryoları uygulanmıştır.

3.4.2 Kaplama Kalınlıklarının İncelenmesi Durumları

Fiziksel testlerde oluşan hasar durumlarının en önemli sebeplerinden biri kaplamanın





Şekil 9. a) Nominal Kalınlık Durumunda Oluşan Gerilme Dağılımı ve b) Kalıcı Deformasyon

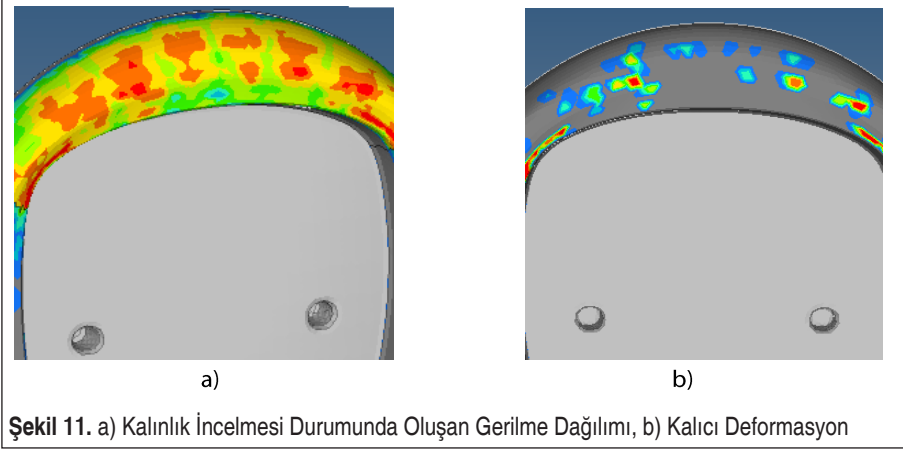
kalınlığının çatlayan bölgelerde nominal kalınlık değerlerini sağlamamasıdır. Testlerde karşılaşılan birçok farklı kaplama çatlağında yapılan incelemelerde, kaplama kalınlığının çatlama görülen yüzeylerde olması gereken değerlerin altında olduğu belirlenmiştir. Bu sebeple, fiziksel testte çatlama oluşan bölgede oluşabilecek kalınlık incilmesi senaryosu incelenmiştir. Bunun yanı sıra her bir katmanın kalınlığının tekil etkisi de incelenmiştir.

3.4.2.1 Üst Bölgede Kalınlık İncelmesi Durumu

Fiziksel testler sonrasında, parçanın üst kısmında çatlak ile karşılaşmıştır. Bölgenin eğri ve küçük olması nedeniyle kaplama katmanlarının kalınlıkları ölçülememiştir. Bu nedenle, kaplama katman kalınlıklarının %20 incelmesi varsayımı yapılarak analizler tekrar edilmiştir. Şekil 10'de kalınlık inceltmesi yapılan bölge sarı renkte gösterilmiştir.



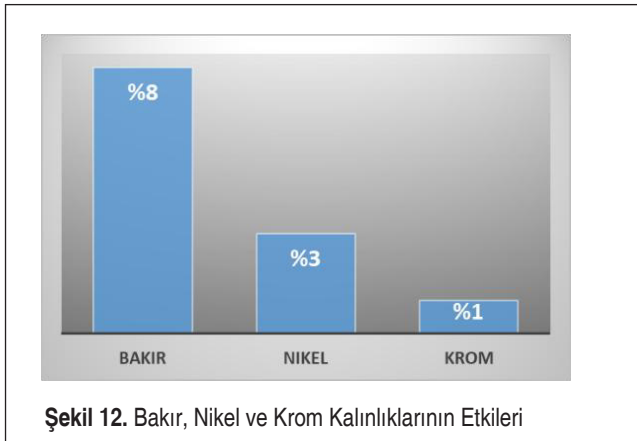
Şekil 10. Üst Bölge İçin Kalınlık İncelmesi Durumu



Şekil 11’de temel durum ile üst bölgede kalınlık incelmesi olan durum birlikte verilmiştir. Parça üzerinde oluşan maksimum gerilme değeri %7 artış göstererek 1,07A MPa olarak hesaplanmıştır. Ayrıca gerilme değeri akma mukavemetinden yüksek olduğu için parça üzerinde oluşan kalıcı gerinim değeri %B olarak hesaplanmıştır. Gerilme ve gerinim sonuçları incelendiğinde, fiziksel testte oluşan çatlaklara benzer gerilme dağılımı görülmektedir.

3.4.2.2 Bakır, Nikel ve Krom Kalınlıklarının Analizde Etkisi

Bakır, nikel ve krom kalınlıklarının, plastik deformasyon değerlerinde hangi ölçüde etkili olduğunun araştırılması için üç katmanda da ayrı ayrı %20 kalınlık incelmesi olduğu varsayılarak üç tane analiz yapılmıştır. Her bir katmanın plastik deformasyona etkisi yüzde olarak Şekil 12’de verilmiştir.



28 Mühendis ve Makina, cilt 61, sayı 698, s. 17-30, Ocak-Mart 2020



mı oluştuğu görülmektedir. Ayrıca maksimum gerilme, akma mukavemeti değerinin altında olduğu için kalıcı deformasyon oluşmamıştır. Analiz sonuçları Şekil 14’da verilmiştir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, krom kaplamalı parçalarda termal çatlak oluşumunu analiz eden bir metot geliştirilmiştir. Metotta her bir katman ayrı ayrı modellenip termal genleşme analizleri gerçekleştirilmiştir. Yüksek gerilme bölgeleri incelenip, kalıcı gerinim değerlerine bakılarak çatlak oluşma durumu incelenmiştir. Yapılan analizlerde, sonuçları etkileyen önemli faktörlerden birisinin üretim sırasında kaplamada oluşan kalınlık incelemeleri olduğu görülmüştür. Kaplama kalınlığında oluşan %20 incelmanın, maksimum gerilme değerini %7 oranında arttırdığı hesaplanmıştır. Dolayısıyla üretim sırasında kaplamada oluşan kalınlık incelemelerinin, kaplama üzerinde hasar oluşmasında büyük bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Kaplama kalınlığında bakır, nikel ve krom malzeme kalınlıklarının etkisi incelendiğinde en etkili olan malzemenin %8 oranıyla bakır olduğu görülmüştür. Buna göre parça üzerinde görülen hasara müdahale edildiğinde bakır kalınlığı artırılarak en iyi sonuç elde edilebileceği ortaya çıkmıştır.

Yapılan analizler sonucu plastik deformasyonlarda etkili olan bir diğer parametrenin parçanın arka kısmında yer alan kırıların olduğu ortaya çıkmıştır. Kırıların kaldırılması durumları için analiz yapıldığında hesaplanan maksimum gerilmede %13,5 seviyelerinde azalma görülmüştür. Bu sayede tasarım aşamasında yapılacak analizler sonucu plastik deformasyon görülen bölgelerde, benzer geometrik değişiklikler yapılarak tasarım iyileştirme çalışmaları yapılması olanağı sağlanmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK 1501 TEYDEB 3141073 numaralı projenin finansal desteği ile tamamlanmıştır.

KAYNAKÇA

1. Anonim, 2000. <https://www.omsaline.com>, (2015).
2. Streiberger, H.-J & Dössel, K.-F. 2008. “Automotive Paints and Coatings,” 2nd Edition, p. 335
3. Aniekan, I., Kelly, O.E., Abdulsamad, G. 2017. “Engineering Material Selection for Automotive Exhaust Systems Using CES Software,” International Journal of Engineering Technologies-IJET, Vol. 3, No.2
4. Ploypech, Suwat & Metzner, Martin & Beatriz dos Santos, Claudia & Jearanaisilawong, Petch & Boonyongmaneerat, Yuttanant. (2019). Effects of Crack Density on Wettability

- and Mechanical Properties of Hard Chrome Coatings. Transactions of the Indian Institute of Metals. 72. 10.1007/s12666-018-01553-4.
5. **E. Khodadad, M. K. Lei** 2014. Crack-bridging Bonding in Trivalent Chromium Composite Coatings on Pure Aluminum Using Carbon Nanotubes for Wear Resistance, International Journal of Electrochemical Science, vol.9, p. 2882 – 2895
 6. **Almotairi, A.** 2016. “Mechanical and Thermal Damage of Hard Chromium Coatings pn 416 Stainless Steel,” Master of Applied Science, Dalhousie University, Halifax
 7. **Umesh,F., Mallikarjun, B., Dr. Ramesh, C.S.** 2015. “Analysis of Bending Stresses On Coating Materials by Experimental and FE Method,” International Journal of Mechanical and Industrial Technology, Vol. 2, Issue 2, p. 41-50
 8. **Logan, H.** 1951. “Effect of Chromium Plating on the Plastic Deformation of SAE 4130 Steel”, Journal of Research of the National Bureau of Standards, vol. 46, No.6, p. 472-479
 9. **Johnson, R & L. Evans, John & Jacobsen, Peter & Thompson, J.R.R. & Christopher, Mark.** 2004. “The Changing Automotive Environment: High-Temperature Electronics” IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, vol. 27, No. 3
 10. FIAT Norm 2009, Chromium plated parts
 11. Abaqus, Analysis User’s Guide v6.13.
 12. **Heieck, J.** 1997. Mechanical Properties of High-Purity Chromium, Institute for Advanced Materials, Italy
 13. **Reed, R.P. and Mikesel, R.P.** 1967. Low Temperature Mechanical Properties of Copper and Selected Copper Alloys, Institute for Materials Research, National Bureau of Standarts Monograph 101, p. 35
 14. ASM International 2002, Atlas of Stress-Strain Curves, 2nd Edition, p. 631

Pnömatik Sistemlerde Enerji Verimliliği

Arda Zaim^{*1}
Haydar Aras²

ÖZ

Artan nüfus ve gelişen teknolojiyle birlikte enerji tüketimi ve maliyetleri günden güne artış göstermektedir. Ülkemiz fosil enerji kaynakları bakımından sınırlı kaynaklara sahip ve dışa bağımlıdır. Enerji ihtiyacının güvenilir, ekonomik ve yeterli bir biçimde karşılanabilmesi temel amaçtır. Bu bağlamda enerjinin verimli kullanımı üzerinde önemle durulması gereken hususlar arasında yer almaktadır. Enerji verimliliği, harcanan enerji miktarının, üretimdeki kapasite ve kaliteyi azaltmadan, ekonomik kalkınmayı ve sosyal refahı engellemekten en aza indirilmesidir. Bu çalışmada, endüstride en çok kullanılan ikincil enerji kaynağı basınçlı havayla çalışan pnömatik sistemlerdeki enerji verimliliği uygulamaları ele alınmış ve deneysel çalışmalarla desteklenmiştir. Basınçlı hava sistemi tasarımı verimliliği artıran unsurlar belirlenmiş; kompresör, silindir ve vakum ejektörü gibi pnömatik iş elemanlarında işletme basınçlarının düşürülmesiyle elde edilebilecek tasarruf miktarları hesaplanmıştır. Ciddi maliyetler oluşturan hava kaçaklarının tespiti ve maliyeti konusunda fiziki bulgular incelenmiş, enerji tasarruf fonksiyonlu ürünlerin kullanımı için yol gösterilmiştir. Çalışmanın, enerji arzında büyük oranda dışa bağımlı olan ülkemizin sanayi sektöründe enerji yoğunluğunun düşürülmesi ve karbon ayak izinin azaltılması faaliyetlerinde bir rehber niteliği taşıyacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Basınçlı hava, enerji verimliliği, enerji yoğunluğu, pnömatik

Energy Efficiency in Pneumatic Systems

ABSTRACT

With increasing population and developing technology, energy consumption and costs are increasing day by day. Our country has limited resources in terms of fossil energy sources and is dependent on foreign sources. The main objective is to meet the energy needs reliably, economically and adequately. In this context, efficient use of energy is important. Energy efficiency is the minimization of the amount of energy spent, without reducing the capacity and quality of production, preventing economic development and social welfare. In this study, energy efficiency applications in compressed air pneumatic systems are discussed. The elements that increase efficiency in the design of the compressed air system were determined; savings that can be achieved by reducing operation pressures in pneumatic equipments such as compressor, cylinder and vacuum ejector have been calculated. Physical findings about the detection and cost of leakages that cause serious costs were examined and a way was provided for the use of products with energy saving functions. It is considered that the study will be a guide in the activities of reducing the energy density and the carbon footprint of our country, which is highly dependent on foreign energy.

Keywords: Compressed air, energy efficiency, energy density, pneumatic

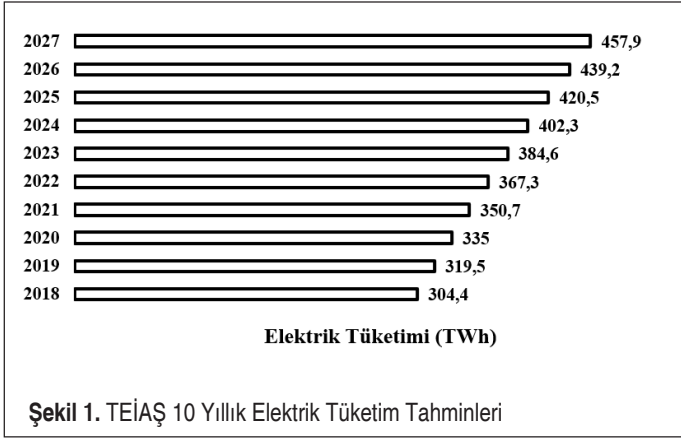
* İletişim Yazarı
Geliş/Received : 17.09.2019
Kabul/Accepted : 20.03.2020

¹ Makine Yüksek Mühendisi, FESTO Sanayi ve Ticaret A.Ş. Tuzla, İstanbul - arda.zaim@festo.com
ORCID: 0000-0002-2602-3169

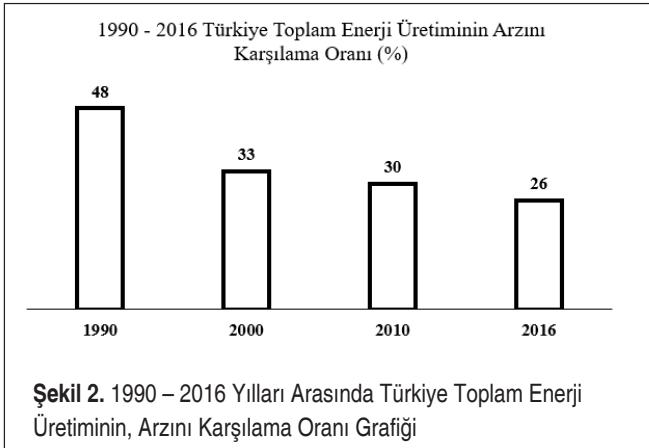
² Prof. Dr., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi - haras@ogu.edu.tr
ORCID: 0000-0001-8131-6426

1. GİRİŞ

Artan nüfus ve gelişen teknolojiyle birlikte enerji tüketimi ve maliyetleri günden güne artış göstermektedir. Ülkemizde 2018 yılında 303.3 TWh elektrik tüketimi ve 303.9 TWh elektrik üretimi gerçekleşmiştir. Elektrik üretimimizin %67,1'i kömür ve doğal gaz gibi fosil kaynaklardan, geri kalan %32,9'u ise yenilebilir enerji kaynakları olan hidrolik, rüzgar, güneş ve jeotermal enerjiden elde edilmiştir. Şekil 1'de gösterildiği gibi TEİAŞ 10 yıllık talep tahminleri raporuna göre 2027 yılında ülkemizdeki elektrik tüketiminin 2018 yılına kıyasla %50.4 artarak brüt 457.9 TWh olması beklenmektedir [1].



Elektrik üretimi için büyük oranda fosil enerji kaynaklarını kullanan ülkemiz fosil enerji kaynakları bakımından sınırlı ve dışa bağımlıdır. Şekil 2'de görüldüğü üzere Türkiye'nin toplam enerji arzında dışa bağımlılığı 1990 yılında %52 iken 2000 yılında %67, 2010'da %70 ve 2016 yılında %74'e ulaşarak son yirmi altı yılda %22 artış göstermiştir [2].

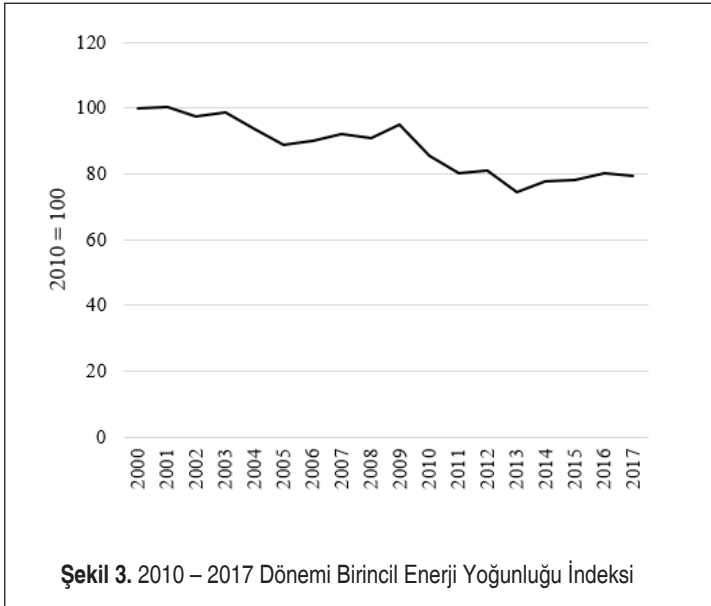




Enerji ihtiyacının güvenilir, ekonomik ve yeterli bir biçimde karşılanabilmesi temel amaçtır. Enerji verimliliği, harcanan enerji miktarının, üretimdeki kapasite ve kaliteyi azaltmadan, ekonomik kalkınmayı ve sosyal refahı engellemeden en aza indirilmesi- dir [3]. Enerji üretiminin, arzı karşılama oranında dışa bağımlılığı artan ülkemizde, enerjinin verimli kullanımı üzerinde önemle durulması gereken konular arasında yer almaktadır. Enerji verimliliği ve tasarrufu, enerji arz güvenliğinin sağlanması, dışa bağımlılık risklerini azaltılması, çevrenin korunması ve iklim değişikliğine karşı mücadelenin etkinliğinin artırılmasının sağlanması konularında önemli bir araçtır [4].

Enerji verimliliği tüm sektörler için önemli olmasına rağmen, önümüzdeki yılların enerji tüketimi ve sektörün enerji yoğunluğu açısından sanayi sektörü önceliklidir. Enerji yoğunluğu, Gayri Safi Milli Hasıla başına tüketilen birincil enerji miktarını temsil eden ve tüm dünyada kullanılan bir göstergedir. Bu gösterge içinde, ekonomik çıktı, enerji verimliliğindeki artış ve azalma, yakıt ikamesinde değişimler birlikte ifade edilmektedir. Enerji yoğunluğu; herhangi bir fiziksel ya da teknik göstergenin (enerji tüketimi, spesifik enerji tüketimi vb.) herhangi bir faaliyetin verimlilik düzeyini açıklayamadığı durumlarda bir enerji verimliliği göstergesi olarak kullanılmaktadır. Sanayi sektöründe enerji yoğunluğunun düşürülmesi ülkemizdeki enerji yoğunluğunun düşürülmesinde büyük bir etkiye sahip olacaktır [5].

Enerji İşleri Genel Müdürlüğü'nün 2000 – 2017 yılları arası için hazırlamış olduğu enerji yoğunluğu indeksi Şekil 3'de gösterilmektedir. Ülkemizde 2000 – 2017 dö-



neminde birincil enerji yoğunluğu indeksi ortalama %1.3 oranında azalmıştır. 2000 yılına göre bir karşılaştırma yapıldığında ise 2017 yılında birincil enerji yoğunluğu indeksinde %20.5 iyileşme söz konusudur. 02.01.2018 tarihinde yürürlüğe giren, ülkemizin ilk enerji verimliliği eylem planı olan Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı kapsamında 2023 yılına kadar yapılacak olan tasarruf eylemleriyle birincil enerji yoğunluğunda 2017 yılına kıyasla %14 oranında bir azalma hedeflenmektedir [6].

Karbon ayak izi her insanın ulaşım, ısınma, enerji tüketimi veya satın aldığı her türlü ürün neticesinde atmosfere yayılmasına neden olduğu karbon miktarını anlatmak üzere kullanılan bir terimdir. Başka bir deyişle, gerçekleştirdiğimiz her faaliyet için gerekli olan enerjinin üretilmesi sırasında atmosfere salınan karbon gazı toplamını ifade etmektedir [7]. Karbon ayak izi özellikle fosil yakıtlardan elde edilen enerjiye dayalı bir tanım olduğu için karbon ayak izinin azaltılması aynı zamanda enerji tüketiminin azaltılması veya optimizasyonu anlamına gelmektedir. Ülkemizde enerji ihtiyacının büyük oranda fosil kaynaklardan sağlandığı ve endüstride kullanılan basınçlı havanın elektrik enerjisiyle üretildiği göz önünde bulundurulduğunda pnömatik sistemlerdeki enerjinin verimli kullanımıyla karbon ayak izinde ciddi bir azalma meydana gelecektir [8].

Endüstride en çok kullanılan ikincil enerji kaynağı basınçlı havadır. Basınçlı havayı enerji kaynağı olarak kullanılan makine ve ekipmanlar pnömatik sistemler olarak tanımlanmaktadır. Pnömatik sistemlerde enerji verimliliği ise, pnömatik iş elemanlarında kullanılan havanın gerektiği kadar basınçlandırılması, şartlandırılması ve tüketilmesi esasına dayanmaktadır. Bu çalışmada basınçlı havayla çalışan pnömatik sistemlerdeki enerji verimliliği uygulamaları ele alınmış ve deneysel çalışmalarla desteklenmiştir. Çalışma basınçlı havanın verimli kullanımıyla enerji yoğunluğunun düşürülmesini ve karbon ayak izinin azaltılmasını amaçlamaktadır.

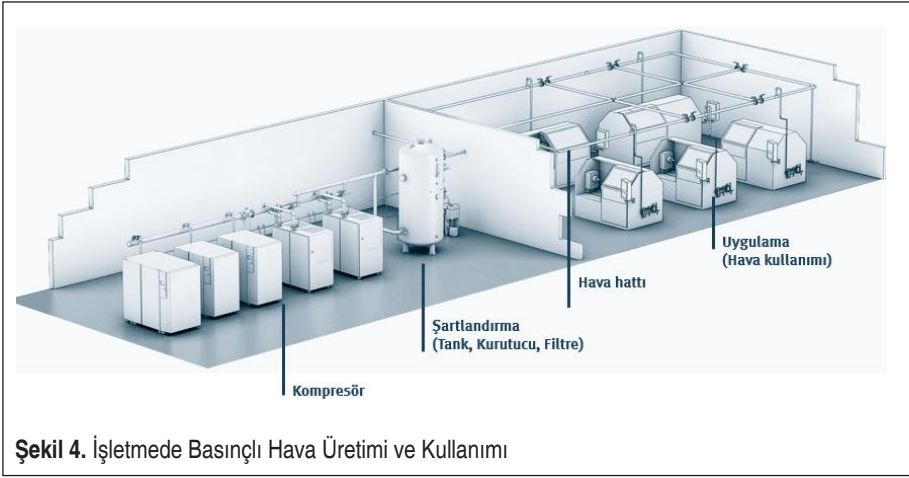
2. BASINÇLI HAVA ÜRETİMİ, ŞARTLANDIRILMASI VE İLETİMİNDE TASARRUF OLANAKLARI

Basınçlı hava dış ortamdan alınan atmosfer havasının bir kompresör ile belirli bir oranda sıkıştırılması ile elde edilmektedir. Elektrik enerjisinin olduğu her yerde elde edilebilen ve depolanabilir olması nedeniyle endüstride en çok tercih edilen enerji kaynaklarından birisidir. Basınçlı hava kolay elde edilip yaygın bir kullanıma sahip olmasına karşın oldukça pahalı bir enerji türüdür. Basınçlı hava kullanımı ve kompresörlerin enerji tüketimi verimlilik çalışmalarında dikkat edilmesi gereken unsurlar arasındadır [9].

Şekil 4’de örnek bir işletmedeki basınçlı hava üretimi, dağıtımı ve kullanımı gösterilmektedir. Burada hava kompresör tarafından sıkıştırılarak basınçlandırılmakta, tankta depo edilmekte, kurutucu tarafından soğutularak neminden arındırılmakta ve filtrelenerek işletmeye servis edilmektedir. Kompresörler; güneş ışığından ve ısı kaynakla-



rından uzak, sıcaklığın ve tozun az olduğu ortamlarda konuşlandırılmalıdır. Soğuk, temiz ve kuru hava prensip olarak verimli bir sıkıştırma sağlamaktadır. Kompresör emiş havası sıcaklığının her 5 oC düşürülmesiyle, verim %2 artış göstermektedir. Bu nedenle kompresör daireleri için binaların kuzey yönünde ve yağmurdan korunaklı bir konum tercih edilmelidir. Kompresörlerin eksoz havaları, bulunduğu ortamın sıcaklığını artırmayacak şekilde atmosfere verilmelidir. En düşük spesifik enerji ve yüksüz enerji tüketimine sahip kompresör seçimiyle elektrik enerjisi tüketimi ve işletme maliyetleri önemli ölçüde azaltılabilmektedir. Spesifik enerji tüketimini etkileyen diğer bir önemli husus ise periyodik bakımdır. Kompresörlerin verimli kullanılmasını sağlamak amacıyla periyodik bakımlar düzenli olarak yapılmalıdır [10,11].



Şekil 4. İşletmede Basıncı Hava Üretimi ve Kullanımı

Kompresör işletme basıncı mümkün olduğunca düşük tutulmalıdır. Yüksek basınç, yüksek enerji tüketimi ve maliyet demektir. Yüksek basınç istenen muhtelif noktalardaki cihaz ve makinelerin işletilebilmesi için ana sistem basıncının yükseltilmesi yerine, basınç lokal olarak basınç yükselticiler kullanılarak servis edilmelidir. Tablo 1’de kompresör işletme basıncının düşürülmesiyle elde edilebilecek tasarruf oranları gösterilmektedir [12].

Basıncı hava hatları tasarlanırken basınç kaybını minimize etmek için mümkün olduğunca keskin dönüşlerden kaçınılmalı, boru çapları doğru tayin edilmeli, hatta yoğunlaşan suyun ve yağ zerreciklerinin kolay ayrıştırılabilmesi için drenaj noktaları oluşturulmalı, ana hattan oluşturulan tali hatların deve boynu tekniğiyle oluşturulması ve hattın %1 oranında eğimli olmasına dikkat edilmelidir. Sabit boru şebekelerinde kompresörden çıkan havanın hattın sonuna kadar toplam basınç düşüşü 0,5 bardan fazla olmamalıdır. Basınç düşüşünün önüne geçmek amacıyla ring metodu benimsenerek tasarım yapılmalıdır [13].

Tablo 1. İşletme Basıncının Düşürülmesiyle Elde Edilebilecek Tasarruf

Basınç Düşüşü (bar)	Tasarruf (%)
12 - 11	8
11 - 10	8
10 - 9	9
9 - 8	10
8 - 7	11
7 - 6	12
6 - 5	14
5 - 4	17
4 - 3	20

Kurutucu seçimi yapılırken kompresörün sahip olduğu üretim kapasitesi dikkate alınmalıdır. Halihazırda yürürlükte olan ISO 8573-1:2010 basınçlı havada kalite standardı göz önünde bulundurularak işletmede kullanılması gereken hava kalite sınıfı tespit edilmeli, hava gerektiği kadar şartlandırılmalıdır. Gereğinden fazla yapılan şartlandırma işleminde basınç ve debi kayıpları meydana gelecek, bu durum maliyetin artmasına neden olacaktır. Filtreleme işlemi düşük hassasiyetten yüksek hassasiyete doğru yapılmalıdır. Şekil 5’de gösterilen şartlandırıcı ünitelerinde kullanılan filtre kartuşlarının periyodik olarak değiştirilmesine dikkat edilmelidir. Sinter filtrelerin temizlenebilme özelliği yoktur, bu nedenle kirlenen filtreler mutlaka değiştirilmelidir. Aksi takdirde filtre olması gerekenden fazla basınç kaybına neden olarak hava maliyetini artıracaktır. Pratik olarak fark basıncı metoduyla işletme özel periyodik bakım aralıkları belirlenmelidir.



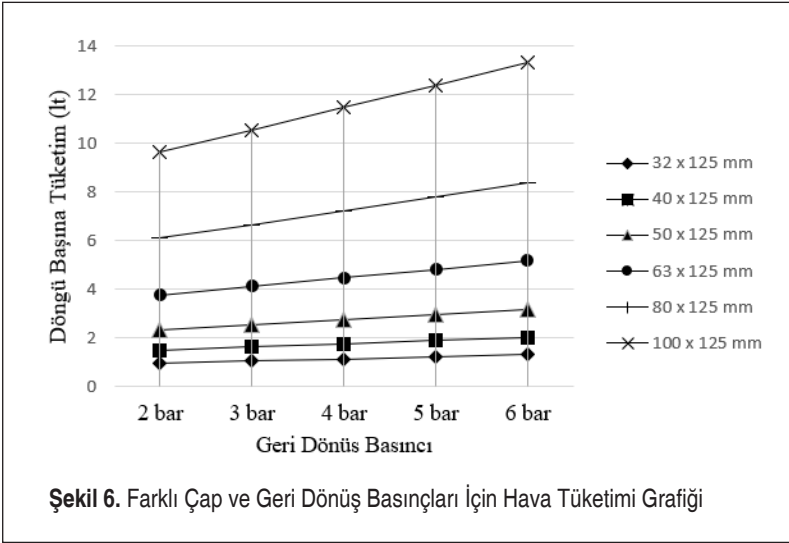


3. PNÖMATİK EKİPMANLARDA ENERJİ VERİMLİLİĞİ UYGULAMALARI

Pnömatik iş elemanlarında doğru ürün seçimiyle tasarruf elde etmek mümkündür. Tasarım safhasında pnömatik iş elemanları, mevcut uygulamaya göre itme kuvvetleri göz önünde bulundurularak optimum şekilde seçilmelidir. Tablo 2’de 200 mm strok boyuna sahip ISO 15552 pnömatik silindir çaplarının bir alt kademeye düşürülmesiyle elde edilebilecek tasarruf miktarları gösterilmektedir.

Tablo 2. Çap Düşürülmesiyle Elde Edilebilecek Enerji Tasarrufu

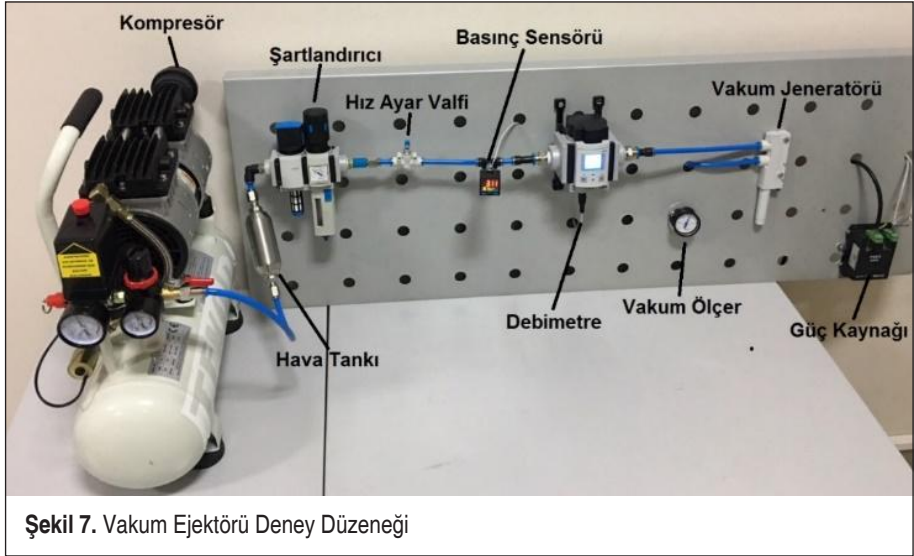
Çap Düşüşü (mm)	Tasarruf (%)
125 - 100	34
100 - 80	36
80 - 63	37
63 - 50	36
50 - 40	37
40 - 32	32



Pnömatik iş elemanlarında mekanik bir değişiklik yapmadan da enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. Tek yönlü iş yapan (itme ya da çekme yönünde) çift etkili (ileri ve geri hareketini havayla gerçekleştiren) pnömatik iş elemanlarında geri dönüş basıncının prosesi etkilemeyecek derecede düşürülmesiyle hava tüketimi azaltılabilmektedir.

Şekil 6’da 125 mm strok boyuna sahip ISO 15552 pnömatrik silindirlerin geri dönüş basıncının düşürölmesiyle elde edilebilecek tasarruf miktarları gösterilmektedir.

Endüstride basınçlı havayı kullanan önemli elemanlardan biri de vakum ejektörüdür. Vakum ejektörü enerji kaynağı olarak basınçlı havayı kullanarak vakum elde eden cihazlardır. Vakum ejektörü, herhangi bir hareketli parça olmadan pnömatrik olarak venturi prensibiyle vakum üretmektedir. Kompakt yapısı ve ilk yatırım maliyetinin düşük olması nedeniyle endüstriyel taşıma uygulamalarında kendine önemli bir yer edinmiştir. İlk yatırım maliyetinin düşük olmasına karşın bu cihazların işletme maliyetleri ciddi derecede yüksektir [14]. Venturi prensibine göre çalışan 1.4 mm orifis çapına sahip bir vakum ejektörünün optimum çalışma koşullarını belirlemek amacıyla Şekil 7’de gösterilen deney düzeneğı oluşturulmuştur. Farklı basınç ve debi değerlerinde vakum ejektörünün hava tüketimi, vakum basıncı ve vakum debisi değerleri belirlenmiştir.

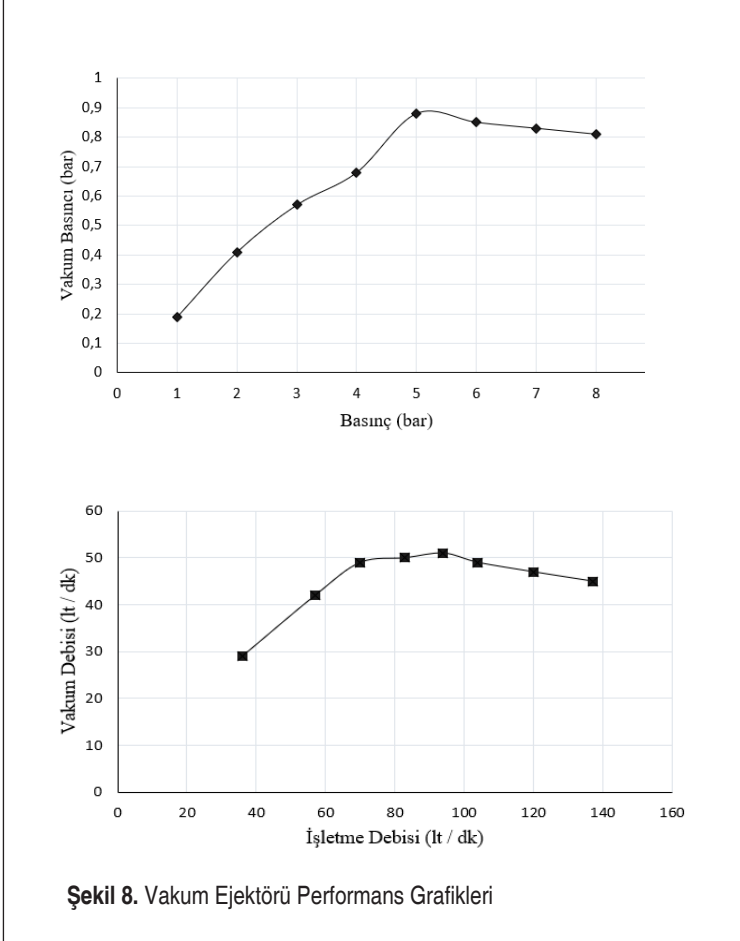


Şekil 7. Vakum Ejektörü Deney Düzeneğı

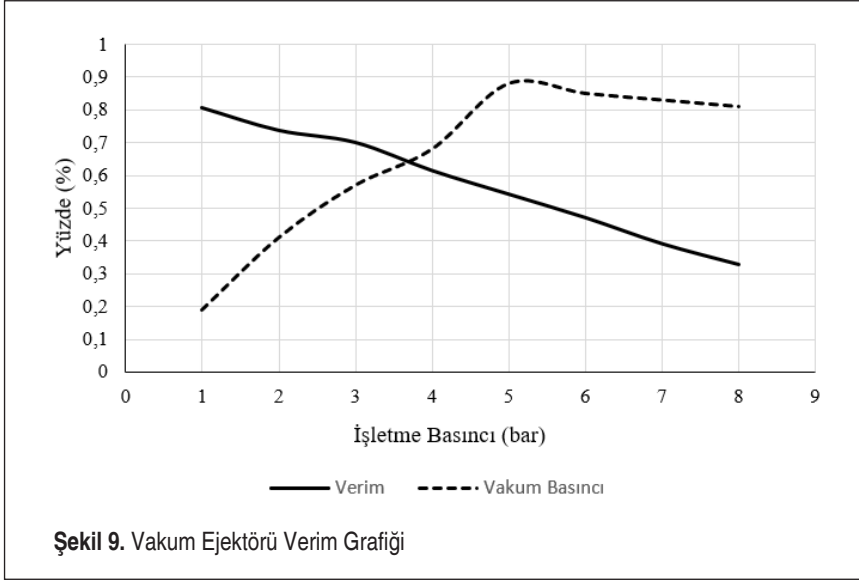
Şekil 8’de görölceğı gibi 1.4 mm orifis çapına sahip venturi prensibiyle çalışan pnömatrik ejektöründe elde edilebilecek maksimum vakum basıncı, 5,0 bar basınçlı hava beslemesiyle oluşmaktadır. Bu tip vakum ejektörlerinin kritik işletme basıncının üzerinde bir basınçla işletilmesi enerjinin verimsiz kullanımına örnek teşkil edecektir. Verim düşecek, birim başına harcanan enerji miktarı artış gösterecektir. Maksimum vakum debisi değeri olan 51,2 lt/dk’ya 5,0 bar basınç ve 94 lt/dk işletme debisi parametrelerinde ulaşılmaktadır. Bu noktadan sonra işletme debisi artarken vakum debisi değeri azalış gözlenmektedir. Maksimum vakum basıncı grafiğinde olduğı



gibi, vakum debisi için de kritik basınç değeri 5,0 bar'dır. Vakum ejektörünün kritik işletme basıncının üzerinde çalıştırılması performans kaybına ve enerji tüketiminin artmasına neden olmaktadır.



Şekil 9'da hacimsel verim ve vakum basıncı değerlerinin, işletme basıncıyla olan ilişkisi gösterilmektedir. Vakum ejektörünün hacimsel verimi, elde edilen vakum debisi değerinin hava tüketimine oranlanması ile hesaplanmaktadır. 1,0 bar işletme basıncında %80,5 olan hacimsel verim, 8,0 bar işletme basıncında %32,8'e kadar düşmektedir. 3,7 bar işletme basıncında hacimsel verim ve vakum basıncı eğrileri kesişmektedir. Optimum nokta olarak tanımlanabilecek bu noktada hacimsel verim ve vakum değeri %64,7'dir. Enerji tüketimi açısından irdelendiğinde 3,7 bar işletme basıncında hava tüketimi 79,1 lt/dk, vakum debisi 49,7 lt/dk ve vakum basıncı -0,647 bar olarak ölçülmektedir.



Şekil 9. Vakum Ejektörü Verim Grafiği

Pnömatik vakum ejektörü performansı ve enerji verimliliği açısından durum değerlendirildiğinde, maksimum vakum basıncı ve vakum debisi değerlerine ulaşılan işletme basıncı 5,0 bar, optimum noktadaki işletme basıncı 3,7 bar olarak tespit edilmiştir. Belirtilen işletme basıncı değerleri için hava tüketimi miktarları Tablo 3’de gösterilmektedir. Vakum ejektörünün yılda 3000 saat çalıştığı öngörüldüğünde; sırasıyla 3,7, 5,0 ve 7,0 bar işletme basınçlarında yıllık hava tüketimleri 14238 m³, 16920 m³ ve 21636 m³ olmaktadır. İşletme basıncı 7,0 bar’dan kritik basınç olan 5,0 bar’a düşürüldüğünde %21,8, 7.0 bar’dan ekonomik basınç olan 3,7 bar’a düşürüldüğünde ise %34,2 oranında tasarruf sağlanabilmektedir.

Tablo 3. Farklı İşletme Basınçları İçin Hava Tüketimleri

İşletme Basıncı (bar)	Hava Tüketimi (lt/dk)	3000 Saatlik Hava Tüketimi (m ³)
3,70	79,1	14238
5,00	94,0	16920
7,00	120,2	21636

Pnömatik sistemlerde enerji verimliliğini etkileyen diğer bir önemli unsur ise hava kaçaklarıdır. Birçok endüstriyel tesiste önemsiz olarak nitelendirilen kaçaklar ciddi bir maliyet oluşturmaktadır. Bu kaçakların bir kısmı insan kulağının duyabileceği frekansta olup, bir kısmı ise ultrasonik detektörler tarafından tespit edilebilmektedir. Tablo 4’de farklı basınçlarda belirli bir çaptan geçebilecek hava debisi değerleri gösterilmektedir.

**Tablo 4.** Farklı Basınçlarda Belirli Bir Çaptan Geçebilecek Hava Debisi

Farklı basınçlarda belirli bir çaptan geçebilecek hava debisi (lt/dk)					
Çap	0.5 mm	1 mm	1.5 mm	2.0 mm	2.5 mm
4 bar	9	36	81	145	226
5 bar	11	45	102	181	282
6 bar	14	54	122	217	339
7 bar	18	72	163	289	452

Hava kaçaqları mekanik hasarların yanı sıra özellikle bağlantı elemanları ile hortumlar arasındaki tolerans farklılıkları nedeniyle meydana gelmektedir. İşletmelerde basınçlı havanın verimli kullanımını sağlamak amacıyla kaçak seviyesi en aza indirgenmeli, Şekil 10'da gösterildiği gibi ultrasonik dedektörlerle periyodik olarak kaçak tespit uygulamaları gerçekleştirilmelidir.

**Şekil 10.** Ultrasonik Dedektörle Kaçak Tespiti

Endüstride üretim proseslerinde birçok sektörde açık üfleme uygulamaları yaygın olarak tercih edilmektedir. Açık üflemler kurutma, soğutma ve temizleme gibi işlemler için kullanılmaktadır. Bu işlemlerde tüketilen hava miktarı oldukça fazladır. Enerji verimliliği açısından açık üfleme uygulamaları için ürün ve proses kalitesinden ödün vermeden fan havası üflemleri sistemlere entegre edilmelidir. Hava tabancası kullanımında enerji tasarruf fonksiyonu olan ürünlerin kullanımına öncelik verilmelidir. Şekil 11’de görüleceği üzere enerji tasarruf fonksiyonlu hava tabancaları tercih ederek %60’lara varan tasarruf sağlamak mümkün olmaktadır.



Şekil 11. Hava Tabancası Tüketim Karşılaştırması

Enerji verimliliğinin temeli harcanan enerji miktarının üretimdeki kapasiteyi ve kaliteyi azaltmadan en aza indirilmesidir. Verimlilik konusunda yorum yapabilmek için üretilen ve tüketilen hava miktarlarının bilinmesi gereklidir. Şekil 12’deki gibi debimetreler kullanılarak hava tüketimleri sürekli olarak takip edilmelidir. Basıncı hava- nın verimli kullanımını artırmak amacıyla bu ölçümler makine bazına indirgenmeli, debimetre cihazlarının kullanımı yaygınlaştırılmalıdır.



Şekil 12. Saplama Probu Debimetre

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, endüstride en çok kullanılan enerji kaynaklarından birisi olan basınçlı havayla çalışan pnömatik sistemlerdeki enerji verimliliği uygulamaları ele alınmış ve deneysel çalışmalarla desteklenmiştir. Basınçlı havanın elde edilmesi, şartlandırılması, depolanması, iletilmesi ve pnömatik iş elemanlarında kullanımı enerji verimliliği yönünden değerlendirilerek örneklerle irdelenmiş ve karşılaştırmalı sonuçlara yer verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde pnömatik sistemlerde enerji tasarruf potansiyelinin büyük bir önem arz ettiği açıkça görülmektedir. Pnömatik sistemlerde enerjinin verimli kullanımıyla ilgili öneriler ve dikkat edilecek hususlar aşağıdaki gibidir.

1. İşletmenin hava ihtiyacı göz önüne alınarak, en düşük spesifik enerji ve yüksüz enerji tüketimine sahip kompresör seçimi yapılmalıdır. Kompresör işletme basıncı mümkün olduğunca düşük tutulmalıdır. İşletme basıncının 7 bar'dan 6 bar'a düşürülmesiyle enerji tüketiminde %12 tasarruf sağlanabilmektedir.
2. Basınçlı hava hatları tasarlanırken minimum basınç kaybı olacak şekilde doğru boyutlandırma yapılmalıdır. Ring metodu benimsenmeli, yoğuşan su ve yağ zerreciklerinin ayrıştırılabilmesi için drenaj noktaları oluşturularak hattın %1 oranında eğimli olmasına dikkat edilmelidir.
3. ISO 8573-1:2010 Basınçlı havada kalite standardı uyarınca gerekli hava kalitesi

belirlenmeli, basınç ve debi kayıplarını önlemek amacıyla hava gerektiği kadar şartlandırılmalıdır.

4. Tasarım sürecinde pnömatik iş elemanları doğru seçilmeli, olması gerekenden fazla itme kuvvetine sahip ürünler enerji tüketiminin artmasına neden olmaktadır. ISO 15552 pnömatik silindirlerde bir alt çapa geçilmesiyle ortalama %30 oranında daha az hava tüketilmektedir.
5. Tek yönde iş yapan çift etkili pnömatik iş elemanlarında geri dönüş basıncının prosesi etkilemeyecek derecede düşürülmesiyle hava tüketimi azaltılabilmektedir. ISO 15552 32 x 125 mm pnömatik silindirin geri dönüş basıncının 6 bardan 2 bara düşürülmesiyle nihai tüketim %26,5 oranında azalmaktadır.
6. Venturi prensibine göre çalışan vakum ejektörlerinde uygulama için optimum işletme basıncı belirlenmeli, ejektör bu basınçta işletilmelidir. Örnek bir uygulamada işletme basıncının 7 bardan, ekonomik basınç olarak tespit edilen 3,7 bar'a düşürülmesiyle yaklaşık %35 oranında tasarruf sağlanabilmektedir.
7. Pnömatik sistemlerdeki hava kaçakları ciddi maliyetler oluşturmaktadır. İşletmelerde ultrasonik kaçak dedektörleri kullanılarak periyodik kaçak tespit servisleri uygulanmalıdır. 6 bar basınçta 1 mm'lik delikten dakikada 54 lt hava geçebilmektedir.
8. Açık üfleme işlemlerinde ürün ve proses kalitesinden ödün vermeden eğer uygulanabiliyorsa fan havası tercih edilmelidir. Fan havasının entegre edilemediği durumlarda ise direkt üfleme yerine enerji tasarruf fonksiyonlu nozullar kullanılmalıdır. Hava tabancalarında enerji tasarruf fonksiyonlu ürünlerin kullanımıyla tüketim yaklaşık %60 oranında azaltılabilmektedir.
9. Verimlilik konusunda yorum yapabilmek için üretilen ve tüketilen hava miktarları debimetreler kullanılarak sürekli olarak takip altına alınmalıdır.

Bu çalışmanın, enerji arzında büyük oranda dışa bağımlı olan ülkemizin sanayi sektöründe enerji yoğunluğunun düşürülmesi ve karbon ayak izinin azaltılması faaliyetlerinde bir rehber niteliği taşıyacağı düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

1. Türkiye Elektrik İletim A.Ş. Genel Müdürlüğü. 2017. "10 yıllık talep tahminleri raporu (2018 – 2027)", Ankara.
2. TMMOB Makinü Mühendisleri Odası. 2018. "Türkiye'nin Enerji Görünümü 2018", Oda Raporu, Yayın No MMO/691, Ankara.
3. **Frigerio, N., Matta, A.** 2015. "Energy-Efficient Control Strategies for Machine Tools With Stochastic Arrivals", IEEE Transactions on Automation Science and Engineering 12 (1): 50 – 6.



4. **Uzun, A., Değirmen, M.** 2018. “Endüstriyel işletmelerde enerji verimliliği ve enerji yönetimi”, Uluslararası Ekonomik Araştırmalar Dergisi, Cilt:4, Sayı:2.
5. **TMMOB Makina Mühendisleri Odası.** 2012. “Dünya’da ve Türkiye’de enerji verimliliği”, Oda Raporu, Yayın No MMO/589, Ankara.
6. **Enerji İşleri Genel Müdürlüğü.** 2018. “Birincil ve nihai enerji yoğunluğu 2010 – 2017”, Ankara.
7. **Caro, D.** 2018. “Carbon footprint”, Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, Elsevier.
8. **Gönençgil, B.** 2008. “Doğal süreçler açısından iklim değişikliği ve insan”, Çantay Yayınevi, ISBN: 978-975-9060-50-3.
9. **Saidur, R., Rahim, N.A., Hasanuzzaman, M.** 2010. “A review on compressed air energy use and energy savings”, Renewable and Sustainable Energy Reviews 14, p.1135-1153.
10. **Unger, M., Radgen, P.** 2017. “Energy efficiency in compressed air systems- a review of energy efficiency potentials, technological development, energy policy actions and future importance” International Conference on Energy Efficiency in Motor Driven Systems, Rome, Italy.
11. **Kaya, D., Phelan, P., Chau, D., Sarac, H. I.** 2002. “Energy conservation in compressed air systems”, International Journal of Energy Research, vol.26,p.837-849.
12. **Dindorfa, R.** 2012. “Estimating potential energy savings in compressed air systems”, Procedia Engineering 39:p.204-211.
13. **Emil, M.** 2001. “Hava dağıtım sistemleri”, II.Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi Bildiriler Kitabı, Oda Yayın No: E/2001/278-1, İzmir.
14. **Endo, M., Iwamoto, J.** 2003. “A study of flow field in vacuum ejector driven by air”, ASME/JSME 2003 4th Joint Fluids Summer Engineering Conference.

Ada Tipi Solenoid Valflerde Akış Analizi Yardımı ile Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi

Kadir Çavdar^{*1}, Mustafa Karataş², Hüseyin Yaşar³

ÖZ

Pnömatik kontrol alanında kullanılan solenoid valflerde oluşan iç akışların incelendiği bu çalışmada, valf pistonunun iki farklı konumu sonucunda oluşan ve akışkanın izlediği A ve B hatlarında, hat boyunca meydana gelen basınç değişiklikleri ve hız değişimleri analiz edilmiştir. A ve B hatları içinde valf üzerinde bazı tasarım değişiklikleri yapılarak bunların etkileri gözlenmiştir. Tasarım iyileştirmeleri ile sağlanan hız ve basınç dağılımında gözlenen değişiklikler, valfte oluşan akış kayıplarının azaldığı şeklinde yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Valf adası, CFD, pnömatik

Determination of Design Parameters in Solenoid Valves Groups By Means of Flow Analysis

ABSTRACT

In this study, the flow characteristics of a solenoid valve used in the pneumatic controls were analysed and the pressure and velocity changes along the line in the A and B lines which are formed as a result of two different positions of the valve piston are introduced. Some design changes were made on the valve in lines A and B and their effects were observed. The changes observed in the speed and pressure distribution provided by the design improvements were interpreted as an improvement in the flow losses occurring in the valve.

Keywords: Valve groups, CFD, pneumatic

* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 06.10.2019

Kabul/Accepted : 13.02.2020

¹ Prof. Dr., Bursa Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa - cavdar@uludag.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9126-0315

² Hid-Tek AR-GE Merkezi - mustafa.karatas@hid-tek.com.tr, ORCID: 0000-0002-1198-3714

³ Bursa Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa - huseyinyasar@uludag.edu.tr, ORCID: 0000-0001-8137-7253



GİRİŞ

Yazılım kontrollü pnömatik solenoid ada valfleri; su, atık su, kimya, petrol, gaz, biyoteknoloji, ilaç, gıda, içecek, otomotiv, makine imalat, enerji, ağaç işleme, kâğıt ve madencilik gibi sektörlerin otomasyon sistemlerinde kullanılmaktadırlar. Kompakt yapıları sayesinde az yer kaplayıp makinelerdeki birçok kumanda işlemini hızlı şekilde yapabilirler.

Yazılım kontrollü pnömatik solenoid ada valfleri, elektriksel uyarı sistemi ile bütün otomasyon sistemlerine kolay bağlantı ve haberleşme sağlayabilen kullanışlı yapılardır. Günümüzün modern makinelerinde sıklıkla kullanılmaktadırlar. En fazla 128 solenoid valf kontrol edebilecek şekilde genişletilebilen valf adalarında bir hattan daha fazla valfin kontrol edilebilmesi mümkündür. Böylelikle hat sayısında ve kabinde kablolama, borulama ve diğer elektrik bağlantılarında tasarruf ile avantajlar elde edilebilir. Bu çalışmada, solenoid valfin tasarımında kullanılabilecek bir yaklaşım açıklanmaktadır. Valf içerisindeki akış analiz edilerek içyapının uygun formda hazırlanması amaçlanmıştır.

Üç boyutlu CFD modellemesi kullanılarak akışla ilişkili kuvvetlere (basınç kuvveti ve viskoz kuvvet) yönelik bir hesaplama yöntemi önerilen çalışmada ilk olarak her yö-rüngeden akış ile ilişkili kuvvetler tarafından etkilenen yüzey tanımlanmış ve ardından CFD metodu kullanılarak akış kuvvetlerinin değerleri belirlenmiştir. Çalışmada akış kuvvetlerini azaltmak amacıyla valf gövdesine ilave dâhili kanallar eklenmiştir [1]. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) ve deneysel araştırmalar yoluyla oluk formunun akış karakteristikleri üzerine yapılan çalışmada üç kademenin kısma rijitliği incelenmiştir; sonuçlara göre, avantaj olarak farklı U-şeklindeki olukların, küremsi-şekilli oluklarla üçgen-şekilli olukların arasına düştüğü görülmektedir [2].

Üç boyutlu akışkan-dinamiği yaklaşımının en iyi valf geometrisini geliştirmede, prototip ihtiyaçlarını azaltmada, sonuç olarak pazara giriş zamanlamasında ve geliştirme maliyetlerinin azaltılmasında mühendisler için çok yönlü yardımcı olabileceği belirtilmektedir. Benimsenen metodoloji, valf tasarımcısına valf performansını geliştirmek hedefiyle iç geometrinin tasarımında büyük ölçüde yardımcı olmaktadır [3].

3/2 pnömatik bir valf için yapılan çalışmada farklı çaplarda ($\phi 6$ mm, $\phi 8$ mm, $\phi 12$ mm) pnömatik bağlantı elemanları kullanarak ve bağlantı elemanı kullanılmayan durumları için valf içinde akan havanın basınç ve hız değerleri karşılaştırılmıştır. Çalışmada, Ansys CFX yazılımı kullanılmış olup k- ϵ türbülans modeli ile çözümler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yönteminin tasarım çalışmalarının karar verme sürecinde etkin bir şekilde kullanılabileceği belirtilmektedir [4].

Bir başka 3/2 pnömatik bir valf çalışmasında, aynı çalışma şartları için numerik ve deneysel metodlarla karşılaştırmasını yapmış ve iki çalışma arasındaki farkı ortaya

koymuşlardır. İki metod ile yapılan çalışmalar neticesinde yakın sonuçlar elde edildiği görülmüştür ve bağıl hata %1,8 olarak bulunmuştur. Bu çalışma sonucunda hesaplamalı akışkanlar dinamiği yönteminin kullanılması, pahalı test ekipmanlarının ve zaman kaybının önüne geçilmesi için alternatif olarak görülmektedir [5].

Hidrolik bir valfin tasarımı için numerik ve deneysel çalışmalar sonucunda, ilk olarak mevcut bir valf belirlenmiş ve bu valfin tasarımları kullanılarak, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) metodu ile valf içindeki basınç değişimleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar yorumlanarak yeni bir tasarım ortaya konmuştur. Yeni tasarım ile birlikte valf boyunca basınç kayıplarında %11 oranında azalma görülmüştür. Bu tasarım ile prototip üretimi yapılarak test çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Numerik yöntem ile deneysel yöntemin karşılaştırılması sonucunda hatanın % 1'in altında kaldığı belirtilmektedir [6].

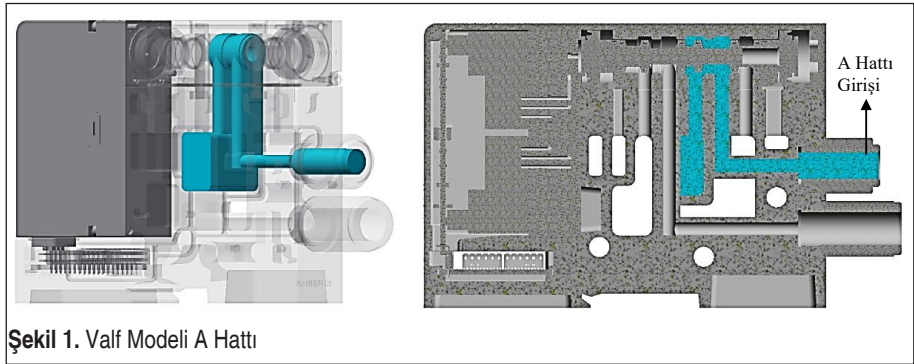
Literatürde bundan başka çok sayıda çalışmada türbülanslı boru akışı incelenmiş ve hem deneysel hem de teorik sonuçlar rapor edilmiştir [7-10].

Yukarıdaki bilgiler incelendiğinde hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yöntemi kullanılarak yapılan çalışmaların sonuçları ile valf modellerinin prototipleri ile yapılan deney sonuçları karşılaştırıldığında hata paylarının düşük olduğu görülmektedir. Tasarım süreçlerinde numerik yöntemler kullanılarak yapılan çalışmalar, prototip masraflarını ve üretim ve testlerde harcanan zamanın azalmasına katkı sunmaktadır.

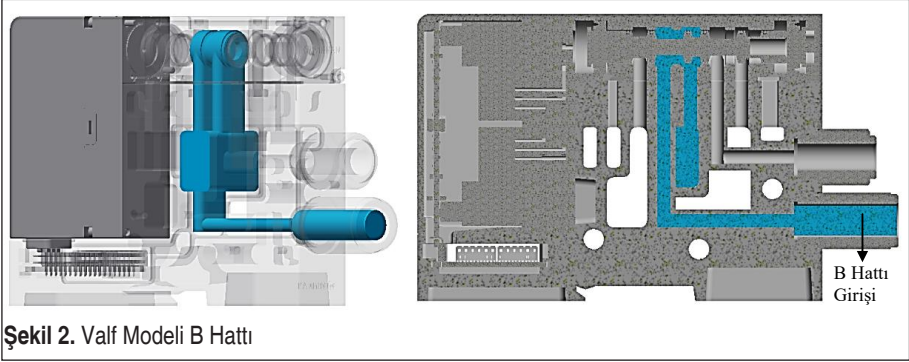
2. VALF ANALİZ MODELİNİN OLUŞTURULMASI

CFD analizinde kullanılmak üzere ilk olarak valfin A ve B akış hatları için modeller hazırlanmıştır. Valf modelleri için Autodesk Inventor yazılımı kullanılmıştır. Pistonun pozisyonuna göre değişen ve aktif hale gelen hatlar için A ve B hattı olmak üzere 2 ayrı model hazırlanmıştır. Bu modellerden A hattı Şekil 1 ve B hattı Şekil 2'de gösterilmiştir.

Analiz çalışması sonucunda elde edilen ilk sonuçlara göre; aynı hatlar için bazı de-ği-



Şekil 1. Valf Modeli A Hattı



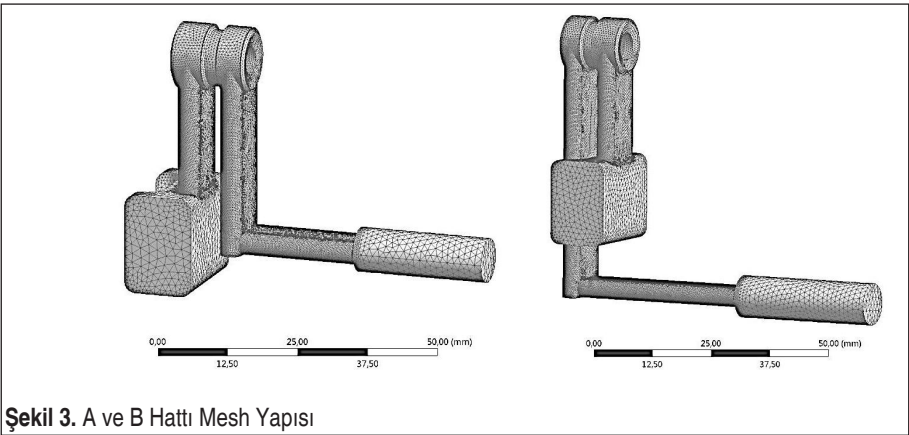
Şekil 2. Valf Modeli B Hattı

şiklikler yapılarak, bu değişikliklerin valf üzerindeki etkileri de ayrıca incelenmiştir. Benzer modeller güncellenmiş valf tasarımları için de uygulanmıştır.

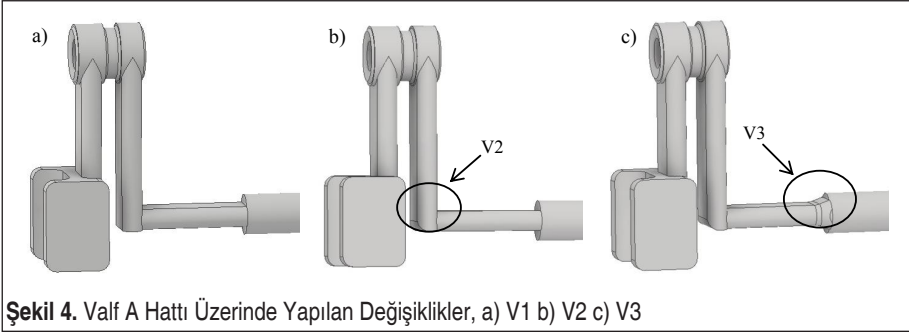
Şekil 3'te A hattı ve B hattı için hazırlanmış örgü yapısı verilmektedir. Örgü yapısının oluşturulması ve çözümlemenin yapılması için ANSYS yazılımı Workbench modülünde bulunan Fluent uygulaması kullanılmıştır. Örgü yapısının düzenlenmesi ve geliştirilebilmesi için "Curvature" mesh tipi kullanılmıştır. Analiz modeli için kullanılacak olan mesh yapılarında; A hattı için 82694 adet düğüm, 416040 adet mesh elemanı, B hattı için 107012 adet düğüm, 540448 adet mesh elemanı kullanılmıştır. Her iki model için inflation katmanı maksimum 5 seçilmiştir.

Çalışmada akışkan olarak hava seçilmiştir. Analiz çözümlerinde duvarlarda kayma olmadığı, modelin termal denge koşullarında olduğu ve pistonların A ve B hattı için tam olarak yerleşmiş durumda olduğu kabul edilmiştir. Ayrıca kanal duvarlarının pürüzlülüğü ihmal edilmiştir.

Valfte pistonun iki farklı konumu sonucunda oluşan A ve B hattı için yapılan tasarım



Şekil 3. A ve B Hattı Mesh Yapısı



Şekil 4. Valf A Hattı Üzerinde Yapılan Değişiklikler, a) V1 b) V2 c) V3

değişiklikleri V2 ve V3 tipleri olarak belirlenmiştir. V2’de havanın ilerleyeceği hatta değişiklik yapılırken (Şekil 4), V3 tipinde hava girişinin olduğu bölgede değişiklik yapılmıştır. Benzer değişiklikler B hattında da yapılmıştır. İlk tasarımlar ise V1 olarak isimlendirilmiştir.

3. CFD YÖNTEMİ KULLANILARAK AKIŞ ANALİZİ

3.1 Türbülans Modeli

ANSYS/Fluent üzerinde yapılan çalışmalarda yazılım, k-ε, k-ω ve Reynolds türbülans modelleri ile çalışma imkânı vermektedir. Bu çalışmada k-ε türbülans modeli seçilmiş olup, incelenen pek çok çalışmada ([1],[2],[7]) k-ε türbülans modelinin tercih edildiği görülmüştür. Türbülans kinetik enerjisi k ve dağılma faktörü ε bu yaklaşıma göre hesaplanmaktadır. k-ε türbülans modeli genel denklemi 1 ve 2 numaralı denklemlerde verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2)$$

Bu denklemlerde; G_k : Ortalama hız değişiminin neden olduğu türbülansın kinetik enerjisindeki artışı temsil etmektedir. G_b : Kaldırma kuvvetinden kaynaklı enerji olup Y_M : Akışkanın sıkıştırılabilirliği ile ilgili enerjidir. $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ ve $C_{3\varepsilon}$ model sabitleridir. S_k ve S_ε sırasıyla Prandtl sayılarıdır.

Türbülans viskozitesi μ_t ise (3) bağıntısı yardımıyla hesaplanır ve burada C_μ sabit bir değerdir:

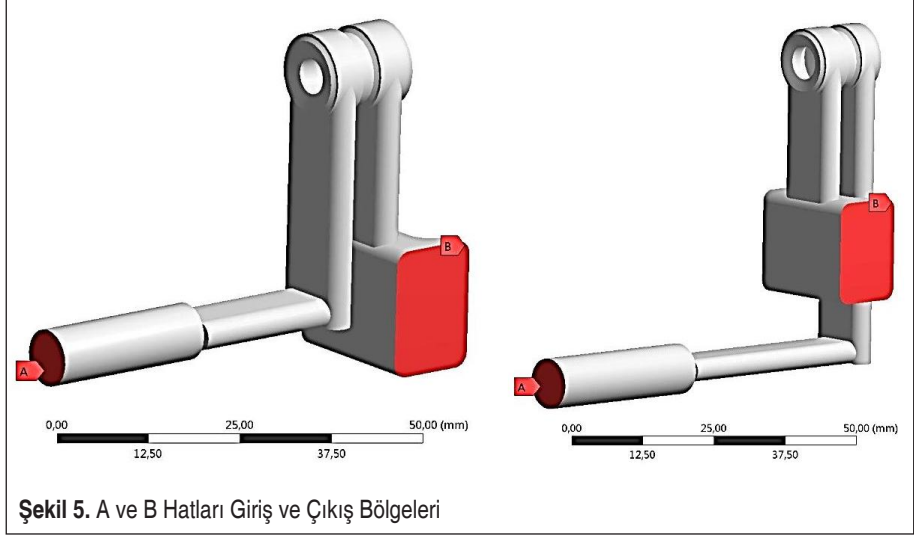
$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$



Model sabitleri $C_{1e}=1,44$, $C_{2e}=1,92$, ve $C_{3e}=1,0$, $C_{\mu}=0,09$, $S_k=1,0$ ve $S_e=1,3$ olarak alınmıştır.

3.2 Sınır Şartları ve Parametreler

ANSYS/Fluent yazılımında yapılacak çalışma için hat boyunca ilerleyecek akışkanın giriş ve çıkış bölgeleri belirlenmiştir, Şekil 5'te verilen görsellerde A: Giriş (inlet), B: Çıkış (outlet) olarak tanımlanmıştır.

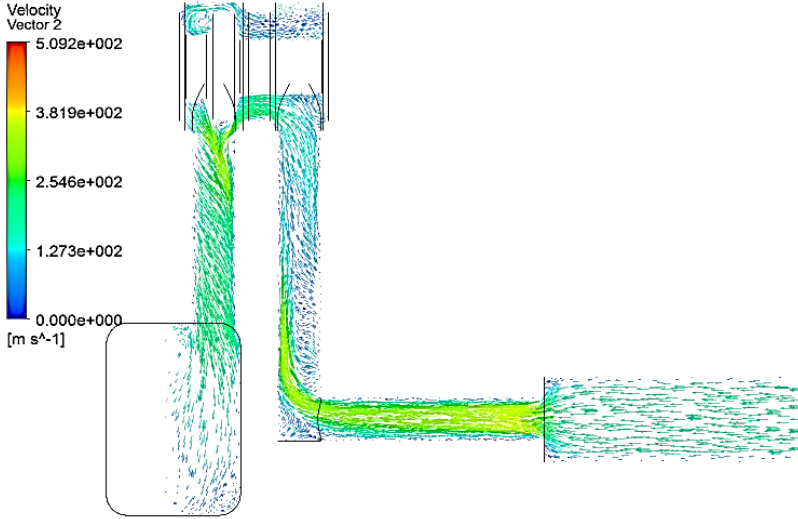


Yazılıma her bir analiz için giriş basıncı 10 bar, çıkış basıncı 9,8 bar olarak girilmiştir. Valf malzemesi alüminyum olarak belirlenmiştir ve yazılım kütüphanesinde bulunan değerler kullanılmıştır. Aynı şekilde akışkan olarak hava, yazılım kütüphanesinden seçilmiş olup $1,225 \text{ kg/m}^3$ yoğunluk ve $1,7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$ viskozite değerleri kullanılmıştır.

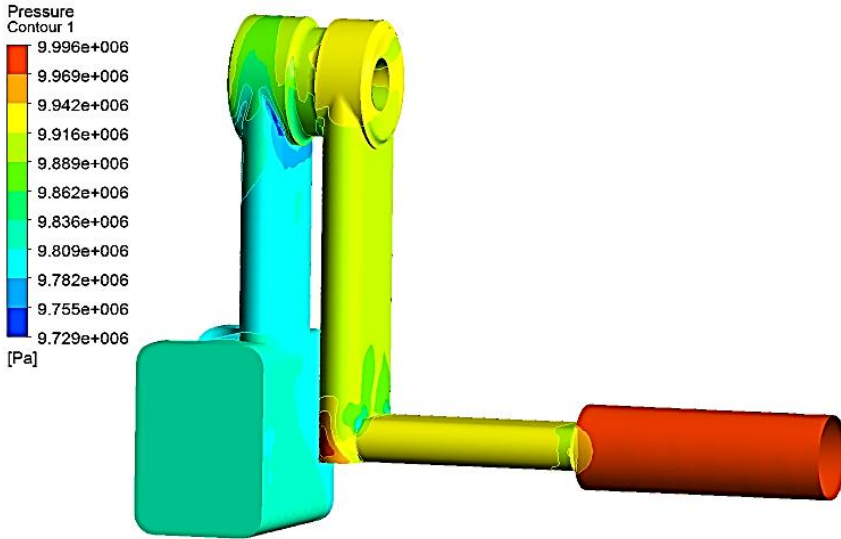
3.3 Analiz Sonuçları ve Karşılaştırma

Sınır şartları ve parametreleri tanımlanan analiz çalışmasının sonucunda, A hattına ait 3 farklı model ve B hattına ait 3 farklı model için elde edilen çıktılar irdelenmiştir. Analiz çıktılarında basınç dağılımları ve hız değerleri incelenmiştir.

Şekil 6'da A hattının ilk hali için vana içindeki hız dağılımları verilmiş olup en yüksek hız değeri 509,2 m/s olarak elde edilmiştir. A hattı üzerinde yapılan değişiklikler sonucunda ikinci versiyon (A-V2) 511,1 m/s olup, üçüncü versiyonda (A-V3) 497,7 m/s hız değerleri bulunmuştur. Şekil 9'da A hattının ilk hali (A-V1) için basınç dağılımı incelendiğinde en düşük basınç 9,73 bar olarak görülmüştür. A hattı V2 ve V3 tiplerinde ise en düşük basınç 9,7 bar olarak elde edilmiştir.

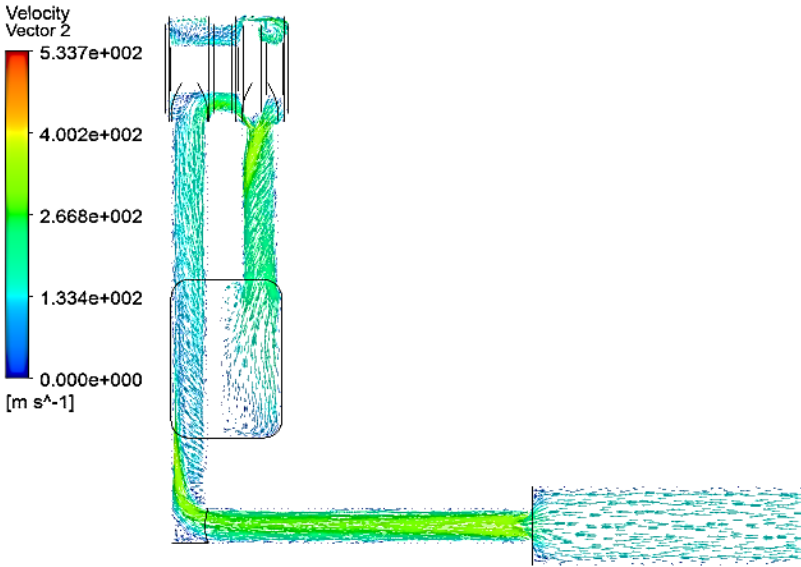


Şekil 6. Valf A Hattı V1 Analiz Sonucu- Hız Dağılımı

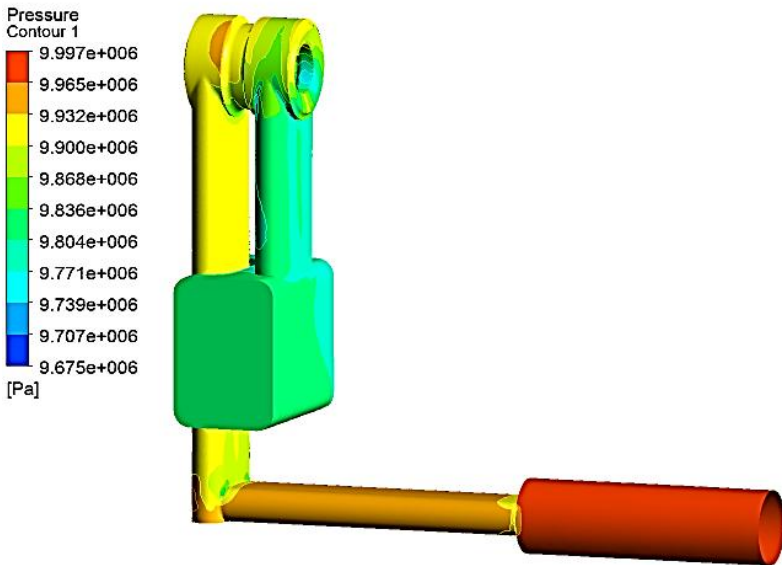


Şekil 7. Valf A Hattı V1 Analiz Sonucu- Basınç Dağılımı

B hattı analiz sonuçlarında ise B hattının ilk durumu (B-V1) için en yüksek hız değeri 533,7 m/s'dir (Şekil 10). B-V2 durumu için en yüksek hız değeri 492,4 m/s olup, B-V3 için en yüksek hız değeri 507,3 m/s'dir. B hatları için basınç dağılımları ince-



Şekil 8. Valf B Hattı V1 Analiz Sonucu- Hız Dağılımı

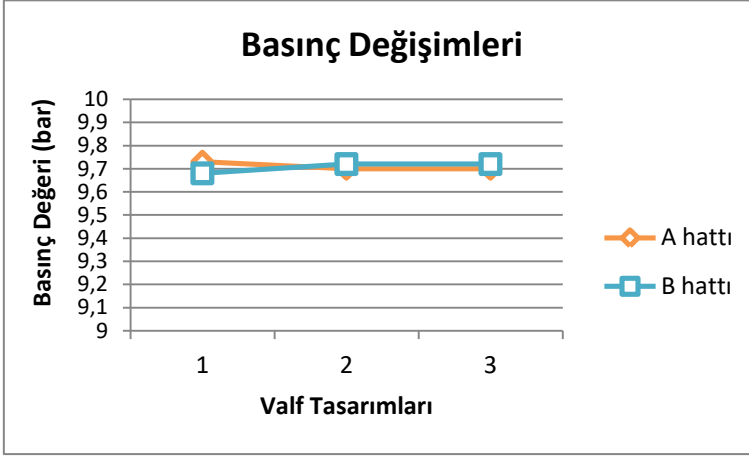


Şekil 9. Valf B Hattı V1 Analiz Sonucu- Basınç Dağılımı

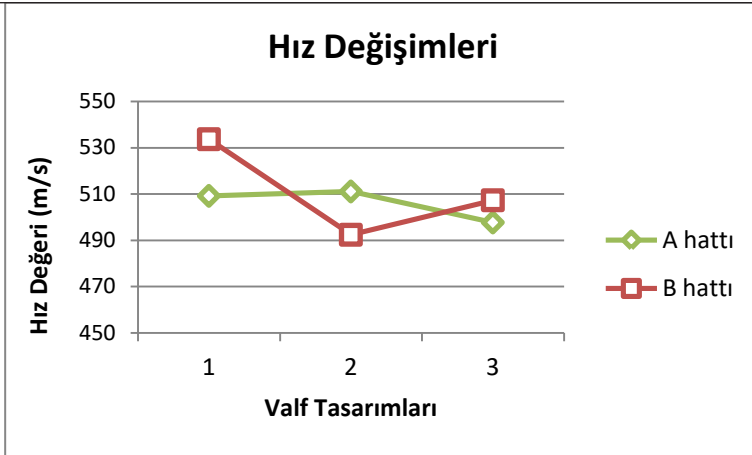


lendiğinde; B-V1 hattı için en düşük basınç 9,68 bar, B-V2 hattı için 9,72 bar olup son durum olan B-V3 için en düşük basınç değeri 9,72 bardır.

Analiz çalışması sonucunda elde edilen verilere göre, A ve B hatları ayrı ayrı düşünülerek, her iki hat için de yapılan değişikliklerin etkileri gözlemlenmiştir. Bu değişiklikler grafiklere aktarıldığında Şekil 10 ve Şekil 11’de verilen sonuçlara ulaşılmıştır.



Şekil 10. Tasarlanan 3 Tip Valfe Ait A ve B Hatları İçin Basınç Değişimleri



Şekil 11. Tasarlanan 3 tip Valfe Ait A ve B Hatları İçin Hız Değişimleri



4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Pnömatik solenoid valfler endüstriyel otomasyon sistemlerinin kontrolü için en önemli ürün gruplarından. Pnömatik valflerin kararlı çalışması, basınç kayıplarının minimize edilmesi ile mümkündür. Bu çalışmada, ön tasarımları gerçekleştirilen solenoid valfin, havanın ilerlediği yol boyunca kayıpların azaltılması hedeflenerek farklı tasarımlar üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Her bir tasarım için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) numerik yöntemi kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir.

Analiz sonuçları irdelendiğinde, tasarım değişikliği sonucunda valfin A ve B hattı için basınç kayıplarının az da olsa azaldığı görülmüştür. Burada maksimum basınç değerleri çıkış noktasında olduğu için hemen hemen aynı değerlere sahiptir. Ancak, basınç ve hız değişimleri tasarımlara göre farklılık göstermektedir. Bu farklar tasarımcıya hangi tasarımın daha uygun olduğu konusunda fikir verebilir.

Tasarım parametreleri (çap, köşe radyüsleri, boru uzunlukları vb) değişiklikler sonucunda hız değerlerinin ilk duruma göre az miktarda düştüğü ancak hız dağılımının daha stabil olduğu ve türbülansların azaldığı gözlenmiştir. Çalışmanın çıktısı olarak, ön tasarımın doğrulanması ve iyileştirilmesi için numerik yöntemlerin kullanılması gerektiği ve bunun sonucunda da zaman ve prototip maliyetlerinin azaltılabileceği söylenebilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK TEYDEB tarafından desteklenen 7160675 nolu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

5. KAYNAKÇA

1. Lisowski, E., Czyżycki, W., Rajda, J. 2013. Three dimensional CFD analysis and experimental test of flowforce acting on the spool of solenoid operated directional control valve. *Energy Conversion and Management*, 70: 220–229.
2. Ye, Y., Chen-Bo, Y., Xing-Dong, Y., Wei-jinZhou, L., Feng-feng, Y. 2014. Effects of groove shape of notch on the flow characteristics of spool valve, *Energy Conversion and Management*, vol. 86, 1091-1101.
3. Blasiak, S., Takosoglu, J. E., Laski, P. 2014. Flow rate analysis of 3/2 directional pneumatic valve by means of Ansys Cfx software. *Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava, Mechanical Series, LX (2)*.
4. Frosina, E., Senatore, A., Buono, D. 2015. 3D CFD Transient Analysis of the Forces Acting on the Spool of a Directional Valve. *Energy Procedia*, 81: 1090 – 1101.
5. Blasiak, S., Takosoglu, J. E., Laski, P. A., Pietrala, D. S., Zwierchowski, J., Bracha, G., Nowakowski, L., Blasiak, M. 2017. Experimental and Simulation Flow Rate Analysis of the 3/2 Directional Pneumatic Valve. *EPJ Web of Conferences*, 143: 02008.



6. **Frosina, E., Marinaro, G., Senatore, A., Pavanetto, M.** 2018. Numerical and Experimental Investigation For the Design of a Directional Spool Valve. *Energy Procedia*, 148: 274–280.
7. **Kaya, F., Karagöz İ.** 2007. Girdaplı Akışlarda Türbülans Modellerinin Uygunluğunun İncelenmesi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 12, Sayı 1, 85-96.
8. **Yakhot, V., Orszag, S. A.** 1986. Renormalization Group Analysis of Turbulence. I. Basic Theory, *Journal of Scientific Computing*, 1(1), 3-51.
9. **Moore M. E., Mcfarland A. R.** 1993. Performance Modelling of Single-Inlet Aerosol Sampling Cyclones; *Environmental Science and Technology*, 27, 1842-1848.
10. **Yakhot V., Orszag, S. A., Thangam, S., Gatski, T. B., Speziale, C. G.** 1992. Development of Turbulence Models For Shear Flows by a Double Expansion Technique, *Physics of Fluids A*, 4, 1510-1520.

Proton Değişim Membran Yakıt Hücreleri: Termodinamiği, Bileşenleri ve Uygulama Alanları

Gamze Karanfil*

ÖZ

Proton değişim membran (PEM) yakıt hücreleri yakıtta depolanan kimyasal enerjiyi doğrudan ve verimli bir şekilde elektrik enerjisine dönüştüren, tek yan ürün olarak suyun oluştuğu; enerji kullanımımızı, kirlenici emisyonları ve fosil yakıtlara bağımlılığı azaltma potansiyeline sahip bir teknolojidir. Uzun yıllardır süren araştırma ve geliştirme çalışmaları neticesinde ticarileşmeye başlayan PEM yakıt hücrelerinin geleneksel teknolojilere alternatif olabilmesi için hala aşılması gereken zorluklar vardır. Sürdürülebilirlik, dayanıklılık ve maliyet gibi zorlukların aşılabilmesi için PEM yakıt hücrelerinin çalışma prensibinin, termodinamiğinin ve araştırma çalışmaları hala devam eden bileşenlerinin görevlerinin detaylı olarak irdelenmesi; ayrıca potansiyel uygulama alanlarının bilinerek geliştirme çalışmalarının bu yönde devam etmesi gerekmektedir. Yapılan derleme çalışmasında, PEM yakıt hücresinin teorisinin detaylı bir biçimde incelenmesinin yanı sıra; dünya literatüründe devam eden çalışmalar ile ilgili bilgi verilmiş ve keşfediliş tarihinden bu yana olan uygulama alanları özetlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enerji, yenilenebilir enerji kaynakları, proton değişim membran yakıt hücreleri

Proton Exchange Membrane Fuel Cells: Thermodynamics, Components and Applications

ABSTRACT

Proton exchange membrane (PEM) fuel cells are those that form the water as the only by-product that directly and efficiently converts the chemical energy stored in the fuel into electrical energy; it is a technology that has the potential to reduce our energy use, pollutant emissions and dependence on fossil fuels. PEM fuel cells, which have started commercializing as a result of long years of research and development, still have difficulties to overcome to be an alternative to traditional technologies. In order to overcome the difficulties such as sustainability, durability and cost, the detailed study of PEM fuel cells' working principle, thermodynamics, and the tasks of the ongoing research studies; In addition, potential development areas should be known and development activities should continue in this direction. In the compilation study, in addition to the detailed examination of the theory of PEM fuel cell; information on ongoing studies in the world literature has been given and the areas of application that have been in place since the discovery date are summarized.

Keywords: Energy, renewable energy sources, proton exchange membrane fuel cells

* İletişim Yazarı
Geliş/Received : 21.01.2020
Kabul/Accepted : 06.04.2020

Dr. Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Karaman -
gamzekaranfil86@gmail.com
ORCID: 0000-0002-7941-9853

1. GİRİŞ

İnsan nüfusunun hızlı artışı ve sanayinin gün geçtikçe gelişmesi nedeniyle küresel enerji tüketimi ve buna bağlı olarak enerji talebi hızla artmaktadır [1]. Bugüne kadar, enerji ihtiyaçları fosil yakıtların yanmasıyla sağlanmış ve bu hava kirliliğini, özellikle kentsel alanda CO₂ gibi sera gazlarının emisyonunu artırmıştır [2]. Bunun yanı sıra, fosil yakıt rezervleri sınırlıdır. Bu problemler göz önüne alındığında iki seçenek ortaya çıkmaktadır: ya mevcut fosil yakıt kullanım tesisleri optimize edilecek ya da yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılması sağlanacaktır. Fosil yakıtların sınırlı rezerv durumu dikkate alındığında ikinci seçeneğin daha sürdürülebilir olduğu açıkça görülmektedir. Güneş, rüzgâr, jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynakları, dünya enerji arzındaki artan kapasite ve oranla son yıllarda hak ettiği daha fazla önem ve yatırıma kavuşmaktadır. Bununla birlikte, yenilenebilir enerji kaynaklarının aralıklı doğası yani sürekli olmayışı uygulama beklentilerini kısıtlamaktadır [3,4].

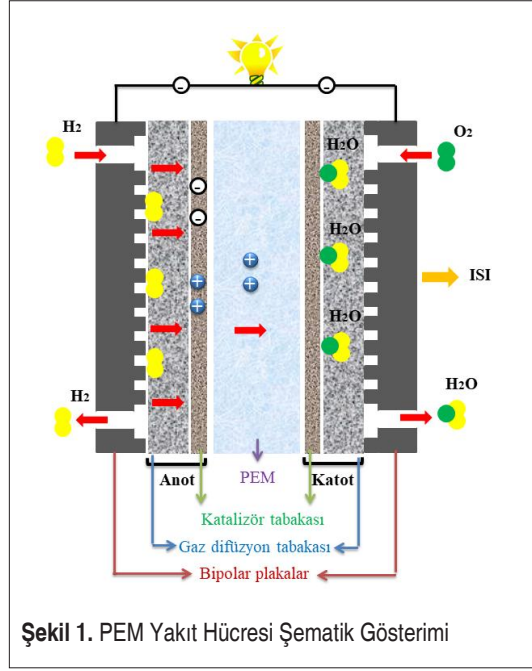
Yakıt hücreleri, çevre dostu güç kaynakları ile ilgili sorunu hafifletmek ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının sürdürülebilirlik problemini ortadan kaldırmak için en güçlü alternatiftir. Yakıt hücresi teknolojisinin geleneksel güç üretim cihazlarıyla karşılaştırıldığında yüksek verime sahip olması, özellikle ulaşım ve taşınabilir cihazlarda kullanımının öne çıkmasını sağlamıştır [5]. Yakıt hücreleri, -yakıt olarak hidrojen kullanıldığında- sıfır emisyonlu ve yüksek enerji dönüşümlü elektrik enerjisi üretir ve yan ürün olarak sadece su çıkar. Yakıt hücreleri kullanılan elektrolitin tipine göre sınıflandırılır. Hali hazırda incelenmekte olan yakıt hücreleri arasında proton değişim membran yakıt hücreleri (PEMYH), alkali yakıt hücreleri (AYH), katı oksit hücreleri (KOYH), fosforik asit yakıt hücreleri (FAYH) ve erimiş karbonat yakıt hücreleri (EKYH) bulunmaktadır. PEM yakıt hücrelerinde yakıt olarak hidrojen yerine metanol kullanıldığında, PEMYH doğrudan metanol yakıt hücresi (DMYH) olarak adlandırılmaktadır [6].

2. PROTON DEĞİŞİM MEMBRAN (PEM) YAKIT HÜCRESİ

2.1 Çalışma Prensipleri ve Termodinamiği

Yakıt hücresi çeşitleri arasında PEM yakıt hücresi, en yüksek enerji yoğunluğuna sahip olanıdır. 60 ile 80 °C arasındaki düşük çalışma sıcaklığı nedeniyle, PEM yakıt hücreleri hızlı başlama özelliğine sahip olup, güç talebindeki değişikliklere iyi yanıtlar sağlayabilmektedir. PEM yakıt hücrelerinin diğer avantajları ise düşük ağırlık ve hacme sahip olmalarıyla birlikte yüksek güç yoğunluğu içermeleridir. PEM yakıt hücrelerinin bu avantajları onları, ulaşım alanındaki uygulamalar, taşınabilir cihazlar ve küçük sabit uygulamalar için gelecek vadeden adaylar haline getirmektedir [7].

PEM yakıt hücresinin şematik gösterimi Şekil 1’de verilmiştir. PEM yakıt hücresinde



anot tarafına hidrojen (veya başka bir yakıt) verilirken, katot tarafına oksijen (saf oksijen veya hava) verilir.

Anotta hidrojen elektronlara ve protonlara ayrılırken bu işlem bir katalizör [örneğin, platin (Pt) içeren bileşikler] varlığında gerçekleştirilmektedir. Üretilen protonlar, proton iletkin elektrolitten (membran) geçerken elektronlar dış devreden dolaşır; bağlı bir cihaza güç verir ve katoda ulaşarak oksijeni indirger. Katotta protonlar oksijen ile birleşerek su oluşturur [8]. Yakıt olarak hidrojen gazı kullanıldığında PEM yakıt hücresindeki anot ve katot reaksiyonları aşağıda verildiği gibidir:

Anot reaksiyonu: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$

Katot reaksiyonu: $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$

Toplam reaksiyon: $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + ısı + elektrik \text{ enerjisi}$

PEM yakıt hücresinden elektrik enerjisi (yararlı iş) sadece akım çekildiğinde elde edilebilir, fakat gerçek hücre potansiyeli ($V_{hücre}$) tersinmez kayıplar nedeniyle termodinamik potansiyelden (E) daha düşüktür. Akım geçtiği zaman, termodinamik potansiyelde meydana gelen sapma hücre tarafından gerçekleştirilen elektriksel işe karşılık gelir. Denge değerinden sapma polarizasyon olarak adlandırılır ve η ile gösterilir. Polarizasyonlar birincil olarak; aktivasyon polarizasyonu (η_{akt}), ohmik polarizasyonu (η_{ohm}) ve difüzyon polarizasyon (η_{dif})'ndan kaynaklanmaktadır.

Bu nedenle, tek bir hücrenin voltaj ifadesi şu şekilde verilebilir:

$$V_{hücre} = E + \eta_{akt} + \eta_{ohm} + \eta_{dif} \quad (1)$$

Toplam reaksiyonda verilen H_2+O_2 kimyasal reaksiyonların tersinir termodinamik potansiyeli Nernst denklemiyle verilir:

$$E = E^0 - \left[\left(\frac{RT}{nF} \right) \ln \left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}}} \right) \right] \quad (2)$$

Nernst denkleminde R gaz sabiti (8,314 J/mol K), T hücre sıcaklığı (K), n elektron sayısı, F Faraday sabiti (96487 C/mol), P_{H_2O} , P_{H_2} ve P_{O_2} (atm) de sırasıyla suyun, hidrojenin ve oksijenin kısmi basıncıdır. Ayrıca E^0 elektrokimyasal reaksiyonun tersinir standart potansiyeli olarak tanımlanır ve standart şartlardaki Gibbs serbest enerjisinin değişimi (ΔG^0) ifadesi kullanılarak şu şekilde verilir [9]:

$$E^0 = - \frac{\Delta G^0}{nF} \quad (3)$$

Aktivasyon polarizasyonu, elektrokimyasal reaksiyon sırasında katalizör tabakaları, yük kinetiği, elektron ve protonun elektrot-elektrolit üstünden geçişinden kaynaklanır [10]. Başka bir deyişle, elektron transfer reaksiyonu devam ederken elektrot potansiyelinin bir kısmı kaybolur. Aktivasyon polarizasyonu, elektrokimyasal reaksiyonların doğasıyla doğrudan ilişkilidir ve reaksiyonun akımın talep ettiği oranda ilerlemesi durumunda aktivasyon enerjisinin büyüklüğünü temsil eder. Bir PEM yakıt hücresinin elektrotlarında meydana gelen aktivasyon polarizasyonunu veren denklem Tafel denklemi olarak bilinir [9].

$$\eta_{akt} = \left(\frac{RT}{\alpha nF} \right) \ln(i_0) + \left(\frac{RT}{\alpha nF} \right) \ln(i) \quad (4)$$

Ohmik polarizasyonu, hücredeki elektriksel direnç kayıplarından kaynaklanır. Bu dirençler elektronların bipolar plakaya geçişinden kaynaklanır ve hemen hemen tüm yakıt hücresi bileşenlerinde bulunabilir. Membrandaki iyonik direnç, elektrotlardaki iyonik ve elektronik direnç, gaz difüzyon tabakalarındaki elektronik direnç, bipolar plakalar ve bağlantı uçlarındaki elektronik direnç ohmik polarizasyona neden olur [10]. Ohmik polarizasyonu, Ohm Kanunu gibi denklemler kullanılarak ifade edilebilir [9]:

$$\eta_{ohm} = -iR^i \quad (5)$$

Difüzyon polarizasyonu, yüksek akım yoğunluklarında reaktanlar ve ürünler arasındaki kütle aktarım sınırlaması nedeniyle ortaya çıkar ve hem anot hem de katot elektrot yüzeyine etki eder[10]. Elektrot reaksiyonları, akım akışını devam ettirmek için sabit bir reaktif kaynağı gerektirir. Difüzyon sınırlamaları bir reaktantın kullanılabilirliğini azalttığından, mevcut reaksiyon enerjisinin bir kısmı kütle transferini yürütmek için kullanılır, böylece çıkış voltajında karşılık gelen bir kayıp meydana gelir. Bir reaksiyon ürünü elektrot yüzeyinin yakınında birikir ve difüzyon yollarını tıkarsa



veya reaksiyona giren maddeleri seyreltirse benzer problemler gelişebilir. Difüzyon polarizasyonu, aşağıdaki gibi ifade edilebilir [9]:

$$\eta_{dif} = \left(\frac{RT}{nF} \right) \ln \left(\frac{i_l - i}{i_l} \right) \quad (6)$$

PEM yakıt hücresinin termodinamik verimliliği (E_{PEM}), çıkan gücün (W) hidrojen tüketim miktarı (m_{H_2}) ile hidrojenin alt ısı değerine (LHV_{H_2}) oranı olarak verilebilir:

$$E_{PEM} = \frac{W}{m_{H_2} \cdot LHV_{H_2}} \quad (7)$$

Belirli bir çıkış akımı için yığının çıkış voltajı belirlendiğinde, çıkış gücü şu şekilde bulunur:

$$W = IV_{hücre} \quad (8)$$

Çıkış akımı, hidrojen kütle akış hızı ile şu şekilde ilişkilidir:

$$m_{H_2} = \frac{I \cdot MW_{H_2}}{2F} \quad (9)$$

Böylece PEM yakıt hücresinin termodinamik verimliliği aşağıdaki gibi basitleştirilebilir [9]:

$$E_{PEM} = \frac{2V_{hücre}F}{MW_{H_2} \cdot LHV_{H_2}} \quad (10)$$

2.2 Bileşenleri

PEM yakıt hücresinde; çok fazlı akışlar, elektrokimyasal reaksiyonlar, yük taşıma ve ısı transferi gibi fenomenlerin aynı anda gerçekleşmesi karmaşık bir yapıya sahip olmasına neden olmaktadır. Yakıt hücresinin çalışması sırasında gerçekleşen çoklu fizik olgusunun temelleri ve bunların malzeme özellikleriyle olan ilişkisi oluşan problemlerin üstesinden gelmek için kritik öneme sahiptir. Tüm bu olayların gerçekleştiği yakıt hücresi bileşenleri -membran, katalizör ve gaz difüzyon tabakasından oluşan membran elektrot bileşkesi ve gaz akış kanallarını içerisinde bulunduran bipolar plakalar- şeklinde verilebilir [11].

2.2.1 Proton değişim membranı

Proton iletimi, PEM yakıt hücreleri için temel fonksiyondur ve genellikle yakıt hücresi kullanımı için membranları değerlendirirken dikkate alınan ilk özelliktir. Direnç kaybı, membranın iyonik direnci ile orantılıdır ve özellikle yüksek akım yoğunluğunda gerekli performans için yüksek proton iletkenliği gereklidir. Moleküler düzeyde, hidratlı polimerik matrislerdeki proton taşınması genel olarak iki ana mekanizmadan biri ile tarif edilir. Bunlardan birincisi ‘proton atlamalı’ olarak da tarif edilebilen ‘Grotthus mekanizması’; ikinci ise suyun bir taşıma aracı olarak işlev gördüğü ‘difüzyon mekanizması’dır.

Proton atlatma mekanizmasında protonlar, bir hidrolize iyonik bölgeden ($\text{SO}_3^- \text{H}_3\text{O}^+$) membran boyunca bir diğerine atlarlar. Anot hidrojen oksidasyonu sonucu oluşan proton su molekülüne yapışarak geçici bir hidronyum iyonu oluşturur ve aynı hidronyum iyonundan farklı bir proton diğer su molekülüne atlar. Bu mekanizmada, iyonik kümeler su varlığında şişmiş ve proton aktarımı için süzülme mekanizmasını oluşturmuştur. Proton atlatma mekanizmasının, Nafion gibi perflorlanmış sülfonik asit membranlarının iletkenliğine çok az bir katkısı vardır.

İkinci mekanizma ise difüzyon mekanizmasıdır. Bu mekanizmada, hidratlanmış proton (H_3O^+), elektrokimyasal fark nedeniyle sulu ortamda difüze olur. Difüzyon mekanizmasında suya bağlı protonlar ($\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_x$); elektro-ozmotik sürüklenme sonucunda bir veya daha fazla su molekülünü membran boyunca taşır ve kendilerini onlarla birlikte transfer eder. Difüzyon mekanizmasının oluşumunun ana işlevi, proton değişim membrandaki polimerik zincirler içindeki serbest hacimlerin varlığıdır ve bu da hidratlanmış protonların membrandan aktarılmasına izin verir [12].

Yakıt hücresindeki proton değişim membranın; yüksek proton iletkenliği, elektrokimyasal ve kimyasal kararlılık, hidrolitik ve termal kararlılık, mükemmel su tutumu, iyi kimyasal özellikler, reaktantlara karşı düşük geçirgenlik, yakıt geçişine karşı direnç, iyi mekanik stabilite ve dayanıklılık, hızlı elektrot kinetiğini kolaylaştırma, farklı yakıtlara uygunluk ve düşük maliyet gibi özelliklere sahip olması istenmektedir [1].

Bu özelliklerinin yanı sıra, membranın su yönetimi ve kalınlığı da yakıt hücrelerinin genel performansında önemli rol oynamaktadır.

Yakıt hücresi performansındaki ilerlemeler, membran teknolojisindeki ilerlemeler ile yakından ilişkilidir. Perflorosülfonik asit membranları (Nafion, Dow, Aquivion, Aciplex-S ve Flemion gibi) yüksek proton iletkenlikleri, iyi kimyasal ve mekanik kararlılıkları nedeniyle en yaygın şekilde kullanılan ve ticarileştirilen proton değişim membranlarıdır. Perflorosülfonik asit membranlar karbon-flor ana zincirine, sülfonik grup içeren yan halkaların bağlanmasıyla oluşmuştur. Bunların arasında 1966 yılında Dupont firması tarafından geliştirilen Nafion membran düşük sıcaklıklarda sergilediği yüksek proton iletkenliği ve iyi kimyasal kararlılığı nedeniyle en sık kullanılan membrandır [13, 14]. Nafion membranın kullanım ömrü 80°C 'de 60000 saate ulaşabilmektedir ve tamamen sulu ortam şartlarında 0.10 Scm^{-1} gibi yüksek proton iletkenliği göstermektedir [15]. Mükemmel proton iletkenliği ve iyi bir kararlılığa sahip olmasına rağmen Nafion membran; yüksek maliyet, yüksek metanol geçirgenliği, dehidrasyon sorunu ve 80°C 'den daha yüksek sıcaklıklarda düşük proton iletkenliği gibi büyük dezavantajları nedeniyle ticari uygulamalarda problem yaratmaktadır. Özellikle yüksek sıcaklıklarda yüksek proton iletkenliği sağlamak ve su yönetimini iyileştirmek için Nafion; inorganik oksitlerle (TiO_2 , SiO_2 , ZrO_2 gibi), killerle (simektit, montmorillonit gibi), zeolit ve heteropoliasitlerle katkılanarak kompozit membran halinde üretilmiştir. Ayrıca Nafion, su yönetimini iyileştirmek ve metanol geçirgenliğini azaltmak için polimerlerle (polianilin (PANI), sülfonlanmış polietereterketon (sPEEK), poli-



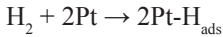
akrilonitril (PAN) gibi karıştırılarak karışım membran şeklinde geliştirilmiştir [12]. Daha düşük maliyetle membran üreterek ticarileştirmeyi kolaylaştırmak amacıyla, sülfonlanmış aromatik hidrokarbon polimerlerin proton değişim membran üretiminde kullanılmasıyla ilgili bir çok çalışma yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir. En çok kullanılan polimerler; sülfonlanmış poli (eter eter keton) (SPEEK), sülfonlanmış poli (eter sülfon) (SPES), sülfonlanmış polisülfon (SPSU), sülfonlanmış poli (arlen eter sülfon) (SPAES), sülfonlanmış poli (arlen eter ketone) (SPAEEK) ve sülfonlanmış poliimid (SPI) olarak verilebilir. Bu polimerler saf halde üretildiği gibi kompozit ve karışım membran olarak da üretilmiş ve yakıt hücresi performansları incelenmiştir [13, 14, 16].

2.2.2 Katalizör tabakası

Katalizör tabakası, anottaki hidrojen oksidasyon reaksiyonu (HOR) ve katottaki oksijen indirgeme reaksiyonunun (ORR) gerçekleştiği yerdir. PEM yakıt hücrelerinde genellikle iki yakıt kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi; hidrokarbon veya oksijenli hidrokarbonların işlenmesiyle üretilmiş ve ‘reform edilmiş’ olarak adlandırılmış H_2 , ikincisi ise metanoldür. Bu iki yakıt dışında etanol, formaldehit veya formik asit gibi yakıtlar üzerinde de çalışılmış ama henüz pratik kullanıma geçilmemiştir. PEM yakıt hücresinin anot elektrotunda gerçekleşen HOR reaksiyonu şu şekildedir [17]:



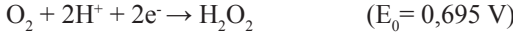
Hidrojenin elektrokimyasal oksidasyonu için en etkili katalizörler platin (Pt) ve paladyum (Pd)’dur [18]. HOR için farklı metaller de yüksek katalitik aktivite göstermesine rağmen, asidik elektrolit ortamında korozyona ve pasifleştirmeye karşı en iyi kararlılığı gösteren katalizörler soy metallerdir. HOR mekanizmasının; asitli elektrolit ortamındaki Pt üzerinde hız belirleyici adım olan hidrojenin ilk ayrışma adsorpsiyonu ile ilerlediği düşünülmektedir. Bu reaksiyonu basit bir yük transferi takip etmektedir [19].



Pt katalizörleri HOR için sergilediği yüksek katalitik aktivite göz önünde bulundurulduğunda, saf hidrojen ile çalışıldığında, çok düşük seviyelerde Pt kullanımı yeterlidir. Hidrojen, PEM yakıt hücreleri için ideal seçim olsa da, saf hidrojen üretimi hala ekonomik değildir. Hidrojen akımı içerisinde bulunabilecek olan azot seyreltme etkisine sahipken, hem CO_2 hem de CO, saf Pt katalizörlerini zehirleyerek anot performansını düşürmektedir.

PEM yakıt hücresi uygulamalarının birçoğunda; katot elektrotunda gerçekleşen ORR mekanizması için seçici bir katalizör gerekmediğinden, katot reaksiyonu anottan farklıdır. Saf oksijen yerine hava kullanıldığında dahi, hava içerisinde bulunan diğer bileşenler (N_2 , Ar, CO_2) sadece seyreltici etki yapar. Buna karşın, yakıt olarak metanol

kullanıldığında seçici bir katalizör gereklidir, çünkü Pt bazlı katalizörler hem oksijen indirgenmesini hem de metanol oksidasyonunu katalize edebilmekte ve karışık potansiyellere yol açabilmektedir. Sulu ortamda oksijenin indirgenmesi, bir dizi olası reaksiyonla yönetilmektedir. Sulu asit ortamında gerçekleşen reaksiyonlar için termodinamik potansiyeller aşağıda verildiği gibidir.



Oksijenin dört elektron ile indirgenmesi, H_2/O_2 yakıt hücresi için en yüksek hücre voltajını sağladığından, gerçekleştirilmesi gereken en etkili reaksiyondur. Bununla birlikte, bu reaksiyonun düşük polarizasyonlarda elde edilmesinin zor olduğu bulunmuştur. Asidik elektrolitlerin tersinir potansiyel değerinde, kıymetli metallerin en kararlı yüzeyleri bile oksit filmlerle kaplanır. Tek istisna altın (Au)'dır; Au, asit varlığında oksijen indirgemesi için etkin olmayan bir katalizördür. Asidik elektrolit varlığında Pt, Pd ve (rodyum) Rh gibi soy metallerin ve bunların alaşımlarının, oksijen indirgemesi için tercih edilen katalizörler olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte bu katalizörlerin en iyisi olan Pt; oksijen indirgemede H_2 indirgenmesinden en az 106 kez daha az aktiftir. Bu durum, yüksek düzeyde polarizasyona yol açar ve yakıt hücresi verimliliğinin ana katalitik sınırlamasıdır [17].

Yakıt hücresinde kullanılabilecek katalizörlerde bulunması gereken temel gereksinimler, tepkime için sitelerin yüksek katalitik aktivitesini ve bu sitelerin maksimum sayısını içerir. Yakıt hücresi katalizörlerinden istenen diğer gereksinimler ise; elektiriksel iletkenlik, iyonomer ile iyi etkileşim ve reaktanlar, ürünler ve elektrolitler ile temas halinde kararlılık olarak verilebilir.

Bir yakıt hücresinin maksimum verim sağladığından emin olmak için, her iki elektrot tepkimesinin termodinamik potansiyellerine olabildiğince yakın olması gerekir. Yapılan araştırmalar, Pt veya Pt içeren katalizörlerin hem etkinlik hem de kararlılık açısından en etkili katalizör materyalleri olduğunu ortaya çıkarmıştır [17], bu nedenle katalizör tabakası bir yakıt hücresi için maliyetin önemli bir kısmını oluşturur. Katalizör maliyetinin düşürülmesi için bazı çözümlerin öne sürülmesine, araştırma ve geliştirme çalışmalarının uzun yıllardır devam etmesine rağmen platin katalizöre alternatif bir katalizör henüz geliştirilememiştir. PEM yakıt hücresinde (özellikle katot elektrotunda) platin katalizör kullanımı, yüksek maliyetinin yanı sıra çeşitli sıkıntılar ortaya çıkarmaktadır:

- Platin ile katalize edilmiş oksijen indirgeme reaksiyonu 4 elektron reaksiyonu değildir. 2 elektronlu oksijen indirgeme reaksiyonu sonucu oluşan H_2O_2 yalnızca sistemin verimini düşürmekle kalmayıp, güçlü oksidasyon kabiliyeti sebebiyle katalizörlerin katalitik aktivitelerini de düşürebilir. Ayrıca hidrojen peroksit radikalleri karbon ta-



bakasına ve proton değişim membranına zarar vererek bozunmalarına neden olabilir.

- Pt katalizörleri besleme sistemindeki kirleticilere karşı çok hassastır. Hava akımı içerisindeki NO_x ve SO_x gazları, H_2 gazı içerisinde bulunabilecek CO , H_2S , NH_3 , organik sülfür-karbon ve karbon-hidrojen bileşikler yakıt hücresi performansı için önemlidir. Bu kirlilikler veya kirleticiler Pt katalizörünü kolayca zehirleyebilir, bu da performans düşüşüne neden olur [20].

- Katalizör tabakası ile ilgili bir diğer önemli husus da dayanıklılıklarıdır. Katalizör tabakası, çalışma sırasında malzeme bozulmasına duyarlıdır. Ferreira ve ark., (2005), platin parçacıklarının iyonomer içinde çözündüğünü ve Ostwald olgunlaşması olarak adlandırılan daha büyük parçacıklara dönüştüğünü göstermiştir [21].

- Ayrıca, katalizör tabakasının şişmesinden kaçınmak, optimum PEM yakıt hücresi performansı ve dayanıklılığı için kritik öneme sahiptir. Katalizör tabakasındaki suyun taşınma/buharlaştırma mekanizmasının aydınlatılmasına, katalizör tabakasının mikro yapısı ile ıslanabilirliği arasındaki ilişkinin kurulmasına ve gelecek nesiller için yüzey prototiplendirilmesini sağlayacak tatmin edici bir araç geliştirilmesine fazlasıyla ihtiyaç vardır [11].

Yakıt hücresi katalizörlerinin maliyetini düşürecek ve platinin sahip olduğu dezavantajları giderecek katalizörler üretebilmek için iki yaklaşım mevcuttur: Pt olmayan katalizörlerin araştırılması ve kompozit Pt katalizörlerin üretilmesi. PEM yakıt hücresi ORR için en umut veren soy metal katalizörleri olarak, metal/N/C sınıfı katalizörler geniş bir şekilde araştırılmıştır. Yüksek yüzey alanı ve aktif bölgelere erişilebilirlik sağlayan büyük gözeneklerle iyi geliştirilmiş mezo-gözenekli Fe/N/C katalizörleri, hem yarı hücre hem de tek hücreli sistemlerde platin katalizöre kıyasla üstün performans sergilemiştir [22]. Son zamanlarda Pd daha ucuz ve daha bol olması sebebiyle platinin yerini alabilecek muhtemel adaylardan biri olarak görülmektedir. Fe, Ni, Co, Cu ve Ag gibi farklı metallerle modifiye edilmiş Pd esaslı alaşım katalizörleri saf Pd katalizörü ile karşılaştırıldığında PEM yakıt hücresinde daha yüksek ORR aktivitesi göstermektedir [23-27]. Metal bazlı olmayan katalizör çalışmalarında ise en dikkat çeken azot katkılı karbon nanofiber (N-CNT) katalizörlerdir. Üretilen bu katalizörler performans ve kararlılık olarak Pt katalizörü geçemese de maliyet açısından umut vaat etmektedir [28]. İstenilen şartları sağlayabilecek yeni bir katalizör üretmek için diğer yaklaşım ise; platin bazlı kompozit katalizörler (Pt_3Co , Pt-Pd, Pt/V-TiO₂, PtCo, Pt-TiO₂ nanotüp) sentezleyerek platin kullanımını azaltmak [29-33] ya da platinin daha etkin bir biçimde yüklenmesi ile yine miktarı ile birlikte maliyetini düşürmektir [34-36].

2.2.3 Gaz difüzyon tabakası

Genellikle karbon fiber esaslı gözenekli malzemelerden oluşan gaz difüzyon tabakaları önemli fonksiyonlara sahiptir. Katalizör tabakalarına iletilecek olan reaktant gazlarının homojen bir dağılımını sağlamak, katot katalizör tabakasından bipolar pla-

kaların gaz kanallarına iletilecek olan ürün suyu ve ısısı için yollar sağlamak; katalizör tabakalarını elektriksel olarak bipolar plakalara bağlamak ve MEA için mekanik destek sağlamak, gaz difüzyon tabakalarının görevidir [37]. Şimdiye kadar gaz difüzyon tabakaları; polimer bazlı karbon fiber kompozitlerden (karbon kağıdı), karbon kumaştan ve metalik köpüklerden yapılmıştır. En yaygın kullanılan gaz difüzyon tabakaları polimer (fenolik reçine gibi) içeren karbon kâğıtlardır. PEM yakıt hücresinin performansı, gaz difüzyon tabakalarının gözenekliliğin büyüklüğüne ve dağılımına ve karbon kağıdının elektrik iletkenliğine büyük ölçüde bağlıdır [38].

Gaz difüzyon tabakasının özellikleri iki tip polarizasyonla ilişkili olabilir. Gaz difüzyon tabakasının elektriksel iletkenliği ohmik polarizasyonu ile; gözeneklilik büyüklüğü ve gözeneklilik dağılımı ise difüzyon polarizasyonu ile ilişkilidir. Gaz difüzyon tabakasının gözenek büyüklüğünün azalması bipolar plakalar ile arasındaki temas noktalarının artmasına yol açabilir, bu da ohmik direncin ve ohmik polarizasyonun azalmasına sebep olur. Çünkü, gözenek çapını artırılması reaktant gazların ve katot katalizörü katmanındaki üretilen suyun geçiş yolunu artırılmasını sağlar. Artan gözenek büyüklüğü, su taşması olayını engelleyebilir. Bu nedenle, araştırmacılar arasında gaz difüzyon tabakasının gözenek büyüklüğünün artan performansla yol açıp açmadığı henüz bir sorundur. Ohmik polarizasyon, çalışmaların orta akım yoğunluklarına hakimdir ve konsantrasyon polarizasyonu, yüksek akım yoğunluklarına bağlanır. Ancak, azalan ohmik polarizasyonun konsantrasyon polarizasyonundan daha önemli bir konu olduğu vurgulanmalıdır. Çünkü, ohmik direncin akım yoğunluğu alanı çok daha geniştir [38].

Nafion membranın gerekli olan proton iletkenliğini ve mekanik bütünlüğünü korumak için, genellikle nemlendirilmiş gazlar kullanılır. Bununla birlikte fazla su, elektrotlarda su taşmasına yol açarak reaktantların katalizör tabakası aktif bölgelerine erişimini engeller. Suyun uzaklaştırılmasını kolaylaştırmak için, gaz difüzyon tabakaları genellikle politetrafloroetilen (PTFE veya Teflon) [39] veya florlanmış etilen propilen (FEP) gibi maddeler kullanılarak hidrofobik işleme tabi tutulur [40]. Ayrıca, katalizör ve gaz difüzyon tabakası arasına bir mikro gözenekli tabaka yüklenir. Adından da anlaşılacağı gibi, mikro gözenekli tabaka, gaz difüzyon tabakasından (10-100 mm) daha küçük ortalama gözenek boyutuna (1-10 mm) sahiptir ve genellikle hidrofo-bik bir bağlayıcı ve gözenek oluşturu-cu madde olarak karbon siyahı kullanılır [41]. Genel olarak, gaz difüzyon tabakasına bir mikro gözenekli tabaka eklenmesiyle, su yönetiminin ve PEM yakıt hücresi performansının iyileştiği gözlenmiştir. Mikro gözenekli tabakanın, katalizör ve gaz difüzyon tabakası arasında, suyun katottan anot tarafına taşınmasına neden olan ve membranın hidrasyon seviyesini geliştiren, kılcal bir bariyer oluşturduğu belirlenmiştir [42]. Mikro gözenekli tabakanın aynı zamanda, hücrenin su taşkını toleransını daha da arttırarak buhar formundaki suyun geçişine izin vermesiyle, katalizör ve gaz difüzyon tabakası arasında bulunan ara yüzey boşluğundaki su birikimini de ortadan kaldırdığı belirtilmiştir [43]. Ayrıca mikro gözenekli tabakada bulunan çatlakların; gaz difüzyon tabakasına olan su girişlerinin sayısını



sınırladığı, su yollarını kararlı hale getirdiği ve dolayısıyla su doygunluğunu azalttığı belirlenmiştir [44]. Ek olarak, mikro gözenekli tabakanın elektrik iletkenliği artırılmasının yanı sıra ve gaz difüzyon tabakası fiberlerinin katalizör tabakasına girişini önlediği belirtilmiştir [41].

Gaz difüzyon tabakası, katalizör tabakalarının dış tarafında bulunan makro gözenekli ve elektrik iletken bir malzemedir. Birincil işlevi, reaktantların ve ürünlerin katalizör tabakasına ve buradan taşınmasını sağlamaktır ve bu nedenle yakıt hücresindeki reaktant gaz dağılımı ve su yönetiminde önemli bir rol oynar. Gaz difüzyon tabakası ayrıca; elektronların katalizör tabakasına ve katalizör tabakasından iletilmesi, istenen çalışma sıcaklığını korumak için atık ısının katalizör tabakasından bipolar plakaya iletilmesi ve katalizör tabakasına ve membrana mekanik destek sağlanması gibi önemli fonksiyonlara sahiptir. Bu fonksiyonları yerine getirmek için gaz difüzyon tabakası; gözenekli, kısmen hidrofobik, sert ve yüksek elektriksel ve termal iletkenliğe sahip olmalıdır [45].

Gaz difüzyon tabakası, PEM yakıt hücrelerinin su yönetiminde hayati bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, gaz difüzyon tabakalarının yapılarını ve özelliklerini optimize etmek ve bunu başarmak için yöntemleri anlamak, yakıt hücrelerinin performansını artırmaya ve dengelemeye yardımcı olur. Gaz difüzyon tabakasının su yönetimini geliştirmek için farklı yöntemler uygulanmakta olup, bunlar arasında ve bunlarla sınırlı olmamak üzere perforaj, PTFE kaplama ve gaz difüzyon tabakası yüzeyine mikro gözenekli tabaka uygulanması gibi yapısal modifikasyonlar yer almaktadır [46]. Bunun yanı sıra, gaz difüzyon tabakasının elektriksel ve ısı iletkenliğini geliştirmek için yapılan çalışmalar da halen güncelliğini korumaktadır [47-49]. Ayrıca, gaz difüzyon tabakası üretiminde karbon dışındaki malzemelerin (metal, seramik vb.) kullanımı da ilgi çeken konular arasındadır [45, 50].

2.2.4 Bipolar plaka

PEM yakıt hücrelerinin bir diğer önemli bileşeni, bipolar plakalardır. Bipolar plakalar; yakıt hücresi yığınlarında hücreden hücreye elektrik bağlantısının sağlanmasında, reaktant gazların akış alanı boyunca homojen olarak dağıtılmasında, elektrik akımının her hücreden iletilmesinde, hücrenin çıkışındaki ürün suyunun uzaklaştırılmasında ve reaksiyonlar sonucu oluşan ısının hücreden uzaklaştırılmasında görev almaktadır [51]. PEM yakıt hücresinin tüm bileşenleri göz önüne alındığında bipolar plakalar, en hacimli ve ağır bileşendir (toplam ağırlığın yaklaşık % 80'i). Aynı zamanda en pahalı parçalardan (yığın maliyetinin yaklaşık % 40'ı) biri olan bipolar plakalar PEM yakıt hücresi uygulamalarını olumsuz yönde etkilemektedir [52].

Enerji departmanının (Department of Energy, DOE) kriterlerine göre bipolar plakalar; düzlemsel elektriksel iletkenlik ($> 100 \text{ Scm}^{-1}$), ara yüz temas direnci ($< 30 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$), hafif asidik suda ($\text{pH} < 4$) kimyasal kararlılık, korozyon direnci ($< 16 \mu\text{Acm}^{-2}$), yüksek termal iletkenlik ($> 10 \text{ W(mK)}^{-1}$), hidrojen ve oksijenin düşük geçirgenliği ($< 2 \times 10^{-6}$

$\text{cm}^3(\text{cm}^2\text{s})^{-1}$), eğilme dayanımı ($> 59 \text{ MPa}$) ve darbe dayanımı ($> 40,5 \text{ Jm}^{-1}$) özelliklerini sağlamalıdır [53].

Bipolar plakaların üretimi için yaygın olarak kullanılan iki ana malzeme ailesi vardır; grafit ve metaller. Yüksek maliyetine rağmen katı grafit; korozyon direnci, kimyasal inertliği ve iyi iletkenliği nedeniyle laboratuvar ölçekli çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, akış kanallarının grafit bipolar plaka yüzeyi üzerine işlenmesi veya elektrokimyasal olarak kazılması gerekmektedir. Bu durum ise grafitin seri üretimde kullanımını sınırlamaktadır. Grafitin aksine metal bipolar plakalar; hafif ve taşınabilir yakıt hücresi yığınlarının seri üretiminde çok ince tabakalarda üretim için uygundur [54]. Bipolar plakalar; mükemmel şekillendirilebilirlikleri, nispeten yüksek mukavemeti, yüksek elektriksel iletkenliği ve düşük gaz geçirgenliği, ve aynı zamanda çok yüksek hacimsel ve gravimetrik güç yoğunluklarına sahip yakıt hücrelerinin seri üretimi için makul maliyetleri nedeniyle metalik plakalardan kolaylıkla yapılabilir [52]. Bugüne kadar; paslanmaz çelik [55], titanyum [56], alüminyum [57], bakır [58] gibi metalik malzemeler bipolar plaka yapımında kullanılmıştır. Ancak metalik malzemeler; SO_4^{2-} , F^- ve Cl^- iyonlarını içeren zayıf asidik bir ortam olan PEM yakıt hücresi çalışma ortamında çözülmeye maruz kalabilir. Kaplamalar ve yüzey işlemleri yoluyla yüzey modifikasyonu, PEM yakıt ortamlarında metalik malzemelerin korozyon direncini ve yüzey iletkenliğini arttırmak için yaygın olarak benimsenmiştir. Buna göre, temel olarak metal bazlı ve karbon bazlı kaplamalar halinde gruplandırılan çeşitli kaplamaların ve işlemlerin performansı incelenmiştir [59]. Ayrıca; polipirrol, polianilin veya bunların türevleri gibi iletken polimerler de, esas olarak mükemmel kimyasal ve fiziksel kararlılıkları ve yüksek elektrik iletkenliklerine bağlı olarak korozyona karşı metal koruma adayları olarak kabul edilmektedir [52].

2.3 Uygulama Alanları

İşlevsel bir yakıt hücresine yol açan araştırma ve geliştirme çalışmaların başlangıcı 1800'lü yılların başına kadar uzanır. Kimyager ve patent avukatı Sir William Grove, ünlü su elektrolizörü/yakıt hücresi deneysel gösterimi nedeniyle yakıt hücresi biliminin babası olarak kabul edilmektedir. Sir William Grove, elektriğin üretilmesinde kullanılabilecek ters bir süreci kavramsallaştırmak için elektroliz teorisini kullanmıştır. Bu hipoteze dayanarak Grove, elektrik üretmek için hidrojen ve oksijeni birleştiren bir sistem (elektrik kullanarak ayırmak yerine) geliştirmeyi başarmıştır. Orijinalinde bir gaz pili olarak tanımlanan sistem, zamanla yakıt hücresi olarak bilinmeye başlamıştır. Yakıt hücresi ile yapılan araştırmalar devam ederken 1959 yılında, bir İngiliz mühendis olan Francis Thomas Bacon, kullanıma hazır ilk yakıt hücresini geliştirmiştir. Yaptığı bu çalışma NASA tarafından lisans verilecek ve benimsenecek kadar etkileyici olmuştur. Özellikle PEM ve alkali yakıt hücreleri, NASA tarafından 1960'larda Gemini ve Apollo insanlı uzay programlarının bir parçası olarak uygulanmıştır. NASA yakıt hücreleri ticari olmayan ve çeşitli sıkıntıları deneyimleyerek isteğe göre uyarlanmış, yakıt ve oksidant olarak sırasıyla hidrojen



ve oksijen kullanılmıştır. Günümüzde yakıt hücreleri; taşımacılık, sabit ve taşınabilir uygulamalarda kullanılmakta, kademeli olarak kamu ve özel sektör tarafından benimsenmekte ve uzun vadeli uygulamalar için daha güvenilir ve dayanıklı hale gelmektedir [60].

Sera gazı emisyonlarının kontrol edilebilirliği gibi çevre üzerindeki potansiyel etkilerinden dolayı PEM yakıt hücrelerinin ana uygulamaları, öncelikle taşımacılık alanına yoğunlaşmıştır. PEM yakıt hücrelerinin diğer uygulamaları da dağınık/sabit ve taşınabilir güç uygulamaları olarak verilebilir. Diğer yakıt hücreleri ile karşılaştırıldığında sahip olduğu yüksek güç yoğunluğu ve üstün dinamik karakteristikleri nedeniyle PEM yakıt hücreleri birçok ana motor üretim firmaları tarafından yoğun bir biçimde çalışılmaktadır. Yakıt hücreli taşıtlara; GM Hydrogen 1 (Zafira), Ford Demo IIa (Focus), DaimlerChrysler NeCar4a, Honda FCX-V3, Toyota FCHV-4, Nissan XTERRA FCV, VW Bora HyMotion ve Hyundai Santa Fe FCV modelleri örnek olarak verilebilir. Dağınık PEM yakıt hücresi güç sistemi uygulamalarına temel olarak küçük çapta odaklanılmıştır (merkezi olmayan kullanım için 50-250 kW veya haneler için <10 kW). Yakıt hücrelerinin atık ısının da kullanılabilir olması, dağınık güç uygulamaları için tasarlanan yakıt hücresi sistemlerinin verimini önemli ölçüde arttırmaktadır. Bankalar ve telekomünikasyon şirketleri için yedek güç, elektrik kesintilerinde ortaya çıkan yüksek maliyet nedeniyle oldukça önem taşımaktadır. Plug Power GenSys ve Ballard FCgen™ 1020 ACS yakıt hücresi sistemleri gibi birçok ünite geliştirilmiş ve birçok yerde konuşlandırılmıştır. Gelecek vaat eden bir diğer alan ise, pillerin sınırlı enerji kapasitesinin, dizüstü bilgisayarlar, cep telefonları ve askeri telsiz/iletişim cihazları gibi modern taşınabilir elektrikli cihazların hızla artan enerji ihtiyacını karşılamadığını göz önüne alarak taşınabilir güç kaynağıdır. PEM yakıt hücreleri, hidrojen yakıtı mevcut olduğu sürece sürekli güç sağlar ve verimlilik kaybı olmadan küçük boyutlarda üretilebilirler. Toshiba, Sony, Motorola, LG ve Samsung gibi başlıca elektronik şirketlerinde, taşınabilir yakıt hücreleri için şirket içi Ar-Ge birimleri bulunmaktadır [11].

Dünyada PEM yakıt hücrelerinin ticarileşmesi henüz gelişmemiştir. Bunun önündeki en büyük iki engel, kullanım ömrü ve maliyettir. MEA (membran elektrot bileşkesi) gibi yakıt hücresi bileşenleri, uzun süreli işlemler sırasında bozulmaya uğramaktadır. Ticari bir yakıt hücresinin ihtiyaç duyduğu kullanım ömrü, hafif araçlar için 5000 çalışma saatinin üzerinde ve % 10 performans düşüşü ile sabit enerji üretimi için 40.000 saatin üzerindedir. Şu anda, çoğu yakıt hücresi yaklaşık bin saatlik çalışmadan sonra büyük bir performans düşüşü sergilemektedir. Enerji departmanının (DOE) verilerine göre; PEM yakıt hücresi bileşenleri için 2015 yılında ulaşılan maliyet 17 \$/kW_{net} ve kullanım ömrü 2500 saat olmakla birlikte, 2020 hedefleri sırasıyla 14 \$/kW_{net} ve 5000 saat olarak belirlenmiştir [61]. Ayrıca DOE; yakıt hücresi sistemleri ve taşımacılık uygulamaları için üretilen yığınlarda 2015 yılı için % 60 verimle 3900 saat kullanım ömrü ve 53 \$/kW_{net} maliyete ulaşıldığını bildirmiş, ayrıca 2020 hedeflerinin % 65 verimle 5000 saat kullanım ömrü ve maliyeti 40 \$/kW_{net} olarak vermiştir [62].

3. SONUÇ VE TARTIŞMA

İlerleme daima enerji gerektirir. Günümüzde, enerji ihtiyaçları fosil yakıtların yakılmasıyla sağlanmış ve bu da hava kirliliğini ve sera gazı emisyonlarını artırmıştır. Sonuç olarak, sera gazı emisyon problemi, geleneksel tesislerin yüksek verimli tasarımı teşvik etmek için somut bir fırsat sunabilecek, aynı zamanda enerji sistemlerine yeni bir yaklaşım ve bunun sonucu olarak da ileri teknolojilerin yayılmasını sağlayabilecek kadar önem taşımaktadır. En ümit verici enerji dönüşüm teknolojilerinden biri, yakıt hücresidir çünkü yakıt hücresi; kimyasal enerjinin, düşük çevresel etki ile doğrudan elektrik enerjisine dönüştürüldüğü bir elektrokimyasal cihazdır. PEM yakıt hücreleri, büyük kirleticilerde $> \% 90$ azalma ile birlikte, elektrik enerjisi dönüşümünde $\% 60$ 'a veya elektrik ve termal enerjinin birlikte üretildiği kojenerasyon sistemlerinde $\% 80$ 'e varan potansiyele sahiptir. Çalışma süresi ve maliyet, PEM yakıt hücrelerinin ticarileşmesinin önündeki en büyük engellerdir. PEM yakıt hücrelerinin kullanımının yaygınlaşması için, var olan engellerin üstesinden gelmek için temel atılımlara ihtiyaç vardır. Özellikle yakıt hücresi bileşenlerinin (katalizör, membran, MEA, bipolar tabaka) iyileştirilmesi, istenilen özellikleri karşılayacak daha az maliyetli alternatif malzemelerin tanımlanması ve geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Bunun yanı sıra, yakıt hücresinin çalışması esnasında karşılaşılan durumlar (su davranışı, hidrofobiklik/hidrofiliklik, mikro-mini kanalların varlığı, polarizasyonlar, korozyon dirençleri vb.) ile ilgili temel bilgilerin edinilerek analitik modellerin ve deneysel araçların da geliştirilmesi gerekmektedir. Mevcut derleme çalışmasında, PEM yakıt hücrelerinin teorisi detaylı bir biçimde incelenmiş, tüm bileşenlerinin gereklilikleri verilerek yapılan çalışmalar özetlenmiş ve uygulama alanları ile gelecek performans beklentileri verilmiştir.

SEMBOLLER

Ag	Gümüş
Ar	Argon
Au	Altın
Co	Cobalt
CO	Karbon monoksit
CO ₂	Karbon dioksit
Cu	Bakır
e ⁻	Elektron
E	Termodinamik potansiyel
E ⁰	Tersinir standart potansiyel
E _{PEM}	Termodinamik verimlilik
F	Faraday sabiti



Fe	Demir
ΔG^0	Gibbs serbest enerjisindeki değişim
H^+	Proton
H_2	Hidrojen gazı
H_2O	Su molekülü
H_2O_2	Hidrojen peroksit
H_2S	Hidrojen sülfür
I	Hücre akımı
LHV_{H_2}	Hidrojenin alt ısı değeri
m_{H_2}	Hidrojen tüketim miktarı
MW_{H_2}	Hidrojenin molekül ağırlığı
n	Elektron sayısı
NH_3	Amonyak
Ni	Nikel
O_2	Oksijen gazı
P_{H_2O}	Suyun kısmi basıncı
P_{H_2}	Hidrojenin kısmi basıncı
P_{O_2}	Oksijenin kısmi basıncı
Pd	Paladyum
Pt	Platin
R	Gaz sabiti
Rh	Rodyum
SiO_2	Silisyum dioksit
T	Hücre sıcaklığı
TiO_2	Titanyum dioksit
W	Güç
$V_{hücre}$	Hücre potansiyeli
ZrO_2	Zirkonyum dioksit
η_{akt}	Aktivasyon polarizasyonu
η_{dif}	Difüzyon polarizasyon
η_{ohm}	Ohmik polarizasyonu

KAYNAKÇA

1. Farooqui, U.R., Ahmad, A.L., Hamid, N.A., 2018. "Graphene Oxide: A Promising Memb-

- rane Material for Fuel Cells,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 714–33.
2. **Lucia, U.** 2014. “Overview on Fuel Cells,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 164–169.
 3. **Haque, M.A., Sulong, A.B., Loh, K.S., Majlan, E.H., Husaini, T., Rosli, R.E.** 2017. “Acid Doped Polybenzimidazoles Based Membrane Electrode Assembly for High Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell: A Review,” *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(14), 9156–79.
 4. **Wang, Y., Leung, D.Y.C., Xuan, J., Wang, H.** 2016. “A Review on Unitized Regenerative Fuel Cell Technologies , Part-A : Unitized Regenerative Proton Exchange Membrane Fuel Cells,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 961–77.
 5. **Park, J.-S., Shin, M.-S., Kim, C.-S.** 2017. “Proton Exchange Membranes for Fuel Cell Operation at Low Relative Humidity and Intermediate Temperature : An Updated Review,” *Current Opinion in Electrochemistry*, 5(1), 43–55.
 6. **Bakangura, E., Wu, L., Ge, L., Yang, Z., Xu, T.** 2016. “Mixed Matrix Proton Exchange Membranes for Fuel Cells : State of the Art and Perspectives,” *Progress in Polymer Science*, 57, 103–52.
 7. **Authayanun, S., Im, K., Arpornwichanop, A.** 2015. “A Review of the Development of High Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cells,” *Chinese Journal of Catalysis*, 36(4), 473–83.
 8. **Kraytsberg, A., Ein-Eli, Y.** 2014. “Review of Advanced Materials for Proton Exchange Membrane Fuel Cells,” *Energy and Fuels*, 28(12), 7303–30.
 9. **Al-baghdadi, M.A.R.S., ve Al-janabi, H.A.K.S.** 2005. “Optimization Study of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance,” *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences* 29, 235–240.
 10. **Arshad, A., Muhammed Ali, H., Habib, A., Bashir, M.A., Jabbal, M., Yan, Y.** 2019. “Energy and Exergy Analysis of Fuel Cells: A review,” *Thermal Science and Engineering Progress*, 9, 308–321.
 11. **Wang, Y., Chen, K.S., Mishler, J., Cho, S.C., Adroher, X.C.** 2011. “A Review of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells: Technology, Applications, and Needs on Fundamental Research,” *Applied Energy*, 88(4), 981–1007. 030.
 12. **Peighambaroust, S.J., Rowshanzamir, S., Amjadi, M.** 2010. “Review of the Proton Exchange Membranes for Fuel Cell Applications,” *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 9349–84.
 13. **Bae, I., Oh, K.H., Yun, M., Kang, M.K., Song, H.H., Kim, H.** 2018. “Nanostructured Composite Membrane with Cross-Linked Sulfonated Poly(Arylene Ether Ketone)/Silica for High-Performance Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells under Low Relative Humidity,” *Journal of Membrane Science*, 549, 567–74.
 14. **Xu, X., Li, R., Tang, C., Wang, H., Zhuang, X., Liu, Y., Kang, W., Shi, L.** 2018. “Cellulose Nanofiber-Embedded Sulfonated Poly (Ether Sulfone) Membranes for Proton



Exchange Membrane Fuel Cells,” *Carbohydrate Polymers*, 184, 299–306.

15. **Demirci, A.** 2006. “Borik Asit Katkılı Sülfolanmış Polisitiren Membranın Polimer Elektrolit Yakıt Hücresinde Elektrolit Olarak Kullanılabilirliği,” Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
16. **Ni, C., Wei, Y., Zhao, Q., Liu, B., Sun, Z., Gu, Y., Zhang, M., Hu, W.** 2018. “Novel Proton Exchange Membranes Based on Structure-Optimized Poly(Ether Ether Ketone)s and Nanocrystalline Cellulose,” *Applied Surface Science*, 434, 163–75.
17. **Thompson, D.** 2003. “Catalysts for the Proton Exchange Membrane Fuel Cell,” In CRC Press, 2–12.
18. **Markovic, N.M., Grgur, B.N., Ross, P.N.** 1997. “Temperature-Dependent Hydrogen Electrochemistry on Platinum Low-Index Single-Crystal Surfaces in Acid Solutions,” *The Journal of Physical Chemistry*, 101(27), 5405–13.
19. **Bai, L., Harrington, D.A., Conway, B.E.** 1987. “Behavior of Overpotential—deposited Species in Faradaic Reactions—II. Ac Impedance Measurements on H₂ Evolution Kinetics at Activated and Unactivated Pt Cathodes,” *Electrochimica Acta*, 32, 1713–31.
20. **Zhang, L., Zhang, J., Wilkinson, D.P., Wang, H.** 2006. “Progress in Preparation of Non-Noble Electrocatalysts for PEM Fuel Cell Reactions,” *Journal of Power Sources*, 156(2), 171–82.
21. **Ferreira, P.J., La, Q., G.J., Shao-Horn, Y., Morgan, D., Makharia, R., Kocha, S., Gasteiger, H.A.** 2005. “Instability of Pt/C Electrocatalysts in Proton Exchange Membrane Fuel Cells A Mechanistic Investigation,” *Journal of Electrochemical Society*, 152(11), 2256–71.
22. **Mun, Y., Kim, M.J., Park, S.-A., Lee, E., Ye, Y., Lee, S., Kim, Y.-T., Kim, S., Kim, O.-H., Cho, Y.-H., Sung, Y.-E., Lee, J.** 2018. “Soft-Template Synthesis of Mesoporous Non-Precious Metal Catalyst with Fe-Nx/C Active Sites for Oxygen Reduction Reaction in Fuel Cells,” *Applied Catalysis B: Environmental*, 222, 191–99.
23. **Boone, C.V., Maia, G.** 2017. “Pt–Pd and Pt–Pd–(Cu or Fe or Co)/Graphene Nanoribbon Nanocomposites as Efficient Catalysts toward the Oxygen Reduction Reaction,” *Electrochimica Acta*, 247, 19–29.
24. **Park, K., Matsune, H., Kishida, M., Takenaka, S.** 2017. “Carbon-Supported Pd-Ag Catalysts with Silica-Coating Layers as Active and Durable Cathode Catalysts for Polymer Electrolyte Fuel Cells,” *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(30), 18951–58.
25. **Takenaka, S., Miyata, H., Tsukamoto, T., Matsune, H., Kishida, M.** 2012. “Improvement in Activity of Highly Durable Silica-Coated Pd/CNT Cathode Catalysts for PEFC by Addition of Cu,” *ECS Transactions*, 50, 1715–22.
26. **Takenaka, S., Tsukamoto, T., Matsune, H., Kishida, M.** 2013. “Carbon Nanotube-Supported Pd-Co Catalysts Covered with Silica Layers as Active and Stable Cathode Catalysts for Polymer Electrolyte Fuel Cells,” *Catalysis Science Technol.*, 3, 2723–31.

27. **Zhao, J., Sarkar, A., Manthiram, A.** 2010. "Synthesis and Characterization of Pd-Ni Nanoalloy Electrocatalysts for Oxygen Reduction Reaction in Fuel Cells," *Electrochimica Acta*, 55, 1756–65.
28. **Bokach, D., Hoopen, S., Muthuswamy, N., Buan, M.E.M., Ronning, M.** 2016. "Nitrogen-Doped Carbon Nanofiber Catalyst for ORR in PEM Fuel Cell Stack: Performance, Durability and Market Application Aspects," *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(39), 17616–30.
29. **Bharti, A., Cheruvally, G.** 2017. "V-Doped TiO₂ supported Pt as a Promising Oxygen Reduction Reaction Catalyst: Synthesis, Characterization and in-Situ Evaluation in Proton Exchange Membrane Fuel Cell," *Journal of Power Sources*, 363, 413–21.
30. **Egetenmeyer, A., Radev, I., Durneata, D., Baumgartner, M., Peinecke, V., Natter, H., Hempelmann, R.** 2017. "Pulse Electrodeposited Cathode Catalyst Layers for PEM Fuel Cells," *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(19), 13649–60.
31. **Xiong, X., Chen, W., Wang, W., Li, J., Chen, S.** 2017. "Pt-Pd Nanodendrites as Oxygen Reduction Catalyst in Polymer-Electrolyte-Membrane Fuel Cell," *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(40), 25234–43.
32. **Zeng, Y., Shao, Z., Zhang, H., Wang, Z., Hong, S., Yu, H., Yi, B.** 2017. "Nanostructured Ultrathin Catalyst Layer Based on Open-Walled PtCo Bimetallic Nanotube Arrays for Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *Nano Energy*, 34, 344–55.
33. **Zhang, C., Yu, H., Fu, L., Xiao, Y., Gao, Y., Li, Y., Zeng, Y., Jia, J., Yi, B., Shao, Z.** 2015. "An Oriented Ultrathin Catalyst Layer Derived from High Conductive TiO₂ Nanotube for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell," *Electrochimica Acta*, 153, 361–69.
34. **Breitwieser, M., Klingele, M., Britton, B., Holdcroft, S., Zengerle, R., Thiele, S.** 2015. "Improved Pt-Utilization Efficiency of Low Pt-Loading PEM Fuel Cell Electrodes Using Direct Membrane Deposition," *Electrochemistry Communications*, 60, 168–71.
35. **Daş, E., Alkan Gürsel, S., Işık Şanlı, L., Bayrakçeken Yurtcan, A.** 2017. "Thermodynamically Controlled Pt Deposition over Graphene Nanoplatelets: Effect of Pt Loading on PEM Fuel Cell Performance," *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(30), 19246–56.
36. **Wang, L., Wurster, P., Gazdzicki, P., Roussel, M., Sanchez, D.G., Guetaz, L., Jacques, P. A., Gago, A. S., Friedrich, K. A.** 2018. "Investigation of Activity and Stability of Carbon Supported Oxynitrides with Ultra-Low Pt Concentration as ORR Catalyst for PEM Fuel Cells," *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 819, 312–21.
37. **Ferreira, R. B, Falcão, D. S., Oliveira, V. B., Pinto, A. M. F. R.** 2017. "Experimental Study on the Membrane Electrode Assembly of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell: Effects of Microporous Layer, Membrane Thickness and Gas Diffusion Layer Hydrophobic Treatment," *Electrochimica Acta*, 224, 337–45.
38. **Taherian, R., Ghorbani, M.M., Kiahosseini, S.R.** 2018. "A New Method for Optimal Fabrication of Carbon Composite Paper as Gas Diffusion Layer Used in Proton Exchange Membrane of Fuel Cells," *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 815, 90–97.



39. **Park, S., Lee, J.-W., Popov, B.N.** 2008. "Effect of PTFE Content in Microporous Layer on Water Management in PEM Fuel Cells," *Journal of Power Sources*, 177, 457–63.
40. **Lim, C., Wang, C.Y.** 2004. "Effects of Hydrophobic Polymer Content in GDL on Power Performance of a PEM Fuel Cell," *Electrochimica Acta*, 49: 4149–56.
41. **Jayakumar, A., Sethu, S.P., Ramos, M., Robertson, J., Al-Jumaily, A.** 2015. "A Technical Review on Gas Diffusion, Mechanism and Medium of PEM Fuel Cell," *Ionics*, 21, 1–18.
42. **Weber, A.Z., Newman, J.** 2005. "Effects of Microporous Layers in Polymer Electrolyte Fuel Cells," *Journal of Electrochemical Society*, 152, A667–68.
43. **Tabe, Y., Aoyama, Y., Kadowaki, K., Suzuki, K., Chikahisa, T.** 2015. "Impact of Microporous Layer on Liquid Water Distribution at the Catalyst Layer Interface and Cell Performance in a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell," *Journal of Power Sources*, 287, 422–30.
44. **Lu, Z., Daino, M.M., Rath, C., Kandlikar, S.G.** 2010. "Water Management Studies in PEM Fuel Cells, Part III: Dynamic Breakthrough and Intermittent Drainage Characteristics from GDLs with and without MPLs," *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 4222–33.
45. **Hussain, N., Steen, E.V., Tanaka, S., Levecque, P.** 2017. "Metal Based Gas Diffusion Layers for Enhanced Fuel Cell Performance at High Current Densities," *Journal of Power Sources*, 337, 18–24.
46. **Omrani, R., Shabani, B.** 2017. "Gas Diffusion Layer Modifications and Treatments for Improving the Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cells and Electrolysers: A Review," *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(47), 28515–36.
47. **Hao, J., Yu, S., Jiang, Y., Li, X., Shao, Z., Yi, B.** 2015. "Antimony Doped Tin Oxide Applied in the Gas Diffusion Layer for Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 756, 201–6.
48. **Sadeghi, E., Djilali, N., Bahrami, M.** 2011. "Effective Thermal Conductivity and Thermal Contact Resistance of Gas Diffusion Layers in Proton Exchange Membrane Fuel Cells. Part 1: Effect of Compressive Load," *Journal of Power Sources*, 196(1), 246–54.
49. **Sadeghifar, H., Djilali, N., Bahrami, M.** 2014. "Effect of Polytetrafluoroethylene (PTFE) and Micro Porous Layer (MPL) on Thermal Conductivity of Fuel Cell Gas Diffusion Layers: Modeling and Experiments," *Journal of Power Sources*, 248, 632–41.
50. **Antolini, E., Gonzalez, E. R.** 2009. "Ceramic Materials as Supports for Low-Temperature Fuel Cell Catalysts," *Solid State Ionics*, 180, 746–63.
51. **Jin, J., Zheng, D., Liu, H.** 2017. "The Corrosion Behavior and Mechanical Properties of CrN/Ni-P Multilayer Coated Mild Steel as Bipolar Plates for Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(48), 28883–97.
52. **Pan, T.J., Zuo, X.W., Wang, T., Hu, J., Chen, Z.D., Ren, Y. J.** 2016. "Electrodeposited Conductive Polypyrrole/Polyaniline Composite Film for the Corrosion Protection

- of Copper Bipolar Plates in Proton Exchange Membrane Fuel Cells,” *Journal of Power Sources*, 302, 180–88.
53. **Taherian, R.** 2014. “A Review of Composite and Metallic Bipolar Plates in Proton Exchange Membrane Fuel Cell: Materials, Fabrication, and Material Selection,” *Journal of Power Sources*, 265, 370–90.
 54. **Kahraman, H. ve Orhan, M.F.** 2017. “Flow Field Bipolar Plates in a Proton Exchange Membrane Fuel Cell: Analysis & Modeling,” *Energy Conversion and Management*, 133, 363–84.
 55. **Davies, D.P., Adcock, P.L., Turpin, M., Rowen, S. J.** 2000. “Stainless Steel as a Bipolar Plate Material for Solid Polymer Fuel Cells,” *Journal of Power Sources*, 86(1), 237–42.
 56. **Wang, S.H., Peng, J., Lui, W.B.** 2006. “Surface Modification and Development of Titanium Bipolar Plates for PEM Fuel Cells,” *Journal of Power Sources*, 160(1), 485–89.
 57. **Joseph, S., McClure, J.C., Sebastian, P.J., Moreira, J., Valenzuela, E.** 2008. “Polyaniline and Polypyrrole Coatings on Aluminum for PEM Fuel Cell Bipolar Plates,” *Journal of Power Sources*, 177(1), 161–66.
 58. **Nikam, V.V., Reddy, R.G.** 2005. “Corrosion Studies of a Copper-Beryllium Alloy in a Simulated Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Environment,” *Journal of Power Sources*, 152(1–2), 146–55.
 59. **Oladoye, A.M., Carton, J.G., Benyounis, K., Stokes, J., Olabi, A.G.** 2016. “Optimisation of Pack Chromised Stainless Steel for Proton Exchange Membrane Fuel Cells Bipolar Plates Using Response Surface Methodology,” *Surface and Coatings Technology*, 304, 384–92.
 60. **Sharaf, O.Z., Orhan, M.F.** 2014. “An Overview of Fuel Cell Technology: Fundamentals and Applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 810–53.
 61. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-polymer-electrolyte-membrane-fuel-cell-components>
 62. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-fuel-cell-systems-and-stacks-transportation-applications>

2019 YILI DEĞERLENDİRMESİ

Aylin Sıla AĞCA

Mühendis ve Makina, toplumun, ülke sanayisinin, Odamıza üye meslek disiplinlerinin ve meslektaşlarımızın ihtiyaçlarını karşılamak üzere TMMOB Makina Mühendisleri Odası tarafından 1957'den bugüne değin yayımlanmaktadır.

Dergimiz akademik süreli yayıncılıkta, uluslararası kalite ve standartlara uygun olarak süreçlerini düzenlemektedir. Dergi, EBSCO (2009), UDLEDge (2018), Index Copernicus (2019), Scientific Indexing Services (2019) veri tabanlarında yer almıştır. Bu çeviri miçi tam metin veritabanları, 120'den fazla ülkede kullanılmakta olup, bu veri tabanları sayesinde dergimizin dünya genelinde daha geniş bir kitleye ulaşması ve tanınması sağlanmaktadır. Ayrıca Ulusal ve Uluslararası diğer veri tabanlarına başvurularına devam etmektedir.

Ülkemizin konusunda önde gelen dergilerinden biri olan Mühendis ve Makina, 2017 yılı Nisan ayına kadar aylık, sonra ise en az beş makale sayısı, üç aylık periyoduyla, yeni teknolojileri, bilimsel araştırma ve inceleme konularını ve mühendisliğe ilişkin birikimleri sayfalarına taşıyarak Oda üyelerine ve ilgili kesimlere bu birikimlerini ulaştırma çabasıdır.

MAKALELER

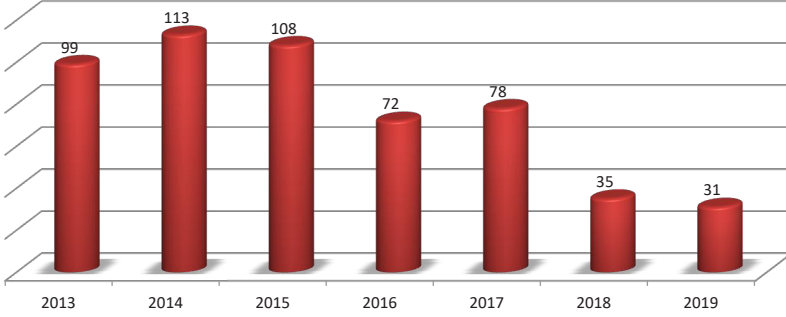
Mühendis ve Makina dergisine 2019 yılında 36 makale gelmiştir. Gelen makalelerin yazarlarının çalıştığı kurum ve kuruluşlara bakıldığında, yüzde 36'lık payı üniversiteler, yüzde 8'lik payı kamu kurum ve kuruluşlar, yüzde 56'lık payı sanayi ve özel sektör oluşturmaktadır. 2019 yılında sanayi kuruluşları ile üniversite ortaklığında yazılan makalelerin devamlılığının sağlanması, meslek odası – üniversite – sanayi ilişkisinin güçlendirilmesi açısından oldukça önemlidir.

Dergimize gelen makaleler nitelikleri bakımından özgün, çeviri ve derleme olmak üzere üç kategoride değerlendirilmektedir. 2019 yılında 24 özgün, 12 derleme makale dergimize gönderilmiştir.

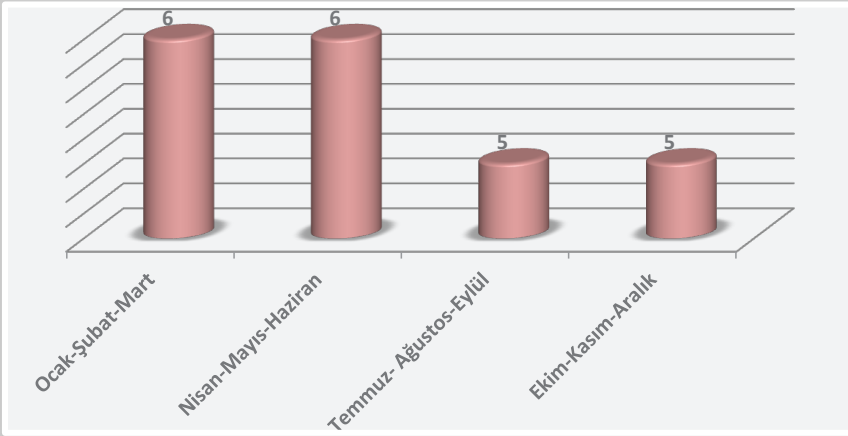
Makalelerin hakemler tarafından değerlendirilmesi sonucu ortaya çıkan kabul ve ret oranına baktığımızda, yüzde 14 kabul (5 makale), yüzde 12 red (4 makale) oranı görülmektedir. 12 makalenin yazar düzenleme, 9 makalenin hakem değerlendirme süreçleri devam etmektedir.

Makalelerin gönderimi ve hakem tarafından değerlendirilmesi süreçlerinde olası zaman kayıplarını ve maliyetleri azaltacak bir yöntem olan Online Makale Yönetim Sistemine (OMYS) 2010 yılında geçilmiştir. Makalelerin <http://omys.mmo.org.tr/muhendismakina/> adresinde yer alan OMYS'ye kayıt yapılarak gönderilmesi, süreçlerin

Yıllara Göre Gelen Yazı Sayıları

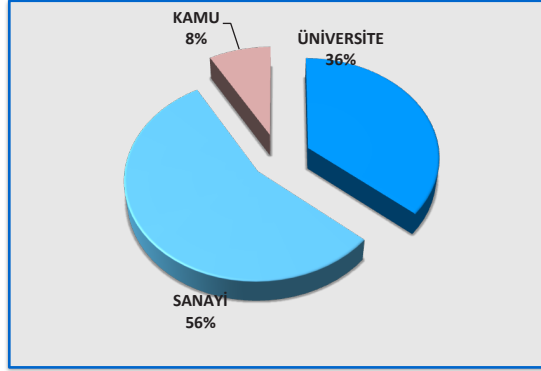


2019 Yılında Yayınlanan Makale Sayıları

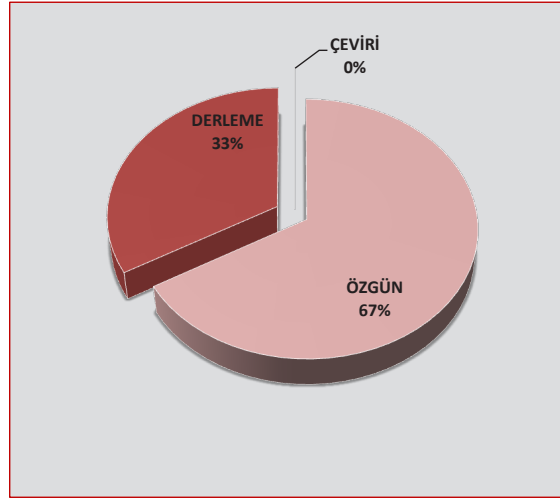


takibini kolaylaştırmış, yazar-editör ve editör-hakem arasında makale ve ileti gönderimini hızlandırarak kabul edilen makalelerin güncelliğini yitirmeden yayımlanması sağlanmıştır.

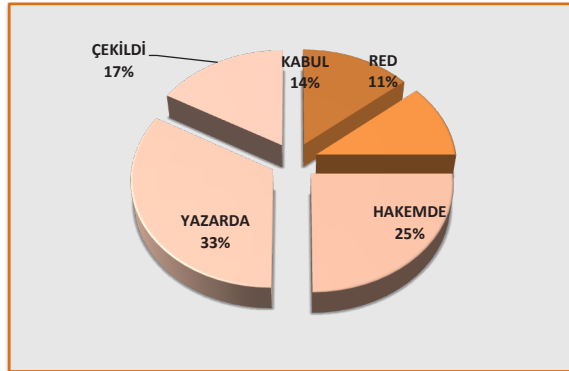
Gelişen ihtiyaçlar doğrultusunda, makale yönetim sisteminde yer alan mevcut makalelerin süreçlerinin tamamlanmasının ardından, önümüzdeki yıllarda kullanılması için alt yapı güncellenmesi planlanmaktadır. Kullanıcı olarak son 5 yıla ait dergi makale dosyalarına alternatif bir adres olarak Dergipark <https://dergipark.org.tr/tr/pub/muhendismakina> üzerinden de ulaşılabilmektedir.



Grafik 1. Yazarların Çalıştığı Alanlara Göre Gelen Makale Oranları



Grafik 2. Türlerine Göre Gelen Makale Oranları



Grafik 3. Değerlendirme Durumlarına Göre Makale Oranları

SONUÇ

Dergimiz, tercih eden üyelerimize posta ile ulaştırılırken www.mmo.org.tr/muhendis-makina adresinden de ihtiyacı olan herkesin erişimine sunulmaktadır. Daha etkin bir web sayfası için çalışmalarımız sürmektedir.

Geçmişte olduğu gibi bugün de bizlere destek olan tüm kişi, kurum ve kuruluşlara, hakemlerimize, yazarlarımıza, yayın kurulumuza, yayın danışma kurulumuza ve yayın çalışanlarına özverili çalışmalarından dolayı teşekkür ederiz.

MÜHENDİS VE MAKİNA DERGİSİ YAZIM ESASLARI

Mühendis ve Makina dergisi, TMMOB Makina Mühendisleri Odası tarafından, ülke sanayisinin, toplumu, 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. Her yazı, konusuyla ilgili en az iki hakeme gönderilir. Hakem görüşlerinde belirtilen eksikler yazarlar tarafından tamamlandıktan sonra, dergide yayımlanabilecek nitelikte olanlar belirlenir ve yazara bilgisi verilir. Yazıların son hali yazarları tarafından düzenlenerek yayın sekreterine Online Makale Yönetim Sistemi (OMYS*) üzerinden iletilir. 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. Yayımlanmayan 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 yayınlanmamış 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 gerekçesini 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.

* Makalelerin gönderimi ve hakem tarafından değerlendirilmesi süreçlerinde yaşanabilecek zaman kayıplarını ve maliyetleri azaltmak için makalelerinizi lütfen; omys.mmo.org.tr/muhendismakina linkindeki sistem üzerinden gönderiniz.

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 an 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 Online Article Management System (OMYS). 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.

Please send your articles via the system at omys.mmo.org.tr/muhendismakina, in order to minimize the costs and time loss, which may result from the process of sending articles and evaluation by arbitrators.