

# MÜHENDİS VE MAKİNA

## ENGINEER AND MACHINERY



tmmob makina mühendisleri odası yayın organı

[www.mmo.org.tr/muhendismakina](http://www.mmo.org.tr/muhendismakina)

HAVACILIKTA ORGANİZASYONEL KAZALAR: B-737 MAX UÇAK KAZALARININ MÜHENDİSLİK PERSPEKTİFİNDEN İNCELENMESİ

RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE İŞLETME VE BAKIM

FOTOVOLTAİK (PV) POMPA SİSTEMİNİN BİLEŞENLERİNİN HESABI

HİDROLİK YÜKSEK BASINÇ HATTI FİLTRE GÖVDESİNİN TASARIMI, OPTİMİZASYONU, ÜRETİMİ VE TEST EDİLMESİ

COVID-19 İLE İVMELENEN DİJİTALLEŞMENİN PLM'E ETKİLERİ



tmmob makina mühendisleri odası  
*uctea chamber of mechanical engineers*

[www.mmo.org.tr/muhendismakina](http://www.mmo.org.tr/muhendismakina)

# Mühendis ve Makina

Engineer and Machinery

**Cilt 61**

Volume 61

**Sayı 701**

Number 701

**Ekim-Aralık 2020**

October-December 2020

# TMMOB MAKİNA MÜHENDİSLERİ ODASI

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

**Ekim-Aralık /October-December 2020**

**Cilt / Vol: 61 Sayı / No: 701**

**Yönetim Yeri / Head Office**

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

**MMO Adına Sahibi**

Publisher  
Yunus YENER

**Sorumlu Yazı İşleri Müdürü**

Executive Editor  
Yunus YENER

**Yayın Sekreteri**

Editorial Secretary  
Ceren YILMAZ ARAS

**Editör / Editorial in Chief**

*Prof. Dr. Harun Kemal ÖZTÜRK*

**Editör Yardımcıları / Associate Editors**

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

**Yayın Danışma Kurulu / Editorial Advisory Board**

Prof. Dr. C. Erdem İMRAK - *İstanbul Teknik Üniversitesi / Istanbul Technical University, İstanbul*  
Prof. Dr. Erdiñ KALUÇ - *Kocaeli Üniversitesi / Kocaeli University, İzmit*  
Prof. Dr. Ali GÜNGÖR - *Ege Üniversitesi / Ege University, İzmir*  
Prof. Dr. Hikmet RENDE - *Akdeniz Üniversitesi / Akdeniz University, Antalya*  
Prof. Dr. Ali PINARBAŞI - *Yıldız Teknik Üniversitesi / Yıldız Technical University, Antalya*  
Prof. Dr. Sedat BAYSEÇ - *Gaziantep Üniversitesi / Gaziantep University, Gaziantep*  
Prof. Dr. E. İlhan KONUKSEVEN - *Orta Doğu Teknik Üniversitesi / Middle East Technical University, Ankara*  
Prof. Dr. Erol KILIÇKAP - *Dicle Üniversitesi / Dicle University, Diyarbakır*  
Prof. Dr. Mustafa YURDAKUL - *Gazi Üniversitesi / Gazi University, Ankara*  
Prof. Dr. Atilla BIYIKOĞLU - *Gazi Üniversitesi / Gazi University, Ankara*  
Prof. Dr. Mirosław BONEK - *Silesian University of Technology, Poland*  
Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU - *Karadeniz Teknik Üniversitesi / Karadeniz Technical University, Trabzon*  
Prof. Dr. Leszek A. DOBRZANSKI - *Silesian University of Technology, Poland*  
Prof. Dr. Ö. Altan DOMBAYCI - *Pamukkale Üniversitesi / Pamukkale University, Denizli*  
Prof. Dr. Halim GÜRGENCI - *Queensland Üniversitesi / The University of Queensland, Australia*  
Prof. Dr. Hyung-Man Kim - *Power System and Sustainable Energy Laboratory (PSSEL), South Korea*  
Prof. Dr. Basim AL-NAJJAR - *Linnaeus University, Sweden*  
Prof. Dr. Barış ÖZERDEM - *İzmir Ekonomi Üniversitesi / Izmir University of Economics, İzmir*  
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 ÖZERCİYES - *AIRBUS, UK*

**Yayın Kurulu / Editorial Board**

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

**Kapak ve Sayfa Tasarımı**

Cover and Page Design  
Muazzez POLAT

**Teknik Sorumlu**

Technical Manager  
Mehmet AYDIN

**Baskı**

Printed by  
Ankamat Matbaacılık Sanayi Ltd. Şti.  
30. Cadde 538. Sokak No: 60 İvedik Organize Sanayi - Ankara  
Tel: (+90 312) 394 54 94  
Basım Tarihi: 15 Aralık 2020  
Baskı Sayısı: 1.000

# Mühendis ve Makina

*Engineer and Machinery*

**Cilt 61**  
Volume 61

**Sayı 701**  
Number 701

**Ekim-Aralık 2020**  
October-December 2020

## İÇİNDEKİLER/CONTENTS

Derleme/Review

- Havacılıkta Organizasyonel Kazalar: B-737 Max Uçak Kazalarının Mühendislik Perspektifinden İncelenmesi** 241  
*The Organizational Accidents in Aviation: An Investigation of B-737 Max Aircraft Accidents from the Engineering Perspective*  
**Tamer SARAÇYAKUPOĞLU**

Araştırma/Research

- Rüzgar Türbinlerinde İşletme ve Bakım** 262  
*Operation and Maintenance for Wind Turbines*  
**Harun Kemal ÖZTÜRK**

Araştırma/Research

- Fotovoltaik (PV) Pompa Sisteminin Bileşenlerinin Hesabı** 280  
*Creating the Sizing Algorithm of a Photovoltaic Pump System*  
**Ahmet DEMİR, F. Mertkan ARSLAN, Hüseyin GÜNERHAN**

Araştırma/Research

- Hidrolik Yüksek Basınç Hattı Filtre Gövdesinin Tasarımı, Optimizasyonu, Üretimi ve Test Edilmesi** 299  
*Design, Optimization and Fabrication of Body of Hydraulic High-Pressure Filter and Experimental Validation*  
**Samet TEKELİOĞLU, Safa ELDEK\*, Hüseyin GÜMÜŞ, Ayfer SARIGÜL, Şeyma AYHAN, Ali KAHRAMAN, Murat DİLMEÇ**

Derleme/Review

- COVID-19 ile İvmelenen Dijitalleşmenin PLM'e Etkileri** 320  
*The Impact of Digitalization Accelerated by COVID-19 on PLM*  
**Alim FİLİK, Rüstem Barış YEŞİLAY**

---

*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](http://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 makale **Tamer Saraçyakupoğlu**'un "Havacılıkta Organizasyonel Kazalar: B-737 Max Uçak Kazalarının Mühendislik Perspektifinden İncelenmesi" başlıklı çalışmasıdır. Bu çalışmada Havacılık kazalarının oluşumu çoğunlukla birden fazla nedenden kaynaklanmaktadır. Diğer bir ifade ile havacılık kazaları birçok etkinin birleşiminin bir sonucu olarak meydana gelmektedir. Bu etkilere, üretim süreçleri, bakım faaliyetleri, beşeri unsurlar, meteorolojik şartlar, sertifikasyon kontrolleri ve pist durumu gibi hususlar örnek olarak verilebilir. Diğer taraftan aynı uçak tipindeki ardışık kazalar, doğal olarak dikkat çekicidir. 29 Ekim 2018'de Endonezya'da ve 10 Mart 2019'da Etiyopya'da meydana gelen B-737 Max ticari yolcu uçağı kazaları bu ardışık kazalara örnektir. Bu çalışmada söz konusu kazalar pilotaj ve mühendislik perspektifinden, sertifikasyon süreçleri açısından ele alınmaktadır.*

*İkinci makalemiz **Harun Kemal Öztürk**'ün "Rüzgar Türbinlerinde İşletme ve Bakım" adlı çalışmasıdır. Enerji tüketimi nüfus artışı, sanayileşme ve konfor seviyesinin artmasına bağlı olarak artmaktadır. Diğer yandan, günümüzde enerji tüketiminin çok büyük kısmının sağlandığı fosil yakıtlar, iklim değişikliği ve çevresel kirliliğe neden olmaktadır. Bu nedenle de, yenilenebilir enerji kaynakları ön plana çıkmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde ise rüzgar enerjisi, ilk yatırım ve işletme maliyetleri göz önüne alındığında ön plana çıkmaktadır. Rüzgar türbinlerinde arızalar nedeni ile meydana gelebilecek duraksamalar yatırımcıların istemediği konular içerisinde yer almaktadır. Rüzgar türbinlerinin mekanik ve elektriksel aksamaları göz önüne alındığında, en çok arızanın elektriksel aksamalardan kaynaklandığı ancak mekanik arızalar sırasındaki duraksamaların ise daha uzun süreler aldığı gözlemlenmiştir. Rüzgar türbinlerinde yapılacak bakım çalışmaları ile hem arızaların önüne geçilebilmekte hem de duraksama süreleri kısıtlanmaktadır. Bu çalışmada, rüzgar türbinlerinde meydana gelen arızaların nedenleri ile işletme ve bakım konuları ele alınmıştır.*

*Üçüncü makalemiz, **Ahmet Demir, F. Mertkan Arslan ve Hüseyin Günerhan**'ın "Fotovoltaik (PV) Pompa Sisteminin Bileşenlerinin Hesabı" adlı çalışmasıdır. Çalışma kapsamında, bir fotovoltaik (PV) pompa sisteminin optimum olarak boyutlandırılması için bir programlama algoritması oluşturulmuştur. Boyutlandırma algoritması, sistemdeki enerji dengesini temel alarak çalışmaktadır. Algoritma, hem akülü hem de aküsüz PV pompa sisteminin boyutlandırılması için uygun olarak modellenmiştir. Akü içeren PV pompa sistemleri için optimizasyon, aküye giren-çıkan enerjilerin dengesi ile iterasyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Akü içermeyen sistemler için optimizasyon, pompanın kullandığı enerjiyi karşılayabilecek PV panel alanının bulunmasını temel almaktadır. Çalışmada oluşturulan algoritma, Temmuz ayında Manisa-Salihli ilçesinde 1 hektarlık alanda mısır bitkisi için uygulanmıştır. Bitkinin sulanması için damlama sulama yöntemi kullanıldığı kabulü yapılmıştır. Ek olarak, kuyu için gerekli kabuller ve varsayımlar yapıldıktan sonra, pompaya gereken güç 1,5 kW ve debi 9,55 m<sup>3</sup>/h olarak hesaplamalara eklenmiştir. Sonuç olarak, sistemde akünün bulunması dahilinde toplam 23 adet PV panel gerekli iken, akünün olmaması*

durumunda 36 adet PV panel gerekli olduğu hesaplanmıştır. Gerekli akü miktarı ise 3 adet olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre, sistem içerisinde akü kullanılması halinde, gerekli PV panel miktarının önemli ölçüde düşürüldüğü hesaplanmıştır. Ek olarak, bir diğer önemli sonuç ise, sistemde akü bulunmaması durumunda, PV panelin elde edebileceği potansiyel enerji miktarının yarısı israf edilmektedir. Ancak akü kullanılması durumunda ise, israf edilecek bu enerji aküler tarafından toplanarak, sistemin daha optimize edilebilir bir hal alması sağlanmaktadır.

Dördüncü makalemiz **Samet Tekelioğlu, Safa Eldek, Hüseyin Gümüş, Ayfer Sarıgül, Şeyma Ayhan Ali Kahraman ve Murat Dilmeç**'in "Hidrolik Yüksek Basınç Hattı Filtre Gövdesinin Tasarımı, Optimizasyonu, Üretimi ve Test Edilmesi" adlı makalesidir. Bu çalışmada, hidrolik basınç hattı filtresinin gövdesinin tasarımı ve gövde optimizasyonu ve EN-GJS 400-15 malzemeden döküm yöntemiyle yerli olarak üretimi gerçekleştirilmiştir. Hidrolik filtrenin iç kısmına işletme basıncı olan 45 MPa basınç statik ve dinamik olarak sonlu elemanlar analizinde uygulanmıştır. Gövde kalınlığının malzeme tasarrufu sağlamak amacıyla optimizasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Kalınlık inceltmesi sonunda parçada oluşan maksimum gerilme 154 MPa civarında ve emniyet katsayısı yaklaşık 1,8 olmuştur. Optimize edilmiş gövdenin standarda uygun olarak patlatma, sızdırmazlık, yorulma testlerine tabii tutulmuştur. Sonuç olarak, sonlu elemanlar analizleriyle hidrolik basınç hattı filtre gövdesi optimize edilmiştir ve mevcut muadillerine göre %17 oranında hafif ve daha mukavemetli olarak üretilmiştir.

Beşinci makalemiz ise **Alim Filik ve Rüstem Barış Yeşilay**'ın "COVID-19 ile İvmelenen Dijitalleşmenin PLM'e Etkileri" isimli makalesidir. Bu çalışmada, Çalışma kapsamında COVID-19 salgını ile birlikte hız kazanan dijitalleşme trendinin, Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (PLM) ile olan potansiyel etkileşimi araştırılmıştır. Konuya dair literatür taraması yapılmış, bu kapsamdaki araştırmalar incelenmiş ve neticesinde COVID-19 ile birlikte başlayan süreç içerisinde dijitalleşmenin kuruluşlar için artık kaçınılmaz olduğu ve dijitalleşmenin PLM ile anlamlı olacağına dair bulgular elde edilmiştir. PLM'in ürün yaşam döngüsü fazları açıklanarak, her fazda dijitalleşmenin etkileri açıklanmıştır. Dijitalleşme, dijital ikiz kavramı ve uygulamalarına değinilmiş ve ürün yaşam döngüsünde etkilediği aşamalar açıklanmıştır. Daha sonra, PLM ve dijitalleşme ilişkisinden bahsedilerek, dijitalleşmenin ürün başlangıcı (BOL), ürün ortası (MOL) ve ürün sonu (EOL) aşamalarında olan etkileri açıklanmıştır. Neticede, anlamlı bir dijitalleşmenin PLM ile mümkün olacağı ve dijitalleşme ile PLM'in birbirini tamamlayan kavramlar olduğundan hareketle, COVID – 19 ile başlayan sürecin PLM konseptinin yaygınlaşmasına ve farkındalığının artmasına katkı sağlayacağını ifade etmek mümkündür.

Dergimize [www.mmo.org.tr/muhendismakina](http://www.mmo.org.tr/muhendismakina) ve <https://dergipark.org.tr> 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 “Comparison of Maintenance and Investment Expenses in the Transportation Sector for Selected Countries” by **Tamer Saraçyakupoğlu**. “The Organizational Accidents in Aviation: An Investigation of B-737 Max Aircraft Accidents from the Engineering Perspective” In this study Aviation accidents mostly occur due to more than one reason. In other words, aviation accidents occur as a result of a combination of many effects. Examples of these effects include production processes, maintenance activities, human factors, meteorological conditions, certification controls, and runway condition. On the other hand, consecutive crashes of the same aircraft type are naturally conspicuous. The B-737 Max commercial passenger aircraft crashes that occurred in Indonesia on October 29, 2018, and Ethiopia on March 10, 2019, are examples of these consecutive accidents. In this study, these accidents are discussed from the pilotage and engineering perspective, in terms of certification processes*

*The second article is titled “Operation and Maintenance for Wind Turbines” by **Harun Kemal**. In this study Energy consumption increases due to population growth, industrialization, and increased level of comfort. On the other hand, fossil fuels, where most of the energy consumption is provided today, cause climate change and environmental pollution. For this reason, renewable energy sources come to the fore. Among renewable energy sources, wind energy comes to the forefront considering the initial investment and operating costs. Failure and inoperability of wind turbines are among the topics that investors do not want. Considering the mechanical and electrical components of wind turbines, it was observed that the most malfunction was caused by electrical evenings, but the pauses during mechanical malfunctions took longer periods. With the maintenance works to be performed in wind turbines, both malfunctions can be prevented and the downtimes are limited. In this study, the causes of malfunctions in wind turbines and operation and maintenance issues are discussed.*

*The third article is titled “Creating the Sizing Algorithm of a Photovoltaic Pump System” by **Ahmet Demir, F. Mertkan Arslan, and Hüseyin Günerhan**. In this study, an algorithm has been created to optimally sizing a photovoltaic pump system. The sizing algorithm works based on the energy balance in the system. The algorithm is suitable for the sizing of both battery-powered and battery-free photovoltaic (PV) pump systems. For PV pump systems containing batteries, optimization takes place using the iteration method with the balance of energies charging or discharging the battery. Optimization for battery-free systems is based on the availability of PV panel area to meet the energy used by the pump. The algorithm created in the study was applied for corn plant in 1 hectare area in Manisa - Salihli district in July. It is assumed the drip method is used for watering the plant. In addition, after the necessary assumptions are made for the well, the power of the pump is added to the calculations as 1.5 kW and the flow rate is 9,55 m<sup>3</sup>/h. As a result, it was calculated that a total of 23 panels are required within the system with a battery and on the other hand, 36 PV*

panels are required in the absence of a battery. In addition, the required battery amount was found to be 3. According to these results, if the battery is used in the system, the amount of PV panels required is reduced significantly. In addition, another important result is that half the amount of potential energy that the PV panel can obtain is wasted if there is no battery in the system. However, if the battery is used, this energy to be wasted is collected by the batteries and the system is provided to become more optimized.

The fourth article is titled “Design, Optimization and Fabrication of Body of Hydraulic High-Pressure Filter and Experimental Validation” by **Samet Tekelioğlu, Safa Eldek, Huseyin Gümüş, Ayfer Sarigöl, Şeyma Ayhan Ali Kahraman, and Murat Dilmeç**. In this study, the design and body optimization of the body of the hydraulic pressure line filter and the production of EN-GJS 400-15 material were produced locally. In finite element analysis, the operating pressure of 45 MPa pressure was applied statically and dynamically to the interior of the hydraulic filter. Thick parts of the body were made thinner in order to save material and re-analyzes were carried out. As a result of the thinning thickness, the maximum stress on the part is to around 154 MPa and safety factor is 1.8. The high-pressure filter body, which has been designed and produced by casting from EN-GJS 400-15 material has been subjected to sealing, fatigue, and blasting tests in accordance with the standards. Consequently, the newly designed filter body produced locally by the casting method is produced both lighter and more durable than the existing counterparts.

The fifth article is titled “The Impact of Digitalization Accelerated by COVID-19 on PLM” by **Alim Filik, and Rüstem Barış Yeşilay**. Within the scope of the study, the potential interaction of the digitalization trend, which accelerated with the COVID-19 epidemic, with Product Life Cycle Management (PLM) was investigated. The literature on the subject has been reviewed, the researches within this scope have been examined and as a result within the process that started with COVID-19, it was found that digitization is now inevitable for organizations and that digitalization will be meaningful with PLM. By explaining the product life cycle phases of PLM, the effects of digitalization in each phase have been explained. Digitalization, the concept of digital twin and its applications are mentioned and the stages it affects in the product life cycle are explained. Then, by mentioning the relationship between PLM and digitalization, the effects of digitalization on the beginning of product (BOL), mid-product (MOL) and end-of-product (EOL) stages are explained. As a result, it is possible to state that a meaningful digitalization will be possible with PLM and that the process starting with COVID - 19 will contribute to the spread of the PLM concept and to increase awareness, since digitalization and PLM are concepts that complement each other.

You can also view the journal on the web page [www.mmo.org.tr/muhendismakina](http://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**





# Havacılıkta Organizasyonel Kazalar: B-737 Max Uçak Kazalarının Mühendislik Perspektifinden İncelenmesi

Tamer Saraçyakupoğlu<sup>1</sup>

## ÖZ

Havacılık kazalarının oluşumu çoğunlukla birden fazla nedenden kaynaklanmaktadır. Diğer bir ifade ile havacılık kazaları birçok etkinin birleşiminin bir sonucu olarak meydana gelmektedir. Bu etkilere, üretim süreçleri, bakım faaliyetleri, beşeri unsurlar, meteorolojik şartlar, sertifikasyon kontrolleri ve pist durumu gibi hususlar örnek olarak verilebilir. Diğer taraftan aynı uçak tipindeki ardışık kazalar, doğal olarak dikkat çekicidir. 29 Ekim 2018'de Endonezya'da ve 10 Mart 2019'da Etiyopya'da meydana gelen B-737 Max ticari yolcu uçağı kazaları bu ardışık kazalara örnektir. Bu çalışmada söz konusu kazalar pilotaj ve mühendislik perspektifinden, sertifikasyon süreçleri açısından ele alınmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Uçak kazaları, B-737 Max, uçuşa everişlilik, sertifikasyon.

## The Organizational Accidents in Aviation: An Investigation of B-737 Max Aircraft Accidents from the Engineering Perspective

### ABSTRACT

Aviation accidents mostly occur due to more than one reason. In other words, aviation accidents occur as a result of a combination of many effects. Examples of these effects include production processes, maintenance activities, human factors, meteorological conditions, certification controls, and runway condition. On the other hand, consecutive crashes of the same aircraft type are naturally conspicuous. The B-737 Max commercial passenger aircraft crashes that occurred in Indonesia on October 29, 2018, and Ethiopia on March 10, 2019, are examples of these consecutive accidents. In this study, these accidents are discussed from the pilotage and engineering perspective, in terms of certification processes.

**Keywords:** Aircraft accidents, B-737 Max, airworthiness, certification.

---

Geliş/Received : 23.05.2020  
Kabul/Accepted : 20.08.2020

<sup>1</sup> Dr., İstanbul Gelişim Üniversitesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, İstanbul  
dr.tamer@tamersaracyakupoglu.com.tr  
Orcid: 0000-0001-5338-726X

## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

On October 29, 2018, a B-737 Max plane crashed into the Java Sea, Indonesia. The aircraft is destroyed and 189 people on board perished. Again, on March 10, 2019, another Boeing B-737 Max crashed in Ethiopia. In the second accident, 159 people lost their lives. These two accidents were one of the most significant aircraft accidents of the International Civil Aviation Organization (ICAO) that was established in 1944 based on the Chicago Convention [1]. ICAO releases regulatory documents such as International Standards and Recommended Practices (SARPs) in terms of aviation safety assurance [3]. But, in many platforms, SARPs are criticized for being regulation-based and considered ineffective especially for the implementation of the novel technologies to the newly designed aircraft types [4,5]. Airworthiness is described as “a written and systematic process documented by the certification authority for the qualification that an aircraft is airworthy under defined operating conditions” [6]. Within the process of the airworthiness there are two phases as “initial” and “continuing” while within the scope of the controls there are “rule-based” and “risk-based” certification activities [1,7].

For a new type, for the airworthiness certification delivery some important requirements provided follow;

- The previous type should be certified,
- Certificate of conformity showing that the aircraft is “convenient for flight” must be completed,
- Weight and balance report should be provided,
- During test flights and physical checks, suitability for flight should be demonstrated [6,8].

A risk-based certification method is a proactive method against the unpredictable effects of the implementation of novel technologies. It is based on the principles as given below;

- Making hazard analysis of new and advanced technology systems applied to aircraft,
- Performing qualification audits by an independent airworthiness body like the “Aviation Safety Institute” apart from Country Airworthiness Authority (CAA),
- Following the possible negative effects of new technologies on aviation through “safety monitoring panels”.

For risk-based certification organization Institute of Nuclear Power Operations (INPO) may be an appropriate example from the nuclear industry. INPO is a decision-maker for the validation of newly designed systems in the nuclear field. It provides proactive measures using hypothetical scenarios [9].

### 2. Investigation of the Accidents

Aviation safety has improved in time. For per one million flights; before the 1960’s the average number of accidents was 60 while it was decreased to 2,9 in 2019 as ICAO’s safety report [10,11].

The phases of flight are the taxi stages before take-off, take-off, climb, cruise, descent, final approach, landing, and after landing as depicted in Figure 1.

The percentages of the accidents are 27% at the final approach, 20% at the landing, and %13 at the take-off.

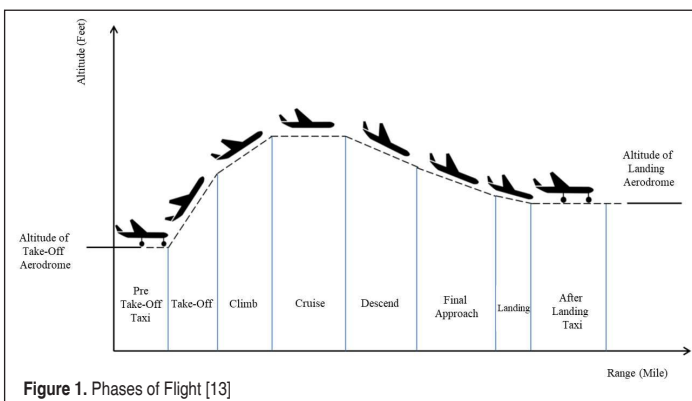


Figure 1. Phases of Flight [13]

In terms of flight time, the final approach corresponds to approximately 3% of the total flight time, the landing process to 1%, and the take-off phase to 1%. Meaningly, 60% of the total aircraft accidents occur in a period of



5% of the flight time [14]. Both Indonesia and Ethiopia B-727 Max accidents were occurred during take-off and climb phases.

It would be appropriate to convey the subject of the Angle of Attack (AoA) since it fits on the main axis of the mentioned accidents. As it is shown in Figure 2, the angle between the relative air and the chord line is called as the AoA.

Based on the Flight Data Recorder (FDR) and Cockpit Voice Recorder (CVR) information gained from crash investigation reports of Indonesia and Ethiopia B-737 Max accidents, it is figured out that the cockpit crew struggled with the auto-pilot that is activated by Maneuvering Characteristics Augmentation System (MCAS) [16,17].

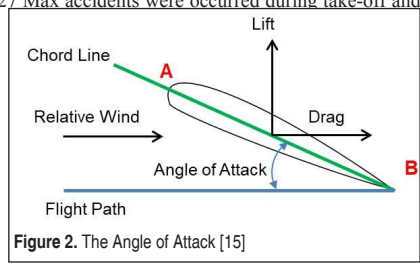


Figure 2. The Angle of Attack [15]

### 3. Evaluation and Findings

81% of the commercial passenger aircraft were manufactured by either Boeing or by its competitor Airbus. This market-share naturally brings fierce competition between them. For not falling behind the other, when one creates a new type, the other responds with the newer [21]. When Airbus A-320 Neo was created with the bigger engines known with fuel efficiency, Boeing had to design a new type for meeting the market requirements. At that time, B-737 NG was the strongest candidate can be equipped with larger engines similar to used on A-320 Neo. But the problem was B-737 NG's distance clear is/was too short for the bigger engines.

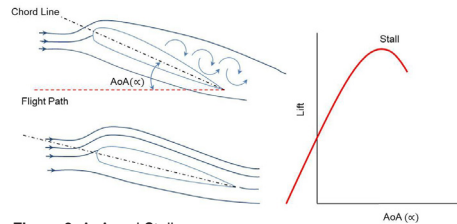


Figure 3. AoA and Stall

Re-positioning the bigger engines to the further forward and higher up on the wings was considered a solution. This solution triggered a high AoA tendency. The stall is a loss of lift of the wing bases on very low speed or to exceeding the critical AoA. There's a correlation between AoA and stall as demonstrated in Figure 3.

Eventually, B-737 Max was manufactured equipped with larger engines than its immediate predecessor B-737 NG [25]. And as mentioned before, "engine re-positioning" has brought the pitch-up tendency and vertical instability phenomena that force the aircraft to stall. MCAS, that is a software-based solution used for stabilizing force as shown in Figure 4.

It's figured out from investigation reports, that the cockpit crew couldn't achieve the regain the control of the aircraft [27]. The Allied Pilots Association (APA) has announced the probable reason. Pilots were unaware of MCAS's adverse effects due to a lack of training [29].

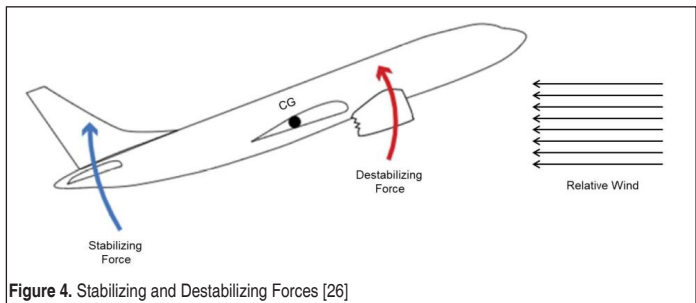


Figure 4. Stabilizing and Destabilizing Forces [26]

### 4. Conclusion

- Designated Engineering Representatives (DER) should be used non-critical system implementations.
- Airworthiness certification/re-certification for new types should be executed by the CAA staff.
- In pursuit of aviation engineering, MCAS should be fed by the verification of at least two sensors as Airbus does. In Airbus Flight Crew Operational Manual (FCOM), it is written that "High AOA protection is more important than any other". The same philosophy should be applied for B-737Max and other types.
- After the implementation of the critical system to the aircraft, the crew should be trained considering the risk impact of the system.
- A risk-based certification process should be used instead of a regulatory-based one.

## 1. GİRİŞ

29 Ekim 2018 tarihinde Endonezya’da bir Boeing B-737 Max uçağı düşmüş ve 189 kişinin hayatını kaybetmesine yol açmıştır. Aradan yaklaşık 4 aylık bir zaman geçtikten sonra, 10 Mart 2019’da yine bir B-737 Max uçağı bu kez Etiyopya’da düşmüş, bu kazada da 157 kişi hayatını kaybetmiştir.

Toplam can kaybının 346 kişi olduğu, B-737 Max kazaları, Aralık 1944’te Chicago Konvansiyonu ile kurulan Uluslararası Sivil Havacılık Organizasyonu’nun (USHO, International Civil Aviation Organization-ICAO) tarihindeki en dikkat çekici kazalar arasında yer almaktadır [1].

ICAO Birleşmiş Milletler’e bağlı, havacılık otoritelerinin en tepesindeki organizasyondur ve Birleşmiş Milletler’in en başarılı alt organizasyonlarından birisi olarak kabul edilmektedir [2]. ICAO, havacılık kurallarına bağlı olarak uçuş ve yer emniyetini arttırmak amacıyla uluslararası standartlar ve uygulamalara yönelik önemli dokümanlar yayımlamaktadır. Bu dokümanlar içerisinde en önemlilerinden bir tanesi “Uluslararası Standart ve Önerilen Pratikler” (International Standards and Recommended Practices-SARP) standartlarıdır. Bahse konu dokümanların ilgili kurum ve kuruluşlara dağıtılmasındaki amaç, gün geçtikçe büyüyen ve çok katmanlı bir disiplin haline gelen havacılığı küresel seviyede olabildiğince emniyetli hale getirmeye çalışmaktır [3]. Ancak birçok platformda SARP gibi uygulamaların, yeni teknolojilerin uçaklara uyarlanmasında yetersiz kaldığına ve söz konusu uygulamaların dijital tabanlı yapılmasına yönelik görüşler bulunmaktadır [4]. Bu görüşlerin temelinde, özellikle yeni sistemlerin hava taşıtlarına uyarlanmasında kural tabanlı sertifikasyon sürecinden, risk tabanlı sertifikasyon sürecine geçiş ve dijital eksenli uygulamaların hayata geçirilmesi yer almaktadır. Keza, yine aynı organizasyonun farklı birimlerinde havacılık otoritelerinin emniyet gözetim sürat ve yeteneklerinin, uçaklara uyarlanan yeni teknolojileri denetlemede yetersiz kalabilecekleri ve bu durumun uçuş ile yer emniyetine yönelik bir risk olarak ifade edilmektedir [5].

Bu safhada, uçuşa elverişlilik kavramı üzerinde durulması uygun olacaktır. Tanım itibariyle uçuşa elverişlilik, bir hava aracının ömür devri boyunca, belirli bir konfigürasyonda kullanım ve limitlendirmelerle, uçuş mürettebatı, yer ekibi, yolcu, diğer hava araçları ve üstünde uçtuğu meskûn mahal için kabul edilenlerin dışında bir risk yaratmadan uçuşunu emniyetle başlatabilme, sürdürebilme ve sonlandırabilme yeteneğidir. Uçuşa elverişlilik sertifikasyonu ise tanımlanmış operasyon şartlarında bir hava aracının uçuşa elverişli olduğunun belirlenmesi için uygulanan ve sertifikasyon otoritesi tarafından belgelenmiş sistematik bir süreçtir [6]. Uçuşa elverişlilik sertifikasyonu, “başlangıç” ve “sürekli uçuşa elverişlilik” olarak iki farklı süreçte ele alınmaktadır.

Genel itibariyle, yapılan kontroller kapsamında sertifikasyon süreci, “kural tabanlı” ve “risk tabanlı” olmak üzere iki farklı cephede ele alınabilmektedir [1,7].



Kural tabanlı sertifikasyon süreci, hava aracının üretildiği ülkenin havacılık otoritesi tarafından belirlenen yönergeler çerçevesinde alışılmış olarak devam eden yöntemleri içermektedir. Bu süreçte, özellikle bir hava aracı tipinden geliştirilen bir başka tipe yönelik fark kontrol listeleri uygulanmaktadır. Örnek olarak,

B-737 Max uçağı, bir önceki tip olan B-737 NG baz alınarak geliştirilmiştir. Bu nedenle kontrol listelerinde, her iki tipin farklılıkları üzerinde durulmaktadır.

Bir hava aracı tipi/modelinden geliştirilen hava aracına “Uçuşa Elverişlilik Sertifikası” verilebilmesi için;

- Önceki tip için bir hava aracı tip sertifikasının mevcut olması,
- Hava aracının uçuş için uygun durumda olduğunu gösteren uygunluk belgesinin tamamlanmış olması,
- Hava aracının ağırlık ve denge raporunun hazır olması,
- Yapılacak test uçuşlarında ve fiziki kontrollerde hava aracının uçuş için uygun durumda olduğunun belirlenmesi gibi şartlar söz konusudur [6,8].

Risk tabanlı sertifikasyon süreci ise hava araçlarında kullanılan yenilikçi teknolojilerin meydana getirebileceği tehlikeleri ön gören ve buna yönelik tedbirler geliştiren önalıcı yaklaşımdır. Risk tabanlı sertifikasyon sürecinde;

- Hava araçlarına uygulanan yeni ve ileri teknoloji sistemlerinin tehlike analizleri yapılması,
- Ülkelerin devlet havacılık otoritelerinin dışında Havacılık Emniyeti Enstitüsü benzeri bağımsız bir yapı tarafından denetlemeler gerçekleştirilmesi,
- Emniyet izleme panelleri ile yeni teknolojilerin havacılığa olabilecek olumsuz etkilerinin takip edilmesi gibi faaliyetler söz konusudur.

Günümüz dünyasında, havacılık sektöründe olmasa da, risk tabanlı sertifikasyon denetlemeleri gerçekleştiren, bağımsız, söz sahibi olan kurumlar mevcuttur. Üretim fazında ve operasyonel aşamada azami hassasiyet gerektiren nükleer enerji teknolojileri kullanan tesislerin yeterliliklerinin ölçülmesinde risk tabanlı değerlendirmeler yapılmaktadır. Merkezi ABD Atlanta’da bulunan Nükleer Güç Operasyonları Enstitüsü (NGOE, Institute of Nuclear Power Operations-INPO) bu tarz yapılanmaya bir örnektir. INPO, nükleer alanda yeni tasarlanan sistemlerin validasyonu konusunda karar vericidir. INPO, varsayımsal senaryolar geliştirerek güvenlik açısından kritik sistemlere yönelik önalıcı tedbirleri sağlamaktadır [9].

## 2. UÇAK KAZALARININ İNCELENMESİ

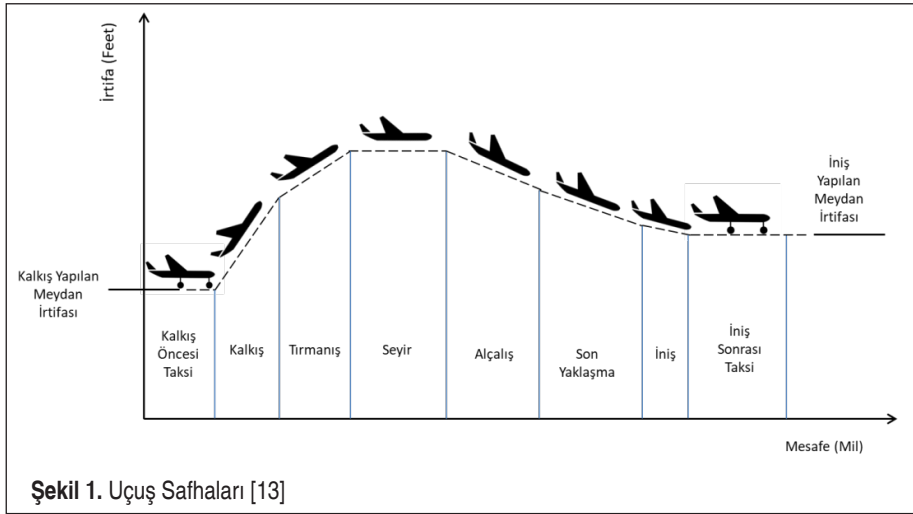
Bilgisayarla yönetilen sistemlerin hayata geçirilmesi ve gelişen teknolojinin havacılığa hızla uyarlanması sonucu gün geçtikçe daha karmaşık bir mimari kullanımı söz konusu olmuştur. Mevcut durumda, bir modern yolcu uçağında birbirinden farklı



sistemleri kontrol altında tutan yüzlerce bilgisayar senkron halde çalışmaktadır. Bu durum uçuş ve yer emniyetine olumlu katkı sağlamaktadır. Havacılık alanında yapılan mühendislik ve emniyet yönetim çalışmalarının sonucunda kaza oranları 1960'lı yıllardan günümüze kadar büyük oranda azaltılmıştır. 1960'lı yıllardan önce bir milyon uçuşta yaklaşık 60 kazanın meydana geldiği gözlemlenmiştir [10]. ICAO'nun 2019 yılı uçak kaza verilerine göre bu sayı bir milyon uçuşta 2,6 seviyesine inmiştir [11]. ICAO Annex 13 dokümanına göre hazırlanan söz konusu veriler, azami kalkış ağırlığı (AKA, Maximum Take-Off Weight-MTOW) 5700 kg'ın üzerindeki tarifeli ticari uçuşlar için geçerlidir [12].

## 2.1 Uçuş Safhaları ve Hücum Açısı

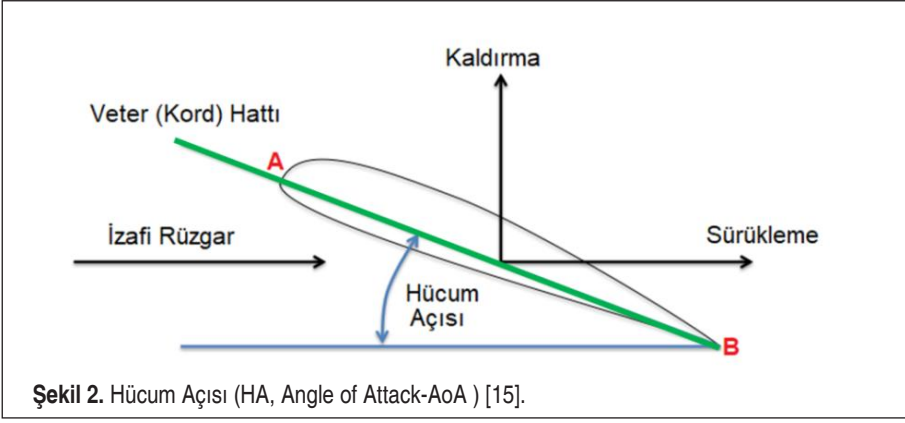
Şekil 1'de görüldüğü üzere bir uçuş süreci ana hatları ile kalkış öncesi taksi, kalkış, tırmanış, seyir, alçalış, son yaklaşma, iniş ve iniş sonrası taksi evrelerinden oluşmaktadır.



Şekil 1. Uçuş Safhaları [13]

Yapılan istatistiksel çalışmalara göre kazaların %27'si son yaklaşımda, %20'lik kısmı ise inişte gerçekleşmektedir. Kalkışta gerçekleşen kaza oranı ise %13'tür. Zaman olarak ele alındığında, son yaklaşma toplam uçuş zamanının yaklaşık %3'üne, iniş süreci %1'ine, kalkış periyodu ise yine %1'ine karşılık gelmektedir. Sonuçta uçak kazalarının %60'lık bölümü kalkış, son yaklaşma ve iniş safhalarında gerçekleşmektedir [14]. Diğer bir ifade ile toplam uçak kazalarının %60'lık bölümü, uçuş zamanının %5'lik bir periyodunda gerçekleşmektedir.

Bu verilere uygun olarak, Endonezya ve Etiyopya'da gerçekleşen kazalar, riskli kabul edilen kalkış ve tırmanış süreçlerinin içerisinde gerçekleşmiştir.



**Şekil 3.** Uçağın Her İki Tarafında Bulunan AoA Sensörü

Söz konusu kazalarda ana eksene oturduğu için, Hücum Açısı (HA, Angle of Attack-AoA ) konusunun aktarılması uygun olacaktır.

Şekil 2’de görüldüğü üzere, bir kanat profili üzerinde A bölgesi “hücum kenarı” ve B bölgesi “fırar kenarı” olarak isimlendirilmektedir. A noktasından B noktasına uzanan doğruya ise veter ya da kord hattı adı verilmektedir. Kanadın karşıladığı izafi hava akışı ile veter hattı arasındaki açı Hücum Açısı olarak isimlendirilmektedir.

Uçağın en iyi tırmanma açısı, en iyi tırmanma sürati gibi uçuş performansını belir-

leyen karakteristiklerin değerlendirilmesi amacıyla son derece önemli olan hücum açısının derecesi, Şekil 3’te uçak üzerinde gösterilen sensörler tarafından algılanmaktadır.

## 2.2 B-737 Max Endonezya Kazasının Oluşum Şekli ve Karakteristikleri

29 Ekim 2018 tarihinde, Endonezya Lion Air Havayollarına ait 610 sefer sayılı PK-LQP çağrı kodlu B-737 Max uçağı, başkent Jakarta’daki Soekarno–Hatta Uluslararası havaalanından, Pangkal Pinang Depati Amir havaalanına tarifeli uçuşunu gerçekleştirirken, yerel saatle sabah 06.32 sularında, kalkıştan yaklaşık 13 dakika sonra Java Denizi’ne düşmüştür. Kaza, Eşgüdümlü Evrensel Zaman (UTC) ile 23.32 sıralarında gerçekleşmiştir. Uçakta aralarında görevli uçuş mühendisinin de bulunduğu 181 yolcu, 2 pilot ve 6 kabin memur olmak üzere toplam 189 kişi hayatını kaybetmiştir. Enkaz arama-kurtarma çalışmaları sırasında bir emniyet dalgıcının da hayatını kaybetmesi nedeniyle, toplam can kaybı 190 olarak açıklanmıştır. Kaza-kırım raporundan, kaptan pilotun 6028 saat ve ikinci pilotun ise 5174 saat uçuş tecrübesine sahip olduğu bilgisi edinilmektedir. PK-LQP çağrı kodlu uçağın ise toplam 893 saat 21 dakikalık uçuş zamanı mevcuttur. Uçağın bakım dokümanlarında görüldüğü üzere yardımcı batarya, sigortalar vb. konularda arızalar gerçekleşmiş ve ilgili bakım personelleri tarafından söz konusu arızalar giderilmiştir. Meteorolojik değerlendirmede, kazanın olduğu gün, Jakarta’daki Soekarno–Hatta Uluslararası Havaalanı, Pangkal Pinang Depati Amir Havaalanı ve seyrüsefer rotası boyunca şartların, uçağın konfigürasyon limitleri dâhilinde olduğu görülmektedir.

Kazanın Uçuş Veri Kaydedicisi (UVK, Flight Data Recorder-FDR) ve Kokpit Ses Kaydedicisi (KSK, Cockpit Voice Recorder-CVR) sistemlerinden oluşan karakteristisi üzerinde yapılan çalışma neticesinde kalkıştan, düşme anına kadar kritik safhalar UTC zamanına göre aşağıda sunulmaktadır:

- 23.19.02: Hava Trafik Kontrol (HTK, Air Traffic Control–ATC) / kuleden kalkış için müsaade istenmiş, uçak pistte koşmaya başlamış ve kalkış süratine ulaşılmasına müteakip (VRotate) 23.20.33’te havalanmıştır.
- 23.21:22: Kule uçağa 27.000 feet’e tırmanması için müsaade verildiğini bildirmiştir.
- 23.21.28: İkinci pilot kuleye mevcut radar irtifasını sormuş ve 900 feet yanıtını almıştır.
- 23.22.00: Flapların nötr duruma getirilmesinden, saniyeler sonra Manevra Karakteristiği Güçlendirme Sistemi (MKGS, Maneuvering Characteristics Augmentation System-MCAS) devreye girmiş ve uçağa burun uçağı kumandası vermiştir.



- 23.24.11: Kaptan hava sürati göstergesinin güvenilir işar vermediğini ikinci pilota bildirmiştir. CVR’da yer alan bu konuşma FDR’da yer alan irtifa dalgalanması ile örtüşmektedir.
- 23.25.11: İkinci pilot kuleye güvenilir bir hava sürati verisi alamadıklarını deklare etmiştir. Bu süre zarfında uçak burnunun dikey vektörde sürekli aşağı yukarı hareket ettiği gözlemlenmektedir.
- 23.28.09: Bir kabin memuru kokpite çağırılmıştır.
- 23.28.18: Kaptan kabin memurundan uçuş mühendisinin kokpite getirilmesini istemiştir.
- 23.29.41: İkinci pilot kuleye uçağı elle kumanda ettiklerini deklare etmiştir.
- 23.30.02: Uçağın kumandasına yönelik sorun yaşandığını bildirmiştir. Kule kalktıkları piste geri inmeleri için 070 (Kuzey-Kuzeydoğu) başına dönmelerini talep etmiştir.
- 23.31.08: Kaptan kuleye gösterge panelindeki işarların farklılığı nedeniyle uçak irtifasının net olarak belirlenemediğini bildirmiştir. Bu esnada uçağın 5000 feet irtifadan derin bir dalış açısıyla burun aşağı verdiği görülmektedir.
- 23.31.33: İkinci pilot bağırarak uçağın düşmekte olduğunu bildirmiştir.
- 23.31.51: Yer Yaklaşım İkaz Sistemi (YYİS, Enhanced Ground Proximity Warning System-EGPWS) yere aşırı yaklaşıldığına dair “Terrain” ikazı vermiştir.
- 23.32.20: PK-LQP çağrı kodlu B-737 Max uçağı radardan kaybolmuştur.

Uçuşun genel seyrinde oto-pilot ve pilotların karşılıklı kumandalarına yönelik hususlar aşağıda sunulmaktadır:

- 23.19.02’den düşme zamanı olan 23.32.12’ye kadar uçağın AoA sensörleri arasındaki 210’lik fark hiç değişmemiştir.
- Uçuş sırasında oto-pilota bağlanıldığına dair işar alınmamıştır.
- 23.22.00’de flapların nötr duruma getirilmesinin hemen ardından kaptan ve ikinci pilot kontrolü almak için müdahalede bulunmuşlar, MCAS ve kokpit mürettebatı arasındaki mücadele düşme anına kadar devam etmiştir.
- Uçuş müddetince düzeltilmiş hava sürati (Computed Airspeed) ve irtifa parametreleri sağ ve sol sensörler açısından farklılık göstermektedir.
- Yaklaşık 13 dakika süren toplam uçuş zamanının çoğunda kaydedilen irtifa 5.000 feet civarında dalgalanmış ve sabit bir irtifa değerine yerleşmemiştir.
- Kalkışa müteakip sol lövyeye (Yoke) titreşimi etkinleşmiş, UTC 23.22 sıralarında,

yani kalkiştan yaklaşık 2 dakika gibi çok kısa bir zaman aralığında durmuştur. Durduktan yaklaşık 15 saniye sonra tekrar harekete geçmiş ve uçak denize dūřene kadar durmamıştır [16].

### 2.3 B-737 Max Etiyopya Kazasının Oluşum Şekli ve Kara Kutu özömlenmeleri

13 Mart 2019 tarihinde, Etiyopya Havayollarına ait 302 sefer sayılı, ET-AWJ ağı kodlu B-737 Max uçağı, Addis Ababa Bole Uluslararası Havaalanı'ndan, Kenya Nariobi Jomo Kenyatta Havaalanı'na tarifeli uçuşunu gerçekleştirirken UTC saatine göre 05.44, yerel saatle 08.44 sularında, kalkiştan yaklaşık 5 dakika sonra dūřmüřtür. Kazada 149 yolcu ve 8 mürettebat olmak üzere toplam 157 kiři hayatını kaybetmiştir. Kaza-kırım raporundan, kaptan pilotun yaklaşık 8122 ve ikinci pilotun ise yaklaşık 361 saatlik uçuşlarının olduğu anlaşılmaktadır. Uçuř mürettebatının kabinde yer alan ekibi olarak, 5 kadın kabin personeli ve 1 uçuř emniyet memurunun (Inflight Security Officer-IFSO) uçakta görev aldığı bilinmektedir. Uçak, kaza anına kadar 1330,8 saat uçuř yapmıştır. Uçağın bakım dokümanlarından, planlı bakımlarının zamanında yapıldığı görölmektedir. Arıza bulguları kapsamında, kaza anına kadar gerçekleşen 39 sortilik uçuř sürecinde sadece bilgisayar çıkışında güç bulunmaması, dūřük basınç nedeniyle mürettebat oksijen silindirinin değiştirilmesi ve Yardımcı Güç Ünitesinin (YGÜ, Auxiliary Power Unit-APU) alışmaması durumlarının söz konusu olduğu, her üç arızanın da giderildiği ve tekerrür etmediği belirlenmiştir. Meteorolojik değerlendirmede, kazanın olduğu gün Etiyopya Addis Ababa ve Kenya Nariobi Jomo Kenyatta Havaalanları ve seyir rotası boyunca meteorolojik Őartların uçak limitleri dāhilinde olduğu görölmektedir. Uçağın karakutusu üzerinde yapılan çalışma neticesinde kalkiştan, dūřme anına kadar kritik safhalar UTC zamanına göre aşağıda sunulmaktadır;

- 05.36.12: 50'lik flap ayarıyla kalkişa hazır halde pist başında kuleden müsaade istemiştir.
- 05.37.36: Kule kalkişa müsaade etmiş ve sonrasında kalkiş gerçekleşmiştir.
- 05.38.40: Sol ve sağ hücum açısı sensörleri arasında farklılık oluşmaya başlamıştır.
- 05.39.00: Sol ve sağ AoA sensörlerinden kokpite aktarılan veriler arasında yaklaşık 59° lik bir farka ulaşmıştır.
- 05.39.30: Kulenin 34.000 feet irtifaya tırmanma talimatının ardından flaplar nötr durumuna alınmıştır.
- 05.39.39: MCAS ilk defa devreye girmiş ve uçağa burun aşağı komutunu vermiş. Pilotlar yaklaşık 40 kg'lık bir karşi kuvvet uygulayarak burnu kaldırmayı başarmış ve olumsuz durumu bertaraf etmiştir.



- 05.40.22: Uçak tekrar MCAS kontrolünde burun aşağı pozisyonu almıştır. Bu sırada EPGWS derin dalışın önlenmesi için burun yukarı (Pull up) uyarısı vermiştir.
- 05.40.38: Pilotlar ise burnu yukarı almak amacıyla elektrik trim sistemini devreye sokmuşlardır.
- 05.40.43: Elektrik trim sisteminin devre dışına alınmasından 5 saniye sonra MCAS tekrar devreye girerek uçağın burun aşağı pozisyona sokmuştur.
- 05.40.50: Kaptan ikinci pilota kuleyle irtibata geçerek uçakta bir uçuş kumanda sorunu yaşadıklarını ve 14.000 feete tırmanıp, irtifayı muhafaza edeceklerini bildirmesini talep etmiştir.
- 05.43.21: MCAS bir daha devreye girerek uçağın burnunun dikey vektörde negatif pozisyonda hareket ettirmiştir. Pilotlar yaklaşık 45 kg'lık bir kuvvetle lövyeyi çekerek burnu kaldırmaya çalışmışlar ancak burun açısının +0,50'den, -7,80'ye gelmesine engel olamamışlardır. Uçağın bu durumda yaklaşık 5000 feet/dakikalık alçalma oranı (Varyo) ile yere yaklaştığı görülmektedir. Pilotlar 180 libreye yakın bir karşı tazyik ile burnu yuları kaldırmaya çalışsalar da başarılı olamamışlardır.
- 05.43.44: Uçak -400 burun açısı, 500 knot (Yaklaşık 926 km/saat) sürat ve 33.000 feet/dakikalık alçalma oranı ile yere çarpmıştır

Uçuşun genel seyrinde oto-pilot ve pilotların karşılıklı kumandalarına yönelik hususlar aşağıda sunulmaktadır:

- 05.39.00: Sol ve sağ AoA sensörlerinden kokpite aktarılan veriler arasında oluşan yaklaşık 59°'lik fark 05:43:30'a kadar devam etmiştir. Aynı zaman aralığında sol yoke'ta titreşim aktif olarak kalmıştır.
- 05.40.50: Kaptanın 14.000 feet irtifaya tırmanma isteğine kule olumlu cevap vermiş ancak bu isteklerini yerine getirmeleri mümkün olamamış ve uçağın arzu edilen uçuş rotasına yerleşmesi sağlanamamıştır. Bunun üzerine kaptan kuleden kalktıkları piste tekrar dönmek için müsaade istemiştir.
- 05.43.21: Uçağın bu durumda yaklaşık 5000 feet/dakikalık alçalma oranı (Varyo) ile yere yaklaştığı görülmektedir. Pilotlar 180 libreye yakın bir karşı tazyik ile burnu yuları kaldırmaya çalışsalar da başarılı olamamışlardır [17].

### 3. DEĞERLENDİRME VE BULGULAR

Yolcu uçakları ömür devri boyunca yaklaşık 120.000-130.000 saat arasında uçuş yapmaktadır [18]. Yaklaşık 8983 uçuş saatine sahip PQ-LQP çağrı kodlu Endonezya uçağının ve yaklaşık 1330 uçuş saatine sahip ET-AWJ çağrı kodlu Etiyopya uçaklarının yeni uçaklar olduğunu söylemek mümkündür. Uçakların yeni olması, bakımlarının zamanında gerçekleştirilmesi, pilotların tecrübeli ve meteorolojik şartların uygun ol-

ması, kazaların meydana gelmesinde üretim aşamasına yönelik soruların oluşmasına sebebiyet vermiştir.

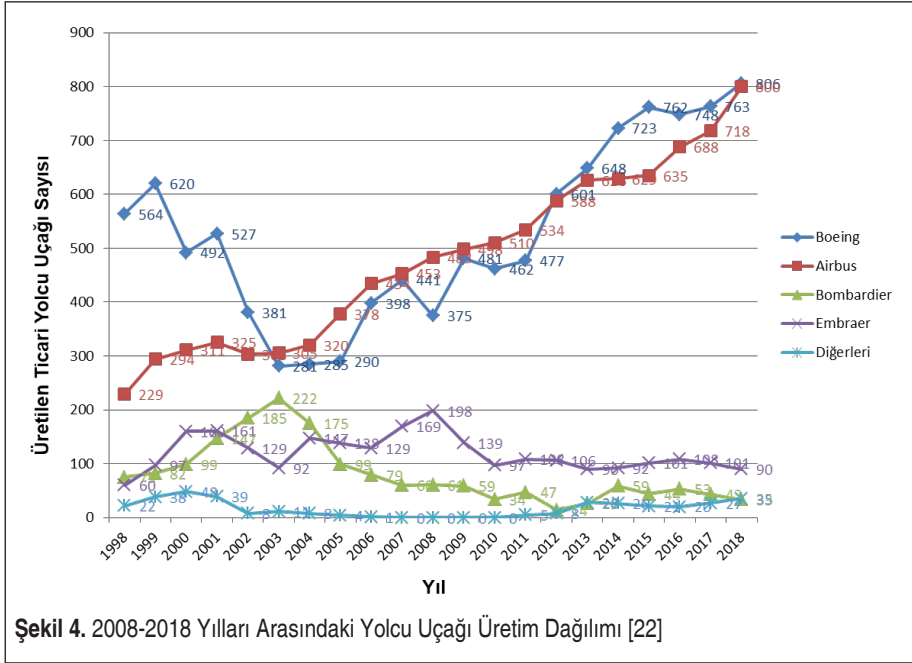
### 3.1 B-737 Max Üretim Süreci

1960'lı yıllar tüm dünyada yolcu talebinin arttığı yıllar olarak bilinmektedir. Luft-hansa gibi havayolu işletmecileri Boeing' ten daha çok yolcuyu daha uzak menzile taşıyacak uçaklar talep etmişlerdir. O dönem Boeing'in 106 yolcu kapasiteli kuyruk bölümünde 3 adet düşük güç üreten motor bulunan 727 tipi uçakları mevcuttur. Boeing 737 uçağının üretim süreci, kuyruksa bulunan motorların daha fazla güç üretecek şekilde büyütülerek kanat altlarına taşınması ile başlamıştır. Böylece yolcu kapasitesi 124'e çıkarılmıştır. Havayolu taşımacılığında bir yolcunun bile önemli olduğu düşünlüdüğünde bu büyük bir atılım olarak görülebilir.

B-737-100 uçaklarının gövde ve motorlarında yapılan değişikliklerden sonra, 21 Aralık 1967 tarihinde ABD Federal Havacılık Dairesi (Federal Aviation Administration-FAA) tarafından sertifikaya edilen ilk B-737-200 uçağı, yolculu uçuşunu 28 Nisan 1968 tarihinde Chicago'dan Michigan Grand Rapids'e gerçekleştirilmiştir. Günümüze kadar üretilen Boeing 737 ailesi uçakları B-737-100'ün üzerine inşa edilmiştir [19]. 1960'lı yıllardan günümüze kadar B-737 uçağının, değişik versiyonlarından 10.000 adet üretilmiştir. Boeing tarafından yapılan açıklamada Washington, Renton tesislerinde 737 serisi uçakların üretiminin 2019 yılı için aylık 52'den 57'ye çıkarıldığı bildirilmiştir. Endonezya ve Etiyopya kazalarından sonra, B-737 Max serisi uçakların üretimi durdurulmuş; ancak -600, -700, -800 ve -900 versiyonlarının üretimi durdurulmamıştır [20].

Diğer taraftan Airbus firması da Avrupa Kıtası'nda öncü bir hava aracı üretim firması olarak karşımıza çıkmaktadır. Airbus ve Boeing ticari havayolu uçağı üretiminde ana rolü üstlenen iki imalatçıdır. Her iki üretici gökyüzündeki uçakların yaklaşık %81'ini üretmişlerdir [21]. Şekil 4'te 2008-2018 yıllar arasındaki yolcu uçağı üretim dağılımından görüleceğı üzere geriye kalan %19'luk kısım, Brezilya menşei-li Embraer, Kanada menşei-li Bombardier, Fransa menşei-li ATR gibi üreticiler ve aralarında Rus-Çin ortak yapımı Comac şirketinin de bulunduğu diğerleri arasında paylaşılmaktadır.

Doğal olarak Boeing ve Airbus zorlu bir rekabet içerisinde üretim yapmaktadırlar. Bir firmanın ürettiğı bir modele rakibi, pazardaki gücünü kaybetmemek adına başka bir model ile yanıt vermektedir. Örneğın büyük gövdeli Airbus A380 uçağı, B-747 uçağına bir rakip olarak üretilmiştir. B-737 Max uçağı için de benzer bir durum söz konusudur. B-737 Max, Airbus'ın A319/A320 ve A321 ailesinde daha efektif ve daha büyük çaplı bir motor kullanmaya başlamasının ardından, Boeing'in 737 NG uçağından değiştirilerek daha büyük bir motorla üretilmesi sonucunu ortaya çıkartmıştır. Bu çerçevede B-737 Max uçağının, Neo motorları ile faaliyet gösteren Airbus A320 ailesi



Şekil 4. 2008-2018 Yılları Arasındaki Yolcu Uçağı Üretim Dağılımı [22]

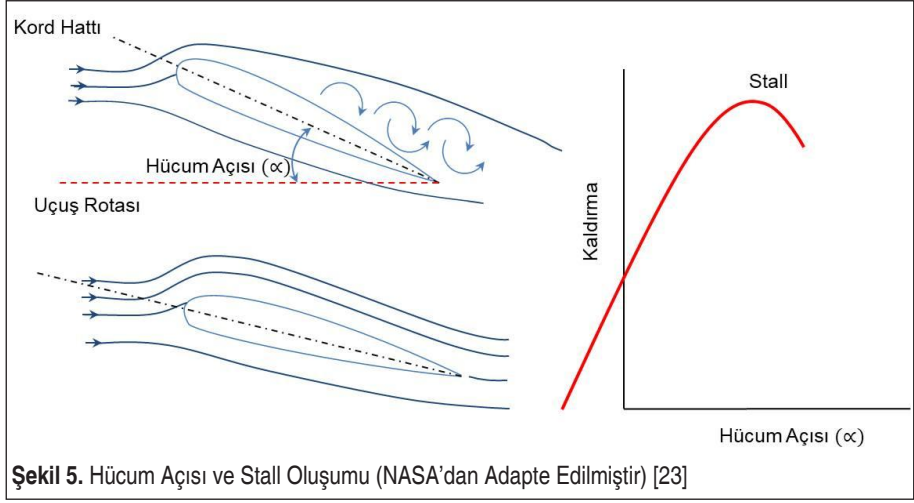
uçaklarına bir cevap olarak üretildiğini söylemek mümkündür. Ancak, daha önce ifade edildiği gibi, bu hızlı dönüşüm beraberinde yeterince olgunlaşmamış teknolojilerin hava araçlarına uyarlanmasındaki riski de beraberinde getirmiştir [5].

### 3.3 Aerodinamik Kararsızlık ve Havada Tutunamama (Perdövites/Stall)

Her uçağın tasarımına göre bir havada tutunma sürati vardır. Bu sürat, uçak kanatlarının geometrisi ve üzerinde yer alan flap, slat gibi donanımlara bağlı olarak uçabileceği minimum sürattir. Tutunma süratinden daha düşük bir değerde, seyir halindeki uçağın kanadında oluşan kaldırma kuvvetinin, uçağın ağırlığını karşılaması mümkün olmamaktadır. Bu duruma stall ya da perdövites adı verilmektedir. Stall ya çok düşük bir hız ya da kanadın hava akışına göre kritik hücum açısını aşması nedeniyle kanadın kaldırma etkisinin kaybolma durumu olarak özetlenebilmektedir. Şekil 5'te gösterildiği üzere yüksek hücum açısında, kanadın üst kısmında hava girdapları oluşmaktadır. Oysa kararlı bir uçuş için alttaki şekilde olduğu gibi kanadın alt ve üst kısmında profil geometrisini takip eden hava akımının meydana gelmesi arzu edilmektedir.

Stall, diğer adı ile perdövites uçağın düşmesine sebebiyet vermektedir. Tutunamama durumundan kurtularak kararlı uçuşa tekrar dönmek için Tablo 1'de yer alan işlem basamaklarının uygulanması gerekmektedir.





**Tablo 1.** Perdövitesten Kurtulma Usulleri [24]

Perdövitesten Kurtulma Usulleri	
Durum	Komut
1. Kanat düzenleyici ya da otopilot	1. Devreden çıkarınız.
2.a. Burun aşağı verme b. Burun açısını ayarlama	2.a. Tutunamama emareleri ortadan kalkıncaya kadar devam ediniz. b. İhtiyaç duyulduğu kadar yapınız.
3. Yatış açısı	3. Düz (Ufki) uçuşa geçiniz.
4. Güç / Takat	4. İhtiyaç duyulduğu kadar gaz açınız.
5. Hız frenleri / bozucular	5. Kapalı duruma alınız.
6. Uçuş rotası	6. İhtiyaç duyulan rotaya dönünüz.

### 3.4. B-737 Max Uçağında Dikey Vektörde Aerodinamik Kararsızlık Oluşumunun Sebepleri ve Boeing'in Buna Getirdiği Çözüm

Aynı segmentteki uçaklar mukayese edildiğinde Boeing'in ürettiği uçakların Airbus'a oranla yere daha yakın olduğu (Ground Clearance) bilinmektedir. B-737 Max modeline, B-737 NG modelindeki motorlardan daha büyük çaplı motorlar yerleştirilmesi zaten yere yakın olan motor dış çerçevesinin yere daha çok yaklaşması sonucunu beraberinde getirmiştir. Boeing mühendisleri sorunu çözmek için, B-737 Max üzerindeki motoru kanat üzerinde daha yukarı ve daha öne monte etmişlerdir [25].

B-737 Max programının başından itibaren Boeing'in üst düzey yöneticilerinin, yarım



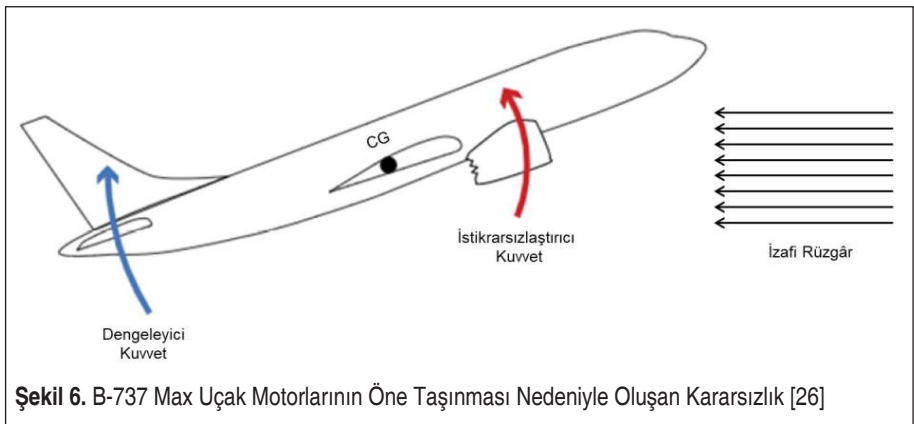
asırlık eski 737 uçak gövdesini daha büyük motorlarla güçlendirmenin uçağın aerodinamik ve operasyonel performansını temelden değiştireceğini bildikleri ön görülmektedir. Şekil 6’da gösterildiği üzere, Boeing’in Seattle tesislerinde 2012 yılında yapılan testler yeni motorların uçuşta anormal halde yükselme eğilimi ve sonuçta yüksek hücum açısı nedeniyle tutunamamaya sebebiyet veren aerodinamik dengesizlik yarattığını ortaya çıkarmıştır.

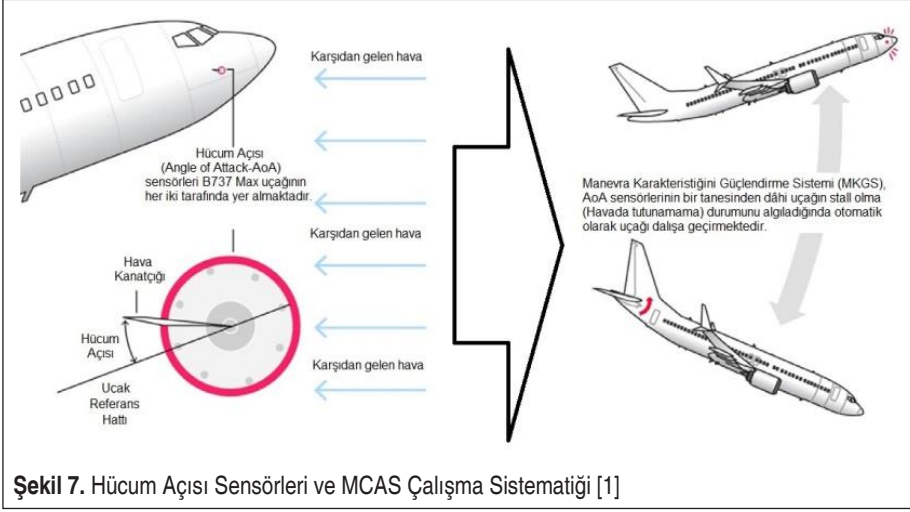
Yapılan testlerde, yüksek hücum açılarında, uçağın burnu gökyüzüne doğrultulduğunda, motorların adeta bir kanat gibi, ek bir kaldırma sağlayarak uçağı daha da yüksek bir hücum açısına zorladığı gözlemlenmiştir.

Boeing, tutunamama sorununu Şekil 6’da yer alan dengeleyici kuvveti otomatik devreye sokan bir yazılımla (Manevra Karakteristiği Güçlendirme Sistemi (MKGS, Maneuvering Characteristics Augmentation System-MCAS) çözüm yoluna gitmiştir. Şekil 7’de gösterildiği üzere amaç, ani tutunamama durumuna karşı yatay dengeleyiciyi otomatik olarak harekete geçirerek irtifanın süratle çevrilmesini sağlamaktır. Böylece hız kazanımı ve havada tutunmanın sağlanması amaçlanmaktadır. Bu durum, pilotajda “irtifanın süratle çevrilmesi” olarak isimlendirilmekte ve havada tutunamama durumunda bir acil durum manevrası olarak kullanılmaktadır.

Sistem mimarisi açısından bakıldığında buradaki sorun B-737 Max’in üzerindeki iki AoA sensörünün bir tanesinden dâhi burnun aşırı kalktığına dair veri alınması durumunda MCAS’in bu sinyali doğru kabul ederek uçağın kumandasını devralması ve dalışa geçirmesidir. Pilotların MCAS’i devreden çıkarmaya yönelik müdahalelerine rağmen, yazılımdan dolayı uçak bütünüyle pilotlar tarafından kumanda edilebilir hale geçmemekte ve kısmi olarak dahi olsa otopilot kontrolünde kalmaktadır. Bir anlamda uçak, pilotların müdahalesine rağmen otopilottan çıkmamaktadır [27].

Uçakların aviyonik tasarımı, pilotların mimari hakkında bilgi sahibi olmalarını zorunlu kılmamaktadır. Uçak tasarımında kullanılan mühendislik bilgileri bir arayüz





**Şekil 7.** Hücüm Açısı Sensörleri ve MCAS Çalışma Sistematiği [1]

aracılığıyla sistemlerin kullanıcısı olan ilgili personele aktarılmaktadır. Bu nedenle, uçakta arka planda çalışan sistemlerden pilotların haberdar olmalarına gerek yoktur. Personelin, uçuş emniyetini ön planda tutacak şekilde, arayüzleri uygun şekilde kullanmaları yeterli kabul edilmektedir. Ancak MCAS için durumun çok farklı olduğu düşünülmektedir. MCAS, pilotların uçuşa konsantrasyonlarında fayda sağlayacak ve uçuş emniyetini artıracak bir sistem olarak tasarlanmışken, sadece bir AoA sensörü verisinden yola çıkılarak MCAS' in devreye girmesi sebebiyle uçuş emniyetini tehlikeye düşüren bir sistem haline dönüşmüştür. Her iki kazada da MCAS' in aralıklı olarak otopilot kontrolü ile “yere çarpana kadar” uçakları dalış pozisyonunda tuttuğu gözlemlenmektedir [16,17].

Yapılan risk değerlendirmesinde, AoA sensörlerinin hatalı veri üretmesi nadir gerçekleşen bir olay ve bu nedenle MCAS' in gelen hatalı veriyi esas olarak devreye girme olasılığının düşük olduğu düşünülebilir ancak

MCAS' e bağlı kazanın şiddetinin yüksek olması sebebiyle risk indeksi çok yüksek bir durum olarak gözlemlenmektedir [28].

### 3.5 MCAS ile İlgili Pilotlara Verilen Eğitim

Test uçuşlarında söz konusu sorunun baş göstermesi sonucunda Boeing yukarıda belirtildiği şekilde otomatik olarak devreye giren MCAS' i bir yazılım desteği ile beraber uçaklara uyarlamıştır. Uçaklara uyarlanan yeni sistemlerin pilot ve bakım personeli gibi ilgili personele eğitimlerinin verilmesi zorunluluktur. American Airlines şirketinde görev yapan pilotların kurduğu Birleşik Pilotlar Derneği (Allied Pilots Association-APA) tarafından MCAS için sadece 1 saatlik tablet üzerinden eğitim verildiği açıklaması yapılmıştır [29].



B-737 Max uçaklarını filolarında kullanmak üzere satın alan firmalar kendi uçuş personeline MCAS' in kullanımının yaklaşık bir saatlik süre içerisinde tablet destekli kısa bir eğitimle veriliyor olmasını bir tanıtım ve reklam vasıtası olarak kullanmıştır. FAA ise Boeing' ten MCAS' e yönelik özel bir detaylı çalışma istememiştir. Çünkü havacılık kuralları gereği sıfırdan bir uçak üretimi sürecindeki sertifikasyon süreçlerinin, aynı uçağın alt modellerinin üretilmesinde baştan sona kadar tekrar edilmesine gerek duyulmamaktadır. Burada re-sertifikasyon süreci işletilmekte olup, uçak üreticileri sadece yeni modeldeki farklılıkları ilgili havacılık otoritesine bildirmektedir. FAA sıfırdan uçak üretimi için tip sertifikasyonu ve üretilmiş uçağın modellerinin üretimi için re-sertifikasyon süreçlerinde bazı durumlarda uçak üreticisi firmalar bünyesindeki Atanmış Mühendislik Temsilcileri (AMT, Designated Engineering Representative-DER) aracılığıyla uçağın uçuş emniyetine uygun olarak üretilip üretilmediklerini kontrol etmektedir. DER üyeleri uçak üretici firmanın personeli olup,

FAA mühendisleri tarafından yapılması gereken tüm kontrolleri yapmakla mükelleftirler [30]. B-737 Max uçakları re-sertifikasyon sürecinde FAA, MCAS' in detaylı bilgilerinin istenmemesini 737 Max uçağının, 737 NG'den dönüştürülen bir uçak olmasına bağlanmaktadır.

## 4. SONUÇ

Arka arkaya yaşanan B-737 Max uçak kazaları, toplamda 346 insanın hayatını kaybettiği dünya havacılığında önemli etkilere sahip olan kazalar olarak yer edinecektir. Kaza sonrası araştırmaların, FAA ile Boeing'in arasındaki organizasyonel bağlantılara odaklanması, söz konusu kazaların uzun vadede birçok tartışmalara yol açacağı izlenimini uyandırmaktadır.

### 4.1 İdari ve Eğitimsel Konular

Boeing personeli olan ancak FAA adına çalışma yapan DER personeli, yeni model uçak üzerindeki önemli değişiklikleri test edip onaylama yetkisine sahiptir [31]. Bu durumun personelin doğru kararlar veremiyor olmasına yol açabileceğine dair tartışmalar devam etmektedir [32]. Çin havacılık otoritesi Civil Aviation Administration of China (CAAC), Çin uçak üretim şirketi Comac'ın ARJ21 uçağının uçuşa elverişlilik işlemleri sırasında benzer bir şekilde Aday Atanmış Mühendislik Temsilcileri (AAMT, Candidate Designated Engineering Representatives-CDER) personelinden istifade etmiş ancak bu personelin yetkilerini sadece bazı dokümanların hazırlanması ile kısıtlamıştır. Söz konusu süreçte uçuşa elverişlilik işlemlerinde CAAC, kendi personeli doğrudan görevlendirmiştir [33].

Yeni tip ve yeni model uçakların sisteme alınması durumunda, verilmesi gereken eğitimlerin risk tabanlı analizler ile belirlenmesi gerekmektedir [34]. Risk tabanlı bir

modelden yola çıkılması durumunda pilot ve bakım personeli gibi uçuş emniyetini doğrudan etkileyen personelin eğitim süreleri, ortamı ve eğitim yardımcılarının neler olacağı net olarak belirlenmiş olacaktır.

## 4.2 Havacılık Mühendisliği Çerçevesinde Öneriler

Boeing'in karmaşık bir aerodinamik kararsızlık sorununu basite indirgeyerek bir yazılım hatası olarak gösterme çabası içerisinde olduğu gözlemlenmektedir. Oysa havacılık gibi teknoloji yoğun proje yönetimlerinde sadece yazılımsal çözümler yapılmaması gerektiği, B-737 Max vakası üzerinden ifade edilmektedir [35].

B-737 Max uçakları üzerinde iki adet AoA sensörü bulunmakta ve bu sensörlerden bir tanesinin burnun aşırı yükseldiğine dair veri aktarması durumunda uçak otopilot kontrolünde dalışa geçmektedir. Boeing'in aynı segmentte yer alan Airbus A320 ile mukayesesinde benzer tip uçak olan A320 uçağında 2 adet sol tarafta aynı yatay düzlemde ve 1 tane sağ tarafta olmak üzere 3 adet AoA sensörü bulunmaktadır [36]. Airbus uçağındaki 3 adet sensörden alınan verilerde bir oylama prensibi (Voting principle) uygulanmaktadır. Bu prensip gereğince, hangi iki sensörün verisi birbirine uyuyorsa diğer veri saf dışı bırakılmaktadır. Bir anlamda otopilot AoA sensörlerinden alınan verilere göre, hareket tarzına oy çokluğuyla karar vermektedir. Konunun hassasiyetine binaen, Airbus A320 uçağına ait Uçuş Mürettebatı Operasyonel El Kitabı'nda (Flight Crew Operational Manual-FCOM); "Yüksek hücum açısı koruması diğer korumaların hepsinden daha önemlidir." ifadesi yer almaktadır [37]. Airbus A320'deki AoA sensör mimarisi ve algoritmasının uçuş emniyetini yükselttiği gözlemlenmektedir.

Bu çerçevede sadece B-737 Max uçağı kazaları değil 25 Şubat 2009 tarihinde Hollanda Schipol Havaalanı'nda son yaklaşmada meydana gelen THY'nin 1951 sefer sayılı B-737-800 uçağına yaşadığı kazanın da incelenmesi gerekmektedir. Söz konusu uçakta da iki adet AoA'dan sadece bir tanesinin sağladığı veri ile hareket edilmiştir.

## 4.3 Sertifikasyon

Hava araçları sertifikasyonunun en temel amacı can ve mal güvenliğinin sağlanmasıdır [38]. Bir hava aracının uçuşa elverişlilik sertifikasyonu sürecinde Tip Sertifikası'nın verilmesi en önemli basamaklardan birisi olarak değerlendirilmektedir. Sertifikasyon işlemlerinin hayata geçirilmesi aşamasında, otorite tarafından gerçekleştirilen kural tabanlı sertifikasyon işlemlerinde, aynı tipin bir önceki modeli ile bir sonraki modeli arasındaki farklı sistemlerin neler olduğunun ve kaç saatlik eğitimlerle yeni sistemlerin ilgili personele veriliyor olduğuna dair bilginin havacılık otoritesine bildirilmesi yeterli olmaktadır. Oysa uçuşa elverişlilik süreci sivil uçakların, motor ve pervanelerinin havacılık otoriteleri tarafından sertifikaya edilmelerini içerecek kapsamlı bir süreçtir.



Tip sertifikasına sahip bir uçağın, yeni bir modelinin re-sertifikasyonu aşamasında özellikle uçaklara uyarlanan yeni teknolojilerin kullanımı son derece önemlidir. Elbette her yeni teknolojinin amacı havacılık emniyetini artırmak ve personelin daha rahat çalışmasını sağlamaktır. Ancak diğer taraftan; uçağın aerodinamik kararlılığını doğrudan etkileyen sistemlerin uyarlandığı yeni bir modelin, re-sertifikasyon sürecinde tehlike analizlerinin yapılmış olması önem arz etmektedir. Bu nedenle, özellikle aerodinamik yapıyı etkileyen yeni sistemlerle donatılan hava taşıtlarının uçuşa elverişlilik onaylarının verilmesi sürecinde risk tabanlı sertifikasyon işlemlerinin uygulanması uygun olacaktır.

## KAYNAKÇA

1. **Sgobba, T.** 2019. “B-737 MAX and the Crach of the Regulatory System”. Journal of Safety Engineering. 6, 4, 299-303.
2. **Aksoy, C., Dursun, Ö. O.** 2018. “A General Overview Of The Development Of The Civil Aviation Sector in Turkey”. Electronic Journal Of Social Sciences. 17, 7, 1060-1076.
3. **Doucet, G.** 2019. “Outer space SARPs: A Mechanism for Implementation of Space Safety.” The Journal of Space Safety Engineering. 6, 2, 145-149.
4. **Nancy, L., Wilkinson, C., Fleming, C., Thomas, J., Tracy, I.** 2014. A Comparison of STPA and the ARP 4761 Safety Assesment Process. MIT PSAS Technical Report, Rev.1, MIT, Massachusetts.
5. **ICAO.** 2018. “News and Developments From The International Civil Aviation Organization”. Strengthening Regional Safety Oversight. 3, 2, 11.
6. **Kenaroğlu, Y.** 2010. “Hava Araçlarının Uçuşa Elverişlilik Sertifikasyonu”. Mühendis ve Makina. 52, 614, 16-28.
7. **Saracyakupoglu, T.** 2020. “The Adverse Effects of Implementation of the Novel Systems in the Aviation Industry in Pursuit of Maneuvering Characteristics Augmentation System (MCAS)”. Journal of Critical Reviews. 7, 11, 2530-2538.
8. **FAA.** 2017. Type Certification. U.S. Department of Transportation, Order 8110.4C Chg 6. [https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Order/FAA\\_Order\\_8110\\_4C\\_chg\\_6\\_only.pdf](https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Order/FAA_Order_8110_4C_chg_6_only.pdf) (İnternet Erişimi 14.08.2020).
9. **Han S.M., Lee S.M., Yim H.B., Seong P.H.** 2017. “Development of Nuclear Safety Culture Evaluation Method for an Operation Team Based on the Probabilistic Approach”. Annals of Nuclear Energy. 111, 317-328.
10. **Campbell, R., Bagshaw, M.** 2002. Human Performance and Limitations in Aviation. ISBN 0-632-05965-6, Blackwell Science, Oxford.
11. **ICAO.** 2019. State of Global Aviation Safety. Safety Report. [https://www.icao.int/safety/Documents/ICAO\\_SR\\_2019\\_final\\_web.pdf](https://www.icao.int/safety/Documents/ICAO_SR_2019_final_web.pdf) (İnternet Erişimi 14.08.2020).
12. **ICAO.** 2001. International Standards And Recommended Practices - Annex 13, Aircraft

Accident and Incident Investigation. <https://www.icao.int/safety/airnavigation/AIG/Pages/Documents.aspx> (İnternet Erişimi 14.08.2020).

13. **Sarac¸yakupoglu, T.** 2020. Emniyet İrtifasından Bilgiler: Genel Havacılık, Üretim ve Bakım Süreçleri. ISBN: 978-625-402-030-8, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara.
14. **Çetingüç, M.** 2018. Havacılık ve Uzay Psikolojisi. ISBN: 978-605-320-495-4, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara.
15. **Wendel, W. B.** 2019. “Technological Solutions to Human Error and How They Can Kill You: Understanding the Boeing 737-Max Products Liability Litigation”. *Journal of Air Law and Commerce*. 84,3, 1-43.
16. KNKT. 2019. Aircraft Accident Investigation Report. Final Report. KNKT.18.10.35.04. Komite Nasional Keselamatan Transportasi. Indonesia.
17. ECAA. 2019. Aircraft Accident Investigation Bureau Interim Report. Interim Investigation Report. AI-01/16. Ministry of Transport. Ethiopia.
18. **Bye, G.** 2017. “Cheaper, Lighter, Quieter: The Electrification of Flight Is at Hand”, <https://spectrum.ieee.org/aerospace/aviation/cheaper-lighter-quieter-the-electrification-of-flight-is-at-hand>, son erişim tarihi: 14.08.2020.
19. **Hill, M. L.** 2002. Boeing 737. ISBN: 1 86126 404 6, The Crowood Press, Wiltshire.
20. **Zang, B.** 2019. “Here’s how much Boeing is estimated to make on each 737 Max 8 plane”, <https://www.businessinsider.com/boeing-737-max-profit-moodys-2019-3>, son erişim tarihi: 14.08.2020.
21. IATA. 2019. Airline Maintenance Cost Executive Commentary Report. <https://www.iata.org/contentassets/bf8ca67c8bcd4358b3d004b0d6d0916f/mctg-fy2018-report-public.pdf>, son erişim tarihi: 14.08.2020.
22. **Mazarenu, E.** 2019. Number of jets added to the global aircraft fleet from 1998 to 2018, by manufacturer, <https://www.statista.com/statistics/622779/number-of-jets-delivered-global-aircraft-fleet-by-manufacturer/> son erişim tarihi: 14.08.2020.
23. NASA. 2020. “Inclination of Lift” <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/incline.html>,son erişim tarihi: 14.08.2020.
24. FAA. 2004. Airplane Flying Handbook: FAA-H-8083-3B, Chapter 4: Maintaining Aircraft Control:Upset Prevention and Recovery Training. [https://www.faa.gov/regulations\\_policies/handbooks\\_manuals/aviation/airplane\\_handbook/media/06\\_afh\\_ch4.pdf](https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/airplane_handbook/media/06_afh_ch4.pdf), son erişim tarihi: 14.08.2020.
25. **Palmer, C.** 2019. “The Boeing 737 Max Saga: Automating Failure”. *Engineering*, 6, 1, 2-3.
26. **Josefson, A., Browne J.C., Sinderson K.M., Hollander A.D., Fee J.M.** 2020. “In Re: Boeing Company Aircraft Securities Litigation”, Consolidated Class Action Complaint”. Case No. 1:19-cv-02394, Bernstein Litowitz Berger and Grossman LLP, Chicago.
27. **Scott, A., Foo , W., M. Johnson, E.** 2019. Change to 737 MAX controls may have



imperiled planes, experts say, <https://graphics.reuters.com/ETHIOPIA-AIRLINE-CONTROLS/0100916V1NZ/index.html>, son erişim tarihi: 14.08.2020.

28. **Arandas, I., Bogdane, R., Gorbacovs, O., Sestakovs, V.** 2018. “Development of a model for assessing the level of flight safety in an airline using concept of risk”. *Procedia Computer Science*. 149, 365-374.
29. **Levin, B.** 2019. “Boeing Trained 737 Max Pilots on iPads to Save Cash”. <https://www.vanityfair.com/news/2019/03/boeing-trained-737-max-pilots-on-ipads-to-save-cash/> (İnternet Erişimi 14.08.2020).
30. FAA. 2017. Designated Engineering Representative (DER) Handbook. Report No: 8110. 37 F. Federal Aviation Administration. Washington D.C.
31. **Florio, F.** 2016. *Airworthiness: An Introduction to Aircraft Certification and Operations*, ISBN: 978-0-08-100888-1, Butterworth-Heinemann, Elsevier, Oxford.
32. **Borfitz, M.** 2020. “What FAA Delegation Does—How And Why?” <http://jdasolutions.aero/blog/what-faa-delegation-does-how-and-why/>, son erişim tarihi: 14.08.2020.
33. **Kun, Y., Cunxi, L.** 2011. “Comparison on the Ways of Airworthiness Management of Civil Aircraft Design Organization”. *Procedia Engineering*, 17, 388-395.
34. **Leveson, G. N.** 2018. “Safety Analysis in Early Concept Development and Requirements Generation”. 28th annual INCOSE International Symposium .07-12 July 2018, Washington D.C.
35. **Narayanan, S., Balasubramanian, S., M. Swaminathan, J., Zhang, Y.** 2019. “Managing uncertain tasks in technology-intensive project environments: A multi-method study of task closure and capacity management decisions”, *Journal of Operations Management*. 66,1, 260-280.
36. Airbus. 2020. Aircraft Characteristics Airport and Maintenance Planning. [https://www.airbus.com/content/dam/corporate-topics/publications/backgrounders/techdata/aircraft\\_characteristics/Airbus-Commercial-Aircraft-AC-A320.pdf](https://www.airbus.com/content/dam/corporate-topics/publications/backgrounders/techdata/aircraft_characteristics/Airbus-Commercial-Aircraft-AC-A320.pdf), son erişim tarihi: 14.08.2020.
37. Airbus. 2018. A318/A319/A320/A321 Flight Crew Operating Manual. Toulouse.
38. **Yanlei, G., Yanpei, Z.** 2011. “Airworthiness Management of CFM56 Products in FAA and EASA”. *Procedia Engineering*. 17, 588-594.





# Rüzgar Türbinlerinde İşletme ve Bakım

Harun Kemal Öztürk<sup>1</sup>

## ÖZ

Enerji tüketimi nüfus artışı, sanayileşme ve konfor seviyesinin artmasına bağlı olarak artmaktadır. Diğer yandan, günümüzde enerji tüketiminin çok büyük kısmının sağlandığı fosil yakıtlar, iklim değişikliği ve çevresel kirliliğe neden olmaktadır. Bu nedenle de, yenilenebilir enerji kaynakları ön plana çıkmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde ise rüzgar enerjisi, ilk yatırım ve işletme maliyetleri göz önüne alındığında ön plana çıkmaktadır. Rüzgar türbinlerinde arızalar nedeni ile meydana gelebilecek duraksamalar yatırımcıların istemediği konular içerisinde yer almaktadır. Rüzgar türbinlerinin mekanik ve elektriksel aksamaları göz önüne alındığında, en çok arızanın elektriksel aksamalardan kaynaklandığı ancak mekanik arızalar sırasındaki duraksamaların ise daha uzun süreler aldığı gözlemlenmiştir. Rüzgar türbinlerinde yapılacak bakım çalışmaları ile hem arızaların önüne geçilebilmekte hem de duraksama süreleri kısıtlanmaktadır. Bu çalışmada, rüzgar türbinlerinde meydana gelen arızaların nedenleri ile işletme ve bakım konuları ele alınmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Rüzgar türbini, rüzgar türbini arızaları, işletme ve bakım

## Operation and Maintenance for Wind Turbines

### ABSTRACT

Energy consumption increases due to population growth, industrialization and increased level of comfort. On the other hand, fossil fuels, where most of the energy consumption is provided today, cause climate change and environmental pollution. For this reason, renewable energy sources come to the fore. Among renewable energy sources, wind energy comes to the forefront considering the initial investment and operating costs. Failure and inoperability of wind turbines are among the topics that investors do not want. Considering the mechanical and electrical components of wind turbines, it was observed that the most malfunction was caused by electrical evenings, but the pauses during mechanical malfunctions took longer periods. With the maintenance works to be performed in wind turbines, both malfunctions can be prevented and the downtimes are limited. In this study, the causes of malfunctions in wind turbines and operation and maintenance issues are discussed.

**Keywords:** Wind turbine, maintenance, operation and maintenance

---

Geliş/Received : 02.06.2020

Kabul/Accepted : 11.09.2020

<sup>1</sup> Prof.Dr., Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, Denizli, hkozturk@pau.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4831-1118

## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

The commercial use of wind energy in electrical power generation has developed rapidly in recent years and has reached levels that can compete with commercial plants in terms of investment costs. For any energy generation technology, the cost of production is variable and is affected by the development level of the technology, working conditions, place of installation and the capacity value of the facilities. Operation and Maintenance (O&M) costs of wind turbines vary with the lifetime of the facility, and the risk of equipment failure increases with the age of the turbine. O&M costs of wind turbines have decreased significantly over the last 30 years and account for 20 to 30% of total life cycle costs for onshore wind turbines. Operation and maintenance costs in offshore wind projects are higher due to the heavy operating conditions at sea, access to the site, complex maintenance work and transmission infrastructure costs. While the cost for wind projects on the coast is approximately 30-60 USD/MWh, it is valued at 71-155 USD / MWh for offshore projects. There are three ways to estimate O&M costs. The simplest method is to assume that the total annual expense represents a certain percentage of the installation cost and is generally considered to be between 3% and 5%. More detailed evaluations can be made by examining the annual electricity production cost or hourly electricity production values that generate the revenue. Detailed studies have shown that O&M costs vary between 15-26 €/MWh. In a study conducted by the International Energy Agency using data from 12 different countries, it has shown that O&M costs are 7-26 €/MWh.

### Objectives

Currently, all three maintenance strategies or their combination are also used in wind farms. Fault maintenance is a typical "run-of-the-fault" approach, with preventive maintenance performed before a problem causes a failure, and corrective maintenance scheduled to fix existing plant specific problems. Preventive maintenance is also called usage-based or predictive maintenance. It is done in predetermined situations or for certain periods in relation to the age of the equipment. Researches have shown that the most malfunctions are caused by electrical equipment (about 5.5 failures per ten machine per year) and that the malfunctions in electrical equipment are repaired and reactivated in a very short time (1.5 days on average). On the other hand, it has shown that gearbox malfunctions are less frequent (1.5 failures in ten years), but repair takes longer (6 days on average). The least problematic is the hydraulic systems and their repairs take less than half a day.

Combining the number of failures with the number of days the turbine is down allows an estimate of the average loss of efficiency in a decade. Faults in both gearboxes and electrical systems cause an average loss of work for only one day a year.

Condition-based maintenance has the ability to predict the remaining life of the equipment in order to implement the best maintenance strategy before the failure occurs. It is possible to perform checks or monitor some variables using sensors such as temperature, voltage, current, noise or vibration to determine the condition of the equipment.

### Results

Operation and Maintenance costs are a large part of the annual total cost of a wind turbine. For a new turbine, operating and maintenance costs can reach 20-25% of the total cost per kWh generated over the lifetime of the turbine. If the turbine is new, the share may only be 10-15%, but this turbine may increase to 20-35% towards the end of its life. Therefore, operating and maintenance costs are getting more attention, as manufacturers try to significantly reduce these costs by developing new turbine designs that require fewer regular service visits and less turbine downtime.

Operation and maintenance costs are related to a limited number of cost components including:

- Insurance;
- Regular maintenance;
- Repair;
- Spare parts and
- Administration.

Maintenance performed in wind turbines are listed below;

1. Annual preventive maintenance
- Wind turbine preliminary examination at the beginning of the contract
  - Preventive maintenance according to the manufacturer's specifications
  - Oil change
  - Lubrication
  - Review of torque and screws
  - Measurement of electrical values and temperatures
  - Analysis of oils

Supply and comprehensive management of spare parts and consumables

2. Corrective maintenance:
- Identifying and resolving electrical faults
  - Replacement of small parts
  - Replacement of large parts
  - Renewal
  - Repair of telecommunication systems

### Benefits of Care

- Increasing productivity and profitability (even if more than 15 years)
- Improving security guards
- Cost reduction
- Improving the estimation efficiency of the MW value generated
- Extending the life span

### Discussion and Conclusions

Given the increase in energy consumption and the role of fossil fuels in climate change, it can be expected that wind energy will increase further in the future. Wind turbines are mostly operated in rural areas or in seas. Many difficulties are encountered in the operation and maintenance of wind turbines. Failure to do the necessary maintenance on time or properly causes some problems. While these problems sometimes cause simple malfunctions and stoppage of the turbine, in some cases the turbine becomes completely unusable. Therefore, attention should be paid to maintenance work in wind turbines.

Studies have shown that maintenance in wind turbines has a direct effect on the value of electricity generation. The deterioration or corrosion occurring on the wing surfaces causes a decrease in electricity generation. Vibrations that may arise due to malfunctions in bearings or moving evenings also cause a decrease in energy consumption and, if not resolved in time, causes malfunctions and the turbine to standstill.

## 1. GİRİŞ

Tüm rüzgar türbinleri, aerodinamik kaldırma veya aerodinamik sürüklenme kuvvetlerinden yararlanarak çalışır. Aerodinamik kaldırma kuvvetleri rüzgarın yönüne diktir, sürüklenme kuvvetleri ise aynı yöndedir. Günümüz rüzgar türbinleri esas olarak, aerodinamik kaldırma kuvvetlerini kullanmak için tasarlanmıştır. Dikey kaldırma kuvveti, rotorun kaldırma gücü vasıtasıyla gerekli döndürme torkunu üretir.

Rüzgar enerjisinin ticari olarak elektrik enerjisi üretiminde kullanımı son yıllarda oldukça hızlı bir şekilde gelişmiş ve yatırım maliyetleri açısından kömür santralleri ile rekabet edebilecek düzeylere kadar gelmiştir [1]. Herhangi bir enerji üretim teknolojisi için, üretimin maliyeti değişkendir ve teknolojinin gelişmişlik düzeyinden, çalışma koşullarından, kurulduğu yerden ve tesisin kapasite değerinden etkilenir [2]. Rüzgar santralleri temel olarak aşağıdaki faktörlerden etkilenir [3]:

- İşletme ve Bakım (İ&B) maliyetleri;
- Yıllık enerji üretimi (YEÜ);
- Sermaye maliyetleri;
- Finansman maliyetleri;
- Rüzgar hızı
- Türbin tipi.

Rüzgar türbini üreticilerin türbin teknolojisini geliştirmesine bağlı olarak; yatırım, işletme ve bakım maliyetleri azaltılabilir ve farklı rüzgar koşulları için farklı tasarımlar yapılabilir. Rüzgar enerjisinden üretilecek enerjinin artışı sağlamak için, büyük rüzgar türbinleri ve süpürme alanları, geliştirilmiş kanat aerodinamiği ve daha uzun kuleler geliştirilmekte ve kurulmaktadır [3].

Rüzgar türbinlerinin İ&B maliyetleri, tesisin kullanım ömrüne göre değişir ve ekipmanın arızalanması riski türbinin yaşı ile birlikte artar. Rüzgar türbinlerinin İ&B maliyetleri, son 30 yılda önemli ölçüde azalmıştır ve karada kurulmuş rüzgar türbinleri için toplam yaşam döngüsü maliyetlerinin %20 ila 30'unu oluşturmaktadır [1]. Açık deniz rüzgârı projelerindeki işletme ve bakım maliyetleri, denizdeki ağır çalışma koşulları, sahaya erişim, karmaşık bakım işleri ve iletim altyapısı maliyetleri nedeniyle daha yüksektir. Kıyıdaki rüzgar projeleri için maliyeti yaklaşık 30-60 ABD Doları/MWh iken denizde kurulan projeler için 71-155 ABD Dolar /MWh değerlerini bulmaktadır [4].

Rüzgar türbinleri optimum enerji dönüşümünü sağlayabilmek için, rüzgar hızına veya elektriksel tasarıma bağlı olarak karmaşık yapılarla sahip olmaktadır [5] ve değişken rüzgar hızlarında bile sabit hızlarda dönebilmelidir. Rüzgar türbini sabit hızı, şanzıman oranına, şebekenin frekansına ve elektrik jeneratörü tasarım özelliklerine bağlı olarak ayarlamaktadır [6].

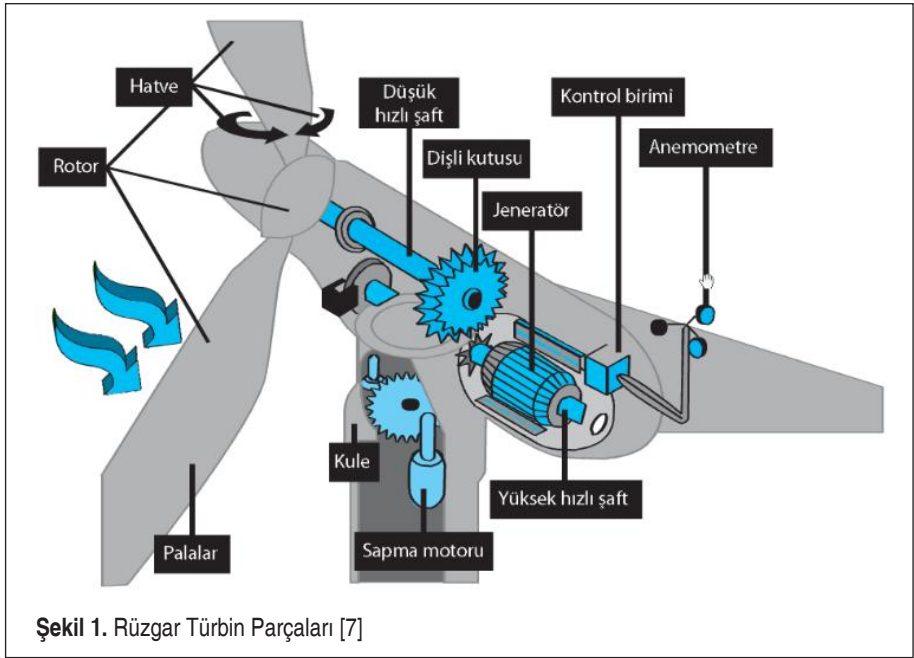


Güç düzenlemesi normal olarak, rüzgar türbininin aşırı yüklenmesini önlemek için rotor kanatları, durma kontrolü veya ikisinin bir kombinasyonu ile yapılır. Rotor üzerine etki eden aerodinamik kuvvetler ve türbinin çıkış gücü, yüksek rüzgar hızlarında azalır.

Rüzgar enerjisi yenilenebilir, uygun maliyetli ve sürdürülebilir bir güç teknolojisi olarak gelişmektedir. Rüzgar türbinlerinin boyutları sürekli olarak artmaktadır ve yeni gelişmeler ile birlikte elektrik şebekelerine daha iyi entegrasyon mümkün olmaktadır. Güç elektroniğinin gelişimi, enerji verimliliği daha iyi olan değişken hızlı rüzgar türbinlerinin gelişmesini sağlamıştır. Bir rüzgar türbini tipik olarak ana bileşenleri olan kanatlar, rotor, ana yatak, aktarma organları ve güç modülü ile birlikte 8000 parça veya daha fazlasını içermektedir. Şekil 1, bir rüzgar türbininin ana bileşenlerini göstermektedir.

Enerji endüstrisindeki diğer güç santralleri gibi, rüzgar santralleri de şirketler için hem elektrik üretimine hem de gelir elde etmelerine olanak sağlamıştır. Bununla birlikte, kömür veya gaz santrallerinin aksine, rüzgar santrallerinde bazı farklı zorluklar ortaya çıkmaktadır.

Endüstriyel ölçekte seri rüzgar türbinlerinin üretimi oldukça yenidir ve farklı rüzgar türbin modelleri bir süredir çok sayıda işletmede çalışmaktadır. Rüzgar türbini sektörünün yeni olması nedeni ile mühendis ve uzman teknisyenler bile türbinlerin hangi



Şekil 1. Rüzgar Türbin Parçaları [7]

bileşenin ne zaman arıza yapabileceği, arıza meydana gelmeden önce veya sonrasında sorunun nasıl önlenilebileceği veya çözüleceği konusunda, ellerindeki veri eksikliği nedeni ile tam olarak bilgi sahibi olamamaktadırlar. Ancak rüzgar türbini işletmecileri, operatörleri ve türbin üreticileri; yürüttükleri projeler ile kırılana veya tamamen devreden çıkıncaya kadar türbinleri çalıştırmak yerine, bakımlarını yaparak çok uzun süreler türbinleri çalıştırmanın mümkün ve önemli olduğunu görmüşlerdir.

Rüzgar türbinlerinin onarımı çeşitli nedenlerle oldukça zordur. Çoğu rüzgar santrali genellikle uzak bölgelerdedir ve işçiler sahada 90 m kadar yükseklikte onarım yapmak zorunda kalmaktadır. Ayrıca, doğal gaz yakıtlı veya kömür yakıtlı santrallerin aksine, operatörler nispeten küçük kapasiteli rüzgar türbinleri nedeniyle bu işlemi birkaç kez tekrarlamaları da gerekebilir.

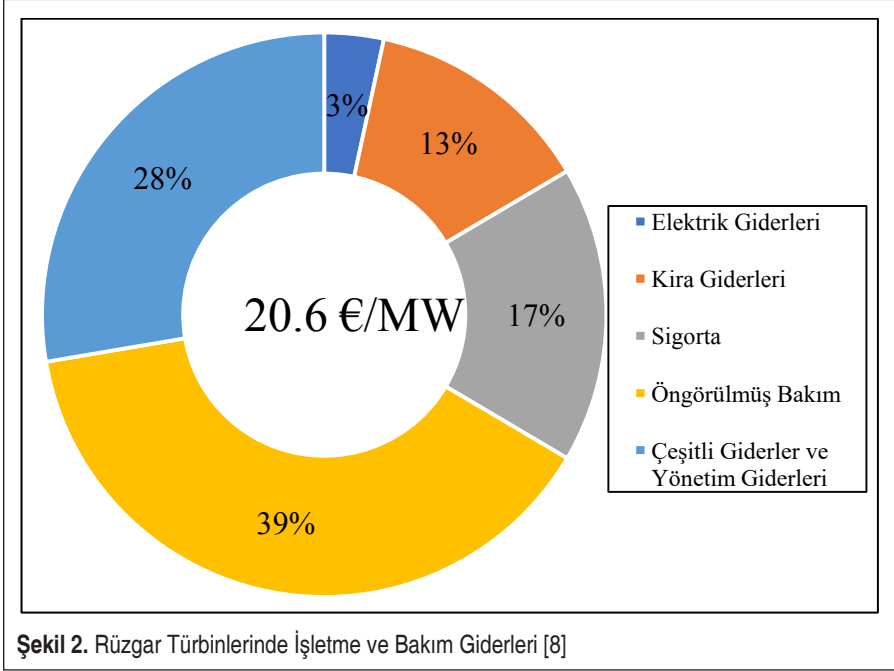
Rüzgar türbinlerinin İ&B maliyetlerinin iki bileşeni hayati önem taşımaktadır ve en aza indirgenmesi gerekir: Programlı bakım ve planlanmamış bakım. Parça arızaları planlanmamış durmalara yol açarsa, o zaman elektrik satışları mümkün olmayacağı için ek maliyetler ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle bu gibi durumları ortadan kaldırmak ve oluşabilecek arızaları öngörebilmek için çok sayıda çalışma yapılmaktadır.

İ&B maliyetlerini tahmin etmenin üç yolu vardır. En basit yöntem, yıllık toplam giderin, kurulum maliyetinin belli bir yüzdesini temsil ettiğini varsaymaktır ve genellikle bu değer %3 ile %5 arasında olduğu kabul edilir. Daha ayrıntılı değerlendirmeler, geliri oluşturan yıllık elektrik üretimi maliyeti veya saatlik elektrik üretim değerleri incelenerek yapılabilir. Yapılan detaylı çalışmalarda, İ&B maliyetinin 15-26 €/MWh arasında değiştiğini göstermiştir. Uluslararası Enerji Ajansı'nın 12 farklı ülkeden gelen verileri kullanarak yaptığı bir çalışmada İ&B maliyetlerinin, 7-26 €/MWh değerinde olduğunu göstermiştir [8]. Şekil 2 de Almanya'da yapılan bir çalışmanın sonuçlarına bağlı olarak, rüzgar türbinlerinde işletme ve bakım giderlerinin dağılımı gösterilmiştir.

Veriler işletme maliyetlerinin türbin büyüklüğünün artmasıyla düştüğünü göstermektedir. Yapılan bir çalışmada, 800-1000 kW aralığında yer alan rüzgar türbinlerinin işletme maliyetlerinin, 420- 490 kW aralığındaki türbinlerin işletme maliyetinden %15 daha düşük olduğunu göstermiştir. Daha büyük rüzgar santrallerinin işletme maliyetlerinin, daha düşük değerler alması beklenebilir, çünkü genel giderler daha fazla sayıda türbine bölünmektedir [8].

Rüzgar santralinde bakım ve işletme maliyetlerini en aza indirmenin, çok fazla sayıda yolları olduğu konusunda karmaşık teoriler vardır. Rüzgar türbinlerinde çok az ve yüzeysel bakım yapmakla çok fazla ve detaylı bakım yapmak arasında bir denge kurulmalıdır. Fazla, detaylı ve gereksiz yapılacak bakım da bir maliyet olarak ortaya çıkmaktadır.

Bakım stratejilerini planlarken önemli bir diğer araç, bileşen arızalarının olasılığı hak-



kında bilgi sahibi olmaktan geçmektedir. Bunun için, ülke çapında ve tek elden rüzgar türbinlerinin izlenmesi, bunların verilerin arşivlenmesi ve arızaların nedenlerinin belirlenmesinin büyük yararlar sağlayacağı düşünülmektedir.

Aynı derecede önemli olan bir diğer konu, türbin arızalanması sırasında geçen sürenin belirlenmesi ve belirli bileşenlerin arızası sonucu oluşabilecek gelirin kaybının belirlenmesidir. Arıza özellikleri makinalerin tasarımına ve kullanım sürelerinin uzunluğuna da bağlıdır.

## 2. RÜZGAR TÜRBİNİ ARIZALARI VE BAKIM

Bakım, üretim işlemlerinde en düşük maliyetle optimum kullanılabilirlik, güvenilirlik ve işletilebilirlik seviyelerinin sağlanmasına yardımcı olan bir aktivitedir. Bakım stratejileri genel olarak arıza bakımı, önleyici bakım ve düzeltici bakım olmak üzere üç ana stratejiye ayrılabilir [9].

Halen üç bakım stratejisinin tamamı veya bunların kombinasyonu, rüzgar santrallerinde de kullanılmaktadır. Arıza bakımı, tipik bir “arızadan kaçma” yaklaşımıdır, bir sorunun bir arızaya yol açmasından önce önleyici bakım yapılır ve mevcut tesise özgü sorunları gidermek için düzeltici bir bakım planlanır. Önleyici bakım, kullanıma dayalı veya öngörücü bakım olarak da adlandırılır. Ekipmanın yaşıyla ilişkili olarak ön-

ceden belirlenmiş durumlarda veya belirli sürelerle yapılır [10]. Bakımın az yapılması durumu gibi fazla yapılması durumu da tercih edilmemektedir [11].

Duruma dayalı bakım, arıza oluşmadan önce en iyi bakım stratejisini uygulamak için ekipmanın kalan ömrünü tahmin etme yeteneğine sahiptir. Ekipmanın durumunu belirlemek için sıcaklık, voltaj, akım, gürültü veya titreşim gibi sensörleri kullanarak kontroller yapmak veya bazı değişkenleri izlemek mümkündür. Durum izleme süreci; çevrimiçi veya çevrimdışı olabilir ve üç temel adımdan oluşur [12]:

- Veri toplama - ekipman sağlığıyla ilgili verileri toplamak;
- Veri işleme - analitik doğrulama, toplanan verilerin anlaşılması ve iyileştirilmesi;
- Karar verme - uzun vadeli tesisin çalışır durumda olmasını en düşük maliyetle sağlamak için hangi bakım stratejisinin ideal olduğuna karar vermek.

Rüzgar türbinlerindeki arızalar, düşük kalite, kötü tasarım ve üretim standartları, inşaat ve montaj eksiklikleri, yerel işletme koşulları, iletim sistemi tasarımı ve genel bakım gibi çeşitli nedenlerden kaynaklanabilir [13]. Şanzıman arızaları en uzun duruş sürelerine neden olan mekanik arızalardandır [14]. Yaklaşık 800 adet rüzgâr türbininde yapılan bir çalışmada türbinlerin büyüklüğüne bakılmaksızın türbinlerin çoğunluğu için arıza tespitinin %90'ın üzerinde olduğu görülmüştür [13]. Hahn ve diğ. [14], şanzıman (dişli kutusu) arızalarının en uzun aksama sürelerine neden olduğu ve teknolojiler iyileştikçe ortalama aksama süresinin azaldığı sonucuna varmışlardır. 15 yıllık bir süre zarfında Almanya'da 1500'den fazla rüzgar türbini ile ilgili olarak yapılan bir anket sırasındaki alt sistemlerdeki arıza oranları ve duruş süreleri, jeneratör arızalarının rüzgar türbinlerindeki toplam arıza sayısının yaklaşık % 4'ünü temsil ettiğini göstermektedir. Rüzgar türbinlerinde meydana gelebilecek arızaların çok ciddi sonuçları olduğu ve türbinleri tamamen kullanılamaz duruma getirdiği arızalar da meydana gelebilmektedir (Şekil 3.)



Şekil 3. Türbin Arızası ve Yangın [15, 16]



Rüzgar türbinlerinin elektriksel aksamlarında ana arıza nedeni, yataklar ve sargılarla ilgilidir. Aşağıdaki bileşenler, indüksiyon jeneratörleri kullanan rüzgar jeneratörlerinde meydana gelen çoğu arızanın nedenleri arasında yer almaktadır [17]:

- Rulmanlar;
- Stator ve rotordaki sargı arızaları;
- Rotor kafesleri ve uçları;
- Kayma halkaları;
- Statordaki manyetik takozlar;
- Soğutma tesisi.

Yapılan araştırmalar en çok arızanın elektrik ekipmanlarından kaynaklandığını (her on makina yılda yaklaşık 5.5 arıza) ve elektrik ekipmanlarında meydana gelen arızaların çok kısa sürelerde (ortalama 1.5 gün) tamir edilerek yeniden faaliyete geçirildiğini göstermiştir. Diğer yandan dişli kutusu arızalarının daha seyrek (on yılda 1.5 kez arıza) olduğunun ancak tamiratının ise daha uzun süreler aldığını (ortalama 6 gün) göstermiştir. En az soruna neden olan ise hidrolik sistemlerdir ve tamiratları yılda yarım günden daha az süre almaktadır.

Arıza sayısının türbinin çalışmadığı gün sayısı ile birleştirilmesi, on yıldaki ortalama verimlilik kaybının tahmin edilmesini sağlamaktadır. Hem dişli kutularındaki hem de elektrik sistemlerindeki arızalar, yılda ortalama sadece bir gün çalışma kaybına neden olmaktadır.

## 2.1 Stator Arızaları

Rotor ve stator sargılarının yalıtım arızasına neden olan ana yaşlanma mekanizmaları ısı etkiler, titreşim gerilmeleri, güç dönüştürücülerindeki voltaj yükselmeleri ve sıcaklık değişimlerinden dolayı malzeme bozulmalarıdır (Şekil 4). Çevresel koşullar yalıtım bozulmasını hızlandırabilir ve nemli çalışma koşullarından kaçınılmalıdır. Kısa devrelerin oluşumu aşırı ısınmadan kaynaklanır ve zamanla artar. Değişken hızlı endüksiyon makinalerinde güç dönüştürücülerinin neden olduğu voltaj yükselmeleri, sargı yalıtım hatalarının da kaynağıdır. Çıkış kablosu ile jeneratör arasındaki empedans farklılıkları, kablo uzunluğu arttıkça ve yarı iletkenlerin anahtarlama frekansı arttıkça daha şiddetli hale gelen yansıyan dalgaları oluşturur [14].

## 2.2 Rulman Arızaları ve Bakım

Yatak arızaları büyük ölçüde rüzgar jeneratörü arızalarına neden olur ve sık karşılaşılan nedenleri yanlış montaj veya yanlış hizalamanın yanı sıra zayıf yağlama, aşırı ısınma ve mekanik kırılmadır [13]. Yüzey sıkıntısı, korozyon, elektrik akımı akışı ve aşırı yüklenme ile birlikte normal yaşlanma sırasında yatak aşınması da rulman arıza-



sına neden olabilir. Bakım uygulamalarının, yatak arıza oranlarını azaltmak için yatak yağlama programlarına uyması oldukça önemlidir. Hasarlı rulmanlar, stator ve rotor arasındaki havanın eşit dağılımını bozar ve rotorun aşırı titreşimlerine neden olabilir. Bu titreşimler giderilmez ise, stator ve rotor arasında temasa neden olabilir, bu da her iki bileşenin de yıkıcı hasarına neden olur.

### 2.3 Türbin Kanatlarında Bakım

Bazı durumlarda kanatlarda meydana gelen arızalar nedeni ile bütün bir kanat veya türbinin tümü kullanılamaz hale gelebilmektedir (Şekil 4). Geleneksel olarak, türbin kanatlarının bakımına, türbinin diğer bileşenlerinin onarımı ve bakımından daha az dikkat edilmiştir. Oysa ki, verimli çalışmayan kanatlar, titreşim yaratabilmekte ve şanzıman arızalarına neden olmaktadır. Rüzgar türbini sektöründe, genel olarak, koruyucu bakım programları, bakım gereksinimlerinin tahmin edilebilirliği nedeniyle türbinlerin iç mekânına odaklanılmıştır. Dahili bileşenler için tipik koruyucu bakım planları 3, 6 ve 12 aylık çalışma programlarına ayrılır. Doğal olarak, kanat onarımlarını planlamak daha zordur. İmalat, nakliye, kule yapımı ve montajında kanatlarda hasarlara neden olabilir. Bununla birlikte, kanatlarda bakım gereksinimi sahada en sık görülen erozyon, hava durumu ve diğer faktörlerden kaynaklanmaktadır. Tahmin edilebilirlik ve geçmişe dair veri eksikliği, kanatların önleyici bakımını zorlaştırmaktadır [19].



Şekil 4. Rüzgar Türbinlerinin Rotor Sargılarında Meydana Gelen Arızalar [18]

Ticari türbinlerin devir hızları 90 m/s'den daha fazla olabilir. Bu hızlarda yağmur damlaları küçük taşların çarpma etkisi gibi etki yaratabilir ve kum üfleyen bir plazma kesicinin erozyon gücüne sahiptir. Bu durum zaman içinde kanat yüzeylerinde pürüzlülüğün artmasına neden olmaktadır. Çalışmalar kanat pürüzlülüğünü ve kanatların üzerinde biriken artıkların rüzgar türbini performansını %5 ila 30 oranında azaltabi-



leceğini göstermiştir [20]. Kanatların yüzey veya kenarlarında oluşabilecek arızalar türbin verimini düşüreceğinden mutlaka bakım yapılarak giderilmelidir (Şekil 5).

Arıza süresini en aza indirmek ve enerji verimliliğini artırmak için, önleyici bir bakım programı uygulamak ve sorunlu alanları belirlemek de dahil olmak üzere, uygulamaları hızlı bir şekilde yapmak kritik öneme sahiptir. Rüzgar türbinleri için yatırımın geri dönüşünün uzun olduğu göz önünde bulundurulduğunda, türbinlerin arıza yapması ve



**Şekil 5.** Rüzgar Türbini Kanatlarında Meydana Gelen Büyük Hasarlar [21, 22, 23]

duraksamaların minimize edilmesi ve bakım ve onarımların hızlı ve düşük maliyetlerle yapılması rüzgar enerjisi sektörü için büyük önem kazanmaktadır.

## 2.4 Türbinlerde Yağlama ve Dişli Kutusunda Bakım

Rüzgar türbinleri pahalı makinelerdir ve yağlama sistemi bu makinanın iyi çalışmasını sağlamak için kritik öneme sahiptir. “Rüzgar türbininin birçok farklı parçasının, dişli kutusu akışkanlarından hidrolik yağlara kadar bir dizi yağlayıcı gres yağıyla yağlanması gerekir. Bir rüzgar türbininin şanzımanının doğru şekilde yağlanması, iyi bir bakım yapılması bir rüzgar türbininin ömrünün uzatılmasında önemli katkılar sağlar. Rüzgar türbini dişli kutularında kullanılmak üzere geliştirilen; rüzgar türbinlerinin aşırı sıcaklıklar kullanılmasına olanak sağlayan, açık deniz rüzgar türbinleri için tuzlu sudan ve olası korozyondan etkilenmeyen ve bütün bu etkilerden türbinleri koruyan ve çok zor koşullarda özelliklerini kaybetmeyen sentetik veya mineral yağlar geliştirilmiştir.

Dişli kutusundaki kullanılan yağlar, değiştirmeden üç ila beş yıl arasında kullanılabilir. Dişli kutusu yağının değiştirmesi çok maliyetlidir. Şanzımanın arızalanması veya şanzımanın değiştirilmesi işletmeciler tarafından istenmeyen bir durumdur. Bu süreçte hem üretim durmakta, hem bakım masrafları yüksek olmakta, hem de özel vinçlerin kiralanarak dişli kutuları değiştirilebildiği için maliyetler çok yükselmektedir. Ancak türbinin yağlaması gerektiren tek parçası dişli kutusu değildir. Jeneratör yatakları ve türbin kanat yataklarının da yağlanması gerektirir ve kanatların üzerinde yağlama noktaları vardır. Rüzgar türbin kanatları, esasen kanadın gövdeye bağlandığı kısmı kuşatan yataklara sahiptir, böylece operatörler türbin kanat açısını rüzgar hızına ve yönüne göre optimize edebilirler.

Şanzıman rüzgar türbinlerinde ek bir stres yaratmakta ve yağın yeterli bir film mukavemeti sağlaması konusunda zorluklar oluşturmaktadır. Yağlama yağlarının oksidasyon direncinin optimize edilebilmesi ve düşük sıcaklıkta akışkanlığının korunabilmesi için katkı maddeleri kullanılması gerekmektedir. Bu konularda özellikle yağ sektöründe araştırma ve geliştirme çalışmaları sürdürülmektedir. Rüzgar türbini sektöründe, daha yüksek kuleler, daha uzun rüzgar türbini kanatları ve daha yüksek güçler (MW) oldukça, yeni zorluklar ortaya çıkmaktadır

Rüzgar türbinleri, aşırı yükleri, basıncı ve gerilimi düzenli olarak idare eden karmaşık bir makinelerdir. Rüzgar türbinlerinin en yüksek kapasitede ve verimde çalışmasını sağlamak için bakım oldukça önemlidir. Türbin yağlaması, rüzgar enerjisi çiftliklerinde ekipmanı koruma işleminin sadece bir parçasıdır. Rüzgar türbinlerinde, planlı bakımın ayrıca filtre değiştirme ve civata torklama gibi hizmetleri de oldukça önemlidir.



Şekil 6. Rüzgar Türbin Kanatlarında Meydana Gelen Arızalar ve Bakımları [24, 25, 26]

### 3. AÇIK DENİZ RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE BAKIM

Rüzgar türbinlerinde, özellikle açık deniz rüzgâr santrallerinde, bileşen arızalarıyla uğraşmanın sonuçları ve maliyetleri çok daha kritiktir, zira tamir gemilerinin bölgeyi ziyaret etmesi ve hataların giderilmesi için zaman ayırması hem zaman almakta hem de bakım maliyetlerini artırmaktadır. Şanzıman gibi kritik bir parçanın arızalanması diğer bileşenlere zarar verebilir ve bu nedenle de olası sorunlara önceden belirlenmesi ve uyarı verilmesinin sağlanması oldukça önemlidir.

Açık denizlerde rüzgar türbinleri çok daha fazla enerji üretir. Ancak, denizlerde pas önemli bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Sermaye yatırımı ödemek için, açık deniz rüzgar santrallerinin en az 25 yıl boyunca çalışabilmeleri gerekmektedir bu ise ancak ayrıntılı bir bakımla mümkündür. Gelecekte, yenilikçi malzemeler ve teknolojiler sayesinde daha iyi ve daha uygun maliyetli bir hale getirilebilir. Yapılan araştırmalar, optimize edilmiş bir tamir işlemi için koruyucu bir filmler geliştirerek açık deniz rüzgar türbinlerinin kullanımında ortaya çıkan problemleri ortadan kaldırmaya çalışmaktadırlar. Açık deniz rüzgar türbinlerinin bakım ve onarımı oldukça zordur

çünkü tüm işler denizde ve her türlü havada yapılmalıdır. Korozyona karşı koruyucu kaplamalar yapılması da oldukça zor bir süreçtir. Rüzgar türbinlerinin su altında kalan kısmının da su üstünde bulunan bölümün de korozyona karşı korunması büyük önem taşımaktadır.

## **4. RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE YAPILAN BAKIM ÇALIŞMALARI**

Genel olarak bakıldığında bakım ile ilgili farklı kategoriler mevcuttur. Bunlar şu şekilde sıralanabilir;

### **4.1 Önleyici Bakım**

Bakım, önceden belirlenmiş aralıklarla veya belirtilen kriterlere göre yapılır ve bir ürünün işleyişinin arıza veya bozulma olasılığını azaltmayı amaçlar. Önleyici bakım, bakımın planlı ve periyodik olduğu anlamına gelir. Arızaların oluşmasını önlemek için bakım eşit aralıklarla yapılır.

### **4.2 Programlı Bakım**

Belirlenmiş bir zaman çizelgesine veya belirlenmiş bir aralıkta yapılan bakım.

### **4.3 Şartlara Dayalı Bakım**

Performans veya parametre izlemeye ve sonraki işlemlere dayalı önleyici bakımdır. Bileşenlerin geçmişi hakkındaki veriler, bakıma ne zaman ihtiyaç duyulduğunu tahmin etmek için istatistiksel yöntemlerle birlikte kullanılır. Ne zaman bakıma ihtiyaç duyulduğunu tahmin etmek, bileşenin nasıl ve neden başarısız olduğu belirlemek için yapılan bakım çalışmalarıdır.

### **4.4 Düzeltici Bakım**

Arıza tespitinden sonra yapılan ve bir öğeyi istenen işlevini yerine getirebileceği bir duruma getirme amaçlı bakımdır. Bileşenler çalıştığı sürece düzeltici bakım yapılmaz. Parçalardan biri arıza yaptığı zaman tamir edilir veya kaldırılır.

### **4.5 Bakım Optimizasyonu**

Bakım optimizasyonu için genel amaç, toplam maliyetleri en aza indirmek veya bakım kaynaklarını en üst düzeye çıkarmaktır.

### **4.6 Veri Analizi**

İzlemenin ilkeleri yeni değildir, ancak giderek ön plana çıkmakta olan karmaşık bilgi işlem analizi ile ölçülen verilerin yorumlanması ve analizi konusunda son yıllarda çok



büyük yol alınmıştır. Dişli kutusundan alınacak titreşim seviyelerinin analizi muhtemel ortaya çıkabilecek arızalar konusunda bilgi verebilir. Titreşim çalışan bir makinanın durumu hakkında bilgi vermektedir. Titreşimde meydana gelecek değişimler, makinanın aksamalarında bir farklılık olduğu anlamına gelebilir. Bu nedenle dakikalık veya saatlik titreşim seviyelerini ölçüp kaydederek, yeni ölçülen titreşim verileri ile karşılaştırmak ve farklılık ortaya çıkarsa kullanıcıya önceden haber vermek olası arızaların önüne geçilmesine yardımcı olacaktır.

Titreşim seviyesi kademeli olarak artış gösteriyorsa, kullanıcıya bir alarm gönderilir. Bu seviye tehlike seviyesinin çok altında bile olsa izlemede yarar olabilir.

#### **4.7 Güvenirlik Merkezli Bakım (GMB)**

GMB, koruyucu bakım ve düzeltici bakım arasında denge kurmak ve doğru zamanda doğru bileşen için doğru koruyucu bakım faaliyetlerini en uygun maliyetli çözüme ulaştırmak için sistematik bir yöntem sunar. GMB yöntemi, bakım planlarını belirlerken güvenilirlik konularına odaklanan yapısal bir yaklaşımdır.

Rüzgar türbinlerinde yapılan bakımlar aşağıda sıralanmıştır;

##### **1. Yıllık önleyici bakım**

- Sözleşme başlangıcında rüzgar türbini ön incelemesi
- Üreticinin özelliklerine göre önleyici bakım
- Yağ değişimi
- Yağlama
- Tork ve vidaların gözden geçirilmesi
- Elektriksel değerlerin ve sıcaklıkların ölçülmesi
- Yağların analizi
- Yedek parçaların ve sarf malzemelerinin temini ve kapsamlı yönetimi

##### **2. Düzeltici Bakım:**

- Elektrik arızalarının belirlenmesi ve çözülmesi
- Küçük parçaların değiştirilmesi
- Büyük parçaların değiştirilmesi
- Yenileme
- Telekomünikasyon sistemlerinin onarımı

##### **Bakımın Sağladığı Yararlar**

- Verimlilik ve karlılığın artırılması (15 yıldan fazla bile olsa)

- Güvenlik görevlilerinin iyileştirilmesi
- Maliyetlerin azaltılması
- Üretilen MW değerindeki gücün tahmin etkinliğinin iyileştirilmesi
- Ömrü uzatma

## 5. RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE İŞLETME VE BAKIM

İşletme ve Bakım maliyetleri, bir rüzgar türbininin yıllık toplam maliyetinin büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Yeni bir türbin için, işletme ve bakım maliyetleri, türbinin kullanım ömrü boyunca üretilen kWh başına toplam maliyetin %20-25'ini bulabilmektedir. Türbin yeniyse, pay yalnızca %10-15 olabilir, ancak bu türbin ömrünün sonuna doğru %20-35 seviyelerine çıkabilmektedir. Bu nedenle de, üreticiler daha az düzenli servis ziyaretleri ve daha az türbin aksama süresi gerektiren yeni türbin tasarımları geliştirerek bu maliyetleri önemli ölçüde azaltmaya çalıştıklarından, işletme ve bakım maliyetleri daha fazla dikkat çekmektedir.

İşletme ve bakım maliyetleri, aşağıdakileri içeren sınırlı sayıda maliyet bileşeniyle ilgilidir:

- Sigorta;
- Düzenli bakım;
- Tamir etmek;
- Yedek parçalar ve
- İdaresi.

Bu maliyet bileşenlerinden bazıları nispeten kolay bir şekilde tahmin edilebilir. Sigorta ve düzenli bakım için, rüzgar türbininin toplam kullanım ömrünün önemli bir kısmını kapsayan standart sözleşmeler yapmak mümkündür. Tersine, onarım ve ilgili yedek parçaların maliyetlerini tahmin etmek çok daha zordur. Her ne kadar tüm maliyet bileşenleri türbin büyüdükçe artma eğiliminde olsa da, tamir ve yedek parça maliyetleri özellikle türbin yaşından etkilenir; düşük başlar ve zamanla artar.

Rüzgar enerjisi endüstrisinin göreceli yeni olmasından dolayı, 20 yıllık ömür beklentisine ulaşmış sadece birkaç türbin vardır. Bu türbinler de şu anda piyasada bulunanlardan çok daha küçüktür.

Almanya, İspanya, İngiltere ve Danimarka'daki deneyimlere dayanarak, işletme ve bakım maliyetlerinin, türbinlerin toplam ömrü boyunca, üretilen kWh başına rüzgar enerjisi başına yaklaşık 1,2 ila 1,5 eurocent (c €) olduğu tahmin edilmektedir. İspanya'daki veriler, bu miktarın %60'ından daha azının kesinlikle türbin ve tesisatların



İ&B'na gittiğini ve geri kalanının işçilik maliyetleri ve yedek parçalar arasında eşit olarak dağıldığını göstermektedir. Kalan %40, sigorta, arsa kiralama ve genel giderler arasında eşit olarak dağılmıştır. Yeni ve daha büyük türbinler için daha düşük İ&B maliyetlerine yönelik eğilimi göstermektedir. Bu nedenle, üç yıllık bir türbin için, İşletme ve Bakım maliyetleri yaklaşık 3.5 c €/kWh'den düşmüştür; eski 55 kW türbinler için yeni 600 kW makinaler için 1 c €/kWh'den az olmaktadır [27].

## 6. SONUÇ

Enerji tüketiminin artması ve iklim değişiminde fosil yakıtların rolü göz önüne alındığında rüzgar enerjisinin gelecekte daha da artması beklenebilir. Rüzgar türbinleri çoğunlukla kırsal alanlarda veya denizlerde kurularak işletilmektedir. Rüzgar türbinlerinin işletilmesinde ve bakımında birçok zorluk ile karşılaşmaktadır. Gerekli bakım işlemlerinin zamanında veya gerektiği gibi yapılmaması bazı problemlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu problemler bazen basit arızalara ve türbinin duraksamasına neden olurken, bazı durumlarda türbinin tamamen kullanılamaz duruma gelmesine neden olmaktadır. Bu nedenle de rüzgar türbinlerinde bakım çalışmalarına önem verilmesi gerekmektedir.

Rüzgar türbinlerinde bakımın elektrik üretim değeri üzerinde de doğrudan etkisi olduğu yapılan çalışmalarda görülmüştür. Kanat yüzeylerinde meydana gelen bozulmalar veya korozyon elektrik üretiminin düşmesine neden olmaktadır. Rulmanlarda veya hareketli aksamalarda meydana gelebilecek arızalar nedeni ile ortaya çıkabilecek olan titreşimler de hem enerji tüketiminin düşmesine neden olmakta, hem de zamanında giderilmez ise arızalara ve türbinin duraksamasına neden olmaktadır.

Bütün bu ve benzeri nedenlerle rüzgar türbinlerinde bakım çalışmaları yapılmalı ve önleyici bakım konusuna önem verilmelidir.

## KAYNAKÇA

1. **IRENA**. 2018. "Renewable Power Generation Costs in 2017". Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
2. **Wu B, Lang Y, Zargari N, Kouro S**. 2011. "Power Conversion and Control of Wind Energy Systems". Piscataway, NJ, USA: IEEE Press; John Wiley & Sons.
3. **Boccard, N**. "Capacity Factor of Wind Power Realized Values vs. Estimates". Energy Policy 2009;37(7):2679-2688.
4. **Lazard**, 2017." Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis". Version 11.0.
5. **Saheb-Koussa D, Haddadi M, Belhamel M, Koussa M, Noureddine S**. 2012. "Modeling and Simulation of Wind Generator With Fixed Speed Wind Turbine Under MATLAB-Simulink." Energy Procedia. 18:701-708.



6. **Bustos, G., Vargas, L. S., Milla, F., Sáez, D., Zareipour, H., & Nuñez, A.** 2012. "Comparison of Fixed Speed Wind Turbines Models: A Case Study." In IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (pp. 961-966). IEEE.
7. **Köseoğlu, H.** 2019. "Rüzgar Enerjisi Nedir, Elektrik Enerjisi Santralleri." <http://www.huseyinkosoglu.com/wp-content/uploads/2016/01/R%C3%BCzgar-Enerjisi-Nedir.pdf>. . İnternet Erişim, Kasım 2019.
8. **Milborrow, D.** 2010. "Breaking down the cost of wind turbine maintenance". Wind Power, <https://www.windpowermonthly.com/article/1010136/breaking-down-cost-wind-turbine-maintenance>. İnternet Erişim, Kasım 2019.
9. **Kuiler, I., Adonis, M., & Raji, A.** 2018. "Preventive Maintenance and Fault Detection for Wind Turbine Generators Using a Statistical Model. In Fault Detection and Diagnosis." IntechOpen. Canada, October 25-28. 2012.
10. **Tian Z, Jin T, Wu B, Ding F.** 2011. "Condition Based Maintenance Optimization for Wind Power Generation Systems Under Continuous Monitoring." Renewable Energy. 36(5): 1502-1509
11. **Agrawal KK, Pandey GN, Chandrasekaran K.** 2013. "Analysis of the Condition Based Monitoring System for Heavy Industrial Machineries." IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research, Enathi. pp. 1-4
12. **Yang W, Tavner PJ, Crabtree CJ, Feng Y, Qiu Y.** 2014. "Wind Turbine Condition Monitoring: Technical and Commercial Challenges." Wind Energy. 17(5):673-693.
13. **Gowdar RD.** 2016. Mallikarjune Gowda MC. "Reasons for Wind Turbine Generator Failures: A Multi-Criteria Approach for Sustainable Power Production." Renewables: Wind, Water, and Solar. 3(1):9
14. **Hahn B, Durstewitz M, Rohrig K.** 2007. "Reliability of Wind Turbines." Wind Energy., Berlin Heidelberg: Springer; pp. 329-332. DOI: 10.1007/978-3-540-33866-6\_62.
15. **MECF,** 2019. "Metropolitan Engineering Consulting and Forensics, Cause and Contributing Factors of Failure of Geared Wind Turbines". <https://sites.google.com/site/metropolitanforensics/cause-and-contributing-factors-of-failure-of-wind-turbines>
16. **Smith, C.** 2014. Fires are Major Cause of Wind Farm Failure, According to New Research, <https://www.imperial.ac.uk/news/153886/fires-major-cause-wind-farm-failure/>. İnternet Erişim, Kasım 2019.
17. **Alewine K, Chen W.** 2012. "A Review of Electrical Winding Failures in Wind Turbine Generators." IEEE Electrical Insulation Magazine. 28(4):8-13.
18. **EP.** 2019. "Efficient Plant, Stopping Repeat Wind-Farm Generator Failures," <https://www.efficientplantmag.com/2013/09/stopping-repeat-wind-farm-generator-failures/>. İnternet Erişim, Kasım 2019.
19. **Behrends, L.** 2019. "Full maintenance and basic maintenance" <https://www.deutsche-windtechnik.com/onshore-full-maintenance-and-basic-maintenance>. İnternet Erişim, Kasım 2019.



20. **WP.** 2011. Wind Power, Planning Maintenance for Wind Turbine Blades, <https://www.windpowerengineering.com/operations-maintenance/planning-maintenance-for-wind-turbine-blades/>. İnternet Erişim, Kasım 2019.
21. **Shreve, E.** 2018. “Wind Turbine Topples in Chatham-Kent”. <https://windsorstar.com/news/local-news/wind-turbine-topples-in-chatham-kent>. İnternet Erişim, Kasım 2019.
22. **NWW.** 2016. “National Wind Watch, Exelon: Mechanical failure led to turbine collapse”, <https://www.wind-watch.org/news/2016/05/07/exelon-mechanical-failure-led-to-turbine-collapse/>. İnternet Erişim, Kasım 2019.
23. **NNYW.2018.** “Northern NY Wind”, <http://www.nnywind.com/photos.html>. . İnternet Erişim, Kasım 2019.
24. **BR.** 2019. “Blade Repair Quality Blade Repair Pays”, <https://fairwindres.com/wind-industry-maintenance/blade-repair/>. . İnternet Erişim, Kasım 2019.
25. **BS,** 2019, “Blade Service, Our Service Portfolio”, <https://www.mb-bladeservice.com/en/leistungen.html>. . İnternet Erişim, Kasım 2019.
26. **FT,** 2019. “Force Technology, Wind turbine towers and rotor blades are exposed to the whims of the weather. Drone inspection provides a visual or thermographic image of the state of the components”. <https://forcetechnology.com/en/services/drone-inspection-of-wind-turbines-onshore-and-offshore>. İnternet Erişim, Kasım 2019.
27. **WEF.** 2019. “Wind Energy the Fact, Operation and Maintenance Costs of Wind Generated Power”, <https://www.wind-energy-the-facts.org/operation-and-maintenance-costs-of-wind-generated-power.html>. . İnternet Erişim, Kasım 2019.

# Fotovoltaik (PV) Pompa Sisteminin Bileşenlerinin Hesabı

Ahmet Demir<sup>1</sup>, F. Mertkan Arslan<sup>2</sup>, Hüseyin Günerhan<sup>3</sup>

## ÖZ

Çalışma kapsamında, bir fotovoltaik (PV) pompa sisteminin optimum olarak boyutlandırılması için bir programlama algoritması oluşturulmuştur. Boyutlandırma algoritması, sistemdeki enerji dengesini temel olarak çalışmaktadır. Algoritma, hem akülü hem de aküsüz PV pompa sisteminin boyutlandırılması için uygun olarak modellenmiştir. Akü içeren PV pompa sistemleri için optimizasyon, aküye giren-çıkan enerjilerin dengesi ile iterasyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Akü içermeyen sistemler için optimizasyon, pompanın kullandığı enerjiyi karşılayabilecek PV panel alanının bulunmasını temel almaktadır. Çalışmada oluşturulan algoritma, Temmuz ayında Manisa-Salihli ilçesinde 1 hektarlık alanda mısır bitkisi için uygulanmıştır. Bitkinin sulanması için damlama sulama yöntemi kullanıldığı kabulü yapılmıştır. Ek olarak, kuyu için gerekli kabuller ve varsayımlar yapıldıktan sonra, pompaya gereken güç 1,5 kW ve debisi 9,55 m<sup>3</sup>/h olarak hesaplamalara eklenmiştir. Sonuç olarak, sistemde akünün bulunması dahilinde toplam 23 adet PV panel gerekli iken, akünün olmaması durumunda 36 adet PV panel gerekli olduğu hesaplanmıştır. Gerekli akü miktarı ise 3 adet olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre, sistem içerisinde akü kullanılması halinde, gerekli PV panel miktarının önemli ölçüde düşürüldüğü hesaplanmıştır. Ek olarak, bir diğer önemli sonuç ise, sistemde akü bulunmaması durumunda, PV panelin elde edilebileceği potansiyel enerji miktarının yarısı israf edilmektedir. Ancak akü kullanılması durumunda ise, israf edilecek bu enerji aküler tarafından toplanarak, sistemin daha optimize edilebilir bir hal alması sağlanmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Güneş enerjisi, fotovoltaik pompa, boyutlandırma algoritması.

## Creating the Sizing Algorithm of a Photovoltaic Pump System

### ABSTRACT

In this study, an algorithm has been created to optimally sizing a photovoltaic pump system. The sizing algorithm works based on the energy balance in the system. The algorithm is suitable for the sizing of both battery-powered and battery-free photovoltaic (PV) pump systems. For PV pump systems containing batteries, optimization takes place using the iteration method with the balance of energies charging or discharging the battery. Optimization for battery-free systems is based on the availability of PV panel area to meet the energy used by the pump. The algorithm created in the study was applied for corn plant in 1 hectare area in Manisa - Salihli district in July. It is assumed that drip irrigation method is used for watering the plant. In addition, after the necessary assumptions are made for the well, the power of the pump is added to the calculations as 1.5 kW and the flow rate is 9.55 m<sup>3</sup>/h. As a result, it was calculated that a total of 23 panels are required within the system with battery and on the other hand, 36 PV panels are required in the absence of a battery. In addition, the required battery amount was found to be 3. According to these results, if the battery is used in the system, the amount of PV panels required is reduced significantly. In addition, another important result is that half the amount of potential energy that the PV panel can obtain is wasted if there is no battery in the system. However, if the battery is used, this energy to be wasted is collected by the batteries and the system is provided to become more optimized.

**Keywords:** Solar energy, photovoltaic pump system, sizing algorithm

\* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 09.06.2020

Kabul/Accepted : 18.08.2020

<sup>1</sup> Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Bornova-İzmir  
ademir@grundfos.com, Orcid:0000-0002-3386-0926

<sup>2</sup> Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Bornova-İzmir  
mertkan.arslan@gmail.com, Orcid: 0000-0001-8359-7743

<sup>3</sup> Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Bornova-İzmir  
huseyin.gunerhan@ege.edu.tr, Orcid: 0000-0003-4256-2418



## EXTENDED ABSTRACT

In this study, an algorithm has been created to optimally sizing a photovoltaic (PV) pump system. The sizing algorithm works based on the energy balance in the system. The algorithm is suitable for the sizing of both battery-powered and battery-free photovoltaic pump systems. For PV pump systems containing batteries, optimization takes place using the iteration method with the balance of energies charging or discharging the battery. Optimization for battery-free systems is based on the availability of PV panel area to meet the energy used by the pump. The algorithm can be applied to all regions and plants. In the study, firstly, the radiation on the sloped surface was calculated, then the water requirement of the plant was determined and the submersible pump that could meet this requirement was selected. Then, the calculation steps of the optimum PV panel surface area and battery amount that can handle the load of this pump are applied. In the next step, the sizing algorithm was validated. Finally, a sample study has been carried out. In the study, the sizing algorithm of the photovoltaic pump system was completed in the presence and absence of batteries. With this study, it has been shown that the amount of PV panels required for the system in the presence and absence of battery is quite different. In addition, this study is a preliminary step for economic analysis to determine which system is more advantageous. The algorithm created in the study was applied for corn plant in 1 hectare area in Manisa - Salihli district in July. It is assumed that drip irrigation method is used for watering the plant. In addition, after the necessary assumptions are made for the well, the power of the pump is added to the calculations as 1.5 kW and the flow rate is 9,55 m<sup>3</sup>/h. As a result, it was calculated that a total of 23 panels are required within the system with battery and on the other hand, 36 PV panels are required in the absence of a battery. In addition, the required battery amount was found to be 3. According to these results, if the battery is used in the system, the amount of PV panels required is reduced significantly. In addition, another important result is that half the amount of potential energy that the PV panel can obtain is wasted if there is no battery in the system. However, if the battery is used, this energy to be wasted is collected by the batteries and the system is provided to become more optimized.



## 1. GİRİŞ

Güneş enerjisi, elektrik şebekesinin bulunmadığı ve/veya bulunduğu bölgelerde aydınlatma, pompalama, vb. düzeneğe güç vermek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Güneş enerjisinin en önemli avantajları; bu kaynağın tükenmez olması ve kullanım güvenliği sunmasıdır [1]. Bununla birlikte, fotovoltaik (PV) sisteminin dezavantajı ise geleneksel enerji kaynaklarına kıyasla yüksek maliyetidir. Bu yüzden PV panel içeren sistemlerinin optimizasyon çalışmalarının yapılması önem teşkil etmektedir [2]. Genel olarak, PV sistem boyutlandırması, sezgisel, analitik, sayısal ve yapay zekâ yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilebilir. Sezgisel yöntem, en kritik aya veya ortalama aylık güneş ışınımına dayanan en basit yöntemdir. Bununla birlikte, bu yöntem PV pompa sisteminin aşırı yüksek veya düşük boyutlandırılmasına yol açabilir, bu da maliyeti ve/veya sistemin güvenilirliğini azaltabilir. Sistem büyüklüğünün analitik bir yöntem temelinde hesaplanması sezgisel yöntemden daha basit ve daha doğrudur, ancak bu denklemlerin karmaşıklığı bu yöntemin temel dezavantajıdır [3].

PV pompalama sistemleri, elektrik şebekelerine hiçbir bağlantısı olmayan veya sınırlı bağlantısı olan kırsal alanlarda suya erişim sağlamak için en kritik çözümlerden biridir. PV panel ile çalışan su pompalama sistemlerinin, kullanım güvenliği, sağlamlık ve çevre ile uyum gibi birçok avantajları vardır [4]. İyi tasarlanmış yenilenebilir enerji kaynaklı bir su pompalama sistemi, Diesel jeneratör veya şebekeye bağlı su pompalama sistemlerine göre hem yüksek verimlilik hem de ekonomi açısından rekabetçi olabilmektedir. PV pompa sistemleri esas olarak PV paneller, elektrik motoru ve pompa setinden oluşmaktadır. Ancak, sistem gereksinimlerine bağlı olarak, akü ve şarj regülatörleri de sisteme eklenebilir. Motor AC (alternatif akım) ile çalışıyorsa, AC-DC dönüştürücüsüne ihtiyaç vardır. DC (doğru akım) ile çalıştırılırsa da DC-DC dönüştürücüleri sisteme eklenebilir [5].

Birçok araştırmacı, PV pompa sisteminin boyutlandırılması, ekonomik performansının incelenmesi ve çevresel fizibilite çalışmaları üzerine odaklanmışlardır [6]. Kaldellis ve diğerleri, saatlik meteorolojik veriler yardımı ile PV pompa boyutlandırması yapmışlardır ve deneysel veriler ile kıyaslama yapmışlardır [7]. Bakelli ve diğerleri, PV pompa ile su tankı modellemesini LPSP (the loss of power supply probability) konseptini kullanarak bir çalışma gerçekleştirmişlerdir [8]. Yahyaoui ve diğerleri, PV pompa sistemlerinin optimum boyutlandırılması için enerji dengesini kullanarak bir algoritma oluşturmuşlardır [9]. Salam ve diğerleri, PV pompa sistemi için hazır PV boyutlandırma programı (HOMER) kullanarak bir çalışma yapmışlardır [10]. Ma ve diğerleri tekno-ekonomik optimizasyon yöntemi kullanarak sistem modellemesi çalışması gerçekleştirmişlerdir [11]. Muhsen ve diğerleri ise, hibrit çok kriterli karar verme yöntemlerini ve sistemin ekonomik verilerini değerlendirerek bir boyutlandırma çalışması yayınlamışlardır [3].

Çalışmada, akü varlığında ve yokluğunda fotovoltaik pompa sisteminin boyutlandır-



ma algoritması tamamlanmıştır. Bu çalışma ile sistemin akü varlığında ve yokluğunda sisteme gereken PV panel miktarlarının oldukça farklı olduğu gösterilmiştir. Ek olarak bu çalışma, hangi sistemin daha avantajlı olduğunun belirlenmesi için ekonomik analizlerinin yapılması için de bir ön adım olmaktadır.

Çalışma kapsamında, öncelikle, eğik yüzeye gelen ışınım hesabı yapılacaktır, ardından bitkinin su ihtiyacı belirlenip bu ihtiyacı karşılayabilecek dalgıç pompa seçimi yapılacaktır. Sonraki adımda, bu pompanın yükünü kaldırabilecek optimum PV panel yüzey alanı ve akü miktarının hesaplama adımları verilecektir. Daha sonra oluşturulan algoritma için örnek çalışma gerçekleştirilecektir.

Algoritma programı, araştırmacılar ve ilgili sektördeki kişiler için yardımcı bir kaynak olacağı amaçlanmıştır.

## 2. FOTOVOLTAİK (PV) POMPA SİSTEMİNİN BİLEŞENLERİNİN HESABI

### 2.1 Eğik Yüzeye Gelen Işınım Hesabı

PV pompanın komponentlerinin hesaplanabilmesi için yataya gelen güneş ışınımının teorik olarak hesaplanması gerekmektedir. Eğik yüzeye gelen saatlik ışınım, izotropik gök yaklaşımı ile hesaplanması Denklem 1 ile verilmiştir [12].

$$I_T = I_b R_b + I_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (1)$$

Denklem 1 içerisinde verilen,  $\beta$ , yüzey eğimini ve  $\rho_g$ , yerin aklık derecesini temsil etmektedir.  $R_b$  eğik yüzey üzerindeki direkt ışınım ile yatay yüzey üzerindeki direkt ışınım oranıdır. Ayrıca,  $I$ , dik yüzeye gelen toplam saatlik ışınım değeridir. Tüm hesaplamalara öncelikle, sistemin kurulacağı bölgenin aylık ortalama günlük ışınım verilerinin ( $\bar{H}$ ) elde edilmesi ile başlanmaktadır.  $\bar{H}$  kullanılarak saatlik direkt ( $I_b$ ) ve yayılı ( $I_d$ ) ışınımın hesaplanması için Denklem 2'den Denklem 12'ye kadar olan eşitliklerin kullanılması gerekmektedir.

Günlük atmosfer dışı aylık ışınım değeri ve bu değere bağlı olan aylık ortalama açıklık endeksi Denklem 2 ve Denklem 3 ile hesaplanabilir [12].

$$H_o = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left( 1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) x \left( \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta \right) \quad (2)$$

Denklem 2 ile verilen  $G_{sc}$ , güneş sabitidir ve değeri  $1367 \text{ W/m}^2$ 'dir. Denklem içerisindeki  $n$ ,  $\phi$ ,  $\delta$ ,  $\omega_s$  sırası ile, ayın gün sayısı, bölgenin enlemi, deklinasyon açısı ve günbatımı saat açısıdır ( $\cos \omega_s = -\tan \phi \tan \delta$ ) [12].



$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} \quad (3)$$

Günlük ortalama aylık yansıyan ışınım, aylık ortalama açıklık endeksinin bir fonksiyonu olarak Denklem 4 ve Denklem 5 kullanılarak hesaplanabilir. Hesaplamalarda, ilgili ayın ortalama gününün  $H_o$  değeri ve o ayın  $\bar{H}_o$  değeri birbirine çok yakın değerler olduğu için  $\bar{H}_o$  değeri yerine  $H_o$  denklemleri kullanılmıştır [12].

Eğer,  $\omega_s \leq 81,4^\circ$  ve  $0,3 \leq \bar{K}_T \leq 0,8$  ise;

$$\bar{H}_d = (1,391 - 3,560\bar{K}_T + 4,189\bar{K}_T^2 - 2,137\bar{K}_T^3)\bar{H} \quad (4)$$

Eğer  $\omega_s > 81,4^\circ$  ve  $0,3 \leq \bar{K}_T \leq 0,8$  ise;

$$\bar{H}_d = (1,311 - 3,022\bar{K}_T + 3,427\bar{K}_T^2 - 1,821\bar{K}_T^3)\bar{H} \quad (5)$$

Saatlik toplam ışınım, aylık ortalama günlük ışınım kullanılarak Denklem 6 ile hesaplanabilir [12].

$$I = r_i \bar{H} \quad (6)$$

Denklem 6 içerisindeki  $I$  ile  $\bar{H}$  oranını oluşturan  $r_i$  Denklem 7 ile verilmiştir.

$$r_i = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s} \quad (7)$$

Denklemdaki  $a$  ve  $b$  katsayıları Denklem 8 ve 9 ile verilmiştir. Denklem 7 içerisinde belirtilen  $\omega$  değeri; Dünyanın kendi eksenini etrafında saatte  $15^\circ$  dönmesi nedeniyle güneşin, yerel meridyenin doğusunda veya batısında açılmalık yer değiştirmesidir. Öğleden önce negatif, öğleden sonra pozitif olmaktadır [12].

$$a = 0,409 + 0,5016 \sin(\omega_s - 60) \quad (8)$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \sin(\omega_s - 60) \quad (9)$$

Aynı şekilde, saatlik toplam yayılı ışınım, aylık ortalama günlük yayılı ışınım değerleri kullanılarak Denklem 10 kullanılarak hesaplanabilir.

$$I_d = r_d \bar{H}_d \quad (10)$$

Denklem 6 içerisindeki  $r_d$  değişkeni Denklem 11 ile gösterilmiştir [12].

$$r_d = \frac{\pi}{24} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s} \quad (11)$$



Saatlik toplam direkt ışınım değeri ise Denklem 12 ile hesaplanabilir [12].

$$I_b = I - I_d \quad (12)$$

Böylelikle elde edilen tüm değişkenler Denklem 1 içerisine yerleştirilir ve eğik yüzeye gelen saatlik (veya daha kısa süreli) ışınım değeri elde edilebilir. Gün içerisinde gelen tüm eğik düzleme gelen saatlik ışınım değeri  $I_t$  değerleri toplanması halinde  $H_T$  değeri bulunmaktadır [12].

## 2.2 Fotovoltaik (PV) Panel Modeli

Eğik düzlemlili PV güneş panelinin çıkış gücü Denklem 13 ile verilmiştir.

$$P_{pv} = \eta_{pv} A_{pv} I_T \quad (13)$$

Denklem 13 ile verilen  $\eta_{pv}$ , PV panel verimi,  $A_{pv}$  yüzey alanı olarak nitelendirilmektedir. Denklem 14 ile PV panel verimi hesaplanabilmektedir [8,13].

$$\eta_{pv} = \eta_r \eta_{pc} \left[ 1 - \beta_{pv} (T_c - T_{cref}) \right] \quad (14)$$

$\eta_r$  referans panel verimliliği,  $\eta_{pc}$  güç şartlandırma verimidir ve maksimum güç izleyici (MPPT) mükemmel olarak kabul edilirse bu değer 1 olarak alınabilir.  $\eta_r$  değeri 1 olarak hesaplamalara dahil edilmiştir.  $\beta_{pv}$  PV panel sıcaklık katsayısıdır. Silikon hücreler için bu değer sıcaklık başına genellikle 0,004-0,006 arasında değişebilmektedir. Çalışma kapsamında bu değer 0,004 olarak kullanılmıştır.  $T_c$  hücre sıcaklığı ve  $T_{cref}$  referans hücre sıcaklığıdır. Hücre sıcaklığı Denklem 15 ile hesaplanabilir [8].

$$T_c = T_a + \left[ \frac{(NOCT - 20)}{800} \right] I_T \quad (15)$$

Denklem 15 ile verilen  $T_a$  hava sıcaklığını ve  $NOCT$ , “nominal hücre çalışma sıcaklığını” temsil etmektedir. Çalışma kapsamına kullanılacak olan panel özellikleri Tablo 1 ile verilmiştir [8,13].

## 2.3 Bitkinin Su İhtiyacı

PV pompa sisteminin seçimi için bitkinin türünün ve bu bitkinin su ihtiyacının belirlenmesi gerekmektedir. Bitkinin su ihtiyacının belirlenmesi için (16-21) numaralı denklemler kullanılmıştır.

Bitkinin su ihtiyacının hesaplamalarında, sulama yönteminin belirlenmesi önemli bir faktördür. Yağmurlama yönteminin kullanıldığı sistemlerde, net sulama suyu ihtiyacı





( $d_n$ ) Denklem 16 ile verildiği gibi, bitkinin su tüketiminden  $ETc$  etkili yağış miktarının ( $P_e$ ) çıkarılması ile hesaplanmaktadır [15].

**Tablo 1.** PV Panel Verileri [14]

PV markası	SunPower (SPR-210-BLK)	PV panel tipi	Monokristal
Max Güç	210 W	Sıcaklık katsayısı	%0,38
Nominal Voltaj	40 V	Açık devre voltajı	47,7 V
Nominal Akım	5,25 A	Kısa devre Akımı	5,75 A
Verimlilik ( $\eta_{pc}$ )	%16,9	Alanı	1,248 m <sup>2</sup>
NOCT	45°C	İnvertör verimi ( $\eta_{inv}$ )	%97,5

**Tablo 2.** Sulama Yöntemlerine Göre Su Uygulama Verimleri [15]

Yöntem	$E_a$ (%)
Taşınabilir yağmurlama sulama	70
Sabit yağmurlama sulama	75
Dönme ekseni ve doğrusal yağmurlama ile sulama	82,5
Ağaçaltı mikro yağmurlama sulama	87,5
Yüzey damla sulama	87,5
Yüzeyaltı damla sulama	90

$$dn = ETc - P_e \quad (16)$$

Damlama yöntemiyle sulamada ise, su tüketimi Denklem 17 ile verilen eşitlik ile düzeltilmiş olarak kullanılmalıdır.

$$T = ETc \left( \frac{Ps}{85} \right) \quad (17)$$

Denklem 17 ile verilen  $T$ (mm) düzeltilmiş bitki su tüketim miktarı ve  $Ps$  (%) bitki tarafından gölgelenen alandır. [15] numaralı referansa göre,  $Ps$  değeri için, tarla bitkileri ve sebzelerde %80, bağ ve sık dikim yapılan meyve ağaçlarında (sıra aralığı 4 m'den sık) %75, geniş dikim aralıklarına sahip meyve ağaçlarında (sıra aralığı 4 m ve daha geniş) ise %70 alınması uygun görülmüştür. Bitkinin su ihtiyacı  $ETc$ , bitki gelişme dönemleri olan başlangıç, gelişme, orta ve son dönem uzunluklarına göz önü-



ne alınarak belirlenir. Çalışmada, aylar 10 günlük, üç döneme ayrılmıştır. Damlama sulama için net sulama suyu ihtiyacı Denklem 18 ile hesaplanabilir [15].

$$dn = T - P_e \quad (18)$$

Toplam sulama suyu ihtiyacı ise, Denklem (19) ile verilmiştir. Denklemdeki  $E_a$  su uygulama verimi (Tablo 2 ile verilmiştir),  $E_e$  ise su iletim verimidir (Basıncılı borulu sulama düzeneklerinde bu değer %98 alınmaktadır) [15].

$$dt = \frac{dn}{(E_a E_e)} \quad (19)$$

Manisa ilinin Salihli ilçesinde 1 hektar alan için mısır bitkisinin Temmuz ayındaki toplam sulama suyu ihtiyacı Denklem 19 kullanılarak toplam 227,1 m<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır (Tablo 3). Bitki için 12 ayın en yüksek su ihtiyacı gerektiren ay Temmuz ayı olduğu için sulama suyu ihtiyacı bu aya göre seçilmiştir [15]. Saatteki sulama miktarının bulunabilmesi için Manisa ilindeki Temmuz ayının ortalama güneşlenme süresi olan 10,5 saat hesaplamalara dahil edilmiştir [16]. Böylelikle, pompanın debisi 7 m<sup>3</sup>/h olarak hesaplanmıştır. Ancak, çalışma kapsamında hesaplanan bu değere %25 emniyet payı eklenmiştir. Böylelikle pompa sistemin debisi 8,75 m<sup>3</sup>/h olmaktadır.

**Tablo 3.** Temmuz ve Ağustos Ayı İçin Sulama Suyu İhtiyacı Hesaplamaları [15].

Bitki: Mısır	TEMMUZ			AĞUSTOS		
	I.DÖNEM	II.DÖNEM	III.DÖNEM	I.DÖNEM	II.DÖNEM	III.DÖNEM
Sulama tipi: Damlama						
Bitki su tüketimi (Etc) (mm)	71,1	71	76,8	66,6	63,6	62,2
Damlama için bitki su tüketimi (T) (mm)	66,9	66,8	72,3	62,7	59,9	58,5
Yağış (P) (mm)	2,4	3,2	1,5	2,8	1,4	1,6
Etkili yağış (Pe) (mm/gün)	1,9	2,6	1,2	2,3	1,1	1,3
Net sulama suyu ihtiyacı, dn (mm)	65	64,2	71,1	60,4	58,8	57,2
Toplam sulama suyu ihtiyacı, dt (mm)	73,7	72,8	80,6	68,5	66,6	64,9
Aylık üç dönemin su ihtiyacı (mm)		<b>227,1</b>			<b>200</b>	

## 2.4 Pompanın Modellenmesi

Bölüm 2.3 ile bitkinin su ihtiyacı belirlendikten sonra gerekli su ihtiyacının karşılan-

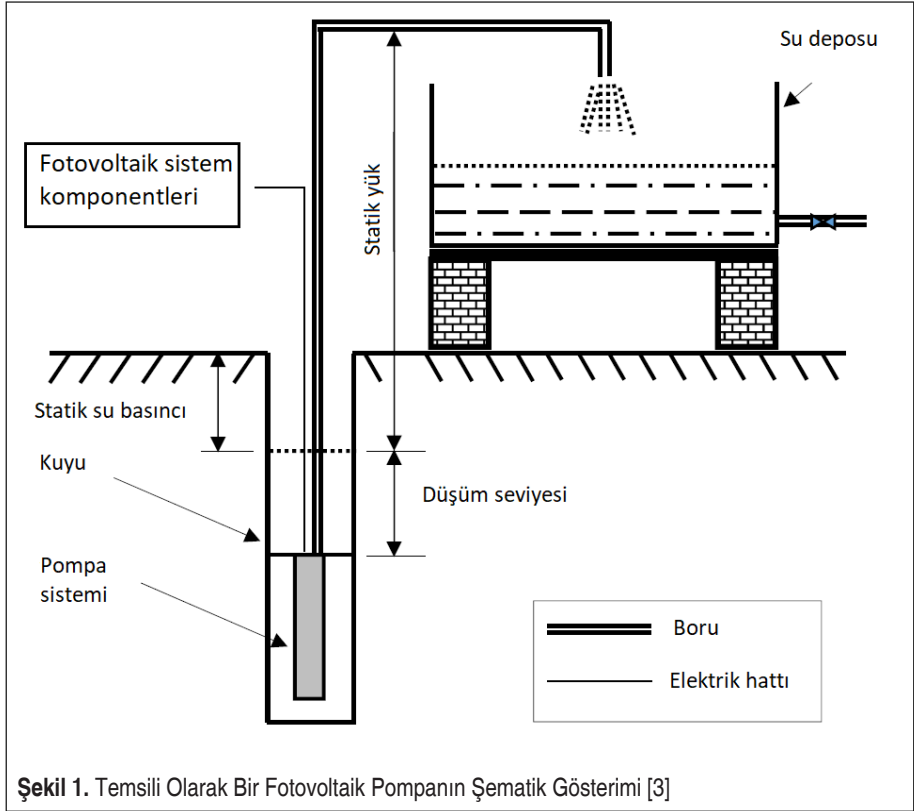
ması için uygun pompanın seçiminin yapılması gerekmektedir. Bu açıdan borulama tesisatının durumuna ve toplam yük kayıplarına göre pompaya verilmesi gereken işin bulunması ve doğru pompa seçiminin yapılması bu bölümde ele alınmıştır. Pompa motorunun tükettiği güç Denklem 20 ile hesaplanabilir.

$$\dot{W}_{pompa} = \frac{\rho \dot{V} g h_{toplam}}{\eta_{pompa-motor}} \quad (20)$$

Denklem 20 ile verilen,  $\rho$  suyun yoğunluğu,  $\dot{V}$  hacimsel debi,  $h_{toplam}$  toplam yük kaybı,  $\eta_{pompa-motor}$  pompa motor verimliliğidir ve bu değer genellikle yüzde 55 ile 85 arasında değişmektedir [17] Şekil 1 ile bir PV pompanın şematik gösterimi verilmiştir.

Denklem 20 içerisindeki toplam yük kaybı ( $h_{toplam}$ ) Denklem 21 ile belirlenir.

$$h_{toplam} = h_s + h_{düşüm} + h_B + h_b \quad (21)$$





Denklem 21 ile verilen  $h_s$ , statik yüküdür ve suyun yüzeyi ile deşarj noktası arasındaki farka eşittir,  $h_{düşüm}$  düşüm seviyesi,  $h_b$  boru hattındaki sürtünme kayıplarından kaynaklı yük kaybı (Denklem 22) ve  $h_b$  bağlantı elemanlarındaki sürtünme kayıpları nedeniyle yük kaybıdır [3].

$$h_b = f \frac{LV^2}{2gd} \quad (22)$$

Denklem 22 ile verilen  $L$  boru uzunluğu,  $d$  borunun iç çapı,  $f$  Reynolds sayısına ( $Re$ ) bağlı boru hattının sürtünme faktörü,  $v$  akışkanın hızıdır (Denklem 23).

$$v = \frac{4\dot{V}}{\pi d^2} \quad (23)$$

Türbülanslı akış için sürtünme faktörü Denklem 24 ile hesaplanabilir.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log \left( \frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (24)$$

Ayrıca,  $h_b$ , Denklem 25 ile hesaplanabilmektedir. Denklemdeki  $K_k$  kayıp katsayısı boru hattı içerisindeki komponentin tipine göre değişmektedir [3,16].

$$h_b = K_k \frac{v^2}{2g} \quad (25)$$

Bitkinin sulama suyu ihtiyacının karşılanabilmesi için pompa seçiminin uygun olarak yapılması gerekmektedir. Bu açıdan bu bölümde pompanın gücünün bulunabilmesi için temel eşitlikler Denklem (20-25) arasında verilmiştir. Çalışma kapsamında pompa seçimi, bir hazır seçim programı aracılığı ile belirlenmiştir [18]. Tablo 4 ile

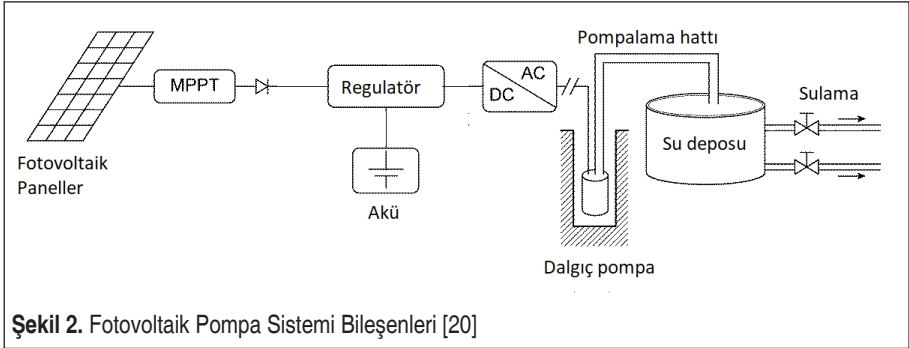
**Tablo 4.** Seçilen Pompanın Özellikleri [18].

Seçilen pompa özellikleri	Değeri
Pompanın mil gücü	1500 W
Pompanın debisi	9,55 m <sup>3</sup> /h
Pompanın basma yüksekliği	30 m
Kütle	19 kg
Pompa malzemesi (Pompa, çark, motor)	Paslanmaz çelik

seçilen pompanın özellikleri verilmiştir. Toplam sulama ihtiyacı Bölüm 2.3 ile verilen hesaplamalar kullanılarak  $9,55 \text{ m}^3/\text{h}$  olarak belirlenmiştir. Ek olarak, pompa seçimi için  $h_s$  (statik yük) 20 m,  $h_{düşüm}$  (düşüm yüksekliği) 5 m,  $h_B$  (borudaki sürtünme kayıplarından kaynaklı yük) 3,89 m ve  $h_b$  (bağlantı elemanlarından kaynaklı yük kaybı) 0,2 m olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak toplam yük kaybı 29,1 m olarak hesaplamalara eklenmiştir.

### 3. BOYUTLANDIRMA ALGORİTMASI

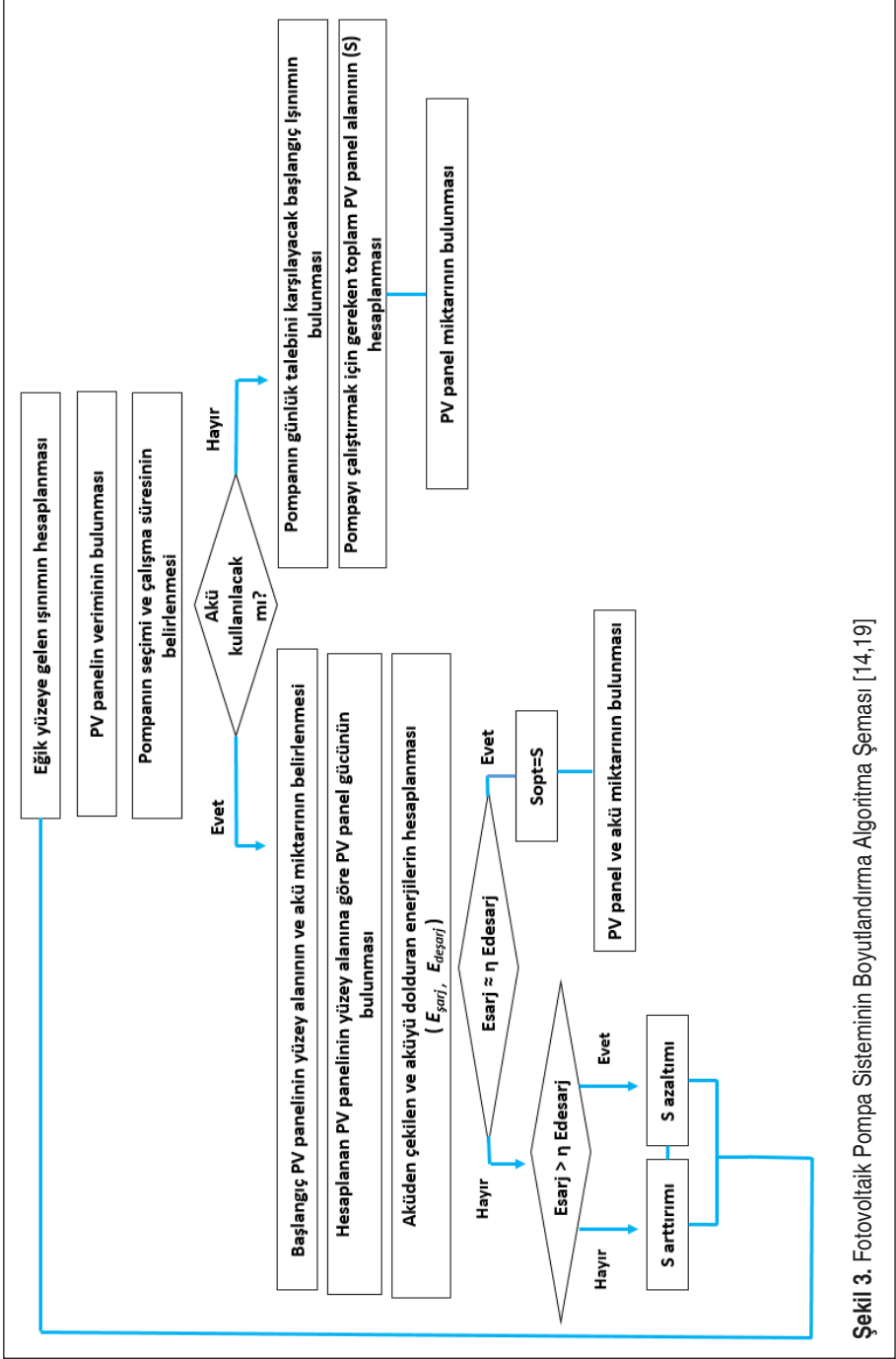
PV pompa sisteminin uygun ve optimum boyutlandırılması, sistem için gerekli olan enerji talebinin tam olarak karşılanması anlamına gelmektedir. Bu nedenle bitkinin yaşam döngüsü boyunca ihtiyaç duyduğu su miktarını, alanın coğrafi özelliklerinin, güneş ışınımının, PV panelin özelliklerinin, akü kapasitesinin ve su deposunun boyutlarının uygun ölçütlerde hesaplanması ve belirlenmesi gerekmektedir. Hesaplamalar, akünün şarj ve deşarj arasındaki enerji dengesi üzerinedir. Böylelikle, ihtiyaç duyulan su hacminin pompalanması sağlanabilmektedir. Algoritmanın temel amacı, aküyü derin deşarj veya aşırı şarjdan korurken ve sulama için gereken su hacmini sağlarken gün boyunca yük beslemesini belirlemektir. PV pompa uygulamalarında, düzenekler hem akülü hem de aküsüz olarak kurulmaktadır [19]. Bu açıdan algoritma hem akülü sistemler için hem de akü içermeyen sistemler için uygulanmıştır. Algoritma, Şekil 2 ile gösterilen sistem için oluşturulmuştur. Algoritmanın şeması ise Şekil 3 ile verilmiştir. Algoritma, MATLAB programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3 ile verilen boyutlandırma algoritmasının adımları aşağıda verildiği gibi düzenlenmiştir.

**Adım 1.** Bölüm 2.1’de Denklem 1 kullanılarak eğik yüzeye gelen ışınımın hesaplanması gerçekleştirilmektedir.

**Adım 2.** Denklem 14 ile verilen panel veriminin hesaplanması yapılmaktadır.



Şekil 3. Fotovoltaik Pompa Sisteminin Boyutlandırma Algoritma Şeması [14,19]



**Adım 3.** Bölüm 2.3 ile işlenen bitkinin hektar başına günlük su ihtiyacının hesaplanmasından sonra Bölüm 2.4'te gösterilen yöntem ile pompa seçimi yapılmaktadır. Böylelikle pompa gücü ve pompa çalışma süreleri hesaplanabilir.

**Adım 4.** Bu adımda genel algoritma, sistemde akünün kullanıp kullanılmayacağına göre iki farklı hesaplama yönlendirecektir.

**PV pompa sisteminin akü içermesi halinde:**

**Adım 5.** Başlangıç PV panelin yüzey alanı [14,19], toplam gücü ve akü miktarı sırasıyla Denklem 26, Denklem 27 ve Denklem 28 ile hesaplanabilir [19].

$$S_i = \frac{\dot{W}_{pompa} \Delta t}{H_T n_{pv} \eta_{akü}^2 \eta_{kablo} \eta_{reg} \eta_{inv} \eta_{birleşim} \eta_{opt, ısıl}} \quad (26)$$

PV panelin toplam gücü Denklem 27 ile hesaplanmaktadır.

$$P_{pv,i} = n_{pv} \eta_{reg} \eta_{birleşim} \eta_{opt, ısıl} S_i I_T \quad (27)$$

Denklem 26 ve 27 ile verilen  $\eta_{akü}$  akünün elektriksel verimini,  $\eta_{kablo}$  uyumsuz kablolarla kayıplarını,  $\eta_{reg}$  regülatör verimini,  $\eta_{inv}$  invertör verimini,  $\eta_{birleşim}$  panel eşleştirme verimini ve  $\eta_{opt, ısıl}$  panelin optik ve ısı performansını göstermektedir. Denklem 28 ile verilen  $V_{akü}$  akü voltajını,  $C_{akü}$  akünün kapasitesini ve  $\Delta dod_{max}$  ise maksimum *dod* (derin deşarj) varyasyonunu temsil etmektedir.

$$n_{bat,i} = \frac{E_{sarj}}{V_{akü} C_{akü} \Delta dod_{max}} \quad (28)$$

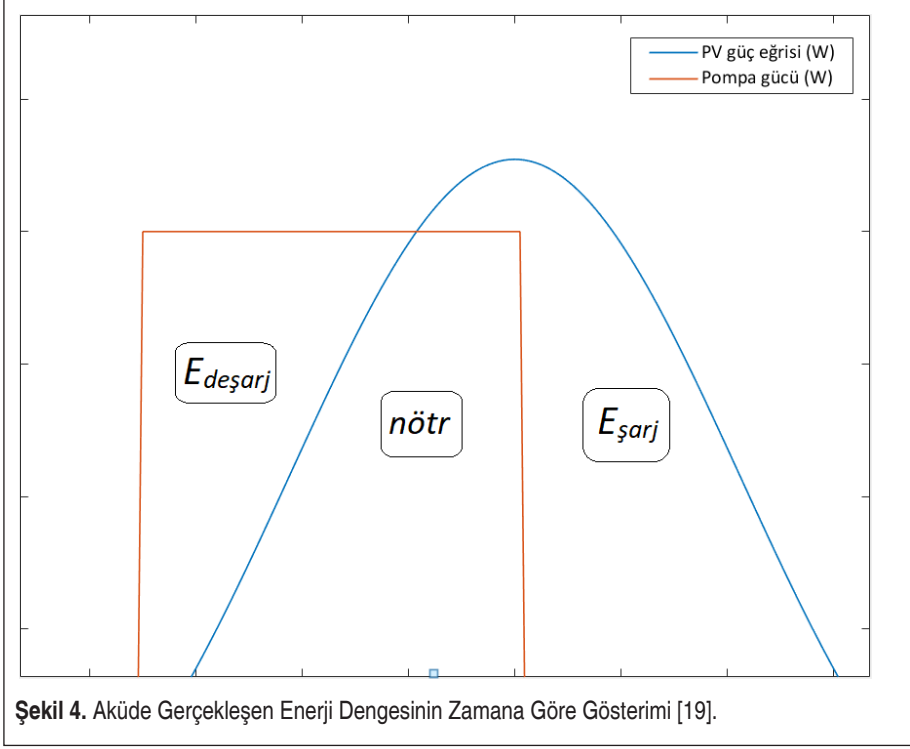
Çalışma kapsamında,  $\eta_{akü} = 0,9$ ,  $\eta_{inv} = 0,975$ ,  $\eta_{kablo} = 0,95$ ,  $\eta_{birleşim} = 0,8$ ,  $\eta_{opt, ısıl} = 0,9$ ,  $\eta_{reg} = 0,9$  ve  $\Delta dod_{max} = 0,78$  olarak hesaplara dahil edilmiştir. Akünün kapasitesi 210 Ah ve gerilim değeri 12 V olarak hesaplamalara eklenmiştir [19].

**Adım 6.** Denklem 26 ile hesaplanan panel alanına bağlı olarak panel gücünün hesaplanması gerekmektedir (Denklem 27).

**Adım 7.** Şekil 4 ile gösterilen aküden çekilen enerji miktarı ( $E_{deşarj}$ ) ve PV panel yardımıyla aküye aktarılan enerji ( $E_{sarj}$ ) hesaplanmaktadır. Ayrıca, aküyü derin deşarjlara karşı korumak amaçla algoritma içerisinde değerinin (0,78) değerinden az olmasını sağlayan bir verimlilik  $\eta$  katsayısı kullanılmıştır. Bu değer  $\eta$  1,28 olarak hesaplamalara dahil edilmiştir. Böylece, Denklem 29 ile akü üzerinden bir enerji dengesi elde edilmektedir [19].



$$E_{şarj} = \eta E_{deşarj} \quad (29)$$



Şekil 4. Aküde Gerçekleşen Enerji Dengesinin Zamana Göre Gösterimi [19].

**Adım 8.** Denklem 29 ile değerlendirilir ve eğer  $E_{şarj} > E_{deşarj}$  ise panel yüzey alanı azaltılır, diğer durumda yüzey alanı artırılır. PV panelinin artış veya azalış miktarı  $0,25 \text{ m}^2$  olarak belirlenmiştir. Eğer  $E_{şarj}$  ve  $E_{deşarj}$  yaklaşık birbirine eşit ise iterasyon durdurulur ve uygun panel alanı bulunmuş olur. Denklem (29) ile gösterilen eşitliğin iki tarafındaki fark,  $50 \text{ W}$ 'dan düşük olduğu zaman iterasyon durmaktadır.

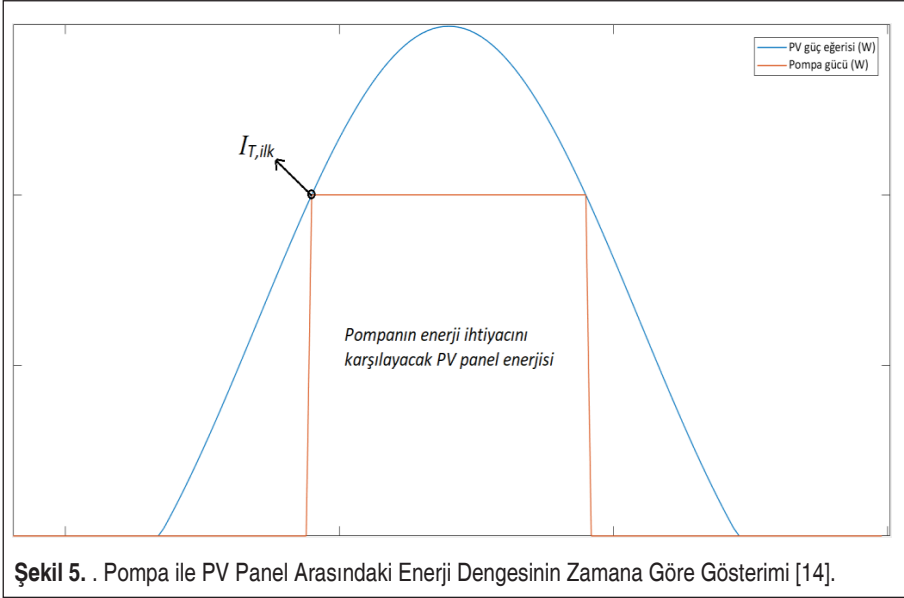
#### **Fotovoltaik pompa sisteminin akü içermemesi durumunda**

**Adım 5.** Şekil 5 ile gösterildiği gibi, öncelikle pompanın ihtiyacını karşılayacak ilk güneş ışınım değeri ( $I_{T,ilk}$ ) bulunmalıdır [14].

**Adım 6.** Daha sonra, Denklem 30 kullanılarak pompayı çalıştırmak için gereken PV panel yüzey hesaplanır [14,19].

$$S = \frac{\dot{W}_{pompa} \Delta t}{I_{T,ilk} \Delta t n_{pv} \eta_{kablo} \eta_{reg} \eta_{inv} \eta_{birleşim} \eta_{opt,ısl}} \quad (30)$$





Denklem 30 ile verilen eşitlikte, Denklem 26'dan farklı olarak akü bulunmadığı için akü ile ilgili verim terimi çıkartılmıştır. Ayrıca, yataya gelen ışınım ile pompa çalışma süresinin çarpımı denkleme eklenmiştir (Şekil 5).

**Adım 7.** Böylelikle bulunan PV panel yüzey alanı seçilen pompanın enerji ihtiyacını karşılayabilecek kapasitede olacaktır. Yüzey alanını, bir adet PV panel yüzey alanına bölerek gerekli panel sayısı bulunabilir [14].

#### 4. ALGORİTMANIN DOĞRULUĞUNUN GÖSTERİLMESİ

Çalışma kapsamında oluşturulan fotovoltaik pompa sisteminin boyutlandırma algoritmasının doğruluğunun gösterilmesi için referans [19] kullanılmıştır. Tablo 5 ile her iki modelde çıkan önemli sonuçlar karşılaştırılmıştır. Referans alınan modelin iklim koşulları ve PV panel verileri, çalışmada oluşturulan model ile aynı değerde olacak şekilde hesaplamalar tamamlanmıştır.

Tablo 5 ile gösterildiği gibi, referans model ile çalışmada oluşturulan modelin verileri birbirine yakın çıkmaktadır. Bu açıdan, çalışma kapsamında oluşturulan modelin hesaplamaları geçerli olduğu kabul edilebilir. İki model arasında oluşan sayısal farklılıklar, boyutlandırma algoritmasının oluşturulma şeklinden, kullanılan formüllerin farklılığından ve çalışmada oluşturulan hesaplamalara bazı iklim verilerinin eklenmesinden kaynaklanmaktadır.



**Tablo 5.** Oluşturulan Model ile Referans [19]'daki Çalışmada Kullanılan Modelin Sonuçlarının Karşılaştırılması

Değerler	Mart		Nisan		Mayıs		Haziran	
	Referans [19]	Model	Referans [19]	Model	Referans [19]	Model	Referans [19]	Model
$E_{deşarj}$ [Wh]	10991	10332	14481	14079	10239	12620	12511	11217
$E_{şarj}$ [Wh]	18725	13488	23035	17336	16807	16232	18033	12636
$E_{pompa}$ [Wh]	11258	11250	18615	18585	33350	33345	44716	44685
S [m <sup>2</sup> ]	37,5	34,34	41,5	45,78	54,5	77,97	61,5	90,99
$n_{bat}$ [adet]	4	5,35	5	6,88	4	6,44	5	5,01

## 5. ALGORİTMANIN BİR ÖRNEK ÜZERİNDE UYGULANMASI

Bölüm 2.1 ile yataya gelen ışınım değerleri verilmiştir. Bölüm 2.2 ile PV panel tipi ve panel verimliliği hesabı yapılmıştır. Bölüm 2.3 içerisinde, 1 hektarlık mısır bitkisinin günlük sulama suyu ihtiyacı “m<sup>3</sup>” cinsinden bulunmuştur. Bölüm 2.4 ile su ihtiyacına göre pompa seçimi yapılmıştır. Son olarak Bölüm 3 ile algoritmanın işleyişinin adımları anlatılmıştır. Bu bölümlerde belirlenen kriterlere göre, sistemde akü varlığında Tablo 6, akü olmadan Tablo 7 ile algoritma çıktılarının özeti verilmiştir. Tüm ışınım ve ortalama hava sıcaklığı verileri Meteoroloji Genel Müdürlüğü resmi internet sitesinden alınmıştır [16].

**Tablo 6.** Algoritma Çıktı Özetleri (Akülü)

Algoritma sonuçları	Miktar	Birim
Gün içinde toplam PV panel alanına gelen toplam enerji	182.587	Wh/gün
PV panelin güneşten elde edilebileceği maksimum enerji	13.932	Wh/gün
PV sisteminin güneşten yararlanma oranı (panel, regülatör, akü vb.)	7,63	%
Pompanın harcadığı toplam enerji	12.600	Wh/gün
PV panel tarafından elde edilen ve israf edilen enerji	1.332	Wh/gün
Aküden çekilen toplam enerji ( $E_{deşarj}$ )	3.887	Wh
Aküye gönderilen enerji ( $E_{şarj}$ )	4.995	Wh
Sistem için gerekli PV panel yüzey alanı	27,62	m <sup>2</sup>
Sistem için gerekli PV panel miktarı	23	Adet
Kullanılması gereken akü miktarı	3	Adet



**Tablo 7.** Algoritma Çıktı Özeti (Aküsüz)

Algoritma sonuçları	Miktar	Birim
Gün içinde toplam PV panel alanına gelen toplam enerji	295.920	Wh/gün
PV panelin güneşten elde edilebileceği maksimum enerji	25.210	Wh/gün
PV sisteminin güneşten yararlanma oranı (panel, regülatör vb.)	8,95	%
Pompanın harcadığı toplam enerji	12.600	Wh/gün
PV panel tarafından elde edilen ve israf edilen enerji	12.610	Wh/gün
Sistem için gerekli PV panel yüzey alanı	44,77	m <sup>2</sup>
Sistem için gerekli PV panel miktarı	36	Adet

Tablo 5 ve Tablo 6 ile PV pompa sisteminin, akülü ve aküsüz çıktı verilerinin özetleri gösterilmiştir. Sistemde akü kullanılmaması durumunda, PV panelin güneşten elde edilebileceği maksimum enerjinin neredeyse yarısının israf edilmiş olduğu görülmüştür. Ancak akü kullanılması durumunda, israf edilecek enerji depolanmaktadır ve sistem bu sayede daha iyi optimize edilebilmektedir.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında geliştirilen PV pompa boyutlandırılması için oluşturulan algoritma çalışma kapsamında Manisa ili Salihli ilçesinde 1 hektarlık alanda mısır bitkisi için uygulanmıştır. Dahası, çalışmada oluşturulan algoritma, istenilen bölgeye ve bitkiye uygulanabilmektedir. Hesaplamaların tümü bir dalgıç pompa ve PV panel arasında gerçekleşen bir enerji dengesi kullanılarak gerçekleşmektedir. Sistemde akünün kullanılması neticesinde, PV panel miktarının önemli ölçüde düşürülebildiği hesaplanmıştır. PV panel sayısı düşürülmesi bir avantaj iken, akünün varlığı bir dezavantajdır. Gerçekte, bir fotovoltaik pompa sisteminin kurulabilmesi için, sadece en zor koşulları temel alan bir hesaplamadan ziyade, sistemin ekonomikliğinin daha fazla önem teşkil ettiği söylenebilir. Bu açıdan çalışma içerisine, daha kapsamlı meteorolojik veriler içeren yöntemler, su deposu hesaplamaları, daha kapsamlı sulama suyu ihtiyacı hesaplama yöntemleri ve en önemlisi ekonomik analiz eklenerek algoritma daha hassas ve doğru hale getirilebilir.

## KAYNAKÇA

1. **Abdelhak, B., Abdelhalim, B., Eddine, B. S., Layachi Z., Amor F., Brahami M.** 2019. "Comparative Study on Photovoltaic Water Pumping Systems Driven by Direct Current



- Motor (DCM) and Induction Motor (IM) Optimized with P&O Control”, AIP Conference Proceedings, 2190, p.020002-1-11.
2. **Khatib, T., Mohamed, Sopian, A. K., Mahmoud M.** 2011. “A New Approach for Optimal Sizing of Standalone Photovoltaic Systems”, *International Journal of Photoenergy*, vol. 2012, no. 391213, p.1-7.
  3. **Muhsen, D. H., Khatib, T., Abdulabbas, T. E.** 2018. “Sizing of a Standalone Photovoltaic Water Pumping System Using Hybrid Multi-Criteria Decision Making Methods”, *Solar Energy*, vol. 159 p.1003–1015.
  4. **Allouhi, A., Buker, M.S., El-houari H., Boharb, A. Amine, M. B., Kouksou T., Jamil A.** 2018. “PV Water Pumping Systems for Domestic Uses in Remote Areas: Sizing Process, Simulation and Economic Evaluation”, *Renewable Energy*, vol. 129, no.8, p.1-8.
  5. **Poompavai, T., Kowsalya M.** 2019. “Control and Energy Management Strategies Applied for Solar Photovoltaic and Wind Energy Fed Water Pumping System: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 107 p.108–122.
  6. **Campana, P. A., Li, H., Yan, J.** 2013. “Dynamic Modelling of a PV Pumping System With Special Consideration on Water Demand, *Applied Energy*, vol. 112, p.635-645.
  7. **Kaldellis, J.K., Spyropoulos G.C., Kavadias K.A., Koronaki, I.P.** 2009. “Experimental Validation of Autonomous PV-Based Water Pumping System Optimum sizing”, *Renewable Energy*, vol. 34 p.1106–1113.
  8. **Bakelli, Y., Arab, A. H., Azoui, B.** 2011. “Imal Sizing of Photovoltaic Pumping System With Water Tank Storage Using Lpsp Concept”, *Solar Energy*, vol. 85, p.288–294.
  9. **Yahyaoui, I., Chaabene, M., Tadeo F.** 2013. “An Algorithm for Sizing Photovoltaic Pumping Systems for Tomatoes Irrigation”, *International Conference on Renewable Energy Research and Applications*, Electronic ISBN: 978-1-4799-1464-7.
  10. **Salam, M. A., Aziz A., Al-Waeli, A., Kazem, H. A.** 2013. “Optimal Sizing of Photovoltaic Systems Using HOMER for Sohar, Oman”, *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 3, no.2, p.301-307.
  11. **Ma, T., Yang, H., Lu L., Peng, J.** 2014. “Pumped Storage-Based Standalone Photovoltaic Power Generation System: Modeling and Techno-Economic Optimization”, *Applied Energy*, vol. 137, p.649-659.
  12. **Duffie, J. A., Beckman, W. A.** *Solar Engineering of Thermal Processes*, Fourth Edition, John Wiley and Sons, ISBN 978-0-470-87366-3.
  13. **Habib, M.A., Said, S.A.M., El-Hadidy M. A., Al-Zaharna I.** 1999. “Optimization Procedure of a Hybrid Photovoltaic Wind Energy System”, *Energy*, vol. 24, p.919-929.
  14. **Almarshoud A. F.** 2016. “Sizing of PV Array for Water Pumping Application”, 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, At Munich, Germany.



15. Tarımsal Araştırmalar ve Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Politikalar Genel Müdürlüğü, 2016. “Türkiye’de sulanan bitkilerin bitki su tüketimi rehberi”, Ankara.
16. <https://www.mgm.gov.tr> (Erişim Tarihi 08.04.2020)
17. **Çengel, Y., Cimbala, J.M.** 2012. Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları, Güven yayımları, ISBN: 978-975-6240-18-2.
18. <https://tr.grundfos.com/grundfos-for-engineers/videos-grundfos-product-center.html> (Erişim Tarihi 05.04.2020)
19. **Yahyaoui, I.** 2016. Specifications of photovoltaic pumping systems in agriculture sizing, fuzzy energy management and economic sensitivity analysis, Elsevier inc., ISBN: 978-0-12-812039-2.
20. **Yahyaoui, I., Ammous, M., Tadeo F.** 2015. “Algorithm for Optimum Sizing of a Photovoltaic Water Pumping System”, International Journal of Computer Applications, vol. 111, no. 6, p.21-28.

# Hidrolik Yüksek Basınç Hattı Filtre Gövdesinin Tasarımı, Optimizasyonu, Üretimi ve Test Edilmesi

Samet Tekelioğlu<sup>1</sup>, Safa Eldek<sup>2\*</sup>, Hüseyin Gümüç<sup>3</sup>, Ayfer Sarıgül<sup>4</sup>, Şeyma Ayhan<sup>5</sup>,  
Ali Kahraman<sup>6</sup>, Murat Dilmeç<sup>7</sup>

## ÖZ

Bu çalışmada, hidrolik basınç hattı filtresinin gövdesinin tasarımı ve gövde optimizasyonu ve EN-GJS 400-15 malzemeden döküm yöntemiyle yerli olarak üretimi gerçekleştirilmiştir. Hidrolik filtrenin iç kısmına işletme basıncı olan 45 MPa basınç statik ve dinamik olarak sonlu elemanlar analizinde uygulanmıştır. Gövde kalınlığının malzeme tasarrufu sağlamak amacıyla optimizasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Kalınlık inceltmesi sonunda parçada oluşan maksimum gerilme 154 MPa civarında ve emniyet katsayısı yaklaşık 1,8 olmuştur. Optimize edilmiş gövdenin standarda uygun olarak patlatma, sızdırmazlık, yorulma testlerine tabii tutulmuştur. Sonuç olarak, sonlu elemanlar analizleriyle hidrolik basınç hattı filtre gövdesi optimize edilmiştir ve mevcut muadillerine göre %17 oranında hafif ve daha mukavemetli olarak üretilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Hidrolik basınç hattı filtresi gövdesi, döküm yöntemi, sonlu elemanlar analizi, optimizasyon

## Design, Optimization and Fabrication of Body of Hydraulic High-Pressure Filter and Experimental Validation

### ABSTRACT

In this study, the design and body optimization of the body of the hydraulic pressure line filter and the production of EN-GJS 400-15 material were produced locally. In finite element analysis, the operating pressure of 45 MPa pressure was applied statically and dynamically to the interior of the hydraulic filter. Thick parts of the body were made thinner in order to save material and re-analyses were carried out. As a result of the thinning thickness, the maximum stress on the part is to around 154 MPa and safety factor is 1.8. The high-pressure filter body, which has been designed and produced by casting from EN-GJS 400-15 material, has been subjected to sealing, fatigue and blasting tests in accordance with the standards. Consequently, the newly designed filter body produced locally by casting method is produced both lighter and more durable than the existing counterparts.

**Keywords:** Hydraulic pressure line filter body, casting method, finite element analysis, optimization

\* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 18.06.2020

Kabul/Accepted : 11.09.2020

<sup>1</sup> Mesa Makina Döküm Gıda San. TİC. A.Ş., Konya, samet.tekelioğlu@mesamakina.com.tr  
ORCID: 0000-0002-1432-5557

<sup>2</sup> Mesa Makina Döküm Gıda San. TİC. A.Ş., Konya, safa.eldek@mesamakina.com.tr, ORCID: 0000-0002-9472-0409

<sup>3</sup> Mesa Makina Döküm Gıda San. TİC. A.Ş., Konya, huseyin.gumus@mesamakina.com.tr,  
ORCID: 0000-0002-1752-0358

<sup>4</sup> Mesa Makina Döküm Gıda San. TİC. A.Ş., Konya, ayfer@mesamakina.com.tr, ORCID: 0000-0002-9666-1924

<sup>5</sup> Mesa Makina Döküm Gıda San. TİC. A.Ş., Konya, seyma@mesamakina.com.tr, ORCID: 0000-0001-6853-5405

<sup>6</sup> Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya, akahraman@erbakan.edu.tr, ORCID: 0000-0002-5598-5017

<sup>7</sup> Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya, muratdilmeç@erbakan.edu.tr, ORCID: 0000-0002-5345-9822



## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

High pressure filters are structures that protect hydraulic circuit elements from dirty particles. These filters are usually used after the hydraulic pump because the pressurised oil sent from the pump to the system must be filtered and transmitted to the elements of the hydraulic circuit. Hydraulic filters have many different working conditions, such as working pressure, burst pressure, fatigue strength, differential pressure and sealing. Verification of these working conditions under international standardized tests provides technical superiority and ease of marketing to the product. For this reason, numerical analyses and experimental tests were carried out to verify the operating conditions of the pressure filters.

### Objectives

In this study, analysis and test studies were conducted to verify the working conditions of hydraulic pressure line filters and determine their performance. First, studies on burst pressure were carried out. Burst pressure is an important criterion in hydraulic filter design. The explosion pressure value of the filter head and housing should be designed to be at least three times the working pressure. This guarantees safe operation against possible pressure jams and sudden pressure rises. As part of this study, the burst pressure of pressure line filters was determined by both numerical analysis and experimental tests. Second, the differential pressure tests of the filters specified in the ISO 3968 standard were performed, thus determining the flow characteristics of the product. According to the laws of fluid mechanics, increasing the flow rate of the fluid in the channel increases the resistance applied to the channel walls, as a result, the differential pressure in the system increases.

### Methods

Boundary conditions are defined according to working conditions in analysis. The teeth in which the filter housing is connected to the filter head are considered the fixing zone. According to the theory of pressure vessels, pressure was applied to all areas in the enclosure. Analyses were made with the defined boundary conditions. First, blasting tests were carried out in the hydraulic filter test machine. A prototype filter with optimum wall thickness is installed in the blast cabinet with high protection. Tests were carried out with the help of a hydraulic pressure booster by connecting the test apparatus. The pressure raising rate used in the blasting test is 19.6. The Test was initiated by a computer program connected to PLC system control. The Test machine recorded the data with PLC control system and the blasting values were obtained. Another sample was tested under the ISO 3968 standard. The input and output ports of the hydraulic filter are connected to the system. The differential pressure test system mainly uses a hydraulic pump with a flow rate up to 1000 l/min, a flow meter with a flow rate up to 800 l/min, and a differential pressure sensor with a measurement up to 1 MPa. The maximum flow rate and increase rate are defined by the user. After achieving the desired flow rate, the test was completed and the results were recorded. Fatigue strength testing was performed on a test machine designed in accordance with the ISO 10771-1 standard. Test samples have been installed in the high vibration resistant test section. A pulse generator was used to produce pressure at the desired frequency. The pressure amplitude and pulse frequency are decoded by the system interface. Fatigue strength tests were stopped when the number of cycles was one million. The Test sample was examined for deformation or leakage.

### Results

45 MPa pressure, which is the operating pressure, was applied statically and dynamically to the inside of the hydraulic filter. According to the analysis results, a maximum stress of about 152 MPa was observed in the hydraulic pressure line filter body. For the geometry designed according to this result, the body was found to be about 1.8 times safe. The thick parts of the body were made thinner and re-analyzed to save material. At the end of thickness thinning, the maximum stress on the part increased to around 154 MPa, and the part was 1.8 times safe. The burst pressure of the filter body was also obtained as 141 MPa by analysis. An explosion test of the optimized body was performed in accordance with the standard, and the filter body exploded at a pressure of 158 MPa and from the part specified in the analyses. As a result, the hydraulic pressure line filter body was optimized by finite element analysis and a lightweight design was made up of 17% compared to its existing counterparts. The high-pressure filter body produced by casting from EN-GJS 400-15 material was subjected to fatigue, differential pressure and blasting tests in accordance with the standards. In the fatigue test, the test was performed according to the desired period times in accordance with ISO 10771-1 standards. In tests conducted under ISO 3968, a difference pressure of 0.16 MPa with a flow rate of 63 l/min was determined.

### Discussion

The filter element used in the filters ensures optimum oil cleaning of the system. Because glass fiber materials consisting of small pores on the filter element perform the main filtering task. The ability of the filter element to actively filter depends on the good design of the filter housing and filter head. Because the external design of the system that can withstand the operating and bursting pressure, the internal structure that will determine the differential pressure and form the flow characteristic, and the selection of materials that will prevent deformation with time by providing fatigue resistance are the most important parameters that affect filtering. At the end of the tests, it was observed that the high-pressure filter body which was designed and produced with domestic facilities by casting method was produced in accordance with international standards. As a result, the filter body is built with lighter, performance and strength than its existing counterparts. New material and geometry studies and the design of lighter filters that create little differential pressure at high flow values that are resistant to operating pressure will take these studies to further points.



## 1. GİRİŞ

Yüksek basınç filtreleri hidrolik devre elemanlarını kirli partiküllerden koruyan yapılar. Kirli yağ filtrelenmezse, büyük partiküllerin hidrolik devre elemanlarına zarar vermesi kaçınılmazdır. Makinaların güvenli bir şekilde çalışabilmesi için hidrolik filtre elemanlarına giden yağın temiz olması gerekir. Bundan dolayı hidrolik devrelerde farklı çeşitte filtreler kullanılmaktadır. Bunlara, geri dönüş filtresi, orta basınç filtresi, düşük basınç filtresi, tank filtresi ve yüksek basınç filtresi örnek verilebilir. Yüksek basınç filtreleri, sistemde pompadan sonra gelerek, pompadan çıkan yağın sisteme dağıtılmadan filtrelenmesi için kullanılır. Pompadan yüksek basınçla çıkan yağın filtrelenerek hidrolik devre elemanlarına iletimini sağlar [1].

Bir hidrolik sistemde yağ ne kadar temiz ise ve çevresel koşullardan (katı, sıvı, gaz ve bunların karışımından kaynaklanan kirlenme) ne kadar iyi korunursa, sistem o kadar verimli, etkili ve performanslı çalıştırılabilir. Hidrolik sistemlerdeki yağ, hidrolik basınç filtresi ile temizlenmektedir. Bu ürünlerin ithalatı yüksektir ve endüstriyel hidrolik, mobil hidrolik, gemi yapımı hidroliği, açık deniz hidroliği, uçak hidroliği, çelik su yapıları ve özel uygulamalar gibi birçok sektörde kullanılmaktadır [2]. Hidrolik basınç hattı filtreleri ülkemizde henüz üretimi yoktur ve filtre gövdeleri sıvama ve direk ekstrüzyon yöntemiyle üretilmektedir.

Filtre giriş portundan giren yüksek basınçlı hidrolik yağ gövde içine doğru ilerler ve yağ filtre elemanından geçerek içerisindeki büyük partiküllerin filtrelenmesi sağlar. Filtre elemanları ağ yapılı tel elemanlar olabildiği gibi fiberglas malzemeden üretilen kâğıt elemanlar da olabilmektedir. Filtre elemanlarının gözenek boyutları küçük olduğu zaman yüksek oranda ve büyük olduğu zaman ise düşük oranda bir filtreleme sağlar. Gözenek boyutları 3 ila 25 mikron arasında değişebilmektedir [3].

Yüksek basınçlı filtrelerde filtreleme dıştan içe doğru yapılmaktadır. Yüksek basınca maruz kalan bu yapıların yüksek dayanımda olması gerekmektedir. Bu nedenle yüksek basınç filtrelerinde güvenlik çok önemlidir. Filtrelerin üretim yöntemi ve üretildiği malzemenin cinsi bu filtrelerdeki basınç dayanımını değiştirmektedir. Derin çekme, soğuk haddeleme, döküm gibi üretim yöntemleri ve gri dökme demir, paslanmaz çelik, yumuşak dökme demir gibi malzeme kriterler filtreleme performansını da etkilemektedir.

Yüksek basınca maruz kalan filtre gövdesinin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak mekanik olarak analizlerinin yapılması tasarımın güçlendirilmesi açısından önem taşımaktadır [1].

Momin ve arkadaşları [4], denizcilik uygulamalarında yüksek basınç filtrelerinin tasarımı ve analizini yapmışlardır. Denizcilik uygulamalarında tuzlu ortamlarda sürekli çalışmak için yüksek güvenilirlikle filtre gereklidir. Filtre yüksek tuzluluk, yüksek ve düşük çevrim sıcaklığı, titreşim, ivmelenme ve şok gibi sert çevre koşullarına karşı





güvenilirliği sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Denizcilik uygulamalarında kullanılan modern filtrelerin birçoğunda yüksek dayanımlı fiberglastan yapılan tek kullanımlık filtre elemanları kullanılmaktadır. Fiberglas filtrelerin filtreleme hassasiyetleri 5-25 mikron arasında değişmektedir. Filtre elemanı merkez tñpünün ve filtre gövdesinin FEM analizleri için ABAQUS programını kullanmışlardır. Filtre elemanı merkez tñpü malzemesi paslanmaz AISI: 316L çeliğidir. Yoğunluğu 7900 kg/m<sup>3</sup>, elastisite modñlü 200000 N/mm<sup>2</sup>, poisson oranı 0.3 ve (0.2%) akma dayanımı 540 N/mm<sup>2</sup>'dir. Filtre başlığı ve filtre gövdesi gerekli basınç değerlerini karşılamak için tasarlanmıştır. Bu basınç değerleri; çalışma basıncı: 20.5 MPa, basınç dayanımı 30.7 MPa, patlama basıncı 41 MPa'dır. Filtre gri dökme demirden yapılmıştır ve denizde oluşabilecek korozyonu önlemek amacıyla özel kaplayıcıyla kaplanmıştır. Analiz sınır şartları oluşturulmuştur, sabit nokta olarak filtre başlığına monte edildiği yer olarak belirlenmiştir. Analizler sonucunda, filtre gövdesinin maksimum gerilme dağılımı 239.3 N/mm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir.

Bypass valfinin tasarımı giriş ve çıkış portu arasındaki basınç farkının 0.4 MPa'dan fazla olmamasını gerektirir. Bu set basıncı valfin açılma basıncı olarak bilinir. Eğer giriş ve çıkış portu arasındaki fark basıncı 0.4 MPa'ı geçerse, yayın sıkışmasını sağlayan yeterli kuvvet oluşarak supap geriye doğru itilir ve akışın geçişine izin verir.

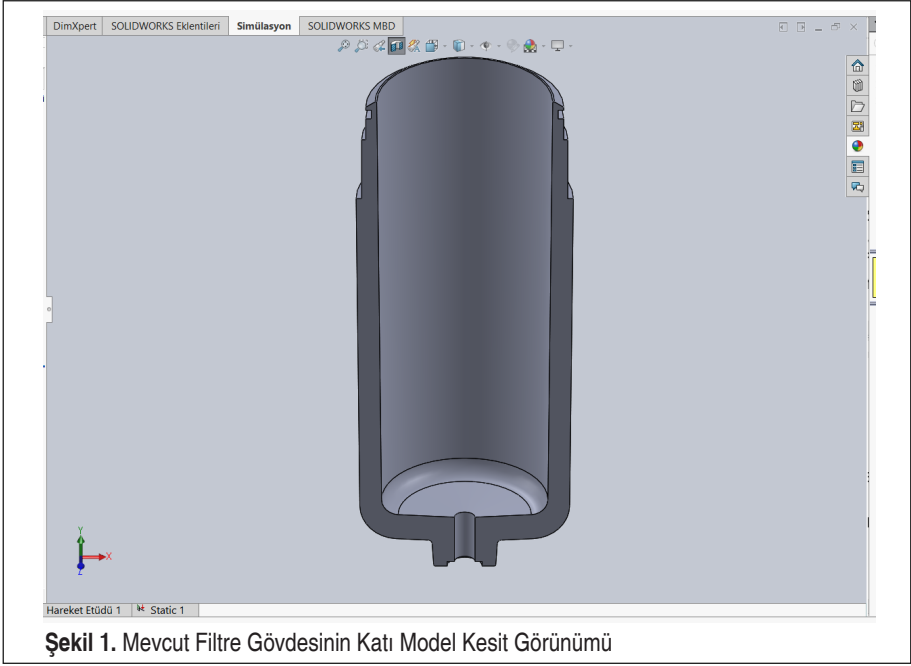
Deniz hidrolik sistemi için yüksek basınçlı fiberglas medya temizlenebilir filtre gereklidir. Hidrolik sistem, basınç dñřüřüne, kritik radyal basınca ve basınç yükü faktörlerine göre tasarlanmıştır. FEM analizleri patlama basıncı altında gerilmenin derecesini belirlemek için uygulanmıştır. Tahmin edilen kritik radyal basıncın, filtrenin çökme basıncı derecesinde iyi durumda olduğu bulunmuştur. Maksimum çalışma basıncı nedeniyle gözlenen gerilmeler filtre elemanının akma dayanımı dahilinde bulunmuştur [4].

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

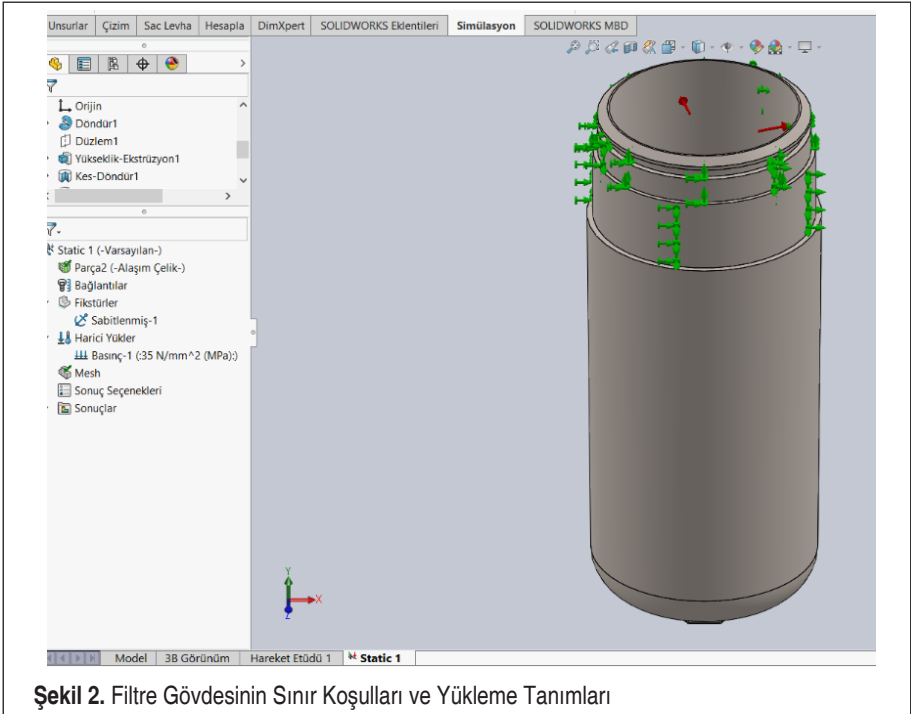
### 2.1. Gövdenin Statik ve Dinamik Analizi

Hidrolik basınç hattı filtresinin gövdesinin statik ve dinamik sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, filtre gövdesi Solidworks katı model programı kullanılarak mevcut filtre gövdelerine uygun olarak tasarlanmıştır (şekil 1). Tasarlanan filtre gövdesinin statik ve dinamik olarak sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır.

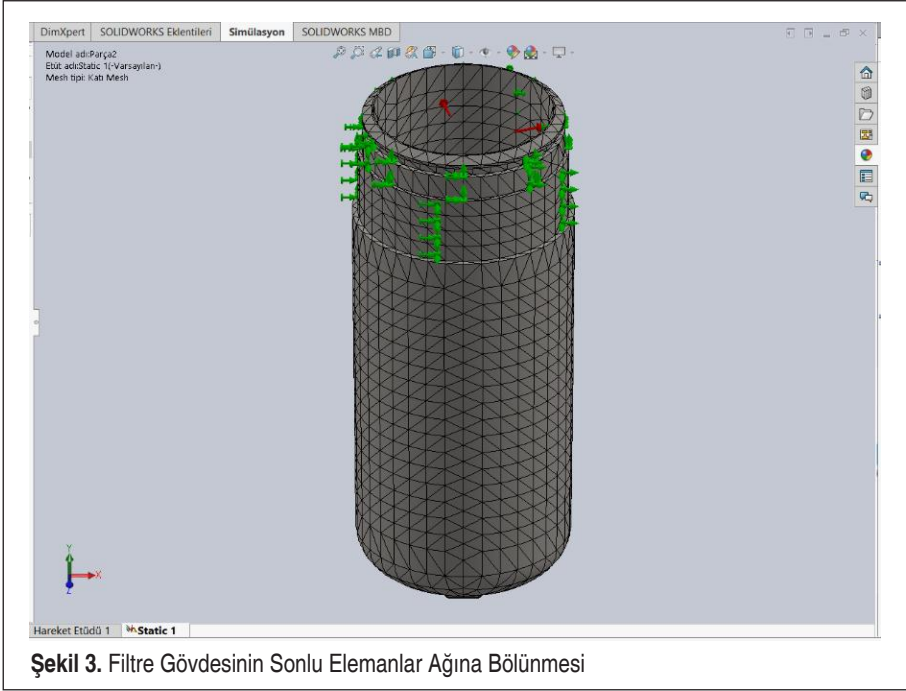
İlk olarak filtre gövdesinin malzemesi EN-GJS 400-15 olarak seçilmiştir. Sonra filtre gövdesinin sınır koşulları tanımlanmıştır. Filtre başlığına montaj yapıldığı kısım sabit olarak tanımlanmıştır. Filtre gövdesi içerisine yüksek basınç hattı filtrelerinin işletme basıncı olan yaklaşık 45 MPa statik basınç gövdenin tamamına uygulanmıştır (şekil 2). Sonra filtre gövdesi sonlu elemanlar ağına bölünmüştür (şekil 3).



Şekil 1. Mevcut Filtre Gövdesinin Katı Model Kesit Görünümü



Şekil 2. Filtre Gövdesinin Sınır Koşulları ve Yükleme Tanımları



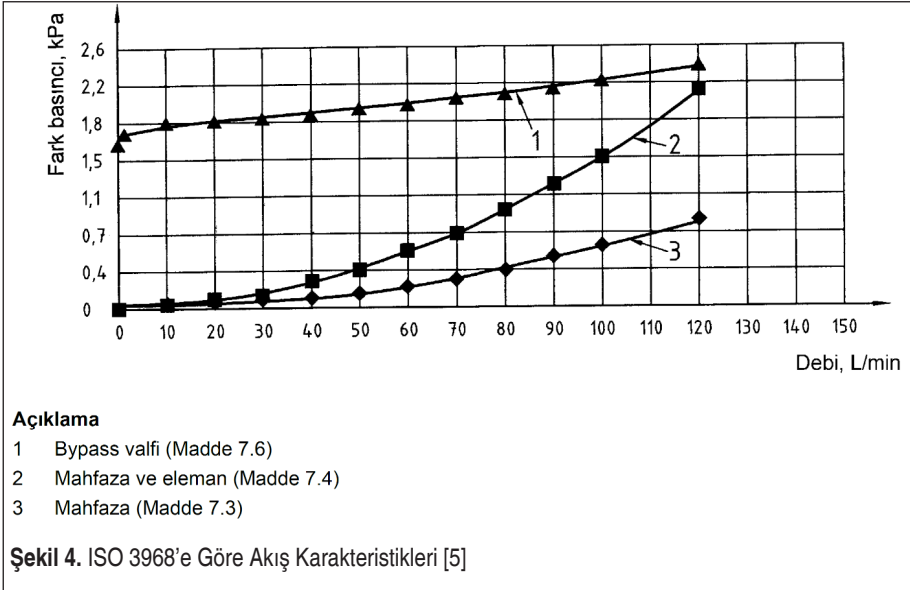
Şekil 3. Filtre Gövdesinin Sonlu Elemanlar Ağına Bölünmesi

## 2.2. Filtre Gövdesine Uygulanan Testler

Kavramsal araştırmalar sonucunda çalışma koşulları ve kapasiteleri sektörlere göre farklılık gösteren hidrolik sistemlerde kullanılan basınç hattı filtreleri, endüstride talep edilen kapasiteleri kapsayacak şekilde tasarlanmıştır. Patlama basıncı, yorulma basıncı, akış karakteristikleri, sızıntı testi ve bypass valfi açma/kapama basıncı testlerinden oluşan çalışma koşullarının uluslararası standartlara göre test edilmesi, filtrelerin performansının tespit edilmesi amacı ile önem taşımaktadır.

Hidrolik sistemlerin basınç hatlarında yüksek basınç düşümü istenmeyen bir durumdur ve minimum basınç düşümü göz önüne alınarak sistemler tasarlanmaktadır. Bu nedenle basınç hattında oluşan basınç kayıplarının da minimum düzeyde olması istenmektedir. Basınç hatlarında genel olarak basınç kaybı oluşturan iki hidrolik ekipman tipi bulunmaktadır. Bunlar hidrolik valfler ve hidrolik filtrelerdir. Hidrolik filtreler boyutsal ve işlevsel olarak basınç hattındaki basıncın kaybolmasına neden olurlar. Bu nedenle filtrelerin akış karakteristiklerinin uluslararası standart testlere göre belirlenmesi gerekmektedir. Testler ISO 3968 kapsamında yapılmakta ve debiyeye karşı oluşan fark basıncı değerlendirilmektedir [5]. Test sonuçları standart rapor şablonuna göre hazırlanmakta ve Şekil 4'deki gibi grafiksel olarak incelenmektedir.

ISO 3968 standardı [5] kapsamında hidrolik basınç hattı filtrelerinde kullanılan bypass

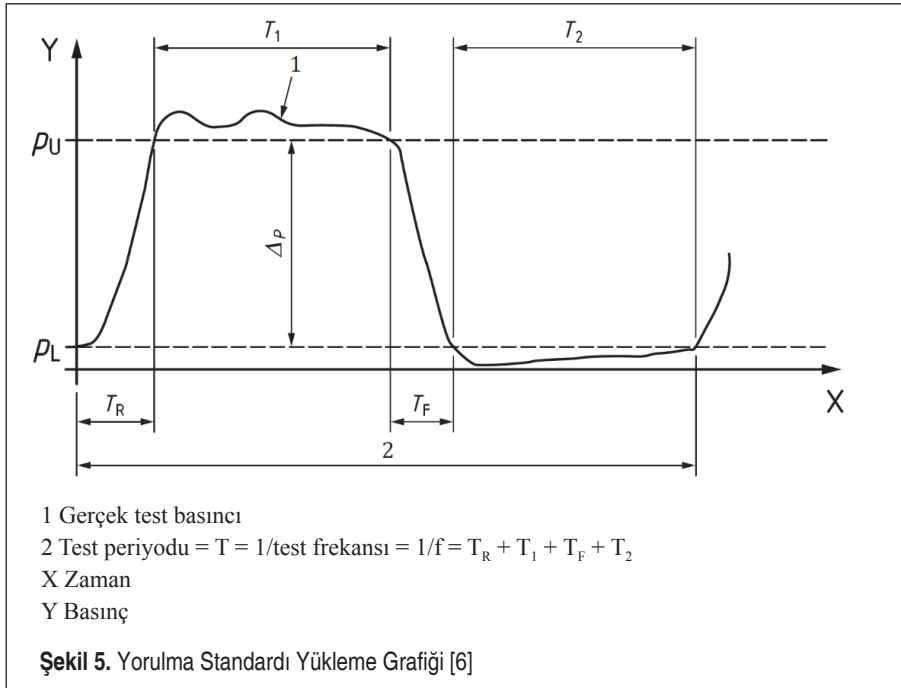


valflerinin açma ve kapama basınçları tayin edilmektedir. Bypass valfinin açma ve kapama basıncı standartta belirtilen ve test sırasında tanımlanan filtre beyan debisine göre ayarlanmakta ve kirli filtre elemanı ile test edilerek bypass valfinin akış karakteristiği belirlenmektedir. Açma basıncına ulaşan bypass valfinin açıldıktan sonra fark basıncını belirli bir oranda tutması beklenmektedir.

Sızıntı testleri hidrolik filtre üzerinde kullanılan sızdırmazlık elemanlarının filtre ile beraber çalışma performansını belirlemek için yapılmaktadır. Hatalı üretim ya da hatalı montaj sebebiyle oluşabilecek sızıntı problemlerinin tespit edilebilmesini sağlamaktadır. Filtrenin giriş kısmından bağlantı verilir ve diğer bütün çıkışları kapatılarak filtre içerisine yağ gönderilir. Test sırasında sızıntı debimetresinden alınan veriler kaydedilir ve raporlanır.

Hidrolik sistemlerde çalışma koşullarından kaynaklı anlık basınç yükselmeleri yaşanabilmektedir. Anlık basınç yükselmeleri sistem ve sistem ekipmanlarına zarar verebileceği gibi hidrolik filtreye de zarar verebilir ve yıkıcı etkiler yaratabilir. Çalışma koşullarına bağlı olarak ani basınç yükselmesinin değeri sistem içerisinde tam olarak bilinmemektedir. Bu nedenle hidrolik filtrelerin patlama basınç değerleri sistem sağlığı için önem arz etmektedir. Patlama basıncı, filtrenin çalışma basıncının en az 3 katı olmak koşulu ile tanımlanabilir ve bu sayede ani basınç yükselmelerinden dolayı kaynaklanacak zararların önüne geçilmiş olur. Belirlenen bu emniyet katsayısı çalışma koşullarına göre hidrolik sistemlerde oluşan maksimum ani basınç yükselme katsayısı olarak değerlendirilebilir.

Basınç altında çalışan hidrolik filtrelerin ömür performansları hidrolik sistemlerin çalışma koşullarına göre tasarlanan basınç yükleme durumlarına bağlıdır. Basınç yükleme koşulları hidrolik sistemin entegre edildiği makinenin kullanım amacına hizmet edecek şekilde değişkenlik gösterebilmektedir. Örneğin; bir abkant presin kapasitesi 2000 parça/gün ise hidrolik filtre günlük 2000 basınç tekrarı altında kalacaktır ya da bir enjeksiyon makinesinin günlük üretim kapasitesi 50000 parça ise hidrolik filtre 50000 basınç tekrarı altında çalışacaktır. Hidrolik filtrelerin değişken olan yükleme koşullarına uygunluğunun belirlenebilmesi için ISO 10771-1 standardına [6] göre testler yapılmaktadır. Standart kapsamında yorulma testleri  $10^5$ - $10^7$  çevrim arasında değişkenlik göstermekte ve uygulanan test basıncının 1 çevrimi (0'dan işletme basıncına çıktığı ve tekrar 0'a indiği zaman aralığı) için gereken periyod süresi verilmiştir. Test tamamlandığında ve belirlenen çevrim sayısına ulaşıldığında hidrolik filtrenin basınç gören yüzeyleri görsel olarak ya da gerektiğinde mikroskopik ortamda incelenmekte ve deformasyon kontrolleri yapılmaktadır. Standartta istenilen test grafiği Şekil 5'te verilmiştir.



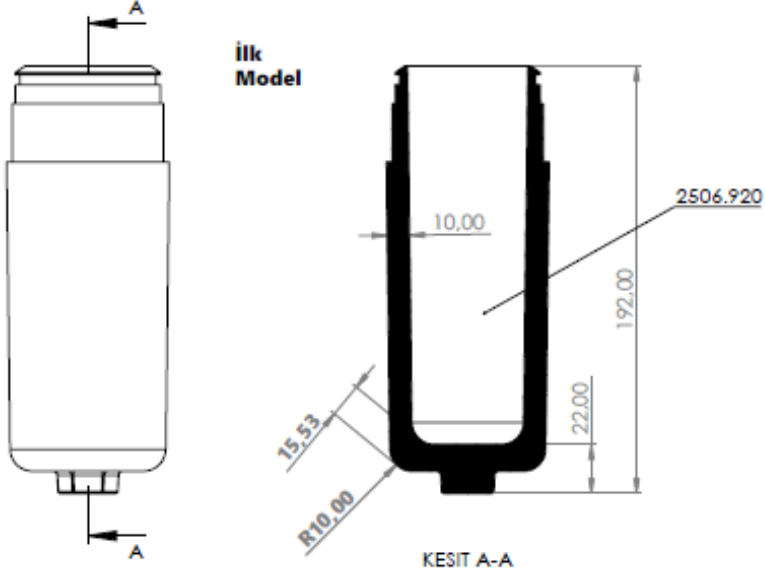
### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1 Filtre Gövdesi Statik ve Dinamik Analiz Sonuçları

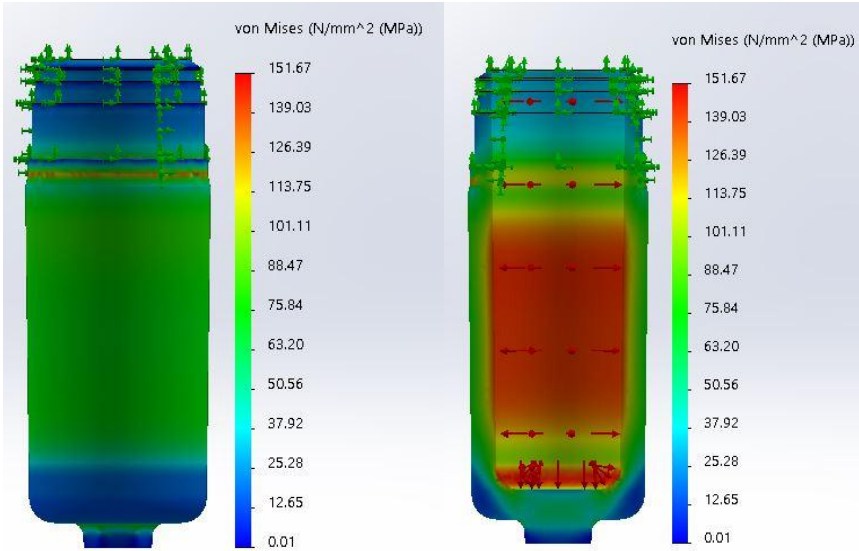
Filtre gövdesinin tasarımı ilk olarak Şekil 6'daki gibi yapılmıştır. Aşağıdaki şekiller-



de görüldüğü gibi bir filtre gövdesi tasarımı yapılmıştır. Bu modelin 45 MPa altında statik analizi yapılarak yan cidarlarda maksimum gerilmenin meydana geldiği ve bu gerilme değerinin 151 MPa olduğu Şekil 7’de görülmektedir.



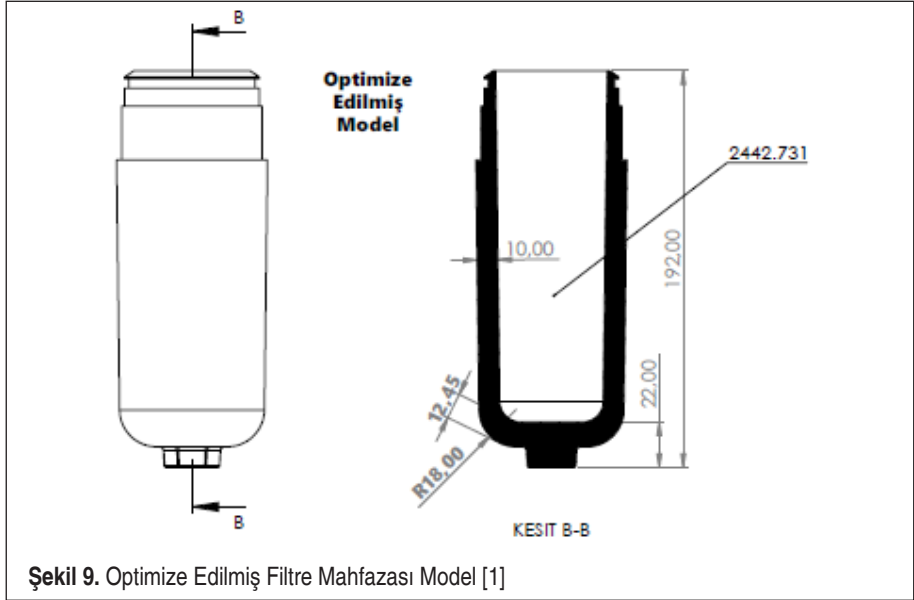
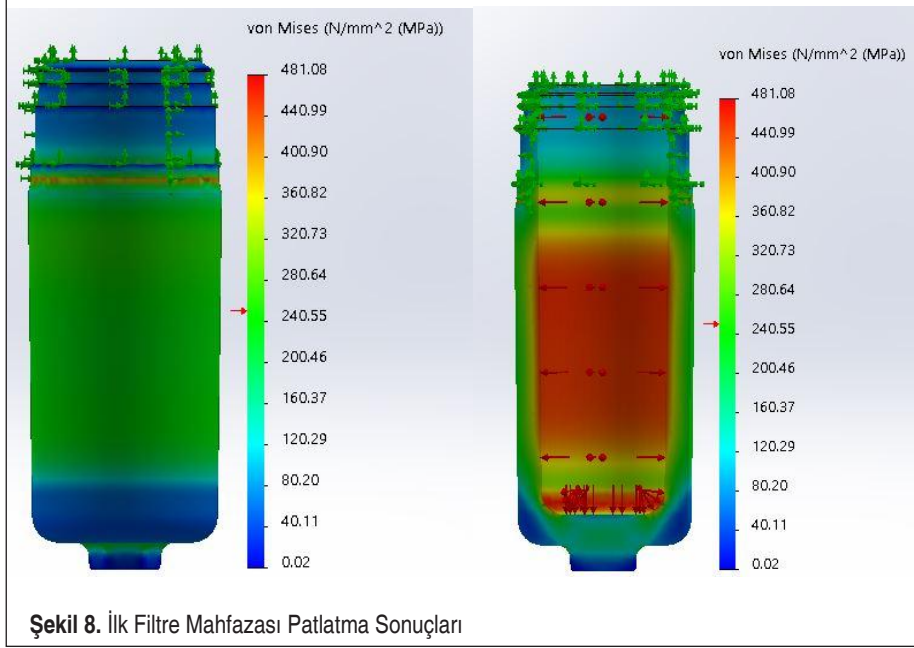
Şekil 6. İlk Filtre Mahfazası Modeli



Şekil 7. LK Filtre Mahfazası Gerilme Sonuçları

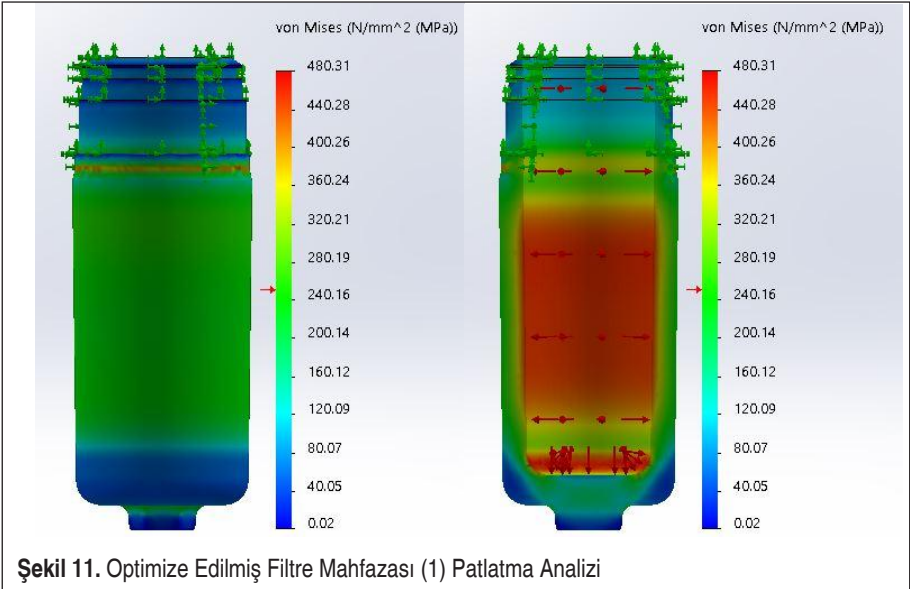
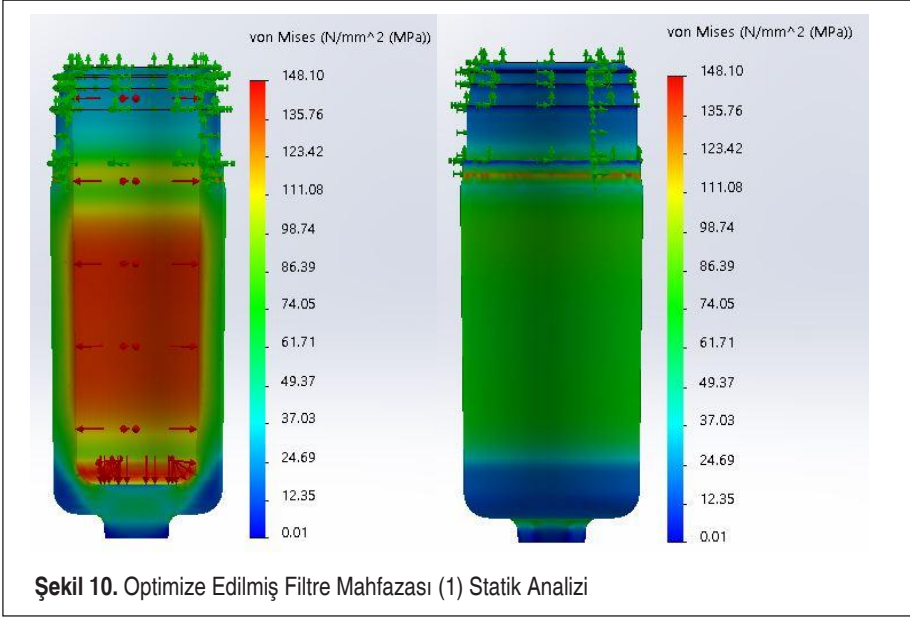


Aynı zamanda Şekil 6'daki modelin Şekil 8'de patlatma analiz sonucu verilmiştir. 142,5 MPa basınç altında bu modelin patlaması ön görülmektedir.

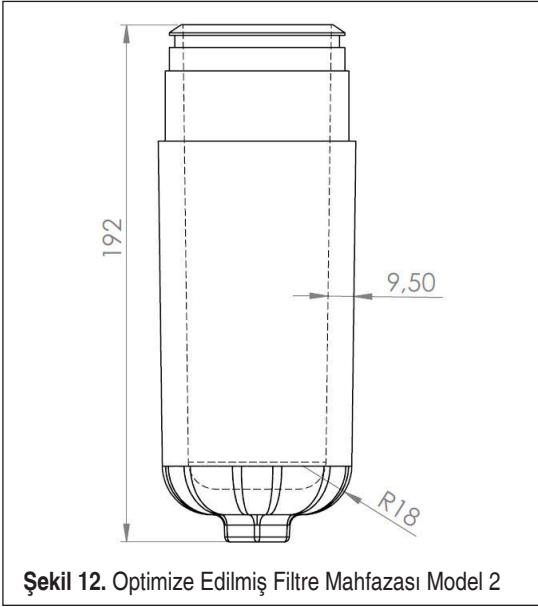




Mahfazanın dış kısmındaki alt radyusu 10mm'den 18mm'ye Şekil-9'daki gibi büyütülerek analiz çalışması tekrarlanmıştır. 45 MPa basınç değerinde statik analiz tekrarlanmış ve gerilme değerinin 148 MPa olduğu Şekil 10'da verilmiştir. Bu maksimum gerilmelerin yan cidarın alt kısımlarında olduğu gözlemlenmiştir.







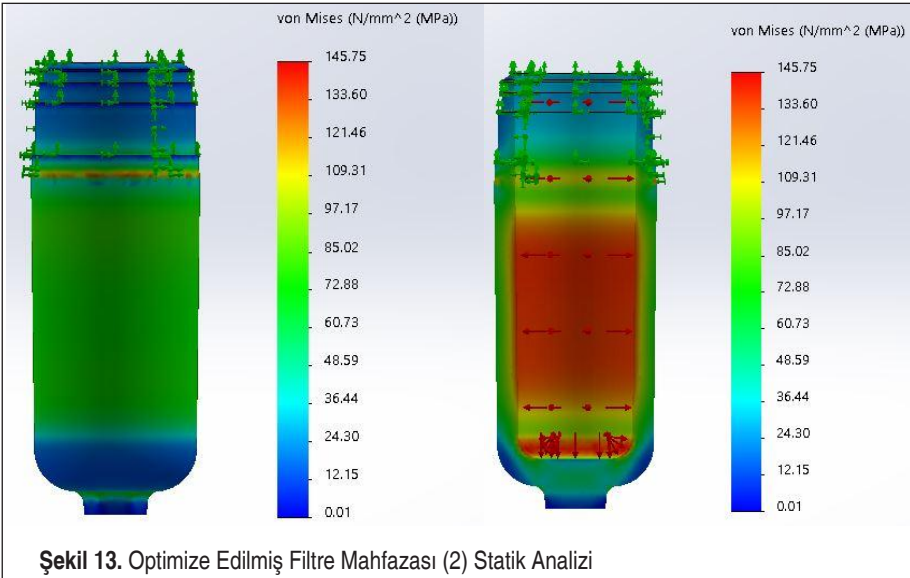
Şekil 12. Optimize Edilmiş Filtre Mahfazası Model 2

Optimizasyondan önceki patlatma basıncı 142,5 MPa iken optimizasyon sonrası patlatma basıncı Şekil 11’deki gibi 146 MPa değerine yükselmiştir.

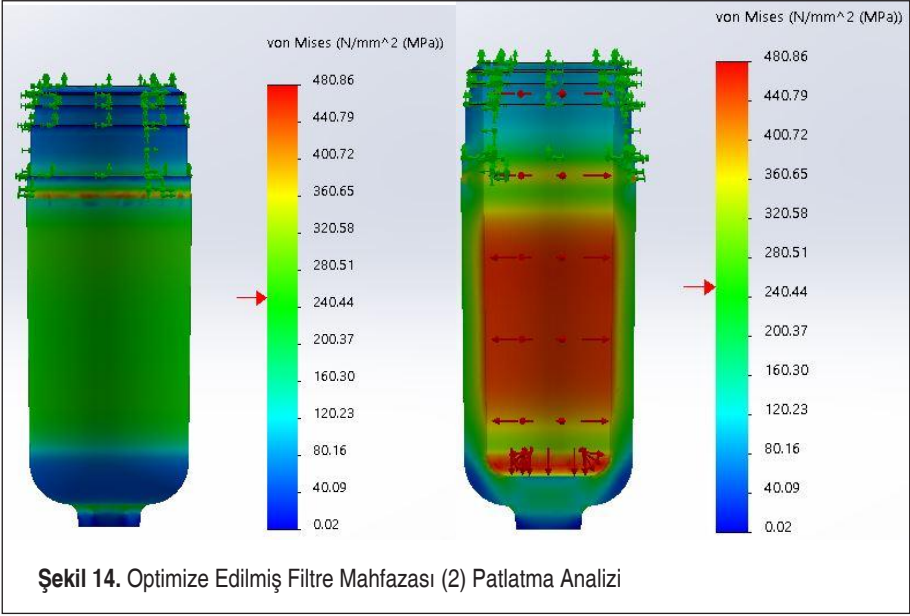
Bir diğer optimizasyon çalışması ise Şekil 12’de görüleceği üzere bir önceki radyus değişikliğinin sabit kalması sağlanarak cidar et kalınlığının 0.5 mm azaltılması ile gerçekteşirilmişdir. Bu çalışma sonucunda mahfaza üzerinde oluşan maksimum gerilmenin mahfaza yüzeyine dağıldığı tespit edilmiştir. Şekil 13 incelendiğinde 45 MPa statik test basıncı yan cidarlarda 146 MPa gerilme oluşturmuştur.

Gerilmelerin cidara yayılması sonucu tahmin edilen patlatma basıncı Şekil-14’teki gibi 147 MPa değerine yükselmiştir.

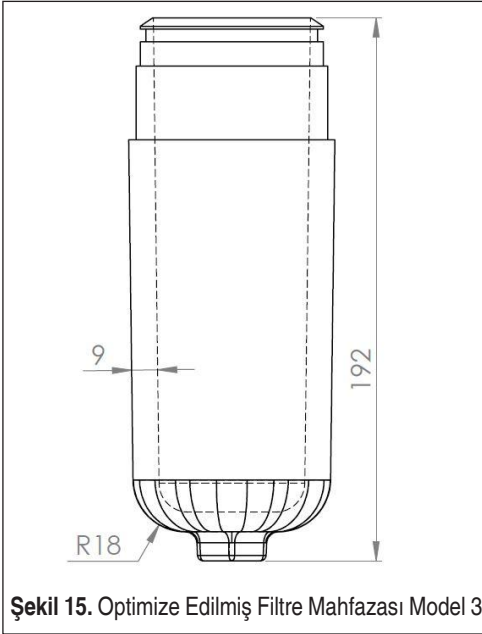
Şekil 15’teki model cidar et kalınlığının 1 mm azaltılması ile oluşturulmuştur. Bu



Şekil 13. Optimize Edilmiş Filtre Mahfazası (2) Statik Analizi

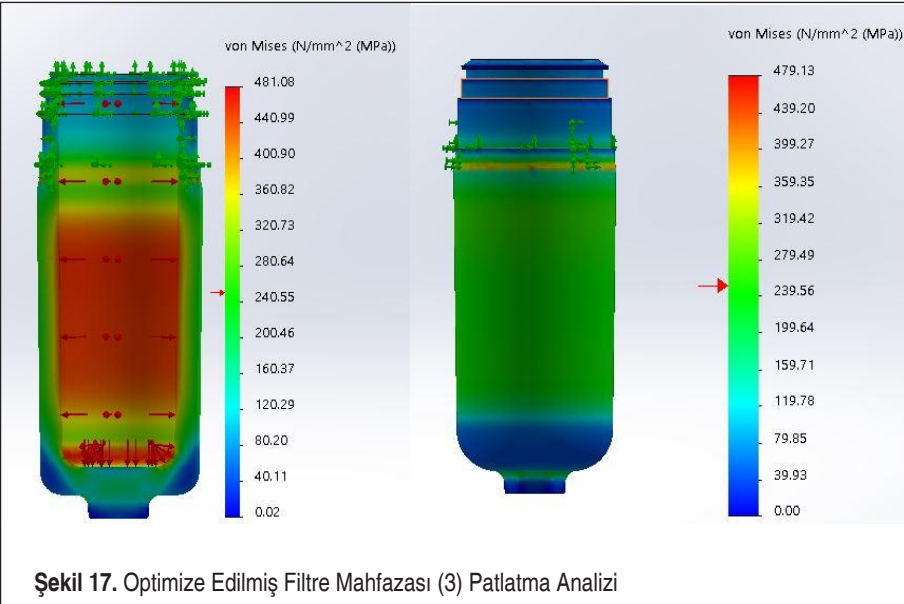
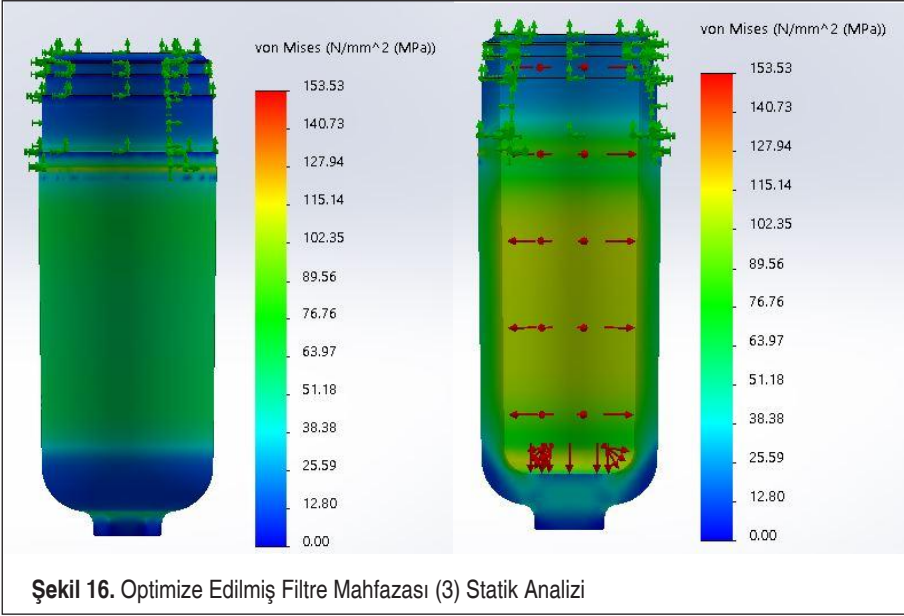


çalışma sonucunda ise mahfazanın 45 MPa altındaki statik basınç altındaki gerilmesi Şekil 16’da 153,5 MPa olarak tespit edilmiştir.

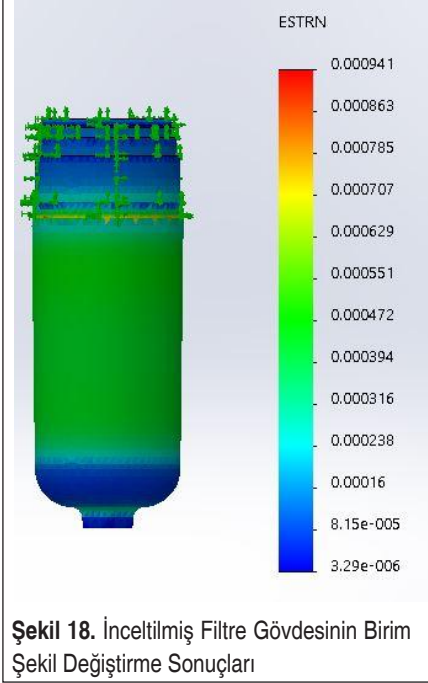


Analizler ile hesaplanan patlama basıncı Şekil 17’deki gibi 141 MPa değerine gerilemiştir. Patlama basıncı literatürde ve muadil ürünlerde görüldüğü üzere çalışma basıncının 3 katı (135 MPa) sınır kabul edilmiştir. Analizler sonucu ideal optimizasyon çalışması Şekil 15’te verilen cidarda kalınlığı 1,00 mm azaltılan ve mahfaza alt radyusu 10mm’den 18mm’e çıkarılan model olduğu tespit edilmiştir.

Analiz sonuçlarına göre 151,5 MPa maksimum gerilme oluşmuştur. Filtre gövdesinde inceltmeler yapılarak, gövde malzemesini azaltmaya yönelik yeni bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Optimizasyon çalışması sonucunda ise maksimum gerilmenin

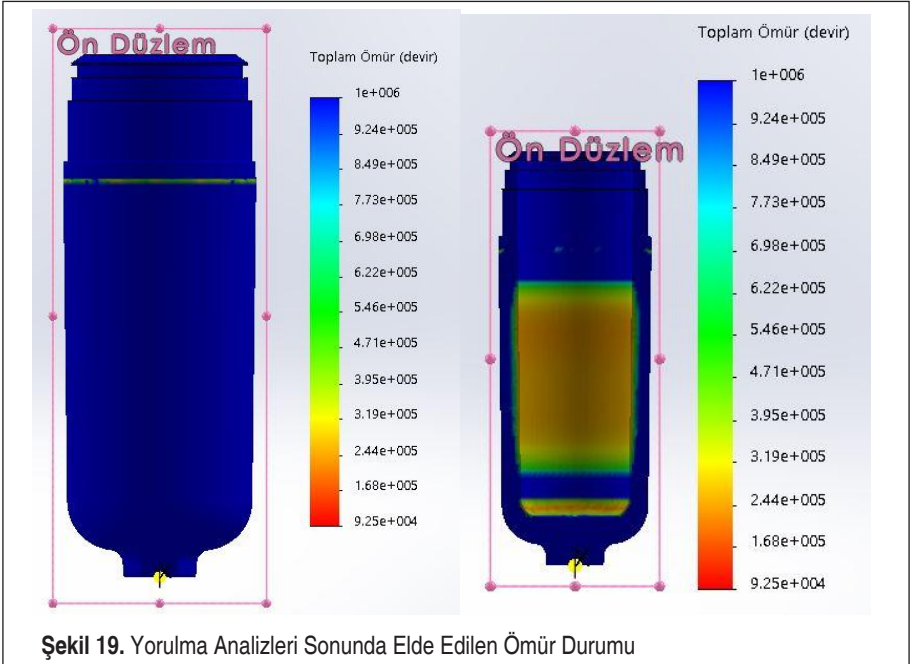


153,5 MPa olduğu gözlenmiştir. Patlama analizi yardımıyla filtre gövdesinin maksimum patlama basıncı değeri elde edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre gövdenin patlama basıncı 141 MPa bulunmuştur. Ömür analizi yapılan gövdenin ömrü hesaplanmıştır ve analiz sonuçlarından sonsuz ömür elde edilmiştir. Patlama testinin gerçekte



standartlara uygun olarak yapılan test sonuçlarına göre gövde 150 MPa basınçta patlamıştır ve gövdenin patlama yerinin yapılan analiz sonuçlarıyla örtüştüğü gözlemlenmiştir. EN-GJS 400-15 malzemeden döküm olarak üretilen filtrenin uluslararası standartlara uygun olarak testleri gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen analizlere göre filtre gövdesinde maksimum 150 MPa civarında gerilme oluşmaktadır. EN-GJS 400-15 malzemenin akma mukavemeti 270 MPa olduğundan, gövdenin emniyet katsayısı 1,8 kadardır. Yapılan gövde geometrik iyileştirmesinde, özellikle gerilmenin düşük olduğu alt köşe radyusleri inceltirilmiştir. Yapılan revizyona göre sonlu elemanlar analizleri tekrar gerçekleştirilmiştir. Gövdesi inceltirilmiş yeni analiz sonuçları Şekil 18’de verilmiştir.





**Tablo 1.** 63 lt/dk Kapasiteli Filtre Muhafazası Optimizasyonu

Özellik	İlk Model	Optimize Edilmiş Model	Optimize edilmiş ve et kalınlığı 0.5 mm azalmış	Optimize edilmiş ve et kalınlığı 1 mm azalmış
Taban radyusu (mm)	R10	R18	R18	R18
İki radyus arasındaki ölçü (mm)	15,53	12,45	12,45	12,45
Ağırlık (gr)	2507	2443	2227	2018
Statik Analiz-Maksimum Gerilme (45 MPa basınç altında) (MPa)	152	148	146	154
Patlatma Akışkan Basıncı (MPa)	143	146	147	141

Bu durumda gövdede maksimum 153,5 MPa civarında gerilme oluşmuştur ve emniyet katsayısı 1,75 kadar olmuştur. Bu elde edilen emniyet katsayısı değeri de kabul edilebilir seviyededir.

Filtre gövdesinin aynı zamanda dinamik yükleme analizleri de gerçekleştirilmiştir. Dinamik yüklemde 0 ila 45 MPa basınç değişken olarak filtre gövdesi içerisine standarta belirttiğiği şekilde uygulanmıştır. Elbette 45 MPa basınç değerinde parçada oluşan gerilme dağılımı değerleri statik durumdaki gerilme ile aynı olacaktır. Elde edilen sonuçlara göre filtre gövdesinin tamamının sonsuz ömürde olduğu görülmüştür (Şekil 19).

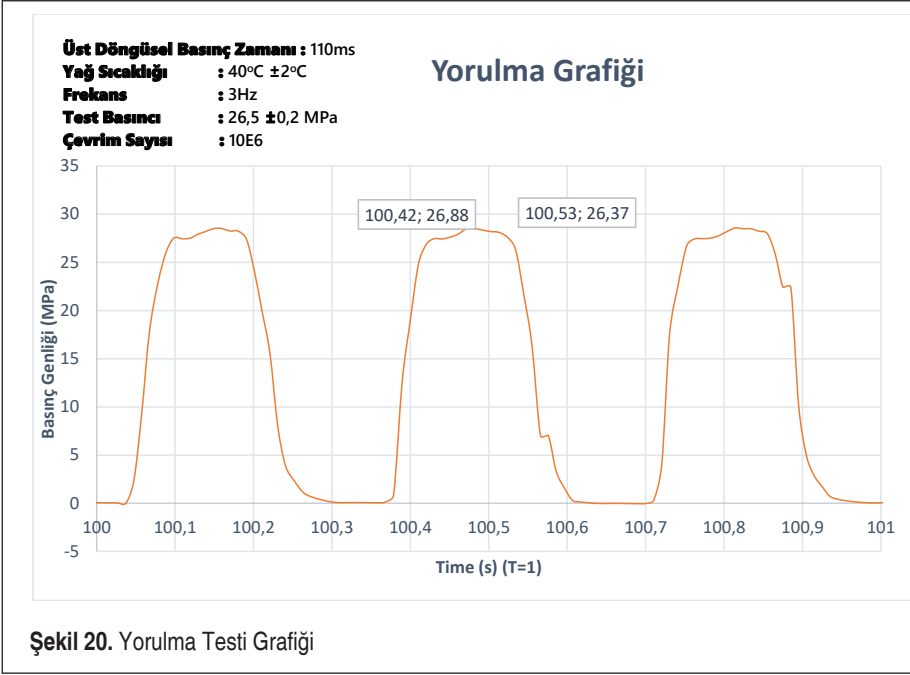
Yapılan sonlu elemanlar analizi ve testler sonucunda 63 lt/dk kapasiteli filtre muhafazası için gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları Tablo 1’de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, optimize edilmiş filtre gövdesindeki maksimum gerilme değeri hemen hemen değişmemesine rağmen, filtre gövdesinin ilk modele göre ağırlığının %24 oranında daha hafif olduğu görülmektedir.

## 3.2 Filtre Gövdesi Standart Test Sonuçları

### 3.2.1 Yorulma Testi

Mesa Makina’nın tasarlayıp üretmiş olduğu hidrolik filtre test makinasında yorulma testi yapılmıştır. Yorulma testinde ISO 10771-1 standardında belirtilen koşullarda çevrim uygulanmıştır. Makineden alınan yorulma grafiği Şekil 20’de verilmiştir.

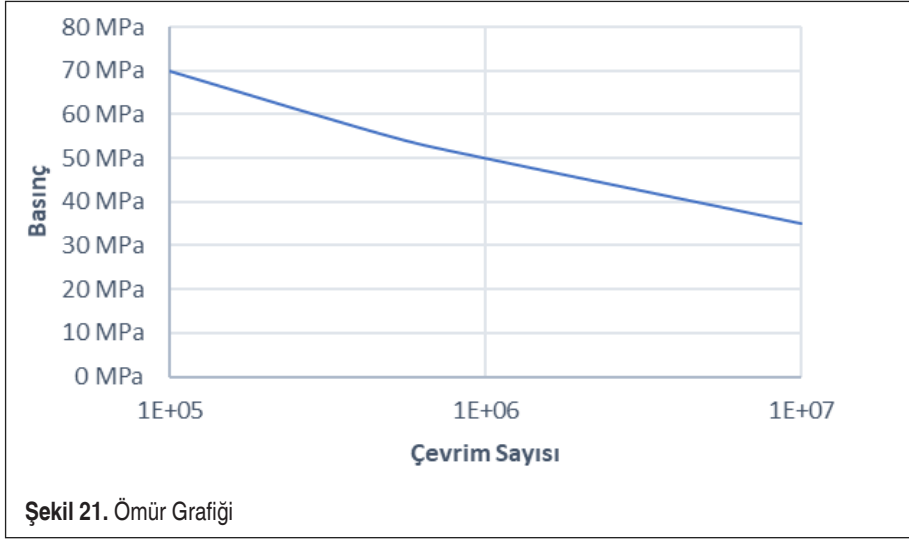
ISO 10771-1 standardında verilen frekans, üst döngüsel basınç zamanı, çevrim sa-



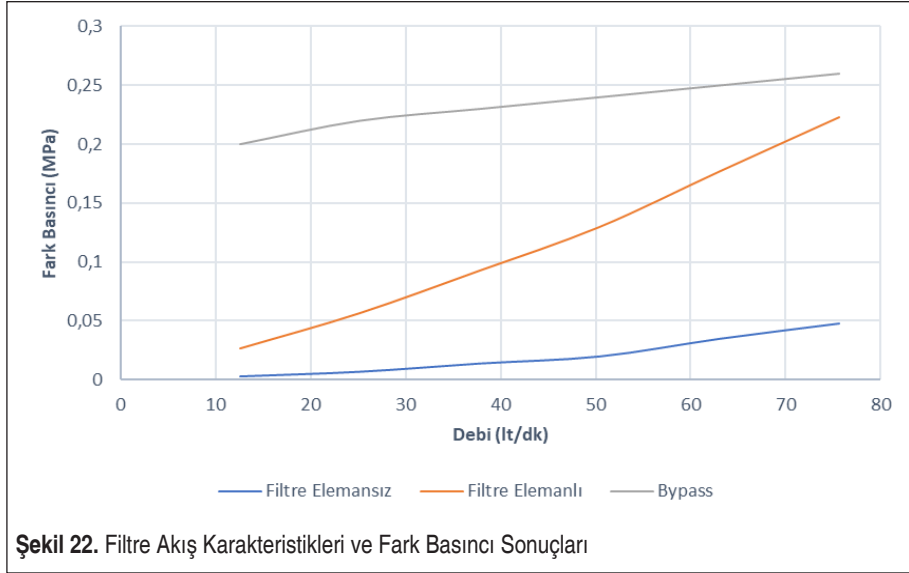
yıları vb. özellikler göz önüne alınarak yapılan testlerde, standart istemlerine uygun bir çevrim elde edilebilmiştir. ISO 10771-1 standardında belirtilen  $10^5$  çevrim ile  $10^7$  çevrim arasında yorulma çevrimi tanımlanmalıdır. Mesa Makina bu testleri  $10^6$  çevrimde gerçekleştirmiştir ve herhangi bir deforme gözlemlenmemiştir. Yapılan teorik hesaplamalar ve analiz sonuçları örtüşmüştür. Yapılan hesaplamalar ve analizlerden çıkan ömür grafiği Şekil 21’de verilmiştir.

### 3.2.2 Geçirgenlik Testi

Mesa Makina’nın tasarlayıp üretmiş olduğu hidrolik filtre test makinasında geçirgenlik testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler ISO 3968 standardının belirtmiş olduğu koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Testler sırasında öncelikle sistemin fark basıncı testi yapılmıştır. Sistemin fark basıncı testlerde düzeltme faktörü olarak uygulanmıştır. Sistemin fark basıncı testinde sonra bypass valfi körlenerek ve filtre mahfazasının geçirgenlik testi yapılarak mahfazanın karakteristiği bulunmuştur. Daha sonra filtre elemanı ve mahfaza montajı gerçekleştirildikten sonra geçirgenlik testi yaparak filtre elemanlı filtre karakteristiği bulunmuştur. En son işlemde iste bypass valfi ISO 3968’de belirttiği gibi 0,7 MPa altında filtre muhafazamızın %1’i sızıntı verecek şekilde ayarlanmıştır ve tıkalı filtre takılarak bypass karakteristiği belirlenmiştir. Geçirgenlik testleri yapılan filtre mahfazası, filtre elemanlı filtre, bypass testlerinin karakteristikleri Şekil 22’de verilmiştir.



Şekil 21. Ömür Grafiği



Şekil 22. Filtre Akış Karakteristikleri ve Fark Basıncı Sonuçları

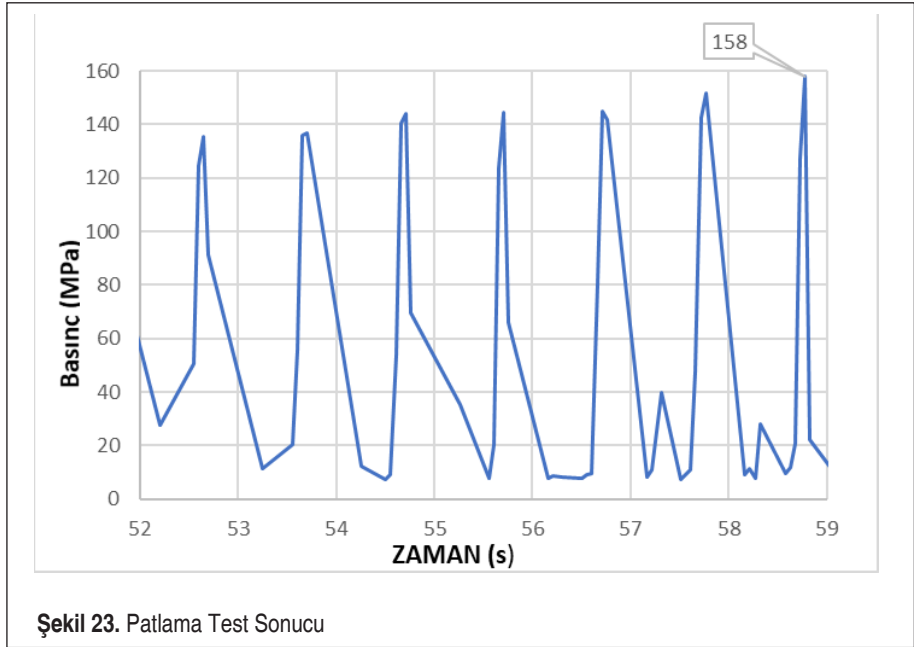
Mesa Makina'nın tasarlayıp üretmiş olduğu hidrolik filtre test makinasında geçirgenlik testleri gerçekleştirilmiş ve Şekil 22'deki karakteristik eğrileri elde edilmiştir. Eğrilerin incelenmesi sonucunda filtremizdeki akışın muadil ürünlere göre %14,6 performanslı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca bypass valfimizin fark basıncını düşük seviye tutması ise bypass valfinden başarı elde edildiğinin göstergesidir.



### 3.2.3 Patlatma Testi

Mesa Makina hidrolik filtre test cihazında 250 MPa basınç değerine kadar patlatma testi yapabilmektedir. Filtrelerin çalışma basınçları 45 MPa'dır ve yapılan literatür araştırmalarında patlatma basınçları çalışma basınçlarının 3 katı olarak görülmüştür. Buna istinaden 135 MPa basınç altında patlamaya göre yapılan analiz çalışmaları ile optimize edilerek üretilmiş filtre muhafazalarının analiz sonuçlarında patlamaları 141 MPa basınç değerinde olduğu görülmüştür. Test makinesinde yapılan testlerde patlama basıncı 158 MPa olarak bulunmuştur. Yapılan testin grafiği Şekil 23 ve patlama sonrası görüntüsü Şekil 24'te verilmiştir.

Muadil filtreleri incelediğimizde patlama basınçları çalışma basınçlarının 3 katı olarak belirtildiği görülmüştür [7]. Buna istinaden Mesa Makina'nın filtresinin patlama basıncı 135 MPa olması gerekmektedir. Yapılan analizler sonucu ön görülen patlama basıncı 141 MPa'dır. Fakat Mesa Makinanın filtresi deneysel incelemelerde 158 MPa basınç altında patlamıştır. Bu sonuçlarda Mesa Makina'nın tasarlayıp ürettiği hidrolik filtre patlatma testinde yapılan analizlerden daha mukavemetli üretim gerçekleştirildiği görülmüştür.



Şekil 23. Patlama Test Sonucu





Şekil 24. Patlatılmış Filtre Görüntüsü

#### 4. SONUÇLAR

TÜBİTAK 1511 Öncelikli Alanlar Projesi kapsamında gerçekleştirilen bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Yüksek basınç hattı hidrolik filtresinin gövdesinin tasarımı ve gövde optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.
- Mesa Makina tarafından, EN-GJS 400-15 malzemeden döküm yöntemiyle yüksek basınç hattı filtre gövdeleri döküm yöntemiyle yerli olarak üretimi gerçekleştirilmiştir ve standart tüm testler filtrelere uygulanmıştır.
- Hidrolik filtrenin iç kısmına işletme basıncı olan 45 MPa basınç statik ve dinamik olarak uygulanması sonucu gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre, hidrolik basınç hattı filtresi gövdesinde yaklaşık 152 maksimum gerilme oluştuğu ve ilk tasarlanan geometri için gövdenin yaklaşık 1,8 kat emniyetli olduğu görülmüştür.



- Gövdenin kalın kısımları malzeme tasarrufu sağlamak amacıyla daha ince yapılarak gerçekleştirilen analizler sonunda, parçada oluşan maksimum gerilme 154 MPa civarına yükselmiştir ve parça 1,75 kat emniyetli olmuştur. Yapılan optimizasyon çalışması sonucunda ilk modele göre %24 oranında ağırlık tasarrufu sağlanmıştır. Optimize edilen hidrolik basınç hattı filtre gövdesinin ise mevcut muadillerine göre %17 oranında daha hafif olduğu bir ürün tasarlanıp üretilmiştir.
- Gerçekleştirilen analizler sonunda filtre gövdesinin patlama basıncı analizlerle 141 MPa olarak elde edilmiştir. Deneysel olarak gerçekleştirilen patlatma testlerinde ise filtre gövdesi 158 MPa basınç değerinde patlamıştır. Buradan, gerçekleştirilen analizlerin gerçeğe yakın sonuçlar verdiğini ve optimize edilmiş filtre gövdelerinin de emniyetli olduğu sonucuna varılmıştır.
- Sonlu elemanlar analizleriyle gerçekleştirilen yorulma analizleri sonunda ise parçanın sonsuz ömürde olduğu belirlenmiştir.
- Döküm yoluyla üretilen yüksek basınç filtre gövdesinin, uluslararası standartlara uygun olarak sızdırmazlık, yorulma, fark basıncı ve patlatma testlerini başarıyla sağladığı görülmüştür. Sonuç olarak, yeni tasarlanan ve yerli olarak döküm yöntemiyle üretilen filtre gövdesi, mevcut muadillere göre hem daha hafif hem de daha mukavemetli olarak üretilmiştir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Mesa Makina tarafından yürütülen 1180163 nolu ve “Hidrolik Basınç Hattı Filtrelerinin Tasarımı, Üretilmesi ve Test Edilmesi” isimli TÜBİTAK 1511 Öncelikli Alanlar Projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Alınan destek için TÜBİTAK’a teşekkür ederiz.

## KAYNAKÇA

1. **Güleç M.** 2012. Hidrolik- Temel Bilgiler ve Devre Elemanları, HYDAC Service GmbH, 3738369
2. **Emanet S.** 2001. “Hidrolik Sistemlerde Filtrasyon ve Filtre Elemanının Özellikleri,” II. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi ve Sergisi
3. **Aruljothi B., Junaid Basha A. M.** 2014. Multipass Performance of Different Medias in Aircraft Hydraulic Filters. Indian Journal of Science and Technology, vol. 7 (4), 447-451.
4. **Momin T., Balasubramanian S.** 2017. “Design and Analysis of High Pressure Hydraulic Filter for Marine Application” Materials Science and Engineering, vol. 197, Issue 1.
5. TS ISO 3968, Hidrolik Akışkan Gücü- Filtreler- Akış Karakteristiklerine Karşı Fark Basıncının Değerlendirilmesi, Şubat 2005.
6. TS ISO 10771-1, Hidrolik Akışkan Gücü- Basınç Altında Çalışan Metal Mahfazaların Yorulma Basınç Deneyleri, Mart 2017.
7. FILTREC Hydraulic Filtration CT08-rev.01-10/17 F420-D1 Technical Datasheet.



# COVID-19 ile İvmelenen Dijitalleşmenin PLM'e Etkileri

Alim Filik<sup>1</sup>, Rüstem Barış Yeşilay<sup>2\*</sup>

## ÖZ

Çalışma kapsamında COVID-19 salgını ile birlikte hız kazanan dijitalleşme trendinin, Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (PLM) ile olan potansiyel etkileşimi araştırılmıştır. Konuya dair literatür taraması yapılmış, bu kapsamdaki araştırmalar incelenmiş ve neticesinde COVID-19 ile birlikte başlayan süreç içerisinde dijitalleşmenin kuruluşlar için artık kaçınılmaz olduğu ve dijitalleşmenin PLM ile anlamlı olacağına dair bulgular elde edilmiştir. PLM'in ürün yaşam döngüsü fazları açıklanarak, her fazda dijitalleşmenin etkileri açıklanmıştır. Dijitalleşme, dijital ikiz kavramı ve uygulamalarına değinilmiş ve ürün yaşam döngüsünde etkilediği aşamalar açıklanmıştır. Daha sonra, PLM ve dijitalleşme ilişkisinden bahsedilerek, dijitalleşmenin ürün başlangıcı (BOL), ürün ortası (MOL) ve ürün sonu (EOL) aşamalarında olan etkileri açıklanmıştır. Neticede, anlamlı bir dijitalleşmenin PLM ile mümkün olacağı ve dijitalleşme ile PLM'in birbirini tamamlayan kavramlar olduğundan hareketle, COVID - 19 ile başlayan sürecin PLM konseptinin yaygınlaşmasına ve farkındalığının artmasına katkı sağlayacağını ifade etmek mümkündür.

**Anahtar Kelimeler:** Dijitalleşme, COVID-19, ürün yaşam döngüsü yönetimi (PLM), dijital ikiz

## The Impact of Digitalization Accelerated by COVID-19 on PLM

### ABSTRACT

Within the scope of the study, the potential interaction of the digitalization trend, which accelerated with the COVID-19 epidemic, with Product Life Cycle Management (PLM) was investigated. The literature on the subject has been reviewed, the researches within this scope have been examined and as a result within the process that started with COVID-19, it was found that digitization is now inevitable for organizations and that digitalization will be meaningful with PLM. By explaining the product life cycle phases of PLM, the effects of digitalization in each phase have been explained. Digitalization, the concept of digital twin and its applications are mentioned and the stages it affects in the product life cycle are explained. Then, by mentioning the relationship between PLM and digitalization, the effects of digitalization on the beginning of product (BOL), mid-product (MOL) and end-of-product (EOL) stages are explained. As a result, it is possible to state that a meaningful digitalization will be possible with PLM and that the process starting with COVID - 19 will contribute to the spread of the PLM concept and to increase awareness, since digitalization and PLM are concepts that complement each other.

**Keywords:** Digitalization, COVID-19, product life cycle, management (PLM), digital twin

\* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 20.07.2020

Kabul/Accepted : 13.09.2020

<sup>1</sup> Ege Üniversitesi, Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi Mükemmeliyet Uygulama ve Araştırma Merkezi, İzmir  
alim.filik@gmail.com, ORCID No: 0000-0003-4572-8241

<sup>2</sup> Ege Üniversitesi, Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi Mükemmeliyet Uygulama ve Araştırma Merkezi, İzmir  
rustem.baris.yesilay@ege.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-0830-8224

## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

Digitalization has been defined by Gartner as the use of digital technologies to change a business model and create new revenue and value creating opportunities. Digitalization enables improved business process efficiency, quality, and consistency by eliminating manual steps within the company and achieving better accuracy. Digitalization can also provide a better real-time view of operations and results by integrating structured and unstructured data, providing better views on organizational data, and integrating data from other sources.

Product lifecycle management (PLM) allows companies to provide additional value to customers to gain competitive advantage. PLM makes business processes more efficient, flexible, and effective by managing product data generated throughout the product lifecycle. It enables a company to reduce product-related costs and improve product quality, directly increases customer satisfaction, and helps increase market share by shortening time to market.

In this study, considering that digitalization has become a necessity for organizations with the COVID-19 epidemic, evaluations have been made that a meaningful digitalization can be with PLM systems and an efficient PLM system can also be achieved with digitalization.

### Objectives

The main purpose of the study is to explain the importance of digitalization accelerating with COVID-19 and to examine the effects of digitalization on PLM, as well as to reveal that digitalization and PLM are concepts that complement each other. In addition, it is aimed to reveal the effects of digitalization at each stage by explaining the product life cycle stages.

In recent years, there are few academic studies on digitalization and PLM. For example, Xin and Ojanen (2017) concluded that with digitalization, the information cycle of the product can be closed and that digitalization will expand the boundaries of traditional PLM, allowing it to be managed throughout the entire life cycle of the product. Tao et al. (2018), who conducted studies on the digital twin and the product life cycle, examined the concepts of the digital twin and the use of the digital twin throughout the product lifecycle. As a result of the literature review, it was concluded that a new publication on this subject would be highly likely to contribute to the literature, since there are few academic studies involving digitalization and PLM issues jointly.

### Methods

Within the scope of the study, existing publications on digitalization, PLM, product life cycle, digital twin and COVID-19 keywords were scanned in English and Turkish. In the literature search on the concepts of digitalization, digital twin and PLM, the relationship between digitalization and PLM is demonstrated by making use of resources such as journals, publications, and related technology sites.

In the section entitled as "COVID-19 and its effects of on digitalization"; McKinsey's digital adoption research and Deloitte's "The Effects of Different Categories of Turkey in the global Covidien-19 Outbreak" reports were examined in detail. Based on the findings in the reports, the increase in the digitalization trend has been tried to be revealed.

### Results

Although the COVID-19 epidemic has great effects on the economy and disrupts the fields of activity in the manufacturing industry, transportation and some production areas with the decrease in human mobility, it is predicted that digitalization will come to the fore in the "new normal". With the COVID-19 pandemic, the transition to digital has accelerated significantly, and many companies consider digitalization as the only option to adapt to competition.

The digital twin has the potential to solve existing problems in PLM with its simultaneous connection between the physical product and the corresponding virtual product. The real-time status data of the product is transferred to the configured virtual product model to realize the simultaneous connection between the physical product and the corresponding virtual product. With the real-time data and historical data obtained, the product manufacturer can understand the working status of the product in real time. With the communication between the physical product and the virtual product, the energy consumption information of the product or important parts can be monitored in real time.

In the study, it has been shown that the product life can be categorized in three important stages. These stages are the beginning of life (BOL) stage, includes conceptualization, definition, and realization; mid-life (MOL) stage, includes the use, maintenance, and service; end of life (EOL) stage includes renewal and reuse of the product, characterized by various scenarios such as dismantling and replacement of parts and reuse and material reclamation. At every stage of the product life cycle, the goals PLM aspires to achieve are different. While the BOL stage aims to improve product design and production quality, the MOL stage is about improving the reliability, availability and sustainability of products. To make PLM a loop and reduce the negative impacts of end-of-use products on the environment and people, it is necessary to address the EOL phase. By moving from BOL to MOL and EOL throughout the entire product lifecycle, the flow of product information is less and less complete, resulting in complex decision-making processes in EOL. However, real-time product life cycle data of each item can be monitored, detected, stored and analyzed with the help of digitalization, especially IoT.

### Discussion

With the COVID-19 epidemic and developing technology, it is possible to state that digitalization is not a choice but a necessity for companies. Within the scope of the study, digitalization, the concept of digital twin and its applications are included and the stages it affects in the product life cycle are explained. Then, by mentioning the relationship between PLM and digitalization, the effects of digitalization on the product start (BOL), mid-product (MOL) and end-of-product (EOL) stages are explained. Therefore, it is possible to state that a meaningful digitalization will be possible with PLM and that the process starting with COVID-19 is an opportunity for the spread and awareness of the PLM concept, since digitalization and PLM are concepts that complement each other.

With the "new normal" after COVID-19, it can be evaluated that companies that are delayed in using digital channels will be greatly disadvantaged. Currently, the impact of digitalization on PLM continues, and companies need to take some steps to keep themselves competitive in the digital age. Nowadays, many actors interacting with the product during the MOL and EOL phase only carry out their respective activities by exchanging little information with other actors. In addition, with digitalization, a holistic exchange of information and interaction between different elements such as designers, manufacturers, customers and recyclers is encouraged.

The study concluded that the digital twin has a high potential application in product design, product manufacturing, and product service to solve problems in the product life cycle. With digitalization, the complexity of products and processes increases, and the data volume becomes extremely large. PLM enables the efficient processing of vast amounts of data. With the applications of digitalization and digital twins, manufacturing firms and interested parties will increasingly be interconnected in both the cyber and physical world.

In the further studies, researchers are recommended to conduct industry-focused case studies showing the interaction of digitalization and PLM.

## 1. GİRİŞ

Dijitalleşme, COVID-19 salgınının etkisi ile daha sık duyar olduğumuz bir kavram haline gelmeye başlamıştır. Dijitalleşme, bir iş modelini değiştirmek, yeni gelir ve değer yaratan fırsatlar sunmak için dijital teknolojilerin kullanılması şeklinde tanımlanmıştır [1]. Giderek karmaşıklaşan dijital iş ekosisteminde rekabet avantajı elde etmek için, şirketlerinin ürün yaşam döngüsü (PLC) boyunca somut ürünler satmanın yanı sıra ürünle ilgili hizmetler sunması gerekir [2]. Aynı zamanda, ürünlerin ve ortamlarının karmaşıklığı artmakta, bu da ürünü PLC’de farklı şirketler arasında konuşlandırılmış çok disiplinli ekiplerle modellemek için dijital araçları kullanma ihtiyacına yol açmaktadır [3]. Dijitalleştirme, şirketin dahili ve harici verilerini entegre ederek, operasyonların ve sonuçların gerçek zamanlı daha iyi bir görünümünü sağlar ve iş süreci verimliliğini, kalitesini ve tutarlılığını iyileştirir. Dijitalleşmenin şirket içi verimlilik açısından potansiyel faydaları arasında, manuel adımları ortadan kaldırarak ve daha iyi doğruluk elde ederek gelişmiş iş süreci verimliliği, kalite ve tutarlılık yer alır. Dijitalleştirme ayrıca yapılandırılmış ve yapılandırılmamış verileri entegre ederek, organizasyon verileri hakkında daha iyi görünümler sağlayarak ve diğer kaynaklardan gelen verileri entegre ederek operasyon ve sonuçlar hakkında daha iyi bir gerçek zamanlı görünüm sağlayabilir [4].

Ürün yaşam döngüsü yönetimi (PLM) ise, şirketlerin rekabet avantajı elde etmeleri için müşterilere ek değerler sağlamasına olanak tanır [5]. PLM, ürün yaşam döngüsü genelinde oluşturulan ürün verilerini yöneterek iş süreçlerini daha verimli, esnek ve etkili hale getirir [6]. Bir şirketin ürünle ilgili maliyetleri düşürmesini ve ürün kalitesini iyileştirmesini sağlar, müşteri memnuniyetini doğrudan artırır ve pazara çıkma süresini kısaltarak pazar payını arttırmasına yardımcı olur [7].

Bu çalışmada, COVID-19 salgınıyla dijitalleşmenin artık kuruluşlar için bir zorunluluk olmaya başladığı, anlamlı bir dijitalleşmenin ürün yaşam döngüsü yönetimi (PLM) sistemleriyle olabileceği ve aynı zamanda verimli bir PLM sisteminin de dijitalleşme ile olacağı hakkında değerlendirmeler yapılmıştır.

Çalışmada öncelikle yapılan masa başı araştırması ve literatür taraması ile elde edilen bulgulara yer verilmiştir. Daha sonra, COVID-19 salgınının dijitalleşme üzerine etkileri incelenmiştir. Dijitalleşme ve dijital ikiz kavramları açıklanarak ürün yaşam döngüsü kapsamındaki örneklere yer verilmiştir. Takibinde PLM kavramı açıklanmış ve PLM sistemlerinde dijitalleşmenin etkileri hakkında bilgiler verilmiştir. Son bölümde ise çalışma kapsamında elde edilen sonuçlara yer verilmiştir.

## 2. YÖNTEM

Çalışma kapsamında yapılan masa başı araştırmasında dijitalleşme, PLM, ürün yaşam döngüsü, dijital ikiz ve COVID-19 anahtar kelimelerine dair var olan yayınlar



İngilizce ve Türkçe olarak taranmıştır. Dijitalleşme, dijital ikiz ve PLM kavramları ile ilgili literatür araştırmasında, dergiler, yayınlar ve ilgili teknoloji siteleri gibi kaynaklardan faydalanılarak dijitalleşme ve PLM arasındaki ilişki gösterilmektedir. Çalışmanın COVID-19 ve dijitalleşme üzerine etkileri bölümünde ise, McKinsey'in dijital benimsenme araştırması ve Deloitte'in "Küresel COVID-19 Salgınının Türkiye'de Farklı Kategorilere Etkileri" raporlarındaki bulgulardan hareketle dijitalleşme trendindeki artış ortaya konulmuştur [8] [9].

Son yıllarda dijitalleşme ve PLM konularını içeren az da olsa akademik çalışmalar mevcuttur. Örneğin, Xin ve Ojanen (2017) dijitalleşme ile ürünün bilgi çevriminin katılabilirliği ve dijitalleşme ile geleneksel PLM'in sınırlarının genişleyerek ürünün tüm yaşam döngüsü boyunca yönetilmesine olanak vereceği sonuçlarına varmışlardır [7]. Dijital ikiz ve ürün yaşam döngüsü üzerine çalışmalar yapan Tao ve arkadaşları ise (2018) dijital ikiz kavramları ve dijital ikizin ürün yaşam döngüsü boyunca kullanım kavramlarını incelemişlerdir [10].

Literatür taraması neticesinde dijitalleşme ve PLM konularını ortak olarak içeren akademik çalışmaların az olması nedeniyle bu konuda yapılacak yeni bir yayının literatüre katkı sunma olasılığının yüksek olabileceği sonucuna varılmıştır. Bu bulgudan hareketle çalışmanın temel amacı COVID-19 ile dijitalleşmenin önemini açıklamak ve dijitalleşmenin PLM'e olan etkilerini incelemek, aynı zamanda dijitalleşme ve PLM'in birbirini tamamlayan kavramlar olduğunu ortaya koymaktır. Ayrıca ürün yaşam döngüsü aşamaları açıklanarak her bir aşamadaki dijitalleşmenin etkilerinin ortaya konulması amaçlanmıştır.

Çalışmanın kısıtları ise dijitalleşme ve PLM ortak paydasında yapılan akademik çalışmaların az sayıda olması, dijitalleşme kavramının literatürde kabul edilmiş ortak bir tanımı olmaması ve ürün yaşam döngüsü yönetiminde yaşamın ortası (MOL) ve yaşamın sonu (EOL) aşamalarında yeterli veri toplanamamasıdır.

### 3. COVID-19 SALGINININ DİJİTALLEŞME ÜZERİNE ETKİLERİ

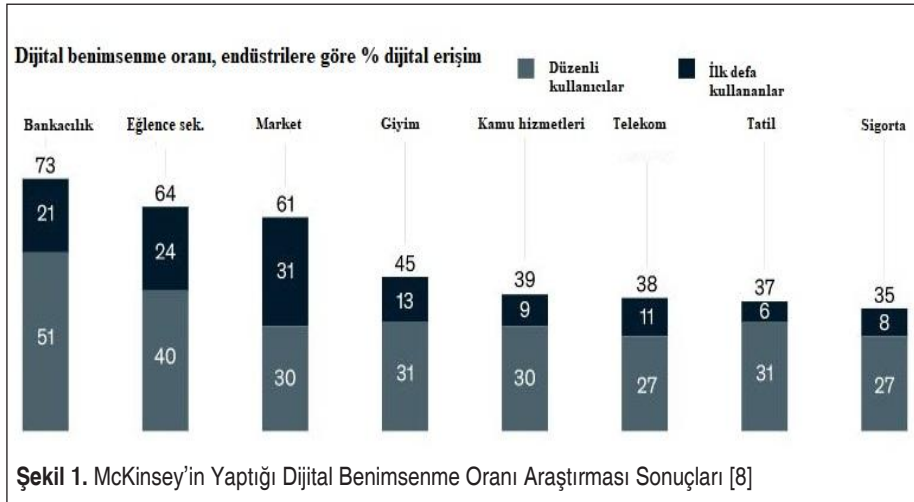
COVID-19 salgını ekonomiler üzerinde büyük etkiler yaratmıştır. İmalat sanayi, ulaş-tırma, insan hareketliliğindeki azalma ile bazı üretim alanlarındaki faaliyet alanları salgınla birlikte sekteye uğrasa da yeni oluşan düzende dijitalleşmenin öne çıkacağı tahmin edilmektedir. Deloitte'in Türkiye genelinde yaptığı COVID-19 salgınının farklı kategorilere etkisi raporunda en yüksek pozitif etkilenen kategoriler uzaktan eğitim ve çalışma, fitness uygulamaları, mobil perakende, ulusal market zincirleri şeklinde sıralanmıştır. Bu raporda e-ticaret ve dijitalleşme alanlarında erken yatırım yapmış, yetkin insan kaynağı ve özgün deneyimi olan sektörlerin ve firmaların, yatırımlarının karşılığını aldığı belirtilmiştir [9].

İnsan faktörünü azaltacak yapay zekâ ve robotikle ilgili teknolojiler ile dijitalleşmenin eğitim ve kamudan başlayarak üretim, hizmet ve finans gibi sektörlerde de hızla yayılması beklenmektedir. COVID-19 salgını ile dijitalleşme önemli ölçüde hızlanmıştır ve birçok firma rekabete uyum sağlamak için dijitalleşmeyi tek seçenek olarak değerlendirmektedir.

Bankalar uzaktan satış ve servis ekiplerine geçerek, krediler için esnek ödeme düzenlemeleri yapmak üzere müşterilere dijital erişim başlatmıştır. Marketler çevrimiçi sipariş ve teslimatlara yönelmiştir. Birçok bölgedeki okullar yüzde yüz çevrimiçi öğrenme ve dijital sınıflara dönüşmüştür. Üreticiler fabrika ve tedarik zincirleri için dijital planlar gerçekleştirmiştir. Listeye daha birçok sektör eklenebilir [11].

Müşterilerin davranışları ve tercih ettikleri iletişim yolları değişmiştir ve dijital kanalların kullanımı artmıştır. Dijital kanalları ilk kez kullanan kişilerin yüzde 75'i "normale" dönüş olduğunda da bu kanalları kullanmaya devam edeceğini belirtmektedir [11]. Çin örneğinde, rekabet halinde olan şirketlerin rekabetteki üstünlüklerini sürdürebilmeleri için dijital kanallarda rakip firmalardan daha başarılı olması gerektiği sonucuna ulaşılmaktadır [12].

Şekil 1’de McKinsey’in Amerikan tüketicileriyle yaptığı dijital benimseme araştırmasının Nisan 2020 raporunda salgın süresince bankacılık, eğlence sektörü, market gibi dijital kanalları ilk kez kullanan kullanıcıların salgından sonra da bu dijital kanalları kullanacakları gösterilmektedir [8]. Gerçekten de son veriler salgın sonrası 2020 yılının Mart ve Nisan aylarını kapsayan yaklaşık sekiz hafta içerisinde tüketici ve iş dünyasında dijital benimseme oranının beş yıl sonra ulaşılabileceği tahmin edilen seviyeye şimdiden ulaşıldığını göstermiştir [11].





## 4. DİJİTALLEŞME VE ETKİLENDİĞİ ALANLAR

Dijital Dönüşümün 4 seviyesi bulunur. İlk seviye, yeniden etiketleme, var olan bir ürünü dijital olarak ele alma ve bunu dijital dönüşüm olarak adlandırılmaya ilgilidir. Seviye 2, mevcut bir bilgi teknolojisi ürününe yeni özellik ve işlevlerin eklenmesi ve dijital dönüşüm olarak adlandırılmasıdır. Seviye 3, dijital dönüşümün mevcut bir şirkete uygulanması diğer bir deyişle şirketi değiştirmekle ilgilidir. Ancak bu sadece yeni dijital teknolojilerin ve hizmetlerin uygulanması nedeniyle değil bu teknolojileri kullanarak şirkette yeni bir iş modeli oluşturulmasıdır. 4. Seviyedeki dijital dönüşüm ise internet, veri tabanı teknolojisi, GPS veya telekomünikasyon gibi bilgi teknolojileri kullanmadan mümkün olmayacak yeni bir iş alanı veya şirketin oluşturulmasıdır. Amazon, Google, Uber, Facebook ve LinkedIn gibi şirketlerin oluşmasına neden olan bu seviyedeki dijital dönüşümdür [13].

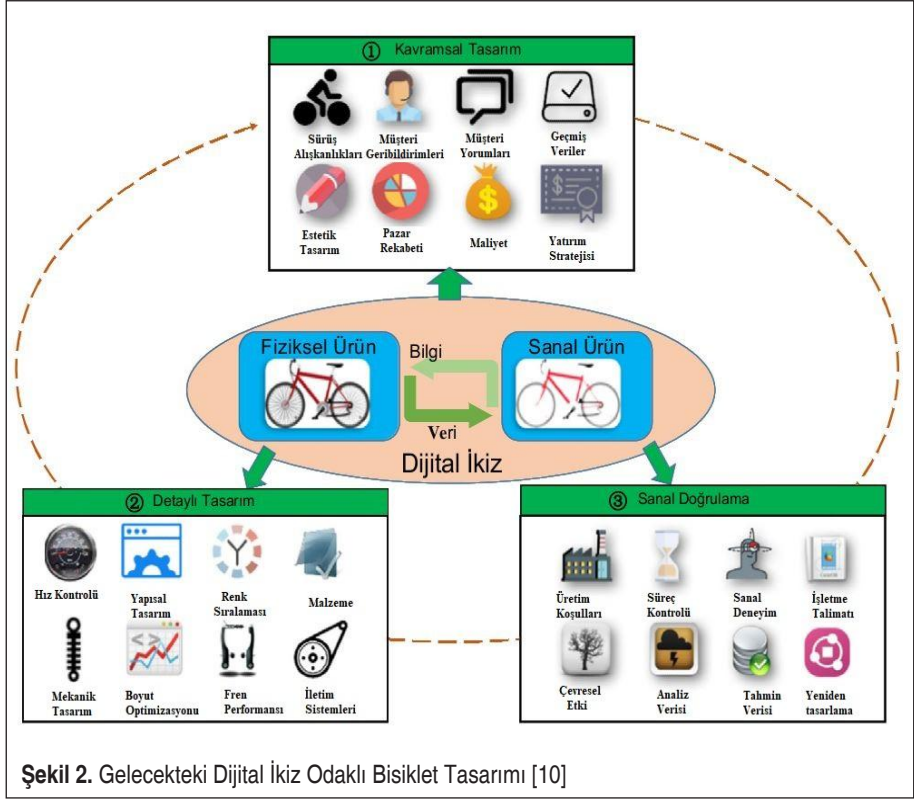
Üretim açısından dijitalleşme, ürünleri dijital formda tasarlamak, ürünü gerçekten üretmeden hemen önce bileşenleri oluşturmak ve kullanmak ve ürün, kullanıcılar ve üretici şirket arasındaki ilişkiyi sürdürmek olarak tanımlanabilir [14]. Daha çok iş hayatına odaklanan Gartner, dijitalleşmeyi “bir iş modelini değiştirmek ve yeni gelir ve değer yaratan fırsatlar sunmak için dijital teknolojilerin kullanılması” olarak tanımlamaktadır [1]. Genel olarak dijitalleşme, dijital teknolojilerin bir şirketin iş modelinde, ürünlerinde, süreçlerinde ve organizasyon yapısında meydana getirebileceği değişikliklerle ilgilidir [14].

## 5. DİJİTAL İKİZ VE ÜRÜN YAŞAM DÖNGÜSÜ

Dijital ikiz kavramı ilk olarak Grieves tarafından 2003 yılında Michigan Üniversitesi'nde PLM hakkındaki sunumunda yer almıştır. “Dijital İkiz, mikro atom seviyesinden makro geometrik seviyeye kadar potansiyel veya gerçek fiziksel olarak üretilmiş bir ürünü tam olarak tanımlayan bir dizi sanal bilgi yapısıdır. İdeal olarak, fiziksel olarak üretilmiş bir ürünün incelenmesinden elde edilebilecek herhangi bir bilgi dijital ikizinden elde edilebilir” [15], “Dijital ikiz, ürün yaşam döngüsündeki tüm bileşenlerin fiziksel veriler, sanal veriler ve aralarındaki etkileşim verileri kullanılarak gerçek bir eşleştirilmesidir” [10], “Fiziksel bir nesnenin veya sistemin yaşam döngüsü boyunca, anlama, öğrenme ve akıl yürütmeyi sağlamak için gerçek zamanlı verileri kullanarak dinamik bir sanal temsili” [16] şeklinde farklı tanımları mevcuttur. Dijital ikizin fiziksel ürün, sanal ürün ve fiziksel ve sanal ürünü birbirine bağlayan veriler olarak üç bölümden oluştuğunu söyleyebiliriz.

Dijital ikiz kavramı önerildiğinden beri endüstrinin birçok alanında uygulanmıştır ve uygulanmaya devam etmektedir. ABD Hava Kuvvetleri Araştırma Laboratuvarı Yapısal Bilimler Merkezi, gerçekçi bir yüksek doğrulukla uçuş modeli oluşturmak ve sanal model verilerini fiziksel verilerle birleştirerek daha doğru bir yolculuk ömrü tahmini





yapmak için dijital ikiz kullanmıştır [17]. Hava Kuvvetleri Araştırma Laboratuvarı, modelin çeşitli verileri entegre ettiği ve birleşmiş aero termoelastik problem için aero-termal model tahminlerine olan güveni simüle etmek ve değerlendirmek için fiziksel alana yüksek düzeyde bağlı olduğu bir çerçeve oluşturmuştur [18]. Cerrone ve ekibi dijital ikiz örneklerin modelini oluşturmuş ve çatlak yolu belirsizliğini çözmek için simülasyon uygulamasını yapmışlardır. Simülasyon sonucu, dijital ikiz kullanmanın kesme yüklemesi altında yanlış tahmini azaltabildiğini göstermektedir [19]. Ayrıca, PTC, Dassault Systèmes, Siemens PLM gibi firmalar ürün tasarım sürecinde, dijital ikiz uygulamasına büyük ilgi göstermektedir [20]. Dijital ikiz, fiziksel ürün ve karşılıklı gelen sanal ürün arasındaki eşzamanlı bağlantısı ile PLM'deki mevcut problemleri çözme potansiyeline sahiptir.

Şekil 2'de bir bisiklet tasarımının kavramsal tasarım, detaylı tasarım ve sanal doğrulama ile üç aşamadaki dijital ikiz odaklı tasarım süreci sunulmuştur. Ürün tasarım süreci geleneksel olarak, bireyin mesleki bilgi ve deneyimini merkeze alır. Bu durumda, tasarımcılar tasarım aşamasında tasarımın geçerliliğini ve kullanılabilirliğini sürekli olarak kanıtlamak için çeşitli testler yapmalıdır. Buna karşılık, modern ürün tasarımı,



müşterileri merkez haline getirme ve müşterilerin katılımını artırma yönündeki giderek artan bir eğilime dönüşmektedir. Ayrıca, ürün tasarım süreci giderek daha fazla sanallaştırma, iş birliği ve görselleşmeye doğru yönelmiştir. Dijital ikiz, ürünün her türlü fiziksel verisini sanal bir alana doğru şekilde eşleyebilir. Sanal ürün, ilgili fiziksel ürünün tüm yaşam döngüsü sürecini yansıtabilir. Dijital ikizlere dayanarak, ürün tasarım süreci kavramsal tasarım, ayrıntılı tasarım ve sanal doğrulamaya ayrılabilir [10].

Kavramsal tasarım, tüm ürünün gelecekteki tasarım yönünü belirlemesi açısından ürün tasarım sürecinin ilk ve en önemli adımıdır. Bu aşamada, tasarımcılar yeni ürünün konseptini, estetiğini ve ana işlevlerini tanımlamalıdır. Tasarımcıların bu aşamada müşteri memnuniyeti, ürün satışları, ürün rekabet edebilirliği, yatırım planları ve diğer birçok bilgi gibi çeşitli verilerle ilgilenmeleri gerekir. Bu veriler çok büyük ve dağınıktır, bu da tasarımcıların verilerle verimli şekilde çalışmasını zorlaştırır. Tasarımcılar ürünün fiziksel alanına her türlü veriyi entegre edebilen ve tüm bilgileri kolayca entegre edebilen dijital ikizleri kullanarak, nerede iyileştirilme yapılması gerektiğini hızlıca anlayabilirler. Dahası, dijital ikiz fiziksel ürünün gerçek zamanlı aktarım verilerini kullanarak müşteriler ve tasarımcılar arasındaki iletişimi daha şeffaf ve hızlı hale getirebilir. Müşterilerin geri bildirimlerini ve müşterilerin önceki neslin kullanımında ortaya çıkan çeşitli sorunları yeni ürünün geliştirilmesinde dikkate almalarını sağlayarak daha doğru bir tasarım oluşturmalarına rehberlik edebilir.

Kavramsal tasarımı bitirdikten sonra, bir sonraki aşama detaylı tasarımıdır. Bu aşamada tasarımcılar, ürün prototipinin tasarımını ve yapımını ve ticari üretimde kullanılan araç ve gereçlerin geliştirilmesini tamamlamalıdır. Tasarımcılar, önceki aşamaya göre ürün fonksiyonları, görünüm, ürün konfigürasyonu, tasarım parametreleri ve test verilerini içeren ürün tasarım şemasını daha da geliştirmelidir. Ayrıntılı tasarım aşaması, ürün prototipinin istenen performansı elde etmesini sağlamak için tekrarlanan simülasyon testleri gerektirir. Bununla birlikte, gerçek zamanlı veri ve çevreden etkilenen veri eksikliği nedeniyle, simülasyon testlerinin etkisi açık değildir. Buna rağmen, dijital ikiz teknolojisi bu problemi fiziksel nesnelerin tüm yaşam döngüsünde olduğu gibi çözebilir. Ürünün tüm verilerini ve çevrenin etkisini kaydedebilir [21].

Son aşama sanal doğrulamadır. Geleneksel modelde, tasarımın geçerliliği ve fizibilitesi, ürün tasarımı bittikten sonra seri üretim yapılarına kadar değerlendirilemez. Sadece üretim döngüsünü uzatmakla kalmayacak, aynı zamanda zaman ve maliyeti de büyük ölçüde artıracaktır. Tasarımcılar dijital ikiz modeli kullanmayı tercih ederse, herhangi bir bileşenin kalitesi, doğrudan dijital ikiz modelinde hata ayıklama ve tahmin yoluyla üretilmeden önce tahmin edilir. Dijital ikiz sanal doğrulama, ekipman, çevre, malzeme, müşterilerin özellikleri ve geçmiş verilerden tam olarak yararlanabilir. Bu yöntem, bir tasarım hatası olup olmadığını test edebilir ve bunun nedenini bulabilir ve daha sonra yeniden tasarım daha hızlı ve verimli olacaktır [10]

Ayrıca, doğrulama ve testlerden kaçınarak tasarım verimliliğini büyük ölçüde artırabi-

lır. Dahası, dijital ikiz sadece davranışları tanımlamakla kalmaz, aynı zamanda gerçek sistemle ilgili çözümler de önerir. Bir diğer ifade ile sanal modelleri temel alan fiziksel nesnelere tahmin etmek için işlem ve hizmet sağlayabilir. Bu nedenle, tasarımcılar dijital ikiz teknolojisini kullanarak, prototipler üzerinde simülasyon testlerini etkili bir şekilde uygulamak ve fiziksel ürünlerin gerçek performansını mümkün olduğunca doğru bir şekilde tahmin etmek için canlı simülasyon senaryoları oluşturabilirler [21].

Ürün servisi, ürün kullanımı ve bakım aşamaları dâhil olmak üzere satış sonrası aşamaları ifade eder. Kullanıcılar esas olarak ürünün güvenilirliği ve rahatlığı ile ilgilenirken, üreticiler esas olarak gerçek zamanlı ürün çalışma durumu, sürdürülebilirlik, ne zaman bakım yapılacak, hangi stratejileri kullanacakları vb. ile ilgilenir. Uçak, otomobil ve elektrik güç ekipmanı gibi karmaşık ürünler için, kusurlardan ve hasarlardan herhangi biri, ürünün gereksiz yere arızalanmasına neden olabilir. Bu nedenle, karmaşık ürünlerin günlük bakımının yapılması özellikle önemlidir. Bununla birlikte, geleneksel yaklaşımlar proaktif olmaktan ziyade reaktif olma eğilimindedir ve çoğu zaman sezgisel deneyime dayanır. Dijital ikiz yöntemi ile arızalar ve anormal gelişen olaylar anlaşılabilir ve önceden bilinmeyen sorunlar öngörülebilir [22].

Dijital ikiz metodolojisine dayanarak, fiziksel ürünün ikizini gerçek zamanlı olarak güncellemek için gelişmiş sensör ve iletişim teknolojisi kullanılmaktadır. Ürünün gerçek zamanlı durum verileri, fiziksel ürün ile karşılık gelen sanal ürün arasındaki eşzamanlı bağlantıyı gerçekleştirmek için yapılandırılmış sanal ürün modeline aktarılır. Gerçek zamanlı durum verileri, ürün konum bilgileri, enerji tüketim bilgileri, kullanıcı çalışması ve ayar verileri, ürün çalışma bilgileri, malzeme yapısı bilgileri, parça aşınma bilgileri vb. içerir. Elde edilen gerçek zamanlı veriler ve geçmiş verileri ile ürün üreticisi, ürünün çalışma durumunu gerçek zamanlı olarak anlayabilir [19].

Fiziksel ürün ile sanal ürün arasındaki iletişim ile ürün veya önemli parçaların enerji tüketimi bilgileri gerçek zamanlı olarak izlenebilir. Gerçek zamanlı ve geçmiş enerji tüketimi verilerine dayanarak, her bir parçanın enerji tüketim oranı, gün / hafta / ay başına enerji tüketimi gibi ilgili istatistiksel analizler yapılabilir. Ayrıca, tahmin algoritması kütüphanesi ve bilgi kütüphanesi ile gelecekteki enerji tüketimi de öngörülebilir. Enerji tüketimi analizi ve tahmini dikkate alındığında, PLM'in sürdürülebilir malzeme seçimi ve büyük ölçekli süreç planlaması gibi ilgili faaliyetleri gerçekleştirilebilir [23].

Dijital ikiz teknolojisi ile yüksek kaliteli sanal ürün modeli, parçaların mekanik yapısını ve birbirleri arasındaki bağlantıyı tam yansıtabilir. Bir arıza meydana geldiğinde, arızalı parça ürün arıza analizi servisi ile tespit edilebilir. Daha sonra imalatçıya ve kullanıcılara, hatalı parçanın konumu, ilgili sökme sırası, değiştirilmesi gereken parça özellikleri gibi ilgili bakım stratejisi sağlanabilir [10].

Sanal bakım, yapılandırılmış yüksek kaliteli sanal ürün modeli ve sanal gerçekçilik teknolojisi ile uygulanabilir. Ürün arızası meydana gelirken ve bakım stratejisi sağ-

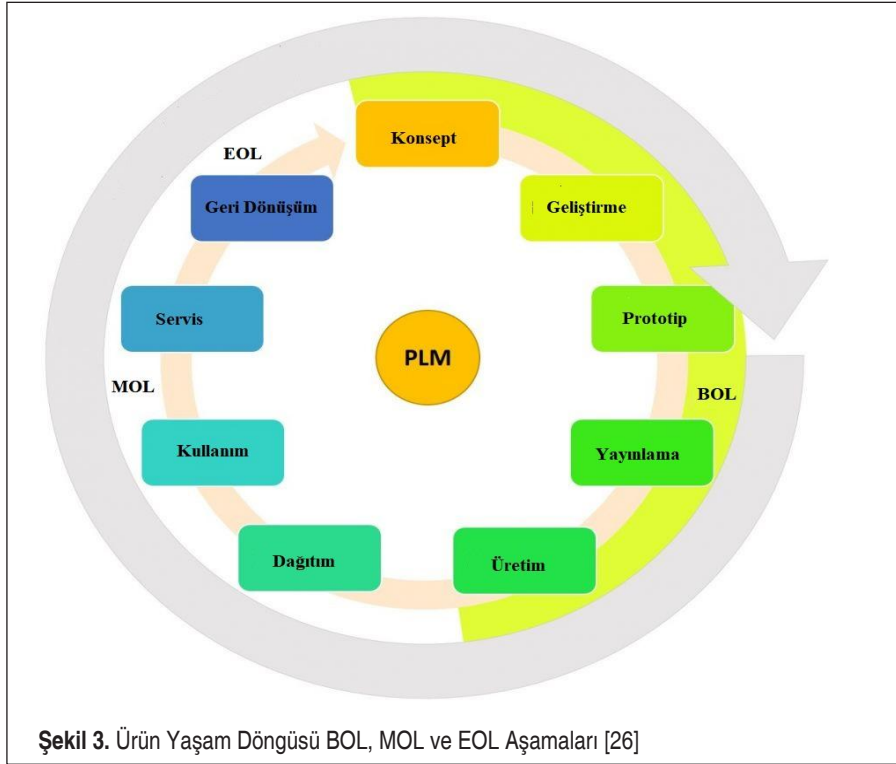


lanırken, kullanıcılar veya üretici, pratik bakım yapmadan önce sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik teknolojilerine dayalı sanal bakım gerçekleştirebilir [24].

Dijital ikiz odaklı ürün hizmetinin gelecekteki uygulama modlarından birini göstermek için bir güç transformatörü örnek olarak verilebilir. Güç transformatörüne sensörler eklenerek, fiziksel güç transformatörünün gerçek durum verileri sanal modele tamamen senkronize edilebilir. Dijital ikiz, mevcut performans durumuna ve bilgiye göre bakım gerekip gerekmediğini, bir sonraki görevi yerine getirip getiremeyeceğini zamanında analiz edebilir ve değerlendirebilir. Ayrıca, transformatörün enerji tüketimi, güç kalite analizleri gibi değerler kontrol edilebilir. Karar verme planlarının bilgisi fiziksel güç transformatörüne geri gönderilir. Bu arada, karar verme sonucu daha sonra ihtiyaç duyulabilecek ürün bilgi kütüphanesini güncellemek için de kullanılabilir [10].

## 6. PLM VE DİJİTALLEŞME

PLM şirketlerin rekabet avantajı elde etmeleri için müşterilere ek değerler sunmalarını sağlar. Ürün yaşam döngüsü genelinde üretilen ürün verilerini yöneterek PLM, iş süreçlerini daha verimli, esnek ve etkili hale getirir. Bir şirketin ürünle ilgili maliyetleri azaltmasını ve ürün kalitesini iyileştirmesini sağlar ve pazara sunma zamanını



Şekil 3. Ürün Yaşam Döngüsü BOL, MOL ve EOL Aşamaları [26]

kısaltarak ve daha verimli ürünler sunarak müşteri memnuniyetini doğrudan artırır ve pazar payını dolaylı olarak artırır [6].

Şekil 3'te bir ürün ömrünü üç önemli aşamada kategorize edebildiğimiz gösterilmiştir. Bu aşamalar, kavramsallaştırma, tanımlama ve gerçekleştirilmeyi içeren ömür başlangıcı (BOL) aşaması, kullanım, bakım ve servis de dâhil olmak üzere ömür ortası (MOL) aşaması, ürünün yenilenmesi ile yeniden kullanımı, parçaların sökülmesi ve yenilenmesi ile yeniden kullanımı, sökülmeden malzeme ıslahı, sökme ile malzeme ıslahı ve son olarak yakma ile birlikte veya bertaraf olmaksızın imha edilmesi gibi çeşitli senaryolarla karakterize edilen ömür sonu (EOL) aşamalarıdır [25].

PLM geleneksel olarak fiziksel ürün verilerinin toplanmasına odaklanır ve ürün üreticileri BOL aşamasından sorumludur. Bu nedenle MOL ve EOL aşamalarındaki ürün bilgileri ve bilgi akışı büyük ölçüde tutarsız ve eksiktir. Ürün yaşam döngüsündeki bu eksik bilgiler üreticilerin bütünsel bir ürün ve hizmet sağlama kapasitelerini sınırlamaktadır.

Ayrıca, PLM'de ürün verilerinin yönetilmesini ve uygulanmasını etkileyen bazı sorunlar vardır. Mevcut uygulamalar, sanal modellerdeki verilerden ziyade fiziksel ürün verilerinin analizine ağırlık vermeyi tercih eder [10]. Ancak, bilgi teknolojilerinin uygulanması ile PLM'in zorlukları büyük ölçüde azaltabilir.

Ürünleri yaşam döngüsü üzerinden takip ederek, radyo frekansı tanımlama (RFID) teknolojisi ve Nesnelerin İnterneti (IoT) ile doğru, gerçek zamanlı ve eksiksiz ürün bilgileri ile ürünün bilgi döngüsü kapatılabilir [27]. Ürünler sensörler ile donatıldığından, üreticilerin MOL ve EOL aşamalarında ürün verilerini toplaması ve bu verileri gelecekte ürünü geliştirmek için kullanması mümkündür. IoT teknolojisi ile ürün yaşam döngüsündeki hammadde, bileşen, makine, ürün ve tesisler gibi her şey entegre akıllı cihazlarla donatılabilir.

Dijitalleşme ile ürünün yaşam döngüsü hakkında gerçek zamanlı veriler alınarak kapalı çevrim yaşam döngüsü yönetimini mümkün kılar. Kapalı çevrim yaşam döngüsü yönetimi ile ürünlerin tasarım, üretim, kullanımı ve ömür sonu geri dönüşüm aşamalarının sürekli olarak geliştirilmesi sağlanır. O yüzden kapalı çevrim PLM ile tüm ürün ömrü boyunca bilgiler toplanır. Bunun sonucunda ürün kalitesi iyileştirilebilir. Nihayetinde, MOL ve EOL operasyonları BOL'deki ürün tasarımı ve üretimle ilgili bilgiler kullanılarak kolaylaştırılabilir. Tasarımcılar ve mühendisler tarafından alınan BOL kararları, sağlanan MOL ve EOL bilgilerinin yardımıyla daha doğru olacaktır [28]. Ayrıca, işletmelerin yöneticilerinin operasyon ve karar verme ile ilgili sorunları çözmelerine yardımcı olabilir.

Ürün yaşam döngüsünün her aşamasında, PLM'in ulaşmak istediği hedefler farklıdır. BOL aşaması ürün tasarımını ve üretim kalitesini geliştirmeyi hedeflerken, MOL aşaması ürünlerin güvenilirliği, kullanılabilirliği ve sürdürülebilirliğini iyileştirme



ile ilgilidir. Bu nedenle, dijitalleşmenin farklı ürün yaşam döngüsü fazlarında PLM üzerindeki etkisi farklı olduğundan hareketle dijitalleşmenin sırasıyla BOL, MOL ve EOL'de PLM fazları üzerindeki etkisi açıklanmıştır.

## 6.1 Dijitalleşmenin BOL Fazındaki Etkileri

Yukarıda belirtildiği gibi, tüm bu aşamalarda veri ve bilgi oluşturulmuştur. BOL'un tasarım ve üretim aşamaları arasında veri ve bilginin oluşturulması CAD / CAM / CAE ve diğer simülasyon yazılımları gibi akıllı sistemler tarafından desteklenir. Ürün Veri Yönetimi (PDM), birçok OEM tarafından ve etkileri yoluyla tedarikçilerince etkili ve verimli bir şekilde kullanılmaktadır. Ürün tasarımı verilen sorunlara çözüm bulmaya odaklanırken, imalat tasarımı somutlaştırmaya odaklanmaktadır. PLM'in bakış açısından, dijitalleşme ile üretim süreci gerçek zamanlı olarak izlenebilir ve ölçülebilir, karmaşık kalite sorunlarının nedenleri sorunlara dönüşmeden önce bulunabilir [4].

İlk olarak, dijitalleşme ürünleri ve süreç geliştirmeyi geliştirir. Sensör teknolojileri, üretim sürecini iyileştirmek için ürünün gerçek zamanlı durum bilgisini sağlayabilir. Sanal fabrika aracılığıyla bir şirket üretim sürecini gerçek zamanlı olarak izleyebilir, kontrol edebilir ve risklere hazırlanabilir. Sanal prototipleme ile sistem planlamacıları üretim sürecindeki değişikliklere hızlı bir şekilde yanıt verebilir, takım ve süreç tasarımının esnekliğini ve verimliliğini geliştirebilir ve BOL aşamasında kullanılabilirlik, konfor ve güvenlik açısından insan-makine etkileşimini göz önünde bulundurabilir. Fabrikadaki gerçek fiziksel kaynaklara kadar uzanan üç boyutlu simülasyonlar ile tasarımcılar, üretim süreçleri ve mevcut kaynakların bilgisi ve bağlamı ile tasarım yapabilir, böylece ürün geliştirme süreçlerinin hızlı ve hassas bir şekilde modellenmesini sağlayabilir [29].

İkinci olarak, dijitalleşme ürünün piyasaya sürülme süresini azaltmaya yardımcı olur. Üretim sırasında ortaya çıkan hataların %85'i tasarım aşamasında karar verme ile ilgili olduğundan, ürün tasarımı çok önemlidir [30]. Dijital bir fabrikada bir bilgi sistemi kullanarak, ürün yaşam döngüsünde meydana gelen beklenmedik problemlerden kaçınılabilir ve bu nedenle ürün tasarımı projesinde zamandan tasarruf edilebilir ve son olarak ürünün piyasaya sürülme süresi azaltılabilir. BOL'da grafiksel kullanıcı arayüzü (GUI) ve artırılmış gerçeklik (AR) kullanılarak, gerekli kâğıt çizimlerinin sayısı azaltılabilir ve tasarım revizyon aşaması hızlandırılabilir, böylece 'eşzamanlı mühendislik' gerçekleştirilir ve piyasaya sürülme süresi kısılır.

Üçüncüsü, dijitalleşme BOL aşamasında daha iyi enerji yönetimini destekleyebilir. IoT ile hammadde tedarikini, ürünün simülasyonunu optimize ederek ve tasarım aşamasında üretim ekipmanlarının verimli çalışma düzenini ayarlayarak daha iyi enerji yönetimi sağlanabilir. Üretim aşamasında enerji yönetimi üretim süreçlerinin daha iyi izlenmesi ve kontrol edilmesiyle başarılıdır. Örneğin, test verileri ürün yaşam döngüsü sırasında otomatik ekipmanlar tarafından üretilir, daha sonra teknoloji uzmanları

veya tasarımcılar, farklı etki faktörleri ile bağlantılı test verilerinin ilişkisini analiz ederek karar verebilir ve en enerji verimli ürün tasarımını seçebilirler [31].

## 6.2 Dijitalleşmenin MOL Fazındaki Etkileri

Ürün geliştirme bakış açısından, araştırmalar çoğunlukla BOL aşamasına odaklanır ve dağıtım, kullanım ve destek gibi MOL aşamasına ilişkin bilgiler eksiktir. Ömür boyu maliyeti optimize etme veya yüksek değerli veya uzun ömürlü ürünlerin kullanılabilirliğini artırma gereksinimleri nedeniyle, üreticilerin sadece sözleşme sürecindeki dönem boyunca ürün performansını garanti etmeleri değil, aynı zamanda bakım hizmetini de sağlamaları beklenmektedir [32].

Geleneksel olarak, ürünler fabrikadan taşındığında ve müşterilere teslim edildiğinde, ürünlerin sahibinin üretici yerine müşteri olarak değiştiği kabul edilir. Makineler veya ekipmanlar son kullanıcılar tarafından kullanıldığında, ilgili verileri toplamak ve analiz etmek zordur. Bu nedenle, üreticinin ürün kullanım verilerini kullanarak ürünü iyileştirmesi, çalışmayı optimize etmesi ve müşterilerin ürünü yüksek verimlilikte kullanması da zordur. Dijitalleşme yardımıyla teknik olarak ürünleri internete bağlamak ve bir IP adresi atamak mümkündür, böylece birbirleriyle, diğer bileşenlerle ve hatta uzaktan kumandalarla iletişim kurabilir ve etkileşime geçebilirler. Bu nedenle, verimli nakliye planlaması, optimize edilmiş depo yönetimi, kapsamlı enerji kullanım kılavuzu, öngörücü ve önleyici bakım yoluyla bu engeller ile başa çıkamamızı sağlar [31].

Dijitalleşmenin MOL fazında PLM üzerindeki bir diğer etkisi de ömür boyu maliyeti azalmasına yardımcı olmasıdır. Dijitalleşmenin en önemli faydalarından biri, planlanmamış arıza riskini azaltmak, yedek parçalar için envanter seviyesini azaltmak ve hatta yedek parçaların kullanılabilirliğini planlayarak envanter maliyetini en aza indirmek için planlanabilecek önleyici bakımı mümkün kılmaktır [32].

Akıllı buzdolabını ürününü örnek olarak kullanırsak, dijitalleşmenin MOL aşamasında enerji verimliliği ve proaktif bakım sağlayabileceği gösterilmiştir. Enerji verimliliğini etkileyen anormal koşullar neredeyse gerçek zamanlı olarak tespit edilebilir, böylece zamanında düzeltilebilir ve örneğin uzaktan izleme yardımı ile yedek parçalara ihtiyaç duyulduğu zaman gecikmeden hazırlanabilir. Daha da önemlisi, tekrar eden ziyaretlerden kaçınmak için gereken yedek parçalar ve gerekli tedarik zamanı önceden belirlenebilir [33].

## 6.3 Dijitalleşmenin EOL Fazındaki Etkileri

Hızla tükenen doğal kaynaklar ve imalat sanayinin getirdiği istenmeyen çevresel sonuçlar ve sosyal sorunlar nedeniyle, artık kullanım sonu ürünlerle başa çıkmak için uygun stratejiler düşünülmeli ve geliştirilmelidir. EOL aşaması yeniden kullanım, geri dönüşüm, yeniden üretim ve imha ile ilgilidir. Şu anda, PLM'in birincil odakları BOL ve MOL fazlarıdır, EOL fazı üzerinde çok az çalışma vardır [6]. PLM'yi bir döngü ha-



line getirmek ve kullanım sonu ürünlerin çevre ve insan üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak için EOL aşamasına değinmek gerekir. Tüm ürün yaşam döngüsü boyunca BOL'den MOL ve EOL'a geçerek, ürün bilgi akışı gittikçe daha az tamamlanır ve bu da EOL'de karmaşık karar verme süreçlerine yol açar. Bununla birlikte, her bir ögenin gerçek zamanlı ürün yaşam döngüsü verileri dijitalleşme, özellikle IoT yardımıyla izlenebilir, tespit edilebilir, saklanabilir ve analiz edilebilir. Böylece, son kullanım ürünleri ile ilgili kritik bilgiler, özellikle bu ürünlerin kalitesi ve kalan değeri tahmin edilebilir; dolayısıyla kaynak tasarrufu sağlayan geri dönüşüm faaliyetleri arttırılabilir [33].

Örnek olarak RFID tabanlı bir demontaj karar verme sistemi kullanılarak dijitalleşmenin EOL fazında PLM üzerindeki etkisi açıkça gösterilebilir [34]. Şu anda, geri dönüşüm şirketleri ürünleri topladıklarında, doğru ürün yaşam döngüsü bilgisi elde etmek zordur. Böyle bir sistemi kullanarak, geri dönüşüm firmaları her koşulda doğru ve zamanında yaşam döngüsü bilgisi sağlayabilir, böylece karar verme maliyeti azaltılabilir ve karar vermenin doğruluğu ve etkinliği artar. Sonuç olarak, geri kazanım verimliliği artırılabilir, çevre kirliliği en aza indirilebilir ve geri dönüş kazançları en üst düzeye çıkarılabilir.

## 7. SONUÇLAR

COVID-19 salgını ve gelişen teknoloji ile birlikte artık dijitalleşmenin firmalar için bir tercih değil zorunluluk olduğunu ifade etmek mümkündür. Çalışma kapsamında dijitalleşme, dijital ikiz kavramı ve uygulamalarına yer verilmiş ve ürün yaşam döngüsünde etkilediği aşamalar açıklanmıştır. Daha sonra PLM ve dijitalleşme ilişkisinden bahsedilerek, dijitalleşmenin ürün başlangıç (BOL), ürün ortası (MOL) ve ürün sonu (EOL) aşamalarında olan etkileri açıklanmıştır. Dolayısı ile anlamlı bir dijitalleşmenin PLM ile mümkün olacağı ve dijitalleşme ile PLM'in birbirini tamamlayan kavramlar olduğundan hareketle COVID – 19 ile başlayan sürecin PLM konseptinin yaygınlaşması ve farkındalığının artması için bir fırsat olduğunu belirtmek mümkündür [35].

COVID-19 sonrası “yeni normalleşme” ile birlikte dijital kanalları kullanmakta geciken firmaların büyük ölçüde dezavantajlı olacakları değerlendirilebilir. Halihazırda dijitalleşmenin PLM üzerindeki etkisi devam etmektedir ve şirketlerin dijital çağda kendilerini rekabetçi tutmak için bazı adımlar atmaları gerekmektedir. Günümüzde, MOL ve EOL aşamasında ürünle etkileşimde bulunan birçok aktör, diğer aktörlerle çok az bilgi alışverişi yaparak yalnızca ilgili faaliyetlerini gerçekleştirmektedirler. Ek olarak dijitalleşme ile birlikte tasarımcılar, üreticiler, müşteriler ve geri dönüşümcüler gibi farklı elemanlar arasında bütünsel bir bilgi alışverişi ve etkileşim teşvik edilmektedir. Bunun gibi karmaşık ağa sahip organizasyonlarda iç ve dış kaynaklardan gelen bilgileri ortaklaşa kullanmak, yönetmek ve paylaşmak oldukça zorlayıcı olacaktır ve



bu yüzden tamamlayıcı alanlarda uzmanlaşmış şirketlerle yapılacak ortaklıklar önemli olacaktır. Bu nedenle gelecekte tüm bu taraflar arasında güçlü bir ortaklığın gerekli olacağı öngörülmektedir [32].

Çalışmada ürün yaşam döngüsündeki sorunları çözmek için, dijital ikizin ürün tasarımı, ürün imalatı ve ürün hizmetinde yüksek potansiyel uygulamasına sahip olduğu sonuçlarına varılmıştır. Dijitalleşmeyle birlikte ürünlerin, süreçlerin karmaşıklığı artmaktadır ve veri hacmi son derece büyük hale gelmektedir ayrıca veri biçimlerinin çeşitliliği artmaktadır. Bu da verilerin yönetilmesinin daha zor hale gelmesine neden olmaktadır. PLM, çok büyük miktarda verinin verimli bir şekilde işlenmesini sağlamaktadır. Dijitalleşme ve dijital ikiz uygulamaları ile birlikte, imalat firmaları ve ilgili taraflar hem siber hem de fiziksel dünyada giderek daha fazla birbirine bağlanacaktır. Farklı alanlardan gelen veriler arasındaki bağlantıları modellemek için standartlaştırılmış ve endüstri genelinde kabul edilmiş PLM veri modelleri sağlamak imalat firmaları açısından oldukça önemlidir.

Teknoloji ve PLM ne kadar gelişmiş olursa olsun, süreçler insanlar tarafından yönetildiği, kontrol edildiği, uygulandığı ve gerçekleştirildiği için insanlar her zaman vazgeçilmezdir. Dijitalleşme nedeniyle karmaşıklık, soyutlama ve problem çözme becerilerine ve çok disiplinli bilgiye sahip insanlara olan ihtiyaç da artacaktır. Buna hazırlıklı olmak için özel eğitim verilmesi şirketler için bir seçenek olabilir. Gelecekte, PLM'in, malzeme geri dönüşümünde iyileştirmeyi, ürün ve lojistikte kapsamlı izlenebilirliği ve PLC genelinde kaynak kullanımının verimliliğini sağlayarak daha az kaynak yoğun bir toplum sağlaması beklenmektedir [6].

İleride yapılacak çalışmalarda araştırmacıların endüstri odaklı olarak dijitalleşme ve PLM etkileşimini gösteren vaka çalışmaları yapmaları önerilmektedir.

## KAYNAKÇA

1. **Gartner**, 2016. "Gartner IT Glossary, "<https://www.gartner.com/en/information technology/glossary/digitalization>, son erişim tarihi: 09.09.2020.
2. **Herterich, M. M., Uebornickel, F., & Brenner, W.** 2015. "The Impact of Cyber-Physical Systems on Industrial Services in Manufacturing, *Procedia Cirp*, 30, p. 323-328, doi: 10.1016/j.procir.2015.02.110.
3. **Figay, N., Ghodous, P., Khalfallah, M., Barhamgi, M.** 2012. Interoperability Framework for Dynamic Manufacturing Networks. *Computers in Industry*, 63(8), pp.749-755, doi: 10.1016/j.compind.2012.08.008.
4. **Parviainen, P., Tihinen, M., Kääriäinen, J., Teppola, S.** 2017. "Tackling the Digitalization Challenge: How to Benefit from Digitalization in Practice, "*International Journal of Information Systems and Project Management.*, vol.5., p.63-77, doi: 10.12821/ijispm.
5. **Golovatchev, J.D., Budde, O.** 2007. June. Next Generation PLM-an integrated approach



for the Product Lifecycle Management. In Dans Proceedings of ICCPR2007: International Conference on Comprehensive Product Realization 2007. Proceedings of ICCPR2007: International Conference on Comprehensive Product Realization.

6. **Terzi, S., Bouras, A., Dutta, D., Garetti, M., Kiritsis, D.** 2010. "Product lifecycle management - From its history to its new role," *International Journal of Product Lifecycle Management*, vol.4, p.360-389, doi: 10.1504/IJPLM.2010.036489.
7. **Xin, Y., Ojanen, V.** 2017. "The Impact of Digitalization on Product Lifecycle Management: How to Deal with it?," *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 10-13 Aralık 2017, Singapore, doi: 10.1109/IEEM.2017.8290062.
8. **McKinsey.** 2020. "COVID-19 US Digital Sentiment Survey," <https://www.mckinsey.com/business-function-s/marketing-and-sales/our-insights/survey-us-consumer-sentiment-during-the-coronavirus-crisis>, son erişim tarihi: 09.09.2020.
9. **Deloitte.** 2020. "Küresel COVID-19 Salgınının Türkiye'de Farklı Kategorilere Etkileri," <https://www2.deloitte.com/tr/tr/pages/consulting/articles/kuresel-covid-19-salgininin-turkiyedefarklikategorilereetkileri.html>, son erişim tarihi: 09.09.2020.
10. **Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., Sui, F.** 2018. "Digital Twin-driven product design, manufacturing and service with big data," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 94, p. 3563–3576, doi: 10.1007/s00170-017-0233-1.
11. **Baig, A., Hall, B., Jenkins P., Lamarre, E., McCarthy, B.** 2020. "The COVID-19 Recovery Will be Digital: A Plan for the First 90 days," <https://www.mckinsey.com/business-functions/mckinsey-digital/our-insights/the-covid-19-recovery-will-be-digital-a-plan-for-the-first-90-days>, son erişim tarihi: 16.06.2020.
12. **Lundin, N.** 2020. "Covid-19 and digital transformation - What do we see now and what will we see soon?," <https://sweden-science-innovation.blog/beijing/covid-19-and-digital-transformation-what-do-we-see-now-and-what-will-we-see-soon>, son erişim tarihi: 09.09.2020
13. **Grant J.** 2019. "Where Does PLM Fit in Digital Transformation?," <https://www.design-news.com/automation-motion-control/where-does-plm-fit-digital-transformation>, son erişim tarihi: 09.09.2020.
14. **Hess, T., Matt, C., Benlian, A., Wiesböck, F.** 2016. "Options for Formulating a Digital Transformation Strategy," *MIS Quarterly Executive*, vol.15, p.123-139, doi: 10.4324/9780429286797-7.
15. **Grieves, M.** 2014. "Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication," <http://www.aprison.com/library>, son erişim tarihi: 09.09.2020.
16. **Bolton, R. N., McColl, K., Janet, R., Cheung, L., Gallan, A., Orsingher, C., Witell, L., Zaki, M.** 2018. "Customer experience challenges: Bringing together digital, physical and social realms," *Journal of Service Management*, vol.29, no. 5, p. 776–808.
17. **Tuegel, E., Ingraffea, A.R., Eason, T.G.** 2011. "Reengineering aircraft structural life



- prediction using a digital twin, “International Journal of Aerospace Engineering.,vol.11, p. 1-14, doi: 10.1155/2011/154798.
18. **Smarslok, B., Culler, A., Mahadevan, S.** 2012. “Error quantification and confidence assessment of aerothermal model predictions for hypersonic aircraft. “53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 23-26 Nisan 2012, Honolulu, Hawaii, doi: 10.2514/6.2012-1817.
  19. **Cerrone, A., Hochhalter, J., Heber, G. ve Ingraffea, A.** 2014. “On the Effects of Modeling as-manufactured Geometry: Toward Ddigital Twin, “International Journal of Aerospace Engineering, DOI: 10.1155/2014/439278.
  20. **Mussomeli,A., Meeker, B., Shepley, S., Schatsky, D.** 2018. “<https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/signals-for-strategists/understanding-digital-twin-technology.html>, son erişim tarihi: 09.09.2020.
  21. **Boschert, S., Rosen, R.** 2016. “Digital Twin-the Simulation aspect, Mechatronic Futures, Springer International Publishing, Switzerland, doi: 10.1007/978-3-319-32156-1\_5.
  22. **Glaessgen, E., Stargel, D.** 2012. “The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles, “53rd AIAA/ASME/ASCE/ AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 23-26 Nisan 2012, Honolulu,Hawaii.
  23. **Tao, F., Bi, L.N., Zuo Y., Nee, A.Y.C.** 2016. “A Hybrid Group Leader Algorithm for Green Material Selection with Energy Consideration in Product Design, “CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol.65, p. 9–12, doi: 10.1016/j.cirp.2016.04.086.
  24. **Qi, Q., Tao, F., Hu, T., Anwer, N., Liu, A., Wei, Y., Wang, L., Nee, A.** 2019. “Enabling Technologies and Tools for Digital Twin, “Journal of Manufacturing Systems, 2019, p 1-19, doi: 10.1016/j.jmsy.2019.10.001.
  25. **Ötleş, S., Üçok, B.** 2018. “Kapalı Döngü - Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi, “Plastik ve Ambalaj Teknolojisi Dergisi, s. 45-54.
  26. **Smartsheet.** 2020. “The New Product Development Process and Product Life Cycle Management, “<https://www.smartsheet.com/product-life-cycle-management>, son erişim tarihi: 09.09.2020.
  27. **Li, J., Tao, F., Cheng, Y., Zhao, L.** 2015. “Big Data in Product Lifecycle Management”, “The International Journal of Advanced Manufacturing Technology”, 81(1–4), 667–684, doi: 10.1007/s00170-015-7151-x.
  28. **Kiritsis, D.** 2013. “Semantic Technologies for Engineering Asset Life Cycle Management, “International Journal of Production Research”, vol.51, p. 7345-7371, doi: 10.1080/00207543.2012.761364.
  29. **Kuo, C.F., Wang, M.J.** 2012. “Motion Generation and Virtual Simulation in a Digital Environment, “International Journal of Production Research, vol. 50, no. 22, p. 6519-6529, doi: 10.1080/00207543.2011. 653698.
  30. **Affonso R.C., Cheutet V., Ayadi M., and Haddar M.** 2013. “Simulation in product life-cycle: Towards a better information management for design projects, “Journal of Modern Project Management, vol. 1, no. 1, p. 113-119.
  31. **Tao, F., Wang, Y., Zuo, Y., Yang, H., Zhang, M.** 2016. “Internet of Things in Prod-



uct Life-Cycle Energy Management, “Journal of Industrial Information Integration, doi: 10.1016/j.jii.2016.03.001.

32. **Roy, R., Stark, R., Tracht, K., Takata, S., Mori, M.** 2016. “Continuous Maintenance and the Future – Foundations and Technological Challenges, CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 65, p.667-688.
33. **Främling, K., Holmström, J., Loukkola, J., Nyman, J., Kaustell, A.** 2013. “Sustainable PLM through Intelligent Products, “Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 26. p. 789–799, doi: 10.1016/j.engappai.2012.08.012.
34. **Chen, S., Yi, J., Zhu, X., Jiang, H., Ju, W.** 2017. “RFID-based Integrated Method for Electromechanical products disassembly decision-making, “International Journal of Computer Integrated Manufacturing, vol. 30, no. 2-3, p. 229-254, doi: 10.1080/0951192X.2016.1145807
35. **Ellenrieder, S.** 2017. “No meaningful Digitalization Without PLM, “<https://www.plmportal.org/en/no-meaningful-digitalization-without-plm.html>, son erişim tarihi:09.09.2020.

## 2020 YILI MAKALE DİZİNİ

TMMOB Makina Mühendisleri Odası tarafından ülke sanayisinin, toplumun, Odamıza üye olan meslek disiplinlerinin ve meslektaşlarımızın ihtiyaçlarını karşılamak üzere 1957'den bugüne değin yayımlanan Mühendis ve Makina Dergisi'nde 2020 yılında yer alan makalelerin dizinini siz değerli okurlarımızla paylaşıyoruz. 3 aylık periyotlar ile yayımlana, ülkemizin konusunda önde gelen dergilerinden olan Mühendis ve Makina, yeni teknolojileri, bilimsel araştırma ve inceleme konularını ve mühendisliğe ilişkin birikimleri sayfalarına taşıyarak Oda üyelerine ve ilgili kesimlere bu birikimlerini ulaştırma çabasıdadır. Dergimizde üniversiteler ve bilim-araştırma kurumlarından gelen makalelerin yanı sıra, çeşitli sektörlerden gelen uygulamaya yönelik makalelere de yer verilmektedir.

2020 yılında dergimize makale gönderen bütün yazarlara teşekkür eder, 2021 yılında da değerli katkılarını bekleriz.

### OCAK-MART 2020 698. SAYI

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

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

**Olca SARI, Orçun BULAT, Onur TUNÇER, Çağlar ÜÇLER**

#### Krom Kaplamalı Parçalarda Termal Çevrim Analizi

*Thermal Cycle Analysis in Chromium-Plated Parts*

**Ali Ozan BAĞRIYANIK**

#### Pnömatik Sistemlerde Enerji Verimliliği

*Energy Efficiency in Pneumatic Systems*

**Arda ZAİM, Haydar ARAS**

#### Ada Tipi Solenoid Valflerde Akış Analizi Yardımı ile Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi

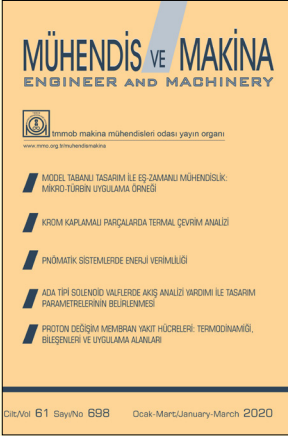
*Determination of Design Parameters in Solenoid Valves Groups By Means of Flow Analysis*

**Kadir ÇAVDAR, Mustafa KARATAŞ, Hüseyin YAŞAR**

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

*Proton Exchange Membrane Fuel Cells: Thermodynamics, Components and Applications*

**Gamze KARANFİL**



JANUARY-MARCH 2020 NO: 698



## NİSAN-HAZİRAN 2020 699. SAYI

### Yapılardaki Kat Adedinin Büyük Kentlerin Güneş Enerjisinden Akılcı Yararlanmasına Etkileri

The Impact of High-Rise Buildings on the Rational Utilization of Solar Energy in Large Cities

**Birol KILKIŞ**

### Soğuk Dövmede Kullanılan Yüzey İşlem Metotları

*Surface Preparation Methods Used in Cold Forging*

**Fatih KOCATÜRK, Doğu ZEREN, Sezgin YURTDAS, M. Burak TOPARLI, Cenk KILIÇASLAN**

### Bakım Uygulamalarında Robotların Yardımcı Ekipman Olarak Kullanılması

*Using Robots as Auxiliary Equipment in Maintenance Applications*

**Sezcan YILMAZ**

### Bir Paketleme Makinesinde Kullanılan Ambalaj Kesici Mekanizmanın Bakım Süresine Etkisi

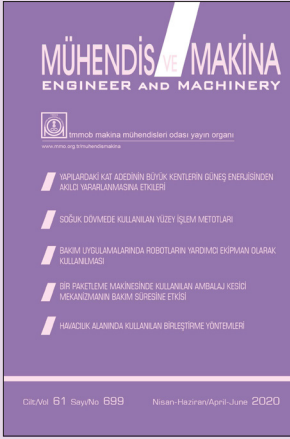
*Effect of the Cutter Mechanism Used in a Packaging Machine on the Maintenance Time*

**Yiğitcan BALIKÇIOĞLU, Binnur Gören KIRAL**

### Havacılık Alanında Kullanılan Birleştirme Yöntemleri

*Welding and Brazing Techniques and Application in Aviation Industry*

**Emin Orhun BAŞTEKELİ**



APRIL-JUNE 2020 NO: 699



## TEMMUZ-EYLÜL 2020 700. SAYI

### Seçilmiş Ülkelerin Ulaştırma Sektöründeki Bakım ve Yatırım Giderlerinin Karşılaştırılması

*Comparison of Maintenance and Investment Expenses in the Transportation Sector for Selected Countries*

**Harun Kemal ÖZTÜRK, Aşkın GÜNGÖR**

### Kat Isıtmasında Yüzer Döşeme ve Faz Değiştiren Malzeme Kullanımının Enerji Verimliliğine ve Konfor Koşullarına Etkisi

*The Effect of Floating Floor and Phase Changing Materials on Energy Efficiency and Comfort Conditions in Individual Heating*

**Ersin HAYDARASLAN, Burhan ÇUHADAROĞLU, Yalçın YAŞAR**

### Rulman Ömürlerinde Güvenilirlik ve Etkileyen Faktörlerin İncelenmesi

*Reliability of Bearing Life and Investigation of Affecting Factors*

**Tezcan ŞEKERCİOĞLU**

### Konaklama İşletmelerinde Çalışan Yöneticilerin Bakım Yönetimi Uygulamalarına Bakışı: Denizli’de Faaliyet Gösteren Konaklama İşletmeleri Örneği

*The View of Managers Working in Hospitality Businesses on the Maintenance Management Practices: The Case Study for Hospitality Companies Operating in Denizli*

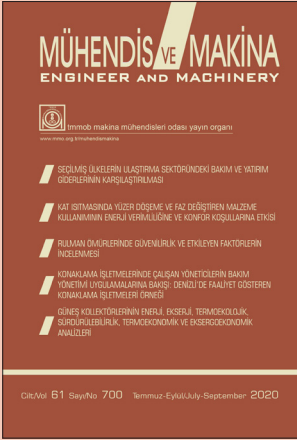
**Hande Mutlu ÖZTÜRK, Cemal MERAN**

### Güneş Kolektörlerinin Enerji, Ekserji, Termoeolojik, Sürdürülebilirlik, Termoekonomik ve Eksergoekonomik Analizleri

*Energy, Exergy, Thermoecologic, Sustainability, Thermoeconomic and Exergoeconomic Analyses of Solar Collectors*

**Hakan ÇALIŞKAN**

JULY-SEPTEMBER 2020 NO: 700





## EKİM-ARALIK 2020 701. SAYI

### Havacılıkta Organizasyonel Kazalar: B-737 Max Uçak Kazalarının Mühendislik Perspektifinden İncelenmesi

*The Organizational Accidents in Aviation: An Investigation of B-737 Max Aircraft Accidents from the Engineering Perspective*

**Tamer SARAÇYAKUPOĞLU**

### Rüzgar Türbinlerinde İşletme ve Bakım

*Operation and Maintenance for Wind Turbines*

**Harun Kemal ÖZTÜRK**

### Fotovoltaik (PV) Pompa Sisteminin Bileşenlerinin Hesabı

*Creating the Sizing Algorithm of a Photovoltaic Pump System*

**Ahmet DEMİR, F. Mertkan ARSLAN,**

**Hüseyin GÜNERHAN**

### Hidrolik Yüksek Basınç Hattı Filtre Gövdesinin

*Design, Optimization and Fabrication of Body of Hydraulic High-Pressure Filter and Experimental Validation*

*Design, Optimization and Fabrication of Body of Hydraulic High-Pressure Filter and Experimental Validation*

**Samet TEKELİOĞLU, Safa ELDEK\*, Hüseyin GÜMÜŞ, Ayfer SARIGÜL, Şeyma AYHAN, Ali KAHRAMAN, Murat DİLMEÇ**

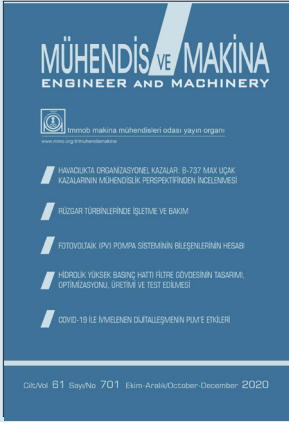
### COVID-19 ile İvmelenen Dijitalleşmenin PLM'e

**Etkileri**

*The Impact of Digitalization Accelerated by COVID-19 on PLM*

**Alim FİLİK, Rüstem Barış YEŞİLAY**

OCTOBER-DECEMBER 2020 NO: 701







## 2020 YILINDA DERGİMİZ İÇİN MAKALE DEĞERLENDİREN HAKEMLER

Abdurrahman Cihad KAYADUMAN	Anadolu Üniversitesi
Adem CANDAŞ	İstanbul Teknik Üniversitesi
A. Alper ÖZALP	Uludağ Üniversitesi
Arda ZAİM	Pamukkale Üniversitesi
Armağan ARICI	Kocaeli Üniversitesi
Atakan TANTEKİN	Atatürk Üniversitesi
Atilla BIYIKOĞLU	Gazi Üniversitesi
Ayşe NARİN	Ege Üniversitesi
Cemal MERAN	Pamukkale Üniversitesi
Cemalettin AYGÜN	Karadeniz Teknik Üniversitesi
Elif ERZAN TOPÇU	Uludağ Üniversitesi
Emin AÇIKKALP	Bilecik Şehy Edebali Üniversitesi
Emre KARA	Gaziantep Üniversitesi
Faruk ORAL	Bitlis Eren Üniversitesi
Gürkan İRSEL	Trakya Üniversitesi
Hakan ÇALIŞKAN	Uşak Üniversitesi
Hakan KARAKAYA	Batman Üniversitesi
Haydar ARAS	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Hüsamettin BULUT	Harran Üniversitesi
Hüseyin GÜNERHAN	Ege Üniversitesi
İhsan DAĞTEKİN	Fırat Üniversitesi



Kadir ÇAVDAR	Uludağ Üniversitesi
Levent BİLİR	Yaşar Üniversitesi
Mehmet Burak BİLGİN	Amasya Üniversitesi
Mehmet Emin ARICI	Karadeniz Teknik Üniversitesi
Mehmet EZAN	Dokuz Eylül Üniversitesi
Mehmet Şerif KAVSAOĞLU	Eskişehir Teknik Üniversitesi
Muhammet KAYFECİ	Karabük Üniversitesi
Muhsin KILIÇ	Uludağ Üniversitesi
Mustafa GÜDEN	İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü
Mustafa ÜNAL	Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi
Necmi DÜŞÜNCELİ	Aksaray Üniversitesi
Oğuz TURGUT	Gazi Üniversitesi
Okyar KAYA	Pamukkale Üniversitesi
Orhan GÜLCAN	Marmara Üniversitesi
Öner ATALAY	Pamukkale Üniversitesi
Salih Seçkin EROL	Kilis 7 Aralık Üniversitesi
Utkucan ŞAHİN	Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi
Tezcan ŞEKERCİOĞLU	Pamukkale Üniversitesi
Yaşar İSLAMOĞLU	Sakarya Üniversitesi
Yusuf ÖZBAKIŞ	Düzce Üniversitesi

*2020 yılında Mühendis ve Makina dergisine katkılarından dolayı uzmanlarımıza teşekkür ederiz.*

# MÜHENDİS VE MAKİNA DERGİSİ YAZIM ESASLARI

**Mühendis ve Makina** dergisi, TMMOB Makina Mühendisleri Odası tarafından, ülke sanayisinin, toplumun, Odamıza üye meslek disiplinlerinin ve meslektaşlarımızın bilimsel, teknik ve mesleki konularda bilgi gereksinimlerini karşılamak, bilimsel ve teknik yönde gelişimlerine katkıda bulunmak üzere düzenli 3 aylık periyotlarla yayımlanan mesleki teknik bir yayın organıdır. "Mühendis ve Makina Dergisine" makina mühendisliği alanında aşağıda nitelikleri açıklanmış yazılar Türkçe ve İngilizce olarak kabul edilmektedir.

**Araştırma Makalesi:** Orijinal bir araştırmayı bulgu ve sonuçlarıyla yansıtan yazılardır. Çalışmanın bilime katkısı olmalıdır.

**Tarama Makalesi:** Yeterli sayıda bilimsel makaleyi tarayıp, konuyu bugünkü bilgi ve teknoloji düzeyinde özetleyen, değerlendirme yapan ve bulguları karşılaştırarak yorumlayan yazılardır.

## SUNUŞ FORMATI

1. Yazı tümüyle (metin, çizelgeler, denklemler, çizimler) bilgisayarda düzenlenmeli ve baskıya hazır biçimde teslim edilmelidir. Yazı, A4 (210x297 mm) boyutlu kağıda, Word ortamında, 10 punto (ana başlık 15 punto) Times New Roman font kullanılarak, bir aralıkla yazılmalıdır.
2. Çizimler (şekiller) ve çizelgelerle (tablolar) birlikte, makaleler 25 sayfadan, kısa bildiriler 4 sayfadan daha uzun olmamalıdır.
3. Yazı, Online Makale Yönetim Sistemi (OMYS) üzerinden gerekli kayıtlar oluşturularak gönderilmelidir. Yüklenen makale, "makale adının ilk 2 ya da 3 kelimesi" şeklinde adlandırılmalıdır. OMYS'ye yüklenen makalede yazar bilgileri bulunmamalı, yazar bilgileri için ayrıca bir kapak sayfası oluşturularak sisteme yüklenmelidir. Kapakta makale adı ve yazar iletişim bilgileri (adı soyadı, adresi, e-postası, yazara ait ORCID\* bilgisi varsa akademik unvanı) yer almalıdır.
4. Metin yalın bir dil ve anlatımla yazılmalı, Türkçe yazım kurallarına uygun olmalı, üçüncü tekil şahıs ve edilgen fiiller kullanılmalı, devrik cümleler içermemelidir.
5. Başlık mümkün olduğunca kısa (en çok 100 harf) ve açık olmalı, içeriği yansıtabilmelidir. İngilizce başlıktaki kelimeler ilk harfleri büyük ve gramer kurallarına uygun şekilde yazılmalıdır.
6. Bölümler (i) öz ve anahtar kelimeler, (ii) abstract ve keywords (İngilizce başlık, öz ve anahtar kelimeler), (iii) ana metin, (iv) semboller, (v) teşekkür (gerekliyse) ve (vi) kaynaklar sırası içinde düzenlenmelidir.
7. Öz (ve abstract) çalışmanın amacını, kapsamını, yöntemini ve ulaşılan sonuçları kısaca tanımlamalı ve 100 kelimeyi aşmamalıdır. En az üç tane Türkçe ve İngilizce anahtar kelime verilmelidir. Türkçe ve İngilizce Başlık, Öz (abstract) ve anahtar kelimeler (keywords) birinci sayfaya sığdırılmalı ve ana metin ikinci sayfadan başlatılmalıdır.
8. Bölüm ve alt bölüm başlıkları numaralandırılmalıdır (TS 1212 ISO 2145).
9. Semboller uluslararası kullanıma uygun seçilmeli; her bir sembol ilk kullanıldığı yerde tanımlanmalı, ayrıca metnin sonunda (Kaynaklardan önce) tüm semboller alfabetik sırayla (önce Latin alfabesi, sonra Yunan alfabesi) listelenmelidir.
10. Denklemler numaralandırılmalı ve bu numaralar satır sonunda parantez içinde gösterilmelidir.
11. Fotoğraflar tarayıcıdan geçirilerek çözünürlüğü en az 300 dpi olacak şekilde ve jpeg formatında bilgisayar 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 yayımlanmamış olmalıdır. Herhangi bir toplantıda tebliğ olarak sunulmuş veya sunulacak ise bu açık olarak belirtilmelidir.
11. Hakem değerlendirme raporuna katılmayan yazar makalesini geri çekme hakkına sahiptir. Ancak geri çekme 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](http://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 a paper:** Author's surname, initial of his/her name., other authors. year. "name of the paper," name of the conference, date, place.

**If reference is a thesis:** Author's surname, initial of his/her name., other authors. year. "name of the thesis," degree, presented 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](http://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.



Havacılıkta Organizasyonel Kazalar: B-737 Max Uçak Kazalarının Mühendislik Perspektifinden İncelenmesi 241

*The Organizational Accidents in Aviation: An Investigation of B-737 Max Aircraft Accidents from the Engineering Perspective*

Tamer SARAÇYAKUPOĞLU

Rüzgar Türbinlerinde İşletme ve Bakım 262

*Operation and Maintenance for Wind Turbines*

Harun Kemal ÖZTÜRK

Fotovoltaik (PV) Pompa Sisteminin Bileşenlerinin Hesabı 280

*Creating the Sizing Algorithm of a Photovoltaic Pump System*

Ahmet DEMİR, F. Mertkan ARSLAN, Hüseyin GÜNERHAN

Hidrolik Yüksek Basınç Hattı Filtre Gövdesinin Tasarımı, Optimizasyonu, Üretimi ve Test Edilmesi 299

*Design, Optimization and Fabrication of Body of Hydraulic High-Pressure Filter and Experimental Validation*

Samet TEKELİOĞLU, Safa ELDEK, Hüseyin GÜMÜŞ,

Ayfer SARIGÜL, Şeyma AYHAN, Ali KAHRAMAN, Murat DİLMEÇ

COVID-19 ile İvmelenen Dijitalleşmenin PLM'e Etkileri 320

*The Impact of Digitalization Accelerated by COVID-19 on PLM*

Alim FİLİK, Rüstem Barış YEŞİLAY