

MÜHENDİS VE MAKİNA

ENGINEER AND MACHINERY

ISSN 1300-3402 E-ISSN 2667-7520



tmmob makina mühendisleri odası yayın organı

www.mmo.org.tr/muhendismakina



Cilt/Vol 66 Sayı/No 718
Ocak-Mart/January-March 2025



TMMOB MAKİNA MÜHENDİSLERİ ODASI MÜHENDİS VE MAKİNA DERGİSİ
UCTEA CHAMBER OF MECHANICAL ENGINEERS JOURNAL OF ENGINEER AND MACHINERY
ISSN:1300-3402, E-ISSN:2667-7520



Mühendis ve Makina

Engineer and Machinery

YIL/YEAR : 2025

CİLT/VOLUME : 66

SAYI/ ISSUE : 718



İMTİYAZ SAHİBİ / PRIVILEGE OWNER

Yunus YENER

TMMOB MAKİNA MÜHENDİSLERİ ODASI / UCTEA CHAMBER OF MECHANICAL ENGINEERS

SORUMLU YAZI İŞLERİ MÜDÜRÜ / PRODUCTION DIRECTOR

Yunus YENER

EDİTÖR / EDITOR IN CHIEF

Prof. Dr. Harun Kemal ÖZTÜRK

Pamukkale Üniversitesi/Pamukkale University

EDİTÖR YARDIMCILARI / ASSOCIATE EDITORS

Prof. Dr. L. Berrin ERBAY, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi /Eskisehir Osmangazi University

Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ, Çankaya Üniversitesi/Cankaya University

ALAN EDİTÖRLERİ / AREA EDITORS

Prof. Dr. Metin AKKÖK, Orta Doğu Teknik Üniversitesi/Middle East Technical University

Prof. Dr. Cemal MERAN, Pamukkale Üniversitesi/Pamukkale University

Prof. Dr. Semiha ÖZTUNA, Trakya Üniversitesi/Trakya University

Dr. Öğr. Üye. Gurbet ÖRÇEN, Dicle Üniversitesi/Dicle University

YAYIN SEKRETERİ / EDITORIAL SECRETARY

Ceren YILMAZ ARAS

KAPAK VE SAYFA TASARIMI/ COVER AND PAGE DESIGN

Muazzez POLAT

TEKNİK SORUMLU / TECHNICAL ASSISTANT

Mehmet AYDIN

BASKI/PRINTED BY

Ankamat Matbaacılık Sanayi Ltd. Şti.

30. Cadde 538. Sokak No: 60 İvedik Organize Sanayi- Ankara

Tel: (0312) 394 54 94

BASKI SAYISI / CIRCULATION

1000

BASKI TARİHİ / PUBLISHING DATE

29 Mart 2025



YAYIN KURULU / EDITORIAL BOARD

- Prof. Dr. Metin AKKÖK, Orta Doğu Teknik Üniversitesi/Middle East Technical University, Ankara
Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ, Çankaya Üniversitesi/Çankaya University, Ankara
Prof. Dr. L. Berrin ERBAY, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi/Eskisehir 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

EDİTÖRLER KURULU / EDITORIAL BOARD

- Prof. Dr. C. Erdem İMRAK, İstanbul Teknik Üniversitesi/Istanbul Technical University, İstanbul
Prof. Dr. Erdiñç KALUÇ, Kocaeli Üniversitesi/Kocaeli University, Kocaeli
Prof. Dr. Ali GÜNGÖR, Ege Üniversitesi/Ege University
Prof. Dr. Hikmet RENDE, Akdeniz Üniversitesi/Akdeniz University, Antalya
Prof. Dr. Ali PINARBAŞI, Yıldız Teknik Üniversitesi/Yıldız Technical University,
Prof. Dr. Sedat BAYSEÇ, Gaziantep Üniversitesi/Gaziantep University
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. Miroslaw BONEK, Silesian University of Technology, Poland
Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU, Karadeniz Teknik Üniversitesi/Karadeniz Technical University, Trabzon
Prof. Dr. Leszek A. DOBRZANSKI, Silesian University of Technology, Poland
Prof. Dr. Ö. Altan DOMBAYCI, Pamukkale Üniversitesi/Pamukkale University, Denizli
Prof. Dr. Halim GÜRGENCI, Queensland Üniversitesi/The University of Queensland, Australia
Prof. Dr. Hyung-MAN KIM, Power System and Sustainable Energy Laboratory (PSSEL), South Korea
Prof. Dr. Basim AL-NAJJAR, Linnaeus University, Sweden
Prof. Dr. Barış ÖZERDEM, İzmir Ekonomi Üniversitesi/Izmir University of Economics, İzmir
Prof. Dr. Melih Cemal KUŞHAN, ESOGÜ/Eskisehir Osmangazi University, Eskişehir
Doç. Dr. Tunç APATAY, Gazi Üniversitesi/Gazi University, Ankara
Doç. Dr. Yiğit TAŞÇIOĞLU, 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



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

Dergimizin yer aldığı veritabanları



İÇİNDEKİLER/ CONTENTS

Araştırma Makaleleri / Research Articles

Sayfalar

- Toz Metalürjisi ve Sıcak Preslemeyle Üretilen Al7075-Si₃N₄ Kompozitlerin Mikroyapısının ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi** 1-22
Investigation Of The Microstructure and Mechanical Properties Of Al7075-Si₃N₄ Composites Produced By Powder Metallurgy and Hot Pressing
Aleyna TAŞKIN, Elif IŞIK, Mahmut Can ŞENEL
- Investigation of Induction Sinterability of Powder Metal Parts of Different Shapes and Sizes** 23- 38
Farklı Şekil ve Boyutlardaki Toz Metal Parçaların İndüksiyon ile Sinterlenebilirliğinin Araştırılması
Can ÇİVİ, Enver ATİK
- Vinç Sistemlerinde Kirişlerin Kaynaklı Birleşim Yerlerinin Bağlantı Tasarım Optimizasyonlarının Modellenmesi, Sysweld Kaynaklı İmalat Sonlu Elemanlar Simülasyonu ve Analizi** 39-65
Modelling of Connection Design Optimizations of Welded Joints of Brackets in Crane Systems, Finite Element Simulation and Analysis of Sysweld Welded Manufacturing
Samet DÖNERKAYA, Sinan Alp AKYOL
- Türkiye’de Buhar Kazanı Sektörünün Vikor ve Edas Yöntemleri ile Yıllara Göre Karlılık Analizi** 66-93
Profitability Analysis of Steam Boiler Sector in Türkiye With Vikor and Edas Methods By Years
Ali SEVİNÇ
- Rüzgar Enerjisi Sahalarında İş Sağlığı ve Güvenliği Çalışmaları** 94-115
Occupational Health and Safety Practices in Wind Energy Fields
Bayram KÖSE, Can UZUN, Ahmet Orhan İNCİ
- Kömür Yakma Sistemlerinde Verim Tahmini Doğruluğunu Artıran Bir Yöntem** 116-128
A Method Increasing the Accuracy of Efficiency Forecast in Coal Firing Systems
Cem ONAT



Gaz Türbini Periyodik Bakımlarının Sistem Performansına Etkilerinin İncelenmesi

129-172

Investigation of The Effects of Gas Turbine Periodic Maintenance on System Performance

Orhan Özay KÖSE, M. Zeki YILMAZOĞLU

Importance and Cost of Maintenance Practices in Wind Turbines

173-188

Rüzgar Türbinlerinde Bakım Uygulamaları ve Bakım Maliyeti
Eylem YILMAZ ULU



TOZ METALÜRJİSİ VE SICAK PRESLEMEYLE ÜRETİLEN AL7075-Si₃N₄ KOMPOZİTLERİN MİKROYAPISININ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Aleyna TAŞKIN¹, Elif IŞIK², Mahmut Can ŞENEL^{3*}

¹ Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Samsun
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-8308-9957>

² Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği, Sivas, ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-8289-9512>

³ Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Samsun,
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-7897-1366>

Anahtar Kelimeler

Öz

Toz metalürjisi, Al7075 alaşımı, Si₃N₄ kompozit

Bu çalışmada, yüksek mukavemetli Al7075 alüminyum alaşımı matrisine farklı oranlarda (%1, %3, 6, 9 ve 12) Si₃N₄ seramik partikülleri takviyesi yapılarak kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretim sürecinde toz metalürjisi ve sıcak presleme teknikleri kullanılmış, elde edilen kompozit malzemelerin mikroyapısı, yoğunluğu, gözeneklilik oranı, Vickers sertliği ve basma dayanımı gibi özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Yapılan testler sonucunda en yüksek yoğunluk (2,65 g/cm³), en yüksek Vickers sertliği (205 HV), en yüksek basma dayanımı (344 MPa) ve en düşük gözeneklilik oranı (%7,5) Al7075-9Si₃N₄ kompozitte elde edilmiştir. Mikroyapı analizlerinde ise takviye oranının artmasıyla Si₃N₄ partiküllerinin matris içerisinde daha homojen bir dağılım gösterdiği, ancak %12 oranında takviye ilavesinde partiküllerin kümelenme eğilimi nedeniyle bu homojenliğin azaldığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, %9 oranında Si₃N₄ takviyesi Al7075 alaşımı için optimum takviye oranı olarak belirlenmiştir. Bu oran, kompozitin mekanik özelliklerini en üst seviyeye çıkarmış, özellikle yoğunluk, sertlik ve basma dayanımı açısından en iyi sonuçların elde edilmesini sağlamıştır. Bu çalışma, Al7075-Si₃N₄ kompozitlerinin ileri mühendislik uygulamalarında kullanılabilecek yüksek performanslı malzemeler olarak potansiyelini ortaya koymaktadır.

* mahmutcan.senel@omu.edu.tr
doi : 10.46399/muhendismakina.1409791

INVESTIGATION OF THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF AL7075-Si₃N₄ COMPOSITES PRODUCED BY POWDER METALLURGY AND HOT PRESSING

Keywords

Powder metallurgy, Al7075 alloy, Si₃N₄, composite

Abstract

In this study, composite materials were produced by reinforcing Si₃N₄ ceramic particles at different rates (1%, 3%, 6%, 9% and 12%) into the high strength Al7075 aluminum alloy matrix. Powder metallurgy and hot-pressing techniques were used in the production process, and the properties of the obtained composite materials such as microstructure, density, porosity rate, Vickers hardness and compressive strength were examined in detail. As a result of the tests, the highest density (2.65 g/cm³), the highest Vickers hardness (205 HV), the highest compressive strength (344 MPa) and the lowest porosity rate (7.5%) were obtained in the Al7075-9Si₃N₄ composite. The microstructure analyses determined that the Si₃N₄ particles showed a more homogeneous distribution with the increase in the reinforcement rate in the matrix. However, this homogeneity decreased due to the agglomeration tendency of the particles in the addition of 12% reinforcement. As a result, the optimal reinforcement rate was determined as 9% Si₃N₄ reinforcement for the Al7075 alloy. This ratio maximized the mechanical properties of the composite, providing the best results, especially in terms of density, hardness, and compressive strength. This study demonstrates the potential of Al7075-Si₃N₄ composites as high-performance materials that can be used in advanced engineering applications.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 26.12.2023

Kabul Tarihi : 25.08.2024

Research Article

Submission Date : 26.12.2023

Accepted Date : 25.08.2024

Extended Abstract

Introduction

Nowadays, the trend towards new materials has increased day by day. In order to achieve this, composite materials have begun to be produced. Composite materials are a type of material developed to combine the superior properties of many materials. According to the matrix material, they are grouped as metal, ceramic, and polymer matrix composites. Metal matrix composites (MMC) are preferred in many areas, especially in the aviation, automotive, and aerospace industries, due to their properties such as low density and high strength. In MMCs, matrix material includes metal or metal alloys. Aluminum (Al) and its alloys are frequently used as matrix materials in metal matrix composites due to their properties such as low density, easy shaping, and good compatibility with the reinforcement material. 7XXX series aluminum alloys, including Al7075 alloy, attract attention in many industrial areas, especially in the fuselage and wings of aircraft, due to their high-strength properties. They consist of two components: matrix material and reinforcement element. Al7075 alloy, which contains high amounts of zinc, has superior properties such as high strength, low density, high fatigue resistance, and toughness. Reinforcing elements are added into the matrix to increase the strength of the composite material. Si_3N_4 is frequently used as a reinforcement element in composite materials due to its properties such as high hardness, high wear resistance, and high strength. Composite materials can be produced by different production methods (powder metallurgy, diffusion bonding, extrusion, liquid infiltration, etc.). Among these methods, powder metallurgy (PM) enables the production of parts that are difficult and costly to manufacture with minimum material loss and low cost when compared to other production methods. In the literature, there are many studies on the mechanical properties of Al-based Si_3N_4 -reinforced composites. However, no study has been found investigating the microstructures and mechanical properties of Al7075- Si_3N_4 composites produced by powder metallurgy and induction hot pressing methods. In this study, Al7075 matrix Si_3N_4 reinforced composites (1, 3, 6, 9, and 12 wt% contribution ratios) composites were produced by powder metallurgy and induction hot pressing methods. The microstructures and mechanical properties of the produced composites were examined.

Material and Methods

In this work, Al7075 alloy powder used as matrix material has a grain size of $\sim 10 \mu\text{m}$, a Vickers hardness of 68 HV, and a theoretical density of 2.81 g/cm^3 . The average particle size of Si_3N_4 used as a reinforcement element is $0.8 \mu\text{m}$, and its theoretical density is 3.25 g/cm^3 . Al7075- Si_3N_4 composites were fabricated by powder metallurgy and induction hot-pressing methods. The Al7075 alloy and ethanol mixture was first mixed in a mechanic mixer and then combined with the Si_3N_4 -ethanol mixture ground in a ball mill. Afterward, the mixture was filtered and dried under a vacuum. Sintering under vacuum and hot pressing were applied to the powders compressed by the pressing process. Sanding and polishing were done to remove any roughness on the sample surface. Then, microstructural analyses and mechanical tests of the samples were performed.

Findings and Discussion

Density, porosity ratio, Vickers hardness, and compressive strength tests were performed on the fabricated Al7075-Si₃N₄ composites. Among Al7075-Si₃N₄ composites, the highest density (2.65 g/cm³) and lowest porosity rate (7.5%) were determined in Al7075-9Si₃N₄ composite. During the hot pressing applied to the composites, the intergranular distance decreased due to the effect of temperature and pressure. Thus, the porosity of the composite decreased, and its density increased. The highest hardness (205±4 HV) and compressive strength (344±5 MPa) were obtained in the Al7075-Si₃N₄ composite. Due to the high hardness of the reinforcement element, there was an increase in the strength of the composite. Within the scope of microstructural investigations, scanning electron microscopy (SEM) was used to determine the surface morphology of the powders, fractured surface images of the samples, and element distribution maps. Energy dispersive X-ray analysis (EDX) was also performed using SEM to determine the distribution of the reinforcement element within the matrix. Finally, phase analyses of the samples were determined by an X-ray diffraction (XRD) device. As a result of the examinations, the densest microstructure was observed in the Al7075-9Si₃N₄ composite. It has been determined that the grains in this composite become closer to each other by necking, and therefore, the mechanical properties are improved. However, it was seen that the silicon nitride agglomerated at a 12% contribution rate, and the mechanical properties of the composite deteriorated accordingly.

Conclusions

In this study, Si₃N₄ reinforced Al7075 matrix composites were produced using powder metallurgy and induction hot-pressing methods. As a result, it was detected that the microstructure of the composite was intensified by reinforcing a certain amount of Si₃N₄ (9% by weight) into the Al7075 matrix. Accordingly, it was determined that the mechanical properties of the composite improved.

1. Giriş

Günümüzde insan ihtiyaçları doğrultusunda yeni malzemelere yönelim giderek artmaktadır. Seçilen malzemelerin kullanıldığı yere göre dayanımlarının artırılması gereklidir. Bunu sağlamak amacıyla birden fazla üstün özelliği aynı anda karşılayabilen kompozit malzemeler üretilmeye başlanmıştır. Kompozit malzemeler birçok malzemenin üstün özelliklerini bir araya getirmek amacıyla geliştirilmiş bir malzeme türüdür (Bharathi ve Kumar, 2023; Adin ve Adin, 2022). Matris malzeme ve takviye elemanı olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. Matris malzemesine göre; metal, seramik ve polimer matrisli kompozitler şeklinde gruplandırılmaktadır (Alharthi, Almotairy ve Almutairi, 2022; Kumar, Sachit, Mohan ve Akshayprasad, 2021).

Metal matrisli kompozitler (MMK) düşük yoğunluk ve yüksek dayanım gibi özelliklerinden dolayı havacılık, otomotiv, uçak-uzay sanayi başta olmak üzere birçok alanda tercih edilmektedir (Kumar ve Khanduja, 2024). MMK; matris malzemesi metal veya metal alaşımları olan kompozitlerdir. MMK yapılarında matris malzemesi olarak genellikle hafif metaller tercih edilmektedir (Taskin ve Senel, 2024). Alüminyum (Al) ve alaşımları; düşük yoğunluğa sahip olması, kolay şekillendirilebilmesi ve takviye malzemesi ile iyi uyum göstermesi gibi özelliklerinden dolayı metal matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak sıklıkla kullanılmaktadır (Sharma, Saxena, Salem, Mohammed, Singh ve Prakash, 2024). Al7075 alaşımını da içeren 7XXX serisi alüminyum alaşımlar; yüksek mukavemet özelliğine sahip olmaları nedeniyle uçakların gövde ve kanatları başta olmak üzere birçok endüstriyel alanda dikkat çekmektedir. Çinko elementinin yoğun olduğu Al7075 alaşımı; dayanımının yüksek olması, yoğunluğunun düşük olması, yorulma direncinin ve tokluğunun yüksek olması gibi üstün özelliklere sahiptir (Dursun ve Soutis, 2014; Shantharaj, Prashanth, Nagaral, Bharath, Auradi, ve Dharshan, 2022). Bu serinin en önemli özelliği çökeltme sertleşmesi olarak da bilinen yaşlandırma ısıl işlemiyle dayanımlarının yaklaşık iki kat artırılabilmesidir (Yıldırım ve Özyürek, 2018).

Kompozit malzemenin dayanımını artırmak ve malzemeye gelen gerilmeleri taşıyabilmek amacıyla matrise takviye elemanı ilave edilmektedir. Metal matrisli kompozitlerde takviye elemanı olarak genellikle silisyum nitrür (Si_3N_4), bor karbür (B_4C), zirkonyum dioksit (ZrO_2), alümina (Al_2O_3) ve tungsten karbür (WC) gibi malzemeler tercih edilmektedir (Şahingöz, Karakoç ve Çıtak, 2024). Si_3N_4 yüksek sertlik, yüksek aşınma direnci ve yüksek mukavemet gibi özelliklerinden dolayı kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda sertlik ve dayanımını korumasından dolayı sıcaklık korozyonunun görüldüğü uygulamalarda da kullanılabilir. Silisyum (Si) ve nitrojen (N) atomları arasındaki kovalent bağ oldukça kuvvetlidir. Bu nedenle Si_3N_4

sert ortam şartlarına, metallere ve polimerlere göre daha fazla dayanıklıdır (Tümer, 2004).

Kompozit malzemeler farklı üretim yöntemleri (toz metalürjisi, difüzyon bağlama, ekstrüzyon, sıvı infiltrasyon vb.) ile üretilebilmektedir. Bu yöntemler arasından toz metalürjisi (TM) diğer üretim yöntemleri ile kıyaslandığında imalatı zor ve maliyetli olan parçaları minimum malzeme kaybı ve düşük maliyetle üretebilmeyi sağlamaktadır. TM yöntemi; yüksek yüzey kalitesinde, yüksek dayanımlı, sıcaklık direnci yüksek ve çevreye duyarlı parça üretimi sağladığından geniş kullanım alanına sahiptir. TM ile toz halinde bulunan malzemeler belirli oranda karıştırıldıktan sonra sıkıştırılarak dayanım kazanmaktadır. Sıkıştırma işleminden sonra toz halinde bulunan malzemelerin temas yüzeyleri arasında daha kuvvetli bağlar oluşması için malzemelere ergime sıcaklığının altında sinterleme işlemi uygulanmaktadır. Ardından ikincil işlemler yapılarak üretim tamamlanmaktadır (Ayvacı, 2019).

Literatürde alüminyum matrisli Si_3N_4 takviyeli kompozit malzemelerin üretilmesi ile ilgili birçok çalışma mevcuttur. Arık yaptığı çalışmada, toz metalürjisi yöntemi ile alüminyum matrisli Si_3N_4 (ağırlıkça %5, 10, 15 katkı oranlarında) takviyeli kompozitleri üretmiştir. Si_3N_4 partiküllerinin yüksek sertliğinden dolayı katkı oranının artmasıyla kompozitin mekanik ve tribolojik özelliklerinin iyileştiğini belirtmiştir (Arık, 2019). Blunavesh vd. çalışmalarında, karıştırmalı döküm yöntemiyle LM25 matrise ağırlıkça %10 Si_3N_4 takviye etmişlerdir. Üretilen kompozitlerin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Farklı kayma hızlarında (1,5, 3, 4,5 m/s), farklı kayma mesafelerinde (400, 800, 1200 m) ve farklı yükler (10, 20, 30 N) altında gerçekleştirilen testler sonucunda en iyi tribolojik özelliklerin 3 m/s kayma hızında, 1200 m kayma mesafesinde ve 10 N yüklemde elde edildiğini belirtmişlerdir (Bhuvanesh ve Radhika, 2017). Haq ve Anand çalışmalarında, Al7075 matrisli Si_3N_4 (ağırlıkça %2, 4, 6 katkı oranlarında) takviyeli kompozitleri karıştırmalı döküm yöntemiyle üretmişlerdir. Üretilen kompozitlere farklı bekleme sürelerinde (1, 5, 10 sn) ve farklı yükler (1, 2, 3, 5 N) altında sertlik testi uygulamışlardır. Testler sonucunda Al7075- Si_3N_4 kompozitin sertliğinin Si_3N_4 katkı oranının artmasıyla arttığını ancak bekleme süresi ve uygulanan yükün artmasıyla azaldığını tespit etmişlerdir (Haq ve Anand, 2018). Kumar vd. çalışmalarında, karıştırmalı döküm yöntemiyle Al7075 matrise ağırlıkça %4, 8, 12 katkı oranlarında Si_3N_4 ilave etmişlerdir. Katkı oranının artmasıyla kompozitin sertliğinin artmasına karşın yapı içerisindeki gözeneklilik oranında da arttığını tespit etmişlerdir. Bu durum kompozitin mekanik özelliklerini olumsuz etkilemiştir. Bundan dolayı gözeneklilik artışının çift karıştırmalı tekniği kullanılarak önlenilebileceğini belirtmişlerdir (Kumar, Vignesh ve Joshua, 2020). Mattli vd. toz metalürjisi yöntemiyle Al- Si_3N_4 kompozitleri üretmişlerdir. Al matrise ağırlıkça %1, 2, 3 katkı oranlarında nano Si_3N_4 ilave etmişlerdir. Katkı oranının kompo-

zitlerin mikroyapılarına ve mekanik özelliklerine olan etkisini incelemiştir. Yapılan testler neticesinde takviye elemanının yüksek yoğunluğuna bağlı olarak katkı oranının artmasıyla kompozitin yoğunluğunda artış meydana gelmiştir. En yüksek sertliği (38 HV) ve en yüksek basma dayanımını (305 MPa) Al-3Si₃N₄ kompozit yapıda elde etmişlerdir (Mattli, Matli, Shakoor ve Mohamed, 2019).

Literatür çalışmalarına bakıldığında Al matrisli Si₃N₄ takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelendiği birçok çalışma bulunmaktadır. Ancak toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleriyle üretilen Al7075-Si₃N₄ kompozitlerin mikroyapılarının ve mekanik özelliklerinin incelendiği herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu nedenle bu çalışmada Al7075 matrisli Si₃N₄ takviyeli (ağırlıkça %1, 3, 6, 9 ve 12 katkı oranlarında) kompozitler toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleriyle üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin mikroyapıları ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu çalışma indüksiyonla sıcak presleme işlemini esas alarak mekanik özellikleri gelişmiş Al7075-Si₃N₄ kompozit malzemelerini üretmeyi amaçlamaktadır. İndüksiyonla sıcak presleme işlemi sıcaklığın ve basıncın aynı anda ve hızlı bir şekilde uygulanmasından dolayı geleneksel sinterleme yöntemlerine kıyasla malzemelerin dayanımını artırmada daha fazla etkilidir. Bu üretim yöntemi, yüksek verimlilik ve enerji tasarrufu sağlarken, aynı zamanda mikroyapıda homojen dağılım sağlamaktadır. Özellikle 9% Si₃N₄ takviyesinin mekanik performans üzerindeki olumlu etkileri, bu yöntemin potansiyelini ortaya koymaktadır. Bu çalışmada, indüksiyonla sıcak preslemenin Al7075-Si₃N₄ kompozitlerinin ileri mühendislik uygulamaları için yüksek performanslı malzemeler geliştirmedeki yenilikçi rolü vurgulanmaktadır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Materyal

Bu çalışmada matris malzemesi olarak Al7075 alaşımı kullanılmıştır. Al7075 alaşımı düşük yoğunluğa, yüksek dayanıma ve yüksek korozyon direncine sahiptir. Ayrıca hafif olması sebebiyle de mukavemet/ağırlık oranı yüksektir. Bu nedenle bu çalışmada Al7075 alaşımı tercih edilmiştir. Takviye elemanı olarak ise Si₃N₄ kullanılmıştır. Si₃N₄ yüksek mukavemete sahip seramik malzemelerden biridir. Düşük termal genleşmeye sahip olması ve kimyasal dayanıklılığından dolayı bu çalışmada kompozit malzemenin özelliklerini iyileştirmek amacıyla tercih edilmiştir. Kullanılan Al7075 alaşım ve Si₃N₄ tozları gaz atomizasyon yöntemi ile üretilmiş olup sırasıyla Nanografi Teknoloji (Türkiye) ve Ube Industry (Japonya) firmasından temin edilmiştir. Matris malzemesi olarak kullanılan Al7075 alaşımı Tablo 1'de gösterildiği gibi ağırlıklı olarak çinko (Zn), magnezyum (Mg) ve bakır (Cu) elementlerinden oluşmaktadır (Sönmez ve Başak, 2016). Al7075 alaşım tozu ~10 µm tanecik boyutuna, 68 HV Vickers sertliğine ve 2,81 g/cm³ teorik

yoğunluğa sahiptir. Takviye elemanı olarak kullanılan Si_3N_4 'ün ortalama partikül boyutu $0,8 \mu\text{m}$, teorik yoğunluğu ise $3,17 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Tablo 2'de Al7075 alaşımı ve Si_3N_4 'ün belirli özellikleri verilmiştir (Şenel, 2018; Yıldırım, 2016).

Tablo 1. Al7075 alaşımının kimyasal bileşimi (% ağırlıkça) (Sönmez ve Başak, 2016)

Cu	Zn	Mg	Si	Mn	Fe	Cr	Ti	Diğer	Al
1,20-2	5,10-6,10	2,10-2,90	0,40	0,30	0,50	0,18-0,28	0,20	0,15	kalan

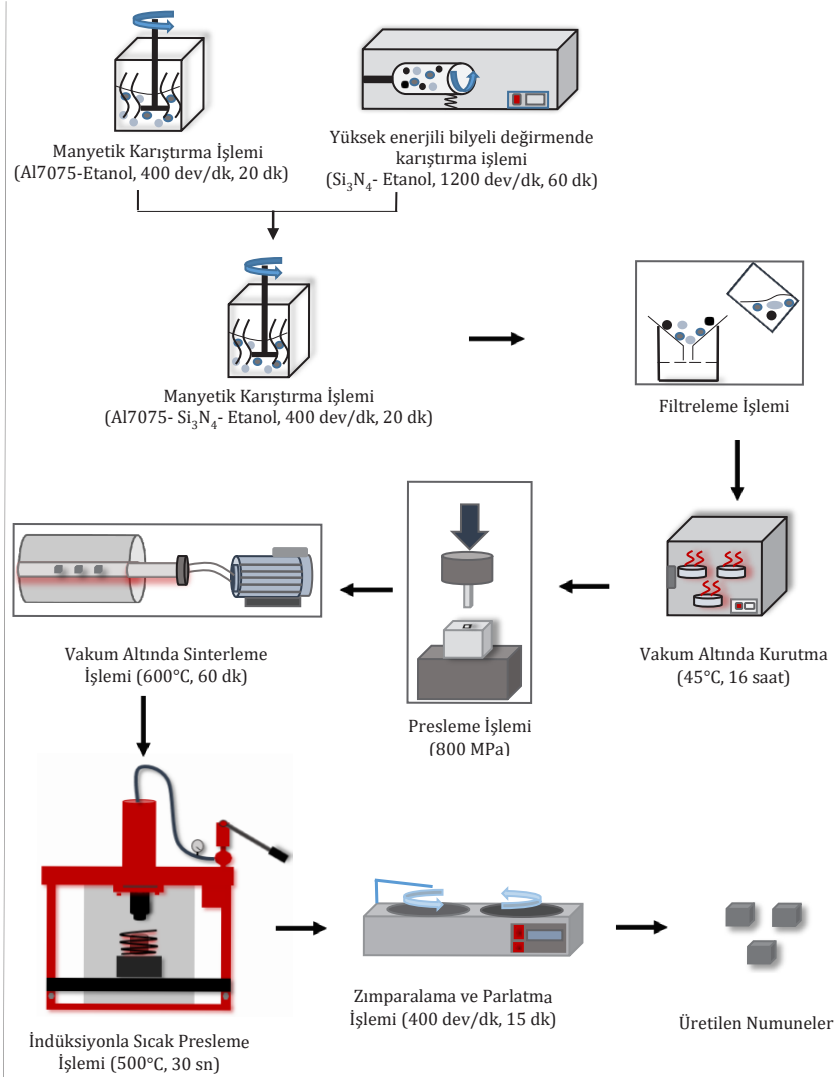
Tablo 2. Al7075 Alaşımının ve Si_3N_4 'ün belirli özellikleri (Şenel, 2018; Yıldırım, 2016)

Malzeme	Yoğunluk (g/cm^3)	Termal İletkenlik ($(\text{W}/(\text{m}^\circ\text{K}))$)	Elastisite Modülü (GPa)	Sertlik (HV)	Ergime Sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)
Al7075	2,81	167	71,7	68	635
Si_3N_4	3,17	29	310	1450	1800

2.2 Yöntem

Yapılan bu çalışmada Al7075- Si_3N_4 kompozitleri toz metalürjisi ve sıcak presleme yöntemiyle üretilmiştir (Şekil 1). İlk olarak Al7075 alaşım tozu etanol içerisinde manyetik karıştırıcıda 400 dev/dk hızda 20 dk süresince karıştırılmıştır. Eş zamanlı olarak Si_3N_4 tozu etanol ile birlikte 1200 dev/dk hızda 60 dk süresince yüksek enerjili bilyalı değirmende öğütülmüştür. Ardından Si_3N_4 -etanol karışımı damla damla Al7075-etanol karışımı içerisine aktarılarak manyetik karıştırıcıda 20 dk boyunca karıştırılmıştır. Etanolün karışımdan uzaklaşıp yalnızca katı partiküllerin kalması amacıyla filtreleme/süzme işlemi gerçekleştirilmiştir. Filtrelenen toz karışım içerisindeki kalan nemi gidermek için karışım 45°C sıcaklıkta 16 saat süresince etüv fırında kurutulmuştur. Sonrasında tozlara ham yoğunluk kazandırmak amacıyla 800 MPa basınç altında hidrolik pres makinesinde sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Presleme işlemi ile belirli dayanım kazanan tozlara asıl mukavemetini sağlayabilmek için 600°C sıcaklıkta 60 dk süresince sinterleme ve 500°C sıcaklıkta 30 sn süresince indüksiyon altında sıcak presleme işlemi uygulanmıştır (Gürbüz, Şenel ve Koç, 2018; Şenel ve Demir, 2023). Sinterleme işleminden sonra gözenekliliğin azaltılması, mikroyapının iyileştirilmesi, mekanik özelliklerin artırılması ve homojen dağılım sağlanması amacıyla sıcak presleme işlemi uygulanmıştır. Sinterleme işlemi toz partiküllerinin birbirlerine bağlanmasını sağlar ancak uygulanan sürenin uzun olmasından dolayı yapı içerisinde gözenek oluşması ihtimali bulunmaktadır. Sıcak presleme işlemi ile bu gö-

zenekler minimum seviyeye indirilerek kompozit yapının mekanik özelliklerinin iyileşmesi sağlanmıştır. Ayrıca sıcak presleme işleminde sinterleme işleminden farklı olarak hem sıcaklık hem de basınç aynı anda uygulanmaktadır. Bu durum kompozit yapıda, birim hacimdeki tane sayısının artmasına yol açmaktadır. Böylece kompozit malzemenin dayanımı artmaktadır. Sıcak presleme işleminden sonra üretilen numunelerin yüzeyindeki pürüzleri gidermek amacıyla numuneler 600, 1200 ve 2500 gritlik SiC su zımparaları kullanılarak zımparalanmıştır.



Şekil 1. Al7075-Si₃N₄ Kompozitlerin Toz Metalürjisi Ve Sıcak Presleme Yöntemiyle Üretim Aşamaları

Son olarak numune yüzeyleri elmas solüsyon ile 15 dk süresince 400 dev/dk hızda parlatılmıştır. Ardından numunelere 22°C sıcaklıkta ve %60 nem oranındaki ortamda mikroyapı analizleri ile mekanik testler uygulanmıştır. Bu ortam koşullarının literatürle uyumlu olduğu tespit edilmiştir (Adin ve Okumuş, 2022).

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

2.3 Mikroyapı Analizleri

Çalışma kapsamında tozların (Al7075, Si₃N₄) ve üretilen numunelerin (Al7075 alaşımı, Al7075-Si₃N₄ kompozitleri) mikroyapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Matris ve takviye elemanı olarak kullanılan tozların tane boyut ölçümü Malvern marka Mastersizer 3000 model tane boyut ölçüm cihazıyla yapılmıştır. Tozların yüzey morfolojisini, numunelerin kırık yüzey görüntülerini ve element dağılım haritalarını belirlemek amacıyla Jeol marka JSM-7001F model taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Ayrıca takviye elemanının matris içerisindeki dağılımını belirleyebilmek amacıyla SEM kullanılarak enerji dağıtıcı X-ışını analizi (EDX) yapılmıştır. Son olarak Rigaku marka Smartlab model X-ışını kırınım cihazı (XRD) ile numunelerin faz analizleri belirlenmiştir.

2.4 Karakterizasyon

Üretilen numunelere deneysel yoğunluk, Vickers sertliği ve basma dayanımı testleri uygulanmıştır. Numunelerin deneysel yoğunlukları (ρ_D) Arşimet prensibine göre belirlenmiştir. İlk olarak numunelerin sudaki asılı kütlesi (m_A), suya doymuş kütlesi (m_D) ve kuru kütleleri (m_K) ölçülmüştür. Sonrasında Eşitlik 1 kullanılarak numunelerin deneysel yoğunlukları hesaplanmıştır. Eşitlikteki ρ_{su} suyun yoğunluğu olup 1 g/cm³ olarak alınmıştır. Her numuneden 5 ölçüm yapılmış ve ortalaması hesaplanarak deneysel yoğunluk değeri belirlenmiştir.

$$\rho_D = [m_K / (m_D - m_A)] \rho_{su} \quad (1)$$

Kompozit numunelerin teorik yoğunluğu (ρ_K) ise Eşitlik 2 ile belirlenmektedir. Eşitlikteki ρ_M ve %M sırasıyla matris malzemesinin (Al7075) yoğunluğu ve ağırlıkça katkı oranıdır. ρ_{TK} ve % TK ise takviye elemanının (Si₃N₄) yoğunluğu ve ağırlıkça katkı oranıdır (Şenel ve Mahmutoğlu, 2022).

$$\rho_K = (\rho_M \times \%M) + (\rho_{TK} \times \%TK) \quad (2)$$

Kompozitlerin mekanik özelliklerini etkileyen diğer parametre ise gözeneklilik oranıdır. Gözeneklilik oranının azalmasıyla kompozitlerin mekanik özellikleri iyileşmektedir. Üretilen kompozitlerin gözeneklilik oranı (%G) Eşitlik 3 ile hesaplanmaktadır.

$$\%G = \left(1 - \frac{\rho_D}{\rho_K}\right) \times 100 \quad (3)$$

Al7075 alaşımının ve Al7075-Si₃N₄ numunelerin sertliklerini ölçmek için Vickers sertlik ölçme yöntemi kullanılmıştır (ASTM E384). Mikro Vickers sertlik ölçüm cihazı (HV1000B) kullanılarak kompozitlerin yüzeyine 15 s süresince 1,961 N yük uygulanmıştır. Yük kaldırıldıktan sonra yüzeyde oluşan kare tabanlı piramitin köşegen uzunlukları ölçülerek numunelerin Vickers sertlik değerleri hesaplanmıştır (Eşitlik 4). Her numuneden en az 7 ölçüm yapılarak bu ölçümlerin ortalaması alınmış ve numunelerin ortalama sertlik değeri (HV) belirlenmiştir. Eşitlikte P numune yüzeyine uygulanan yük ve d ise ortalama köşegen uzunluğudur.

$$HV = \frac{1,8544 \times P}{d^2} \quad (4)$$

Kompozitlerin basma dayanımı Mares marka Tst-10t model basma cihazı ile belirlenmiştir (ASTM E9). Numunelere 1 mm/dk basma hızında 5 MPa ön yük uygulanmıştır. Sonrasında 3 mm/dk hızda basma testi gerçekleştirilmiştir. Her numuneye en az üç basma testi yapılarak bu değerlerin ortalaması alınmış ve kompozitlerin ortalama basma dayanımı belirlenmiştir.

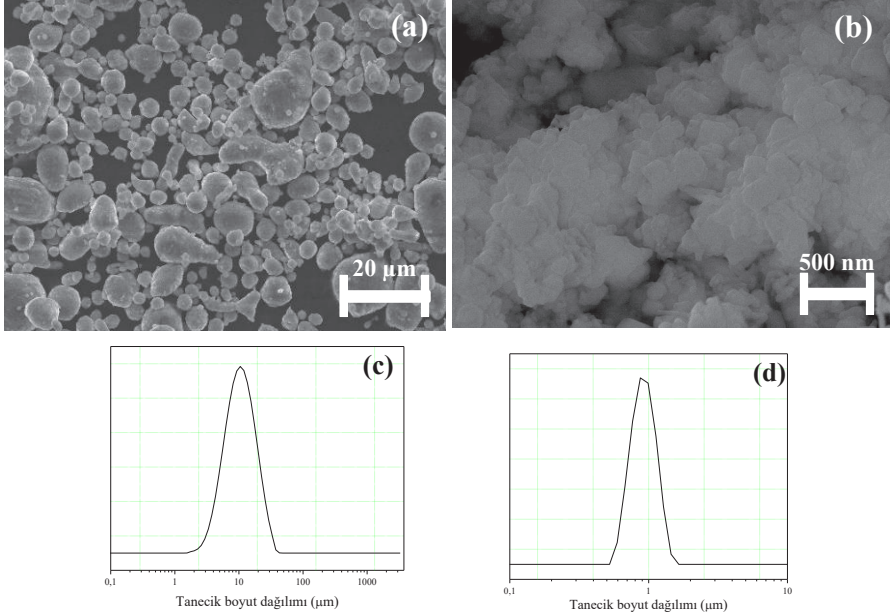
3. Bulgular ve Tartışma

3.1 Tozların Karakterizasyonu

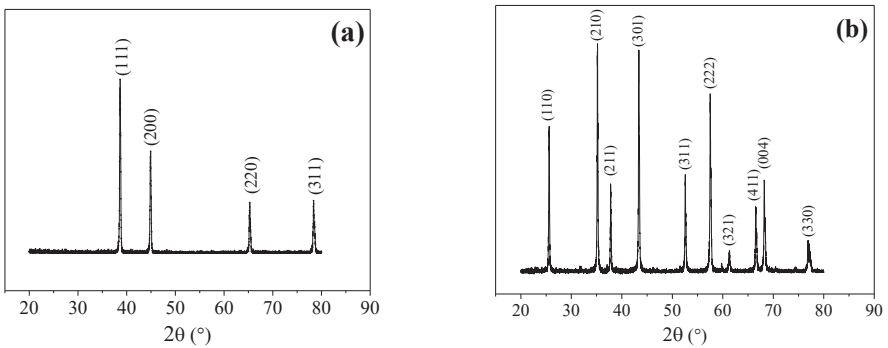
Al7075 alaşım ve Si₃N₄ tozlarının SEM görüntüleri ve tanecik boyut dağılımları Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2(a)'da gösterilen Al7075 tozunun SEM görüntüsü incelendiğinde partiküllerin küresele yakın bir morfolojide olduğu görülmektedir. Şekil 2(b)'de verilen Si₃N₄ partiküllerinin ise küresel olmayan düzensiz yapıda olduğu tespit edilmiştir. Tanecik boyut dağılımı analiz sonuçlarına göre; Al7075 alaşım tozunun ortalama 10 µm ve Si₃N₄ tozunun ortalama 800 nm boyutunda olduğu tespit edilmiştir (Şekil 2(c, d)).

Şekil 3'te Al7075 alaşım ve Si₃N₄ tozlarının XRD örgü desenleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde; matris malzemesi olarak kullanılan Al7075 alaşımının kırınım açılarının 2θ=~38°, 45°, 66° ve 78° olduğu belirlenmiştir. Bu analizde yer alan tüm fazların alüminyuma ait olduğu tespit edilmiş olup bu kırınım açılarına karşılık gelen düzlemler (111), (200), (220) ve (311) şeklindedir. Takviye malzemesi olarak tercih edilen Si₃N₄'ün kırınım açılarının ise 2θ=~26°, 35°, 38°, 43°, 53°, 57°, 61°, 67°, 69°, 77° olduğu tespit edilmiştir. Bu kırınım açılarına karşılık gelen düzlemler ise (110), (210), (211), (301), (311), (222), (321), (411), (004), (330)'dır. Si₃N₄ tozunun faz analizindeki tüm piklerin silisyum nitrüre ait oldu-

ğu belirlenmiş olup kirlilikten doğabilecek herhangi bir faza rastlanmamıştır. Bu analiz ısıl işlem sonrasında üretilen numunelerin faz yapılarının belirlenmesinde yardımcı olmaktadır.



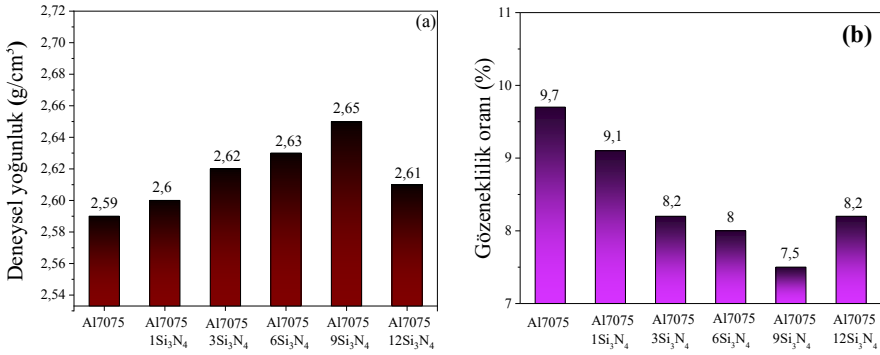
Şekil 2. Tozların SEM Görüntüleri: Al7075 Alaşım (a), Si₃N₄ (b) ve Tanecik Boyut Dağılımları: Al7075 Alaşım (c), Si₃N₄ (d)



Şekil 3. Al7075 Alaşım (a) ve Si₃N₄ (b) Tozlarının XRD Analizi

3.2 Yoğunluk ve Gözeneklilik Oranı Ölçüm Sonuçları

Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen Al7075 matrisli Si₃N₄ takviyeli kompozitlerin yoğunluk ve gözeneklilik oranı değerleri Şekil 4'te verilmiştir. Şekil incelendiğinde Si₃N₄ takviye oranının artmasıyla kompozitlerin gözeneklilik oranının azaldığı buna bağlı olarak yoğunluk değerinin arttığı görülmektedir. Al7075-Si₃N₄ kompozitleri arasında en yüksek yoğunluk (2,65 g/cm³) ve en düşük gözeneklilik oranı (%7,5) %9 Si₃N₄ takviyeli kompozitte elde edilmiştir. Ancak %12 Si₃N₄ katkı oranında partiküllerin bir araya gelerek toplanmasından dolayı yapı içerisinde boşluklar oluşmuştur. Bu nedenle kompozitin gözeneklilik oranı artarak yoğunluğu azalmıştır.



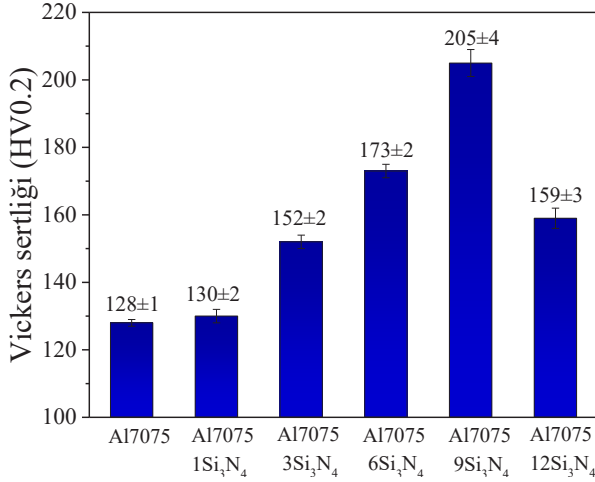
Şekil 4. Al7075 Alaşımı ile Al7075-Si₃N₄ Kompozitlerin Yoğunluk (a) ve Gözeneklilik Oranı (b) Değerleri

3.3 Mekanik Test Sonuçları

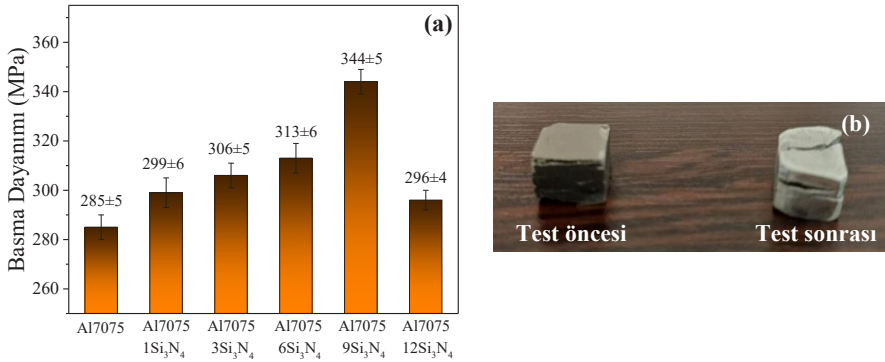
Al7075 alaşımı ve Al7075-Si₃N₄ kompozitlerin katkı oranına bağlı olarak Vickers sertliği değişimi Şekil 5'te verilmiştir. Şekle göre Si₃N₄ katkı oranının artmasıyla kompozitlerin sertliği artmıştır. En yüksek sertlik değeri (205±4 HV) Al7075-9Si₃N₄ kompozitte belirlenmiştir. Al7075 alaşımına (128±1 HV) kıyasla Al7075-9Si₃N₄ kompozitte sertlik değeri %60,2 oranında artmıştır. Bu artış, takviye elemanı olarak kullanılan silisyum nitrürün sert ve aşınma direnci yüksek seramik yapısından kaynaklanmaktadır.

Şekil 6'da üretilen kompozitlerin katkı oranına bağlı olarak basma dayanımı değerleri verilmiştir. Al7075 alaşımında 285±5 MPa olan basma dayanımı, Al7075-9Si₃N₄ kompozitte %20,7 artışla 344±5 MPa değerine yükselmiştir. Kompozit yapılarına uygulanan ısıl işlemin etkisinden dolayı sıcaklık ve basınç birlikte uygulandığında taneler arası boşluk azalmaktadır. Ayrıca basma dayanımı oldukça yüksek seramik bir malzeme olan silisyum nitrür katkısıyla Al7075-Si₃N₄ kompo-

zitin basma dayanımı da artmaktadır. Ancak %12 Si_3N_4 katkısında partiküllerin bir araya gelerek topaklanmasından kaynaklı olarak yapı içerisinde gözenekler meydana gelmiştir. Bu durum da Al7075-12 Si_3N_4 kompozitin basma dayanımının azalmasına sebep olmuştur.



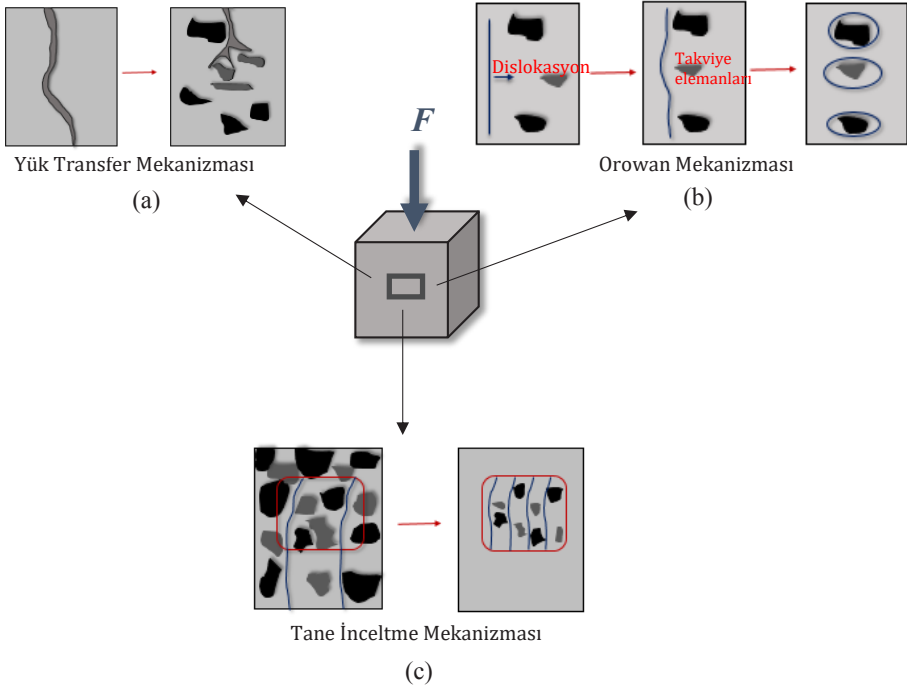
Şekil 5. Al7075 Alaşımı ve Al7075-9 Si_3N_4 Kompozitlerin Vickers Sertlik Değerleri



Şekil 6. Al7075 Alaşımı, Al7075- Si_3N_4 Kompozit Malzemelerin Basma Dayanımı Değerleri (a) ve Basma Testi Öncesi-Sonrası Numune Görüntüleri (b)

Kompozit malzemelerin dayanımını artırmak için çeşitli mekanizmalar bulunmaktadır. Yük transferi, tane inceltme ve Orowan güçlendirme mekanizması ile kompozitlerin mukavemeti artırılabilir. Şekil 7(a)'da gösterilen yük transfer mekanizmasında kompozit malzemeye gerilme uygulandığında matris malzemesinin hasara uğramasına sebep olan yük, takviye elemanlarına transfer

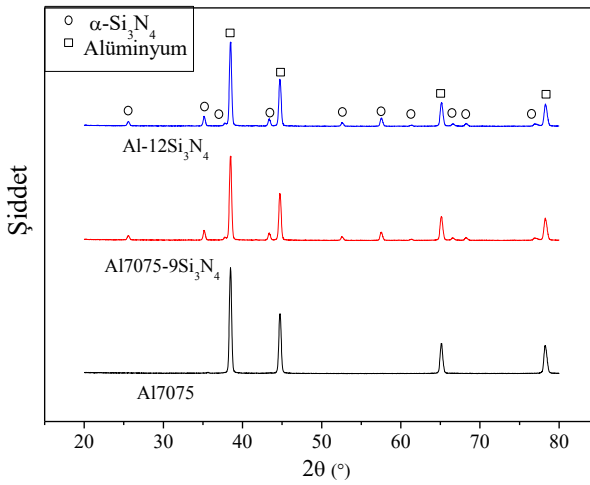
olmaktadır. Böylelikle takviye elemanı ve matris malzemesi arasında güçlü bir bağ oluşmaktadır. Al7075-Si₃N₄ kompozitlerde, matris malzeme Al7075 ve takviye elemanı Si₃N₄ arasında güçlü bir bağ oluşturmak için, sinterleme ve sıcak presleme yöntemleri kullanılmıştır. Al7075 matris malzemesi üzerindeki yük Si₃N₄ partiküllerine transfer olmaktadır. Bu, malzemenin daha fazla yük taşımaya ve hasar görmeden önce daha yüksek mukavemete sahip olmasını sağlamaktadır. Şekil 7(b)'de gösterilen Orowan mekanizmasında ise dislokasyon yoğunluğunun artması ile birlikte dislokasyon çizgileri takviye partikülleri etrafında dairesel şekil almaktadır. Al7075-Si₃N₄ kompozitlerde, Si₃N₄ dislokasyonların hareketini engelleyerek, partiküllerin etrafında dairesel şekiller almasına neden olmaktadır. Bu dairesel döngüler yapı içerisinde dislokasyonların hareketini kısıtlayarak kompozit malzemenin dayanımını artırmaktadır. Diğer bir güçlendirme mekanizması ise Şekil 7(c)'de gösterilen tane inceltme mekanizmasıdır. Tane inceltme mekanizmasında tanelerin boyutunun azalması tane sınırı sayısının artmasına yol açmaktadır. Tane sınırı sayısının artmasıyla ise dislokasyonlar kompozit yapı içerisinde kolay hareket edemez ve kompozitin dayanımı artar (Chen, Tao, Yi, Liu, Li ve Bao, 2018).



Şekil 7. Yük Transfer (a), Orowan (b) ve Tane İnceltme (c) Mekanizmaları

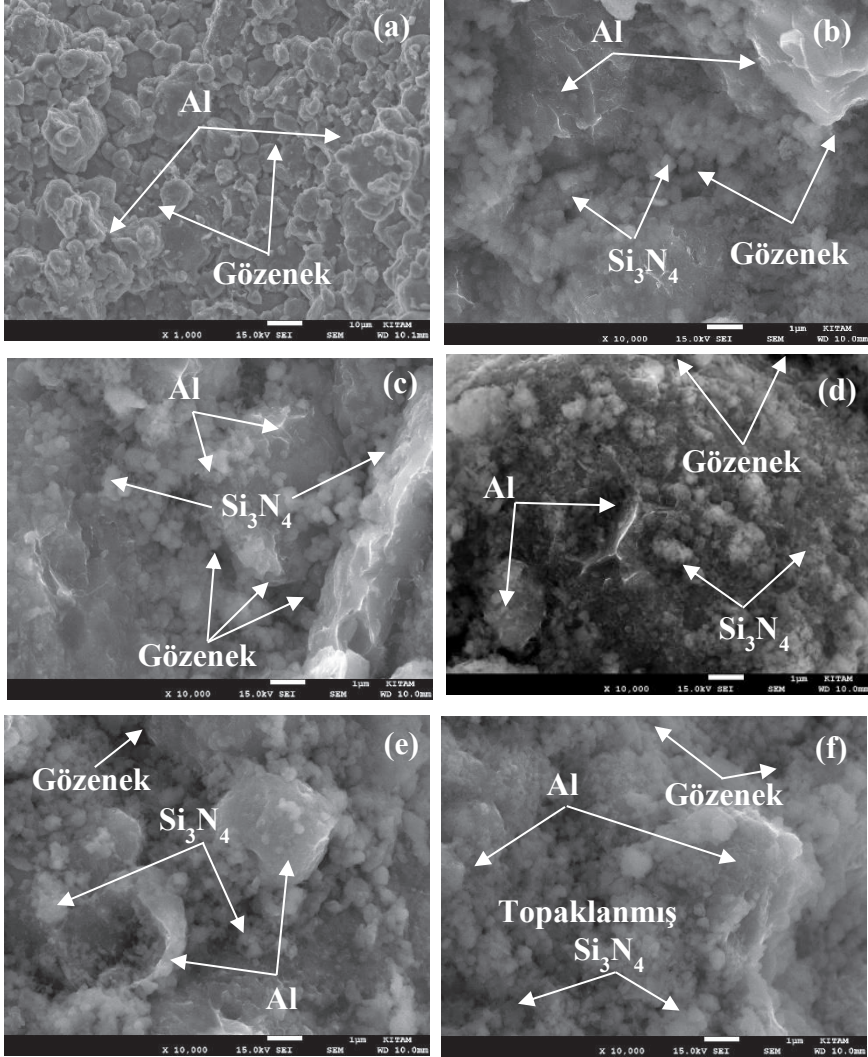
3.4 Numunelerin Kırık Yüzey ve XRD Analizi

Şekil 8’de Al7075 alaşımı, Al7075-9Si₃N₄ ve Al7075-12Si₃N₄ kompozitlerin XRD örgü desenleri verilmiştir. □ simgesi Al7075’i, o simgesi ise Si₃N₄’ü ifade etmektedir. Si₃N₄ 1420°C sıcaklığın altında α-Si₃N₄ yapıdadır. Bu çalışmada üretilen kompozit numuneler, 600°C sıcaklıkta sinterlendiğinden XRD analizinde α-Si₃N₄ yapı bulunmaktadır. Ayrıca şekil incelendiğinde kompozitin mekanik özelliklerinin kötüleşmesine sebep olan Al₄C₃ gibi ikincil faz oluşumu gözlemlenmemiştir. Çünkü Al₄C₃ oluşumu için gerekli olan sıcaklık 830°C’dir. Çalışmada 600°C sıcaklıkta sinterleme işlemi yapıldığı için ikincil faz oluşumu için yeterli sıcaklık oluşmamıştır.



Şekil 8. Al7075 Alaşımı ve Al7075-Si₃N₄ Kompozitlerin XRD Örgü Desenleri

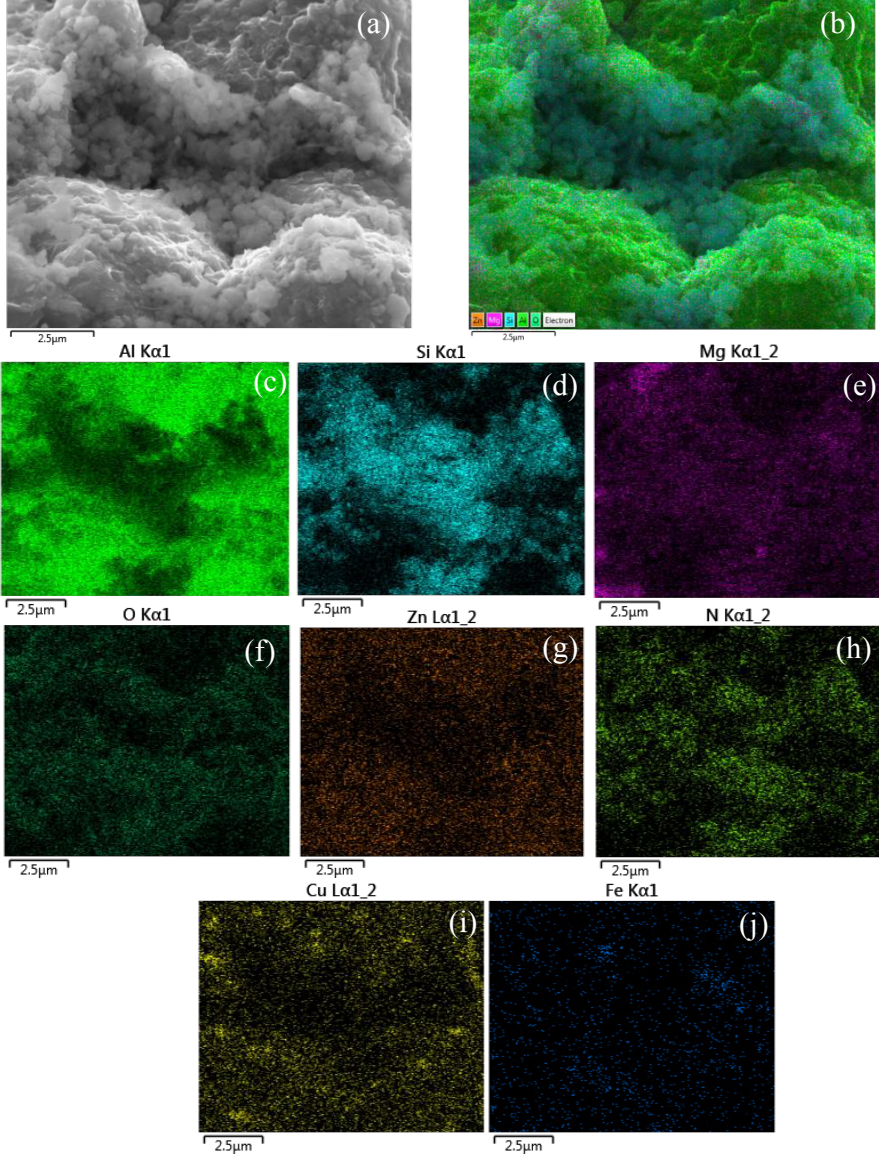
Al7075 alaşımı, Al7075-3Si₃N₄, Al7075-9Si₃N₄ ve Al7075-12Si₃N₄ kompozitlere ait kırık yüzey SEM görüntüleri Şekil 9’da verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde Al7075-9Si₃N₄ kompozit yapının Al7075 alaşımına ve diğer kompozit yapılarla kıyasla daha yoğun bir mikroyapıya sahip olduğu ve takviye partiküllerinin daha homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Bundan dolayı en iyi mekanik özellikler Al7075-9Si₃N₄ kompozit yapıda elde edilmiştir. Ancak Şekil 9(d)’de verilen %12Si₃N₄ katkı oranında Si₃N₄ partiküllerinin topaklandığı belirlenmiştir. Bu topaklanmalar matris malzeme ve takviye elemanı arasındaki yoğunluk farkı ve partiküller arasındaki elektrostatik çekim kuvvetlerinden dolayı oluşabilmektedir (Ahmad, Khan ve Hasan, 2020; Rao ve Mohan, 2020; Sekar, Pradeep, Silambarasan ve Dhairiyasamy, 2024). Buna bağlı olarak Al7075-12Si₃N₄ kompozitin mekanik özellikleri kötüleşmiştir.



Şekil 9. Al7075 Alaşımına (a), Al7075-1Si₃N₄ (b), Al7075-3Si₃N₄ (c), Al7075-6Si₃N₄ (d), Al7075-9Si₃N₄ (e) ve Al7075-12Si₃N₄ (f) Kompozitlere Ait Kırık Yüzey SEM Görüntüleri

Şekil 10'da Al7075-12Si₃N₄ kompozit yapıya ait SEM görüntüsü, SEM-EDX analizi ve element dağılım haritaları verilmiştir. Şekilde Al7075-12Si₃N₄ kompozit yapıdaki elementlerin (Al, Mg, O, Cu, Zn, Si, N ve Fe) her biri farklı renk ile gösterilmiştir. Bu elementler arasından Al, Mg, O, Cu, Zn ve Fe kompozit yapı içerisindeki Al7075 alaşımının dağılımını ifade etmektedir. Si ve N elementleri ise yapıda-

ki Si_3N_4 takviye partiküllerini temsil etmektedir. Şekil incelendiğinde %12 Si_3N_4 katkı oranında takviye partiküllerinin homojen dağılmayıp kümelendiği ve bu nedenle mekanik özelliklerin bozulduğu tespit edilmiştir.



Şekil 10. Al7075-12 Si_3N_4 Kompozite Ait Kırık Yüzey SEM Görüntüsü (a), SEM-EDX Analizi (b) ve Element Dağılım Haritaları (c-j)

4. Sonuçlar

Bu çalışmada toz metalürjisi yöntemiyle Al7075 matrisli Si₃N₄ takviyeli kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin yoğunluk, gözeneklilik oranı, Vickers sertliği ve basma dayanımı incelenmiştir. Ayrıca numunelerin mikroyapısını incelemek amacıyla kompozitlere SEM, SEM-EDX ve XRD faz analizleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Al7075-Si₃N₄ kompozitleri arasında en yüksek deneysel yoğunluk (2,65 g/cm³), en yüksek Vickers sertliği (205 HV), en yüksek basma dayanımı (344 MPa) ve en düşük gözeneklilik oranı (%7,5) Al7075-9Si₃N₄ kompozitte elde edilmiştir. Si₃N₄ partiküllerinin yüksek sertliği ve matris içerisinde homojen dağılımı sebebiyle ağırlıkça %9 Si₃N₄ katkı oranında kompozitin mekanik özellikleri iyileşmiştir. Ancak ağırlıkça %12 Si₃N₄ katkı oranında Si₃N₄ partiküllerinin yapı içerisinde homojen dağılamaması sebebiyle mekanik özellikler olumsuz etkilenmiştir.
- Partiküllerin homojen dağılamamasının sebebi; belirli bir katkı oranından sonra Si₃N₄ partikülleri arasında elektrostatik çekim kuvvetleri ve yüzey enerjisinin artmasından dolayı oluşan topaklanmalardır. Bu durum, literatürde partikül kümelenmesi ve bunun mekanik özellikler üzerindeki olumsuz etkileriyle ilgili bulgularla uyumludur.
- Al7075 alaşımına kıyasla Al7075-9Si₃N₄ kompozitte deneysel yoğunluğun, Vickers sertliğinin ve basma dayanımının sırasıyla %2,3, %60,1 ve %20,7 oranlarında arttığı tespit edilmiştir. Bu artışlar, Si₃N₄ partiküllerinin sertlik ve dayanım özellikleri üzerindeki olumlu etkilerini açıkça göstermiştir.
- Üretilen Al7075-9Si₃N₄ kompozitlerin SEM görüntüleri incelendiğinde takviye partiküllerinin matris içerisinde diğer kompozitlere kıyasla daha homojen dağıldığı tespit edilmiştir. XRD faz analizi sonucunda; kompozit yapılarda Al₄C₃ gibi istenmeyen ikincil faz oluşumu gözlenmemiştir. Ayrıca Al7075 alaşımına kıyasla Al7075-9Si₃N₄ kompozitlerde mikroyapının daha yoğun olduğu belirlenmiştir.
- Sonuç olarak Al7075 matrise belirli orana kadar (%9) Si₃N₄ takviye edildiğinde kompozitin mekanik özelliklerinin iyileştiği belirlenmiştir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; Aleyna TAŞKIN ve Elif IŞIK deneysel çalışmaların yürütülmesinde; Mahmut Can ŞENEL de mikroyapı ve faz yapısı incelemelerinin yapılmasında katkı sağlamışlardır.

Kaynakça

- Adin, H. and Adin, M. (2022). "Effect of particles on tensile and bending properties of jute epoxy composites." *Materials Testing*, 64(3), 401-411. Doi: <https://doi.org/10.1515/mt-2021-2038>.
- Adin, M.Ş. and Okumuş, M. (2022). "Investigation of Microstructural and Mechanical Properties of Dissimilar Metal Weld Between AISI 420 and AISI 1018 Steels." *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47:8341-8350. doi: <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06243-w>.
- Ahmad, Z., Khan, S. and Hasan, S. (2020). "Microstructural characterization and evaluation of mechanical properties of silicon nitride reinforced LM 25 composite." *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4):9129-9135. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.06.037>.
- Alharthi, N. H., Almotairy, S. M., and Almutairi, M. A. (2022). "Frictional behavior and mechanical performance of Al reinforced with SiC via novel flake powder metallurgy." *Metals*, 12(2), 1-14. doi: <https://doi.org/10.3390/met12020323>.
- Arik, H. (2019). "Al-Si₃N₄ toz metal kompozit malzeme üretimi ve aşınma davranışının araştırılması." *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7(4):776-787. doi: <https://doi.org/10.29109/gujsc.621116>.
- Ayvacı, B. (2019). *Toz metalürjisi ile üretilen çeliklerde presleme tekniğinin mikroyapı mekanik özelliklere etkisinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Bharathi, P. and Kumar, T.S. (2023) "Mechanical characteristics and wear behaviour of Al/SiC and Al/SiC/B₄C hybrid metal matrix composites fabricated through powder metallurgy route," *Silicon*, 15(10):4259-4275. doi: <https://doi.org/10.1007/s12633-023-02347-0>.
- Bhuvanesh, D., and Radhika, N. (2017). "Experimental investigation on tribological characteristics of silicon nitride reinforced aluminium metal matrix composites." *Journal of Engineering Science and Technology*, 12(5):1295-1306.
- Chen, X., Tao, J., Yi, J., Liu, Y., Li, C., and Bao, R. (2018). "Strengthening behavior of carbon nanotube-graphene hybrids in copper matrix composites." *Materials Science and Engineering: A*, 718:427-436. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.02.006>.
- Dursun, T., and Soutis, C. (2014). "Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys." *Materials and Design*, 56:862-871. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.002>.
- Gürbüz, M., Şenel, M. C., and Koc, E., (2018). "The effect of sintering time, tem-

- perature, and graphene addition on the hardness and microstructure of aluminum composites." *Journal of Composite Materials*, 52(4):553-563. doi: <https://doi.org/10.1177/0021998317740200>.
- Haq, M. U. I. M., and Anand, A. (2018). "Microhardness studies on stir cast AA7075-Si₃N₄ based composites." *Materials Today: Proceedings*, 5(9):19916-19922. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.357>.
- Kumar, P. N. S., Sachit, T. S., Mohan, N., and Akshayprasad, M. (2021). "Dry sliding wear behaviour of Al -5Si-3Cu-0.5Mn alloy and its WC reinforced composites at elevated temperatures." *Materials Today: Proceedings*, 44:566-572. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.351>.
- Kumar, S. A., Vignesh, J. H., and Joshua, S. P. (2020). "Investigating the effect of porosity on aluminium 7075 alloy reinforced with silicon nitride (Si₃N₄) metal matrix composites through stir casting process." *Materials Today: Proceedings*, 39:414-419. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.690>.
- Kumar, N. and Khanduja, D. (2024) "A study of mechanical properties on aluminum - based hybrid metal matrix composite (AA7175/B₄C/SiC/Gr)," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 105(1):351-358. doi: <https://doi.org/10.1007/s40033-023-00485-8>.
- Mattli, M. R., Matli, P. R., Shakoor, A., and Mohamed A. M. A. (2019). "Structural and mechanical properties of amorphous Si₃N₄ nanoparticles reinforced Al matrix composites prepared by microwave sintering." *Ceramics*, 2(1):126-134. doi: <https://doi.org/10.3390/ceramics2010012>.
- Rao, P.S.R. and Mohan, C.B. (2020). "Study on mechanical performance of silicon nitride reinforced aluminium metal matrix composites." *Materials Today: Proceedings*, 33(8):5534-5538. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.495>.
- Şenel, M. C., and Mahmutoğlu, Ü. (2022). "Effect of induction heat treatment on the mechanical properties of Si₃N₄-graphene-reinforced Al2024 hybrid composites." *Bulletin of Materials Science*, 45(1):1-17. doi: <https://doi.org/10.1007/s12034-021-02638-5>.
- Şenel, M. C. (2018). Grafen-seramik tanecik takviyeli alüminyum matrisli hibrit kompozitlerin toz metalürjisi metoduyla üretimi, mekanik ve mikroyapı özelliklerinin incelenmesi. Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Şenel, M. C., and Demir, M., (2023). "Effect of induction heat treatment process and graphene/B₄C amount on the tribological and mechanical properties of Al6061 hybrid composites." *JOM*, 75(7):2554-2568. doi: <https://doi.org/10.1007/s11837-023-05790-x>.

- Sekar, B.K., Pradeep, G.V.K., Silambarasan, R. and Dhairiyasamy, R. (2024). "Microstructural and mechanical characterization of AA2124 aluminum alloy matrix composites reinforced with Si_3N_4 particulates fabricated by powder metallurgy and high-energy ball milling." *Revista Materia*, 29(3):1-22. doi: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2024-0196>.
- Shantharaj, P., Prashanth, A. S., Nagaral, M., Bharath, V., Auradi, V., and Dharshan, K. (2022). "Microstructure, tensile and compression behaviour of B4C particles reinforced Al7075 matrix composites." *Materials Today: Proceedings*, 52:1135–1139. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.008>.
- Sharma, S.K., Saxena, K.K., Salem, K.H., Mohammed, A., Singh, R. and Prakash, C. (2024) " Effects of various fabrication techniques on the mechanical characteristics of metal matrix composites : a review." *Advances in Materials and Processing Technologies*, 10(2):277-294. doi: <https://doi.org/10.1080/2374068X.2022.2144276>.
- Sönmez, F., and Başak, H. (2016). "Sürtünme karıştırma kaynağının yaşlandırılabilir parçalar üzerinde etkisi effect of stir friction welding on age hardenable parts." *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture*, 31(ÖS1):29-34. doi: <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.311198>.
- Şahingöz, B. Karakoç, H. and Çıtak, R. (2024) "Production of AA6061/TiB₂/B₄C/GNP hybrid surface composites processed by friction stir processing (FSP) and investigation of mechanical properties," *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C Tasarım ve Teknoloji*, 12(1):405–426. doi: <https://doi.org/10.29109/gujsc.1435733>.
- Taskin, A. and Şenel, M. C. (2024) "Tribological properties and microstructures of tungsten carbide and few-layer graphene-reinforced aluminum-based composites," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 77(2):445–456, doi: <https://doi.org/10.1007/s12666-023-03114-w>.
- Tümer, M. (2004). Silisyum tozu üretilmesi ve sinterlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Yıldırım, M. (2016). Mekanik alışım yöntemi ile AA7075- karbon nanotüp takviyeli metal matrisli kompozit üretimi karakterizasyonu ve aşınma davranışlarının incelenmesi. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Yıldırım, M., and Özyürek, D. (2018). "Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen 7075 Al alışımlarında Mn miktarının aşınma davranışlarına etkisinin incelenmesi." *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(2):269–276. doi: <https://doi.org/10.29109/http-gujsc-gazi-edu-tr.336025>.



INVESTIGATION OF INDUCTION SINTERABILITY OF POWDER METAL PARTS OF DIFFERENT SHAPES AND SIZES

Can ÇİVİ^{1*}, Enver ATİK²

¹ Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Manisa

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-5302-9072>

² Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Manisa

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-8250-1957>

Keywords

Powder Metallurgy, Sintering, Induction Sintering, Conventional Sintering

Abstract

Powder metal parts are used in many applications because of widely advantages. Induction sintering is a rapid sintering method, and it is moving towards to an important alternative process of conventional sintering by means of time and energy saving and more improved mechanical properties. In this study, five different commercial component were pressed with dual axis press under 600-800 MPa pressure. The samples were sintered with conventionally and with medium frequency (30 kHz) induction sintering mechanism. The body of the samples was heated directly by induction sintering. Comparison of the mechanical properties and microstructures of samples which produced by conventional and induction sintering methods were carried out. In the tests, compression testing, HRB hardness testing and microstructural examination were used for each component individually or in combination, taking into account customer specifications. As a result of study, although there were differences depending on the alloys and the shape of the powder metal component, when porosity, hardness and compression strength are taken into account, it has been observed that with the induction sintering method, sintering times of 30 minutes could be reduced to 15 minutes, resulting in a time reduction of approximately 50%. While a maximum difference of 11% was observed in the sample with the worst result in the compression test in induction sintering compared to conventional sintering, it was observed that the compression strength obtained with conventional sintering in other samples could be achieved with the induction sintering method. When the hardness and porosity data were examined, it was seen that induction sintering can reach the targeted conventional sintering values. It has been observed that a hardness increases of up to 20 HRB is provided in the best case. When the pre-sintering time is included, an 80 % time advantage is observed compared to conventional sintering.

* can.civi@cbu.edu.tr

doi : 10.46399/muhendismakina.1460609

FARKLI ŞEKİL VE BOYUTLARDAKİ TOZ METAL PARÇALARIN İNDÜKSİYON İLE SİNERLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Anahtar Kelimeler

Öz

Toz Metalurjisi,
Sinterleme, İndüksiyon
Sinterleme, Geleneksel
Sinterleme

Toz metal parçalar, yaygın avantajları nedeniyle birçok uygulamada kullanım alanı bulmaktadır. İndüksiyon sinterleme, hızlı bir sinterleme yöntemidir ve zaman ve enerji tasarrufu ve iyileştirilmiş mekanik özellikler sebebiyle geleneksel sinterlemeye önemli bir alternatif olma yolunda ilerlemektedir. Bu çalışmada, beş farklı ticari bileşen 600-800 MPa basınç altında çift eksenli presle preslenmiştir. Numuneler, geleneksel ve orta frekanslı (30 kHz) indüksiyon sinterleme mekanizmasıyla sinterlenmiştir. Numunelerin gövdesi doğrudan indüksiyon sinterleme ile ısıtılmıştır. Geleneksel ve indüksiyon sinterleme yöntemleriyle üretilen numunelerin mekanik özellikleri ve mikro yapıları karşılaştırılmıştır. Testlerde, müşteri spesifikasyonları dikkate alınarak her bir bileşen için ayrı ayrı veya kombinasyon halinde basma testi, HRB sertlik testi ve mikro yapısal inceleme kullanılmıştır. Çalışma sonucunda alaşımlara ve toz metal bileşenin şekline bağlı olarak farklılıklar olmasına rağmen gözeneklilik, sertlik ve basınç dayanımı dikkate alındığında indüksiyon sinterleme yöntemi ile 30 dakikalık sinterleme sürelerinin 15 dakikaya indirilebildiği, bunun sonucunda yaklaşık %50 oranında zaman azalması sağlandığı görülmüştür. İndüksiyon sinterlemede basma testinde en kötü sonuca sahip numunede konvansiyonel sinterlemeye göre maksimum %11'lik fark gözlenirken, diğer numunelerde konvansiyonel sinterleme ile elde edilen basma dayanımının indüksiyon sinterleme yöntemi ile de sağlanabildiği görülmüştür. Sertlik ve gözeneklilik verileri incelendiğinde indüksiyon sinterlemenin hedeflenen konvansiyonel sinterleme değerlerine ulaşabildiği görülmüştür. En iyi durumda 21 HRB'ye kadar sertlik artışı sağlandığı gözlemlenmiştir. Ön sinterleme süresi de eklendiğinde konvansiyonel sinterlemeye göre %80'lik bir zaman avantajı görülmektedir.

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 28.03.2024

Submission Date : 28.03.2024

Kabul Tarihi : 02.10.2024

Accepted Date : 02.10.2024

1. Introduction

Due to its many benefits, powder metallurgy is one of the most popular production techniques. Using this technique, powders with varying compositions are crushed and subsequently sintered. One of the most crucial problems in powder metallurgy is sintering, as it greatly increases the resistance of crushed powders. The sintering furnaces are where the sintering process is typically carried out. Both batch furnaces and continuous furnaces are used for this (R.M. German, 1996). An essential substitute for the conventional sintering method is the induction sintering technique. This process's benefit is that it may quickly densify to almost theoretical density and prevent grain development (Shon, Jeong, Ko, Doh, & Woo, 2009). Electromagnetic induction, a heating method for electrically conductive materials such as metals (Zinn, S., Semiatin, 1988). The most important feature of the induction heating system is the rapid heating of material because heating occurs directly on metal parts. In general, induction is used for surface heating of materials. Beside of this, heat transfer is 3,000 times better than other heating systems. This provides much faster completion of the warm-up process and reducing the time spent for this period (Randall M. German, 2005). One of the most effective heating techniques in today's electromagnetic material processing is induction heating, which produces heat that is both energy-efficient and quick to produce (Rapoport & Pleshivtseva, 2006). Induction sintering was generally carried out at the same time as pressing in a high-frequency sintering apparatus (Çivi, Tahralli, & Atik, 2014). High frequency induction sintering (HFIHS) is a new rapid sintering method developed in recent years for ceramic and composite production (H. C. Kim, Shon, Yoon, Doh, & Munir, 2006; H. C. Kim, Shon, Yoon, Lee, & Munir, 2006; H. C. Kim, Yoon, Doh, Ko, & Shon, 2006; S. W. Kim, Cockcroft, Khalil, & Ogi, 2010) Along with high frequency induction sintering studies, medium frequency induction has also been carried out (Uğur Çavdar & Atik, 2014; Çivi & Atik, 2012, 2018; Çivi et al., 2014) in recent years. For applications in powder metallurgy, mixtures of elemental iron and graphite powder are frequently utilized (W. F. Wang, 2005). The difference between this system and high frequency sintering is that sintering is performed after pressing. Since this method is a method between induction and sintering by conventional sintering, it is suitable for serial production and sintering of different shaped parts after pressing.

In this study, iron based different shaped commercial powder metal components were sintered by induction and conventional sintering methods. The suitability of mass production of induction sintering was investigated and sinterability of different shaped powder metal parts was investigated by induction sintering method.

2. Experimental studies

In this study, Iron based Hogenas metal powders was used. The powder contents are listed in Table 1. The chemical compositions and the physical properties of the powder contents specified in Table 1 are given in Tables 2-5. Powder metal components in the specified contents were produced by Sintek Inc. Turkey with a dual axis press under 800 MPa pressure. Conventionally sintering was carried out in sintering furnace for 150 minutes (45 minutes pre-sintering, 30 minutes sintering and 75 minutes cooling). Induction sintering was carried out in medium frequency induction sintering mechanism (30 Khz) for 15 and 30 minutes at 1120°C (Figure 2). Pre sintering was not applied to components and samples were cooled in room temperature environment. Induction sintering was carried out in copper coil in the heat resistant glass. A laser pyrometer was used to maintain a consistent temperature of 1120°. Measurements and detailed shapes of sintered components are given in Figure 3 (Sample nomenclature was made according to Figure 3). The image of the samples during sintering is shown in figure 4. After the sintering, some mechanical and microstructural analyses were done to samples. The samples are commercially produced and used components in the automotive industry. The mechanical tests carried out on the samples were requested from consumers. Rockwell-B hardness test was applied according to ASTM E18-12. Compression tests were done to some of the samples according to ASTM E9-09. Finally microstructural investigation was done for two samples. Through all these tests, the properties of induction sintered samples were determined, and these values were compared with conventional sintered samples.

Table 1. Chemical Contents of Samples

Sample Name	Content of Metal Powder
Sample a)	% 100 NC 100.24 Pure Iron + % 0,6 Kenolube P11 (% 2.2-% 2.4 Zn)
Sample b)	%100 Distaloy AE (% 4 Ni + % 1,5 Cu + % 0,5 Mo) + % 0,6 Graphite+% 0,6 Kenolube
Sample c)	% 85 NC 100.24 Pure Iron + % 15 Distaloy ACu (% 10,4-11Cu) + % 0,6 Kenolube
Sample d)	% 100 AHC 100.29 Pure Iron+% 0,6 Kenolube
Sample e)	% 80 AHC 100.29+ % 20 Distaloy ACu (% 10,4-11 Cu) (% 99,2)+ % 0,8 Graphite+% 0,4 Kenolube

Chemical compositions, physical properties (apparent density and flowability) and particle size analysis of used metal powders are given in Table 2-5.

Table 2. Högenas NC 100.24 Chemical Compositions, Physical Properties and Particle Size Analysis

Chemical Compositions (%)		Physical Properties		Particle Size Analysis (%)	
H ₂	0,15			45 µm<	18,5
Cu	0			45-75 µm	20,5
Mo	0	Apparent Density	2,43 g/cm ³	75-106 µm	25,9
C	0			106µm-150 µm	33,9
O	0,08			150µm-212 µm	2,3
Fe	Balance	Flowability	32 s/50 g	180µm-212 µm	0,1
				>212 µm	0

Table 3. Högenas Distaloy AE Chemical Compositions, Physical Properties and Particle Size Analysis

Chemical Compositions (%)		Physical Properties		Particle Size Analysis (%)	
Ni	4,07			45 µm<	27,1
Cu	1,52			45-75 µm	29,5
Mo	0,50	Apparent Density	3,02 g/cm ³	75-106 µm	20,4
O	0,08			106µm-150 µm	17,2
C	0			150 µm-180 µm	4,7
Fe	Balance	Flowability	26 s/50 g	180µ-212 µm	1,1
				>212 µm	0

Table 4. Högenas AHC 100.29 Chemical Compositions, Physical Properties and Particle Size Analysis

Chemical Compositions (%)		Physical Properties		Particle Size Analysis (%)	
C	0,003	Apparent Density	2,98 g/cm ³	45 µm<	24,9
O	0,13			45-75 µm	28,6
				75-106 µm	21,8
Fe	Balance	Flowability	25 s/50 g	106-150 µm	19,2
				150-212 µm	5,5
				>212 µm	0

Table 5. Högenas Distaloy ACu Chemical Compositions, Physical Properties and Particle Size Analysis

Chemical Compositions (%)		Physical Properties		Particle Size Analysis (%)	
Cu	10,8	Apparent Density 3,04 g/cm ³ Flowability	24 s/50 g	45 µm<	22,8
O	0,09			45-75 µm	29
C	0			75-106 µm	20,9
				106 µm-150 µm	20,5
Fe	Balance			150µm-180 µm	5,8
				180µm-212 µm	1
		Apparent Density	24 s/50 g	>212 µm	0

All the sintered commercial powder metal parts are given in Figure 1.



Figure 1. Sintered Samples

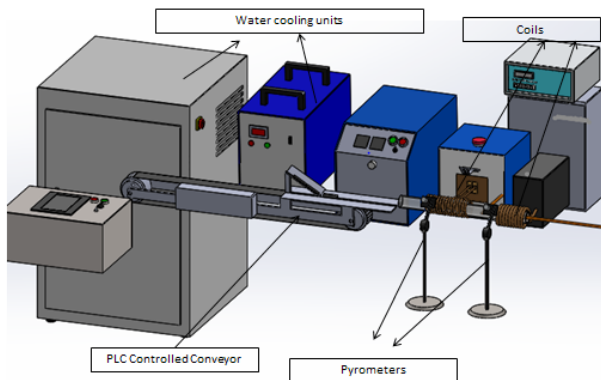


Figure 2. Medium Frequency Induction Sintering Unit

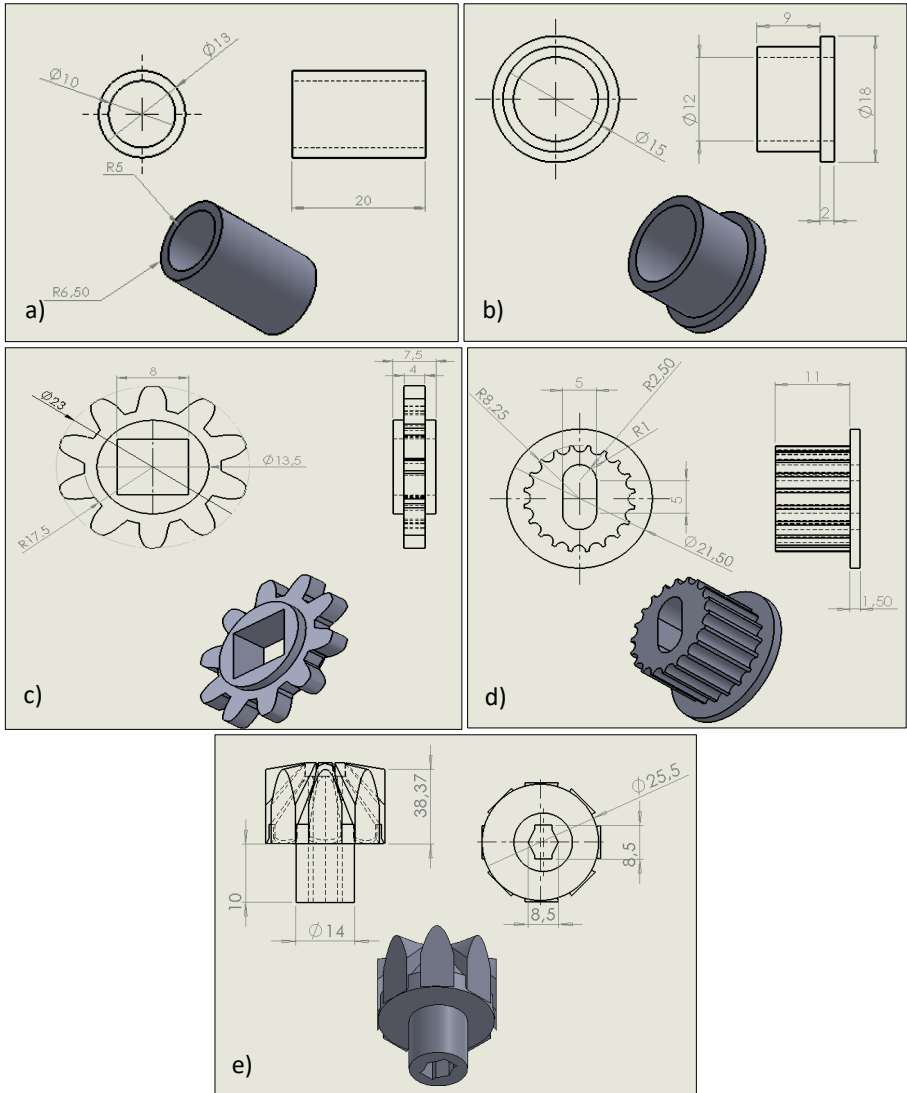


Figure 3. Technical Drawings of All Sintered Components (Dimensions in mm)

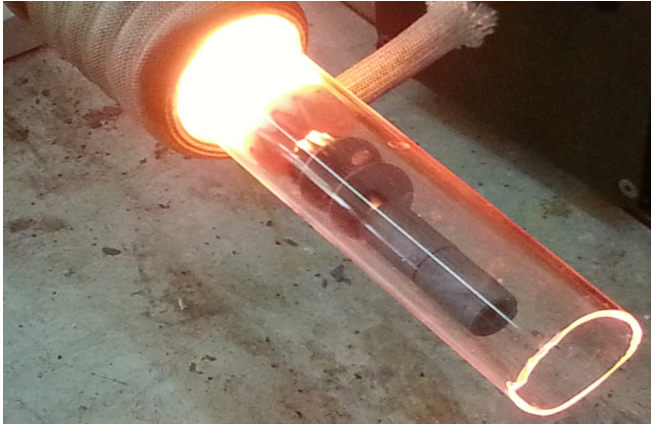


Figure 4. The Image of the Specimens During Sintering

Research and publication ethics were complied with in this study.

3. Results and Discussion

3.1 Sample a)

A compression test was applied to the Sample a (100% pure iron (Högenas NC 100.24) and 0.6% Kenolube lubricant by weight) after the sintering process. Table 6 displays the results of the compression test.

Table 6. Compression Test Results of Sample a.

Sintering duration	Max. Stress (MPa)	Max. Strain (%)
15 min. induction	209,78	10,27
30 min. induction	219,45	12,39
Conventional Sintering	246,94	15,41

In these specimens, the strength values obtained by conventional sintering were not achieved by induction sintering method. Beside of this strength values were increased with sintering duration up to 30 minutes. The increase in sintering time in the induction sintering method naturally resulted in an increase in neck formation and mechanical properties during sintering (Randall M. German, 2005). This is in accordance with the situation determined in the previous study that the mechanical properties in induction sintering of pure iron materials are lower than in conventional sintering. In addition, parallel results were obtained in sample d, which contains pure iron. (Çivi & Atik, 2018). The main advantage of induction sintering is that it is a fast method. Direct heating of the sample makes

the method fast and effective. Beside of this Induction heating is based on joule heating. The resistivity of the materials to be heated is critical for this heating method (Rapoport E, 2010). Resistivity of samples containing alloys such as Ni, Mo, Cu, C are much higher before sintering compared to pure iron samples. This supports inductive heating positively (Can Çivi, 2015; Çivi & Atik, 2018). Similar results were obtained for the alloys included in this study (Table 1). These related results are given in the following section.

3.2 Sample b)

The contents of Sample b were 99.4% Distaloy AE (4% Ni + 1.5% Cu + 0.5% Mo) + 0.6 Graphite + 0.6 Kenolube. Compression tests were applied to these samples and microstructure of these specimens were investigated. Table 7 and Figure 5 present the test findings.

Table 7. Compression Test Results of Sample b.

Sintering duration	Max. Stress (MPa)	Max. Strain (%)
15 min. induction	315,21	15,25
30 min. induction	317,32	14,96
Conventional Sintering	316,26	15,10

The strength values obtained by conventional sintering method have been reached in these samples for 15 minutes by induction sintering process. Better results were obtained with induction in iron-based copper alloy samples, in line with the literature (Uğur Çavdar & Atik, 2010). It is known that the addition of Cu and Mo to the alloy in iron-based powder metal parts improves the mechanical properties (R.M. German, 1996; S. Wang et al., 2019). When both methods were compared, similar compression strength properties were obtained in this component. Also, as seen in Figure 5 a and b, porosity decreased as sintering time increased in induction sintering. In addition, porosity analysis results confirm this (Figure 6).

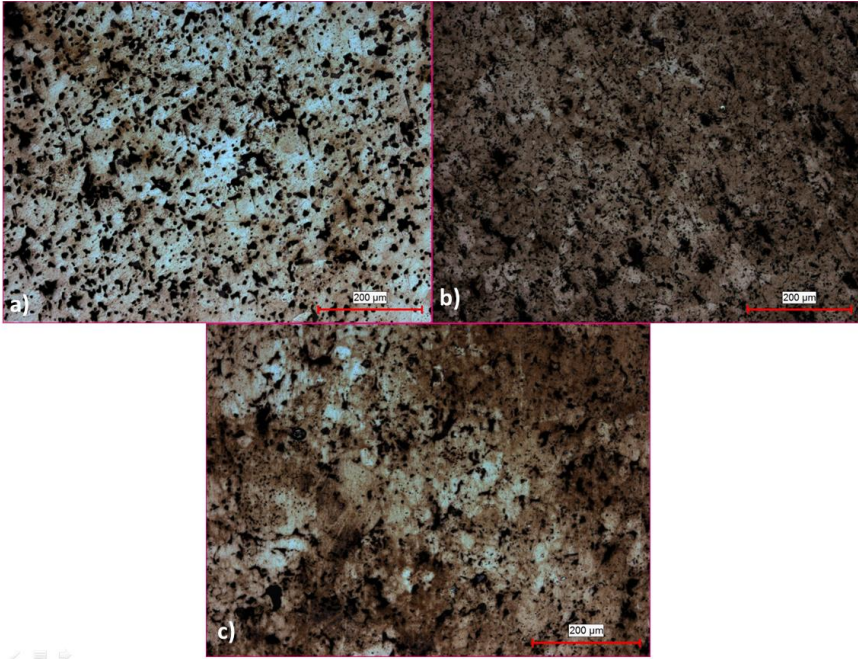


Figure 5. Microstructure Images of Sample b; a)15 Minutes Induction Sintering, b) 30 Minutes Induction Sintering c) Conventional Sintering

Additionally, porosity analyses were done to these samples from microstructure images. Clemex vision lite software was used for porosity analysis. An example analyses were given in Figure 6. Analyses results were given in Table 8.

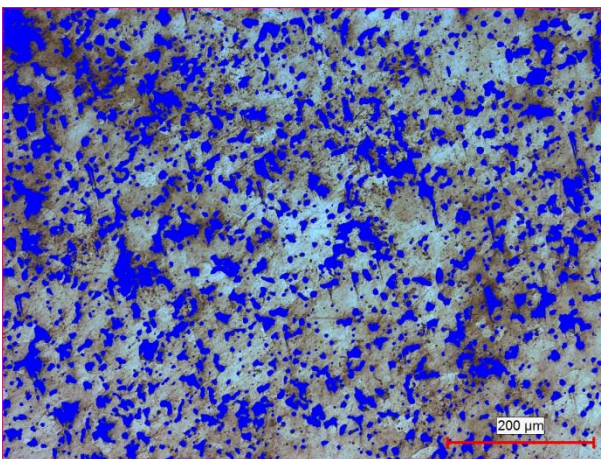


Figure 6. An Example Porosity Analyze Images

Table 8. Porosity Analyses of Sample b.

Sintering duration	Porosity (%)
15 Minutes Induction	24,59
30 Minutes Induction	20,90
Conventional Sintering	22,19

It is a known fact that density values decrease after sintering in samples containing copper. Similar to the literature, low density values were obtained in this sample containing copper (R.M. German, 1996). In some cases (especially in the bushings used in this study-Sample a and Sample b) porosity is a desired condition for self-lubrication. Oil enters the pores and exits during the first operation, providing lubrication. However, when conventional and induction sintering methods were compared, similar porosity values were observed in this component. Because in this sample the amount of Copper in the Alloy is relatively low compared the other components (Table 1). This also resulted in close strength values (Table 7).

3.3 Sample c)

Sample c have 85% NC 100.24 (Pure Iron Dust) + 15% Distaloy ACu (10,4-11% Cu) +0,6 Kenolube content. Rockwell-B hardness tests were applied to these samples and the microstructure of the samples were examined. As can be seen from the hardness test results, the hardness values obtained by conventional sintering are reached by sintering by induction for 30 minutes.

Table 9 and Figure 7 present the test findings.

Table 9. Rockwell-B Hardness of Sample c.

Sintering Duration	Hardness (HRB)
15 Minutes Induction	45,5
30 Minutes Induction	50,0
Conventional Sintering	49,0

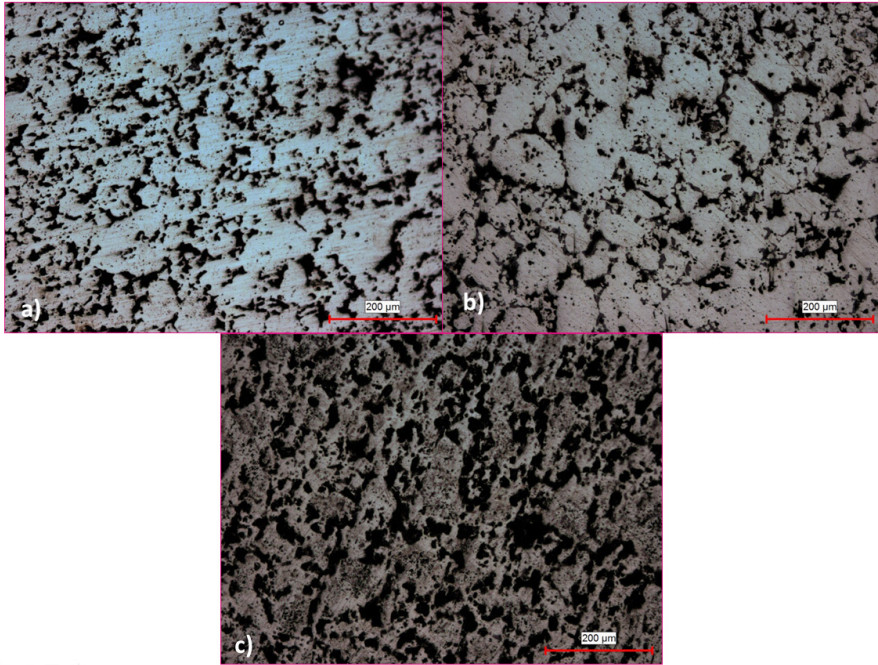


Figure 7. Microstructure Images of Sample c; a)15 Minutes Induction Sintering, b) 30 Minutes Induction Sintering c) Conventional Sintering

Additionally, porosity analyses were done to these samples. Analyses results were given in Table 10.

Table 10. Porosity Analyses of Sample c.

Sintering duration	Porosity (%)
15 Minutes Induction	28,96
30 Minutes Induction	28,24
Conventional Sintering	42,53

Likewise, for this sample, it was observed that better hardness values were obtained after induction sintering (Çivi et al., 2014). Copper supports liquid phase sintering, providing better mechanical strength values. However, the high amount of Copper in the alloy, as mentioned before, leads to increased porosity (Randall M. German, 2005). What is interesting in this sample is the difference in porosity values between the conventional sintered and induction sintered samples (Table 10). It is thought that the hysteresis effect that occurs in direct heating

with induction prevents the copper from moving towards the grain boundary. Hysteresis is the effect that expresses the high rate of vibration and displacement of molecules (Zinn, S., Semiatin, 1988).

3.4 Sample d)

Sample d have 100% pure iron (AHC 100.29) and 0.6% kenolube lubricant content. The Rockwell-B hardness test were applied to these samples. Test results were given in Table 11.

Table 11. Rockwell-B Hardness of Sample d.

Sintering duration	Hardness (HRB)
15 Minutes Induction	19,0
30 Minutes Induction	20,0
Conventional Sintering	21,0

The hardness values obtained by conventional sintering were not reached by sintering by induction for 30 minutes (Table 11). Beside of this it has been observed that the hardness values were very close to each other. As stated before, this situation is due to the low resistivity of pure iron samples. The driving force in induction sintering is resistivity (Çivi & Atik, 2018). As a result, it is seen that the induction sintering method is more suitable for alloyed metals rather than pure metals when all components are taken into consideration.

3.5 Sample e)

The contents of Sample e was % 80 AHC 100.29 + 20% Distaloy ACu (% 10,4-11 Cu) mixture (% 99,2) + 0,8% Graphite + 0,4% Kenolube. Rockwell-B hardness tests were applied to these samples. Hardness test results were given in Table 12.

Table 12. Rockwell-B Hardness of Sample f.

Sintering duration	Hardness (HRB)
15 Minutes Induction	48,0
30 Minutes Induction	51,0
Conventional Sintering	30,0

As can be seen from the hardness results, the hardness values obtained by conventional sintering were overcome by induction sintering for 15 minutes and much higher hardness values were obtained. It has been previously demonstrated that the presence of alloying elements in experimental samples leads to intermetallic

phases during sintering and improves mechanical properties in induction sintering. Here, parallel results were obtained in the sintering of parts of different sizes and shapes (Can Çivi, 2015). When the results are examined specifically for this alloy, it is seen that induction sintering is very suitable for this alloy. Cu and C in the alloy increase the resistivity, create sintering dynamics and shorten the sintering time. The fact that the hysteresis formed by induction disperses the liquid phase and the graphite content ensures steel formation, and that the alloy production is more effective in the induction method due to rapid heating, has enabled much better hardness values to be achieved on this sample basis (Table 12).

All these experimental results briefly show that induction sintering can be used as a mass manufacturing tool as an alternative to traditional sintering under the right conditions. The additive manufacturing method is a method that is given great importance today and is known to have significant disadvantages as well as important advantages it provides (Pereira, Kennedy, & Potgieter, 2019). For small and cylindrical or homogeneous shaped parts, the induction sintering method can also be an alternative of the additive manufacturing method. Here, the mechanical properties expected from the part to be produced may become important. It has also been shown that both methods can be applied in a hybrid way (Rios, 2018).

4. Conclusions

In the study, sintering of the parts with different shapes and sizes could be carried out by medium frequency induction sintering. Melting or distortion was not occurred on the samples. Mechanical properties of samples were determined parallelly desired mechanical tests from companies that ordered parts. Additionally microstructural analyses were done some of the samples. When porosity, hardness, and compression strength are considered, it has been observed that the induction sintering method can reduce sintering times from 30 minutes to 15 minutes, resulting in a time reduction of approximately 50%. There were variations depending on the alloys and the shape of the powder metal component. The sample that performed the worst in the compression test showed a maximum difference of 11% (246,94-219,45 MPa) between induction and conventional sintering, but other samples showed that the induction sintering method could achieve the same compression strength as conventional sintering. In the best scenario, it has been noted that hardness increases of up to 21 (30 HRB-51 HRB) HRB are given. An 80% time benefit is seen when pre-sintering time is taken into account in comparison to traditional sintering. As a result of this study, it was observed that, induction sintering can be modified serial production and with this method, the production of parts in many different shapes and sizes can be achieved. This method, which is similar to conventional sintering, can be adapted to commercial applications beside scientific studies. In addition, it is thought that

the method will be an alternative or complementary to additive manufacturing methods. Future studies will determine this idea.

Acknowledgements

We would like to thank to Sintek Powder Metallurgy Industry And Trade Inc. for their support in the study.

References

- Can Çivi. (2015). *Investigation of Effect of Sintering Parameters to Mechanical Properties at Medium and Low Frequency Sintering of Powder Metal Parts* (PhD). Manisa Celal Bayar University, Manisa.
- Çavdar, Uğur, & Atik, E. (2010). Induction Sintering of %3 Cu Contented Iron Based Powder Metal Parts. *Modern Applied Science*, 4(3), 63–70.
- Çavdar, Uğur, & Atik, E. (2014). Investigation of conventional-and induction-sintered iron and iron-based powder metal compacts. *JOM*, 66(6), 1027–1034. doi: <https://doi.org/10.1007/s11837-014-0977-0>
- Çivi, C., & Atik, E. (2012). *Comparison of effect of induction and classical sintering to mechanical properties of powder metal components*. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1476). doi: <https://doi.org/10.1063/1.4751578>
- Çivi, C., & Atik, E. (2018). The effect of inductive sintering to iron based powder metal parts. *Journal of Alloys and Compounds*, 753. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.04.241>
- Çivi, C., Tahrali, N., & Atik, E. (2014). Reliability of mechanical properties of induction sintered iron based powder metal parts. *Materials and Design*, 53. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.034>
- German, Randall M. (2005). *Powder metallurgy and particulate materials processing: the processes, materials, products, properties, and applications*. Metal Powder Industries Federation.
- German, R.M. (1996). *Sintering Theory and Practice*. New York.
- Kim, H. C., Shon, I. J., Yoon, J. K., Doh, J. M., & Munir, Z. A. (2006). Rapid sintering of ultrafine WC-Ni cermets. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 24(6), 427–431. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2005.07.002>
- Kim, H. C., Shon, I. J., Yoon, J. K., Lee, S. K., & Munir, Z. A. (2006). One step synthesis and densification of ultra-fine WC by high-frequency induction combustion. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 24(3), 202–209. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2005.04.004>

- Kim, H. C., Yoon, J. K., Doh, J. M., Ko, I. Y., & Shon, I. J. (2006). Rapid sintering process and mechanical properties of binderless ultra fine tungsten carbide. *Materials Science and Engineering: A*, 435–436, 717–724. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.07.127>
- Kim, S. W., Cockcroft, S. L., Khalil, K. A., & Ogi, K. (2010). Sintering behavior of ultra-fine Al₂O₃-(ZrO₂+Xmol% Y₂O₃) ceramics by high-frequency induction heating. *Materials Science and Engineering: A*, 527(18–19), 4926–4931. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.04.025>
- Pereira, T., Kennedy, J. V., & Potgieter, J. (2019). A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job. In *Procedia Manufacturing* (Vol. 30, pp. 11–18). Elsevier B.V. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.003>
- Rapoport E, P. Y. (2010). Optimal Control of Induction Heating Processes - Edgar Rapoport , Yulia Pleshivtseva.pdf, 1–5.
- Rapoport, E., & Pleshivtseva, Y. (2006). *Optimal Control of Induction Heating Processes*. *Optimal Control of Induction Heating Processes*. doi: <https://doi.org/10.1201/9781420019490>
- Rios, O. (2018). *Additive Manufacturing Consolidation of Low-Cost Water Atomized Steel Powder Using Micro-Induction Sintering*. Retrieved from <http://www.osti.gov/scitech/>
- Shon, I. J., Jeong, I. K., Ko, I. Y., Doh, J. M., & Woo, K. Do. (2009). Sintering behavior and mechanical properties of WC-10Co, WC-10Ni and WC-10Fe hard materials produced by high-frequency induction heated sintering. *Ceramics International*, 35(1), 339–344. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2007.11.003>
- Wang, S., Wang, Q., Wang, H. L., Liu, F. P., Yao, W. J., Jiang, F., ... Wang, F. Y. (2019). Effects of copper content on microstructure and mechanical properties of powder-forged rod Fe-C-Cu alloys manufactured at elevated temperature. *Materials Science and Engineering A*, 743(November 2018), 197–206. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.11.082>
- Wang, W. F. (2005). Effect of alloying elements and processing factors on the microstructure and hardness of sintered and induction-hardened Fe-C-Cu alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 402(1–2), 92–97. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.04.016>
- Zinn, S., Semiatin, S. L. (1988). *Elements of Induction Heating Design, Control and Applications*. ASM International. doi: <https://doi.org/10.1361/eo-ih1988p001>



VİNÇ SİSTEMLERİNDE KİRİŞLERİN KAYNAKLI BİRLEŞİM YERLERİNİN BAĞLANTI TASARIM OPTİMİZASYONLARININ MODELLENMESİ, SYSWELD KAYNAKLI İMALAT SONLU ELEMANLAR SİMÜLASYONU VE ANALİZİ

Samet DÖNERKAYA^{1*}, Sinan Alp AKYOL²

¹ BVS Bülbüloğlu Vinç Sanayi Ar-Ge Merkezi, 06935 Sincan, Ankara
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-7577-5124>

²BVS Bülbüloğlu Vinç Sanayi Ar-Ge Merkezi, 06935 Sincan, Ankara
ORCID No : <http://orcid.org/0009-0004-3648-7460>

Anahtar Kelimeler

Öz

Kaynak simülasyonu, kaynak distorsiyonu, aralıklı metot kaynak, SYSWELD

Vinç sistemlerinde kullanılan kirişlerin konstrüksiyonlarında güçlendirme takviyeleri (stiffener) kullanılmaktadır. Bu takviyelerin kiriş boyunca aralıksız şekilde kaynaklı imalat yöntemleriyle birleştirilmesiyle ısıl etkinin olumsuz etkisi artmaktadır. Isıl deformasyon etkisi nedeniyle çarpılma ve buna bağlı kirişlerde bozulmalar meydana gelmektedir. Bu çalışma kapsamında SYSWELD Visual Assembly kaynaklı imalat simülasyon programı kullanılarak, kaynaklı imalat süreçlerinde oluşan ısıl deformasyon etkilerinin üretim öncesinde bertaraf edilebilmesi hedeflenmiştir. Sonlu elemanlar simülasyonu ve analizleri yapılarak güçlendirme takviyelerinin kaynaklanmasından dolayı oluşan çarpılma ve bozulmalar minimum seviyeye indirgenmeye çalışılmıştır.

Gün geçtikçe endüstriyel uygulamalarda kaynaklı imalat proseslerinde artan hammadde, malzeme, işçilik ve enerji maliyetleri operasyonel kaynaklı birleştirme yöntemlerinde optimizasyon yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Vinç kirişlerinde, kaynaklı imalat operasyonlarında distorsiyon toleransları dahilinde oluşabilecek; deformasyon ve çarpılmaların yön ve büyüklükleri, kaynaklı imalat gerilme konsantrasyonunun oluşturduğu olumsuz etkiler SYSWELD Visual Assembly kaynaklı imalat simülasyon programı aracılığıyla yürütülen sonlu elemanlar analiz çalışmaları neticesinde üretim öncesinde tespit edilebilmektedir. Bu çalışmada, vinç endüstrisinde konstrüksiyonlarda yer alan güçlendirme takviyeleri kaynak dikişlerinin kiriş boyunca aralıklı süresiz kaynak yöntemi kullanılması zorunluluğu bu kapsamda yürütülen analizler sonucunda tespit edilmiştir. Ayrıca vinç çelik konstrüksiyonlarında; TS EN 1993-1-8 standardının kaynaklı imalat proseslerinde doğrudan uygulanması durumunda konstrüksiyonların daha ekonomik; Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları yönetmeliği kullanılması durumunda ise daha emniyetli ve güvenli bir vinç sistemi imal edileceği sonucuna ulaşılmıştır.

* s.donerkaya@bvs.com.tr
doi : 10.46399/muhendismakina.1479146

MODELLING OF CONNECTION DESIGN OPTIMIZATIONS OF WELDED JOINTS OF BRACKETS IN CRANE SYSTEMS, FINITE ELEMENT SIMULATION AND ANALYSIS OF SYSWELD WELDED MANUFACTURING

Keywords

Weld simulation, weld distortion, intermittent weld, SYSWELD

Abstract

Stiffeners are used in the construction of beams used in crane systems. The negative effect of thermal effect is increased by joining these reinforcements with welded manufacturing methods continuously along the beam. Due to the thermal deformation effect, distortion and related beam distortions occur. Within the scope of this study, SYSWELD Visual Assembly welded manufacturing simulation programme was used to eliminate the thermal deformation effects that occur in welded manufacturing processes before production. Finite element simulations and analyses were performed to minimise distortions and distortions caused by welding of reinforcements.

Increasing raw material, material, labour and energy costs in welded manufacturing processes in industrial applications day by day necessitate optimisation in operational welded jointing methods. In crane beams, the direction and magnitude of deformations and distortions that may occur within the distortion tolerances in welded manufacturing operations, and the negative effects of welded manufacturing stress concentration can be determined before production as a result of finite element analysis studies carried out through the SYSWELD Visual Assembly welded manufacturing simulation program. In this study, the necessity of using intermittent discontinuous welding method along the beam of the welding seams of the reinforcements in the constructions in the crane industry was determined as a result of the analyses carried out in this context. In addition, it has been concluded that in crane steel constructions; if TS EN 1993-1-8 standard is directly applied in welded manufacturing processes, constructions will be more economical; if the Regulation on Design, Calculation and Construction Principles of Steel Structures is used, a safer and safer crane system will be manufactured.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 06.05.2024

Kabul Tarihi : 21.10.2024

Research Article

Submission Date : 06.05.2024

Accepted Date : 21.10.2024

Extended Abstract

Introduction/Background

As a result of the simulations and analyzes carried out within the scope of the study, it was determined that distortions and distortions causing structural damage occurred due to the welding seams in the reinforcement integrated into the construction of the carrier beams in the cranes, combined with the continuous (uninterrupted) welded manufacturing method along the crane beams. Operational welded manufacturing parameters such as calculating the direction and magnitude of distortions and deformations that may occur in the structure within tolerances, ensuring residual stress controls that may occur during welded manufacturing, as well as minimizing excessive welding applications and creating optimum welding assembly plans and ideal weld maps, SYSWELD Visual it was determined within the scope of the study before welded manufacturing by using the assembly welded manufacturing simulation program. Objective of this study is to minimize distortions and deformations in crane beam structures due to continuous welding using SYSWELD Visual Assembly simulations. It highlights the need for intermittent welding methods for reinforcement stiffeners, emphasizing the economic benefits of EN 1993-1-8 and the safety advantages of the Regulation on Steel Structure Design.

In order to minimize the undesirable distortion, distortion and deformation effects that may occur in welded manufacturing operations in crane beams, the necessity of applying intermittent method welding method in the welding seams of the reinforcements (stiffeners) in the beam construction, except for exceptional special cases along the beam, has been confirmed as a result of SYSWELD Visual Assembly welded manufacturing finite element analysis studies carried out within the scope of this study.

Objectives

The purpose of this study is to analyze the effects of welding manufacturing processes on the crane beam structures of the crane construction, the design process of which has been completed by making engineering calculations and to determine the necessity of using intermittent welding methods in stiffener weld seams in order to minimize unwanted distortion and deformation effects.

Methods/Methodology

The study's SYSWELD Visual Assembly analyses identified distortions in crane beams from continuous welding of reinforcement stiffeners, suggesting the use of EN 1993-1-8 for economic optimization or the regulation on Steel Structure Design for safety in intermittent welding connections.

Results/Findings

The study examined the application of welding standards and regulations in Turkey, particularly focusing on intermittent corner welding connections, serving as a preliminary study for optimizing structural connections and recommended the direct use of robotic automation systems to minimize distortions and residual stresses during welding operations.

Discussion and Conclusions

In crane steel constructions; if the TS EN 1993-1-8 standard is directly applied in welded manufacturing processes, the construction is more economical; however, utilizing the Regulation on the Design, Calculation and Construction Principles of Steel Structures would lead to crane system that is safer and more secure.

1. Giriş

Vinç sektöründe dünya pazarında başta okyanus ötesi ve deniz aşırı ülkeler olmak üzere müşteri kuruluşların vinç sistemlerinin kullanım ve servis ömürleri açısından kalite beklentileri gün geçtikçe artmaktadır. Bu çerçevede müşteri kuruluşlar isterleri doğrultusunda vinç sistemlerinin projelendirme süreçlerinden, kaynaklı imalat proseslerinde ki operasyonel imalat süreçlerine kadar mühendislik danışmanlık firmaları ve üçüncü taraf denetçileri aracılığıyla üretim ve imalat aşamalarına doğrudan müdahale etmektedirler. Vinç sistemleri özelindeki teorik mühendislik hesaplamaları yapılarak doğrulanan fakat kaynaklı imalat prosesleri gereği hatalı uygulama yapılması suretiyle imal edilen vinç kirislerinin kullanılamamasına hatta çelik konstrüksiyonların doğrudan hurdaya ayrılmasına yol açabilecek istenmeyen olumsuzluklar yaşanabilmektedir.

Vinç sistemlerinde endüstriyel uygulama süreçlerinde en çok tercih edilen kaynaklı imalat birleştirme yöntemleri alın ve köşe kaynağıdır. Ulusal ve uluslararası standartlarda yer alan kaynaklı imalat tasarım detayları ve literatür taramaları bu yöntemler kapsamında gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı imalat proseslerinde yapılan incelemeler doğrultusunda en fazla kullanım alanı bulunan alın ve köşe kaynak yöntemine haiz ilgili standartlar araştırılmış, ülkemizde kullanımına yardımcı olmak amacıyla analiz edilmiştir. Ayrıca yine bu çalışma kapsamında kaynaklı imalat standartlarının vinç sektöründeki çelik konstrüksiyonların kaynaklı birleşim bağlantılarının araştırmaları için ön çalışma niteliği taşımaktadır.

Literatürde yer alan çalışmalara bakıldığında; optimizasyon amacıyla çelik takviyeli dikdörtgen çelik boru kolonlar üzerinde test ve sonlu elemanlar analizleri (Liu, Sun ve Ni, 2023) araştırma konusu olarak incelenmiştir. Diğer taraftan simülasyon ve deney sonuçlarının karşılaştırılmaları yapılarak, analiz çalışmalarının doğruluğu değerlendirilmiştir. Aralıklı kaynak yönteminin deformasyon ölçeğini tahmin etmek için hidrodinamik, statik sonlu elemanlar analizi ve sayısal interpolasyon entegre edilmesi suretiyle bir hesaplama prosedürü geliştirilmiştir (Jian, Liu, Zhao, Wu, Lei ve Chen, 2021). Kaynak simülasyonu analizi yapılarak, küçük ölçekli bir T-bağlantısı incelenmiştir ve sayısal bir modelleme araştırması tarafından yapılmıştır (Kollár, 2023). Yapılan analizler sonucu tamir kaynağı yapılan ve analiz edilen T-bağlantısında plastik gerilme yaklaşık %33 oranında artarken, Von Mises kalıcı gerilme tepe değerinin yaklaşık %26 arttığı tespit edilmiştir. SYSWELD Visual Assembly kaynaklı imalat simülasyon programının ısıtma işlem, kaynak ve kaynak montaj süreçlerine yönelik tasarım ve imalat sürecinde sıkıntıların tahmin edilmesi, artık gerilmelerin belirlenmesi ve kaynak bağlantısının tahmini tasarım sürecinde uygulanması Sravan ve Jose (KK ve MJ, 2022) tarafından yapılan çalışmalar neticesinde sunulmuştur.

Toleransları dahilinde yapıda olası muhtemel oluşabilecek distorsiyon, çarpıl-

ma ve deformasyonların yön ve büyüklüklerinin hesaplanması, kaynaklı imalat sırasında oluşabilecek kalıntı gerilme kontrollerinin sağlanmasının yanı sıra gereğinden fazla kaynak uygulamalarının minimum seviyelere indirgenmesi ile birlikte optimum kaynak montaj planı ve kaynak haritalarının oluşturulması gibi operasyonel kaynaklı imalat parametreleri SYSWELD Visual Assembly kaynaklı imalat simülasyon programı kullanılması suretiyle kaynaklı imalat üretim öncesinde tespit edilebilmektedir (Tiago, Sergio ve Paulo, 2017).

Günümüzde kaynaklı imalat operasyonlarında gün geçtikçe artan hammadde, malzeme, işçilik ve enerji maliyetleri operasyonel kaynaklı birleştirme yöntemlerinde tasarrufa gidilmesini zorunlu kılmaktadır. Geleneksel vinç sistemlerindeki kaynaklı birleşim bağlantılarında; TS EN 1090-2, TS EN 1993-1-8 ile Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları Yönetmeliğine (ÇYTHYE) uygun olarak kaynak geometrisi, etkin dikiş ve boğaz kalınlığı, efektif kaynak dikiş uzunlukları gibi aralıklı (metot) kaynağına ilişkin ideal kaynaklı imalat operasyon parametreleri çalışma kapsamında belirlenmiştir.

Kaynaklı imalat ideal kaynak kalitesi toleransları çerçevesinde kalıntı gerilme kontrollerinin sağlanması, distorsiyon toleransları dahilinde yapıda olası muhtemel oluşabilecek bozulma ve deformasyonların yön ve büyüklüklerinin hesaplanması, kaynaklı imalat sırasında kabul kriterleri toleransları dahilinde kaynak nüfuziyet değerlerinin belirlenmesi, fiktür tespitlerinin yanlış konumlandırılmasından kaynaklanan kaynak hatalarının en aza indirgenmesi ve kaynak montaj planı ile kaynak haritalarının optimum hazırlanması ve gereksiz kaynak uygulamalarının minimum seviyeye indirgenmesi, distorsiyon etkisinden kaynaklanan kaynaklı imalat revizyon işçilik maliyetlerinin azaltılması gibi parametreler SYSWELD Visual Assembly bilgisayar destekli kaynaklı imalat simülasyon programı kullanılması suretiyle vinç üretim süreçleri öncesinde tespit edilebilmektedir.

Vinçlerdeki taşıyıcı kirişlerde konstrüksiyona entegre edilen güçlendirme takviyelerindeki (stiffener) kaynak dikişlerinin kiriş boyunca sürekli (aralıksız) kaynaklı imalat yöntemiyle birleştirilmesinden dolayı ısı tesir etkisi altında ısıl deformasyonlar oluşmaktadır. Kaynaklı imalat sürecinde olası muhtemel olumsuz bu etkilerin Visual Assembly kaynaklı imalat simülasyon programı kullanılarak, üretim öncesinde minimize edilmesi hedeflenmiştir. Güçlendirme takviyelerindeki ısıl deformasyon etkisinden kaynaklanan çarpılma ve bozulmaların minimum seviyeye indirgenmesi sonlu elemanlar analiz faaliyetleri çalışma kapsamında yürütülmüştür. Bu çerçevede vinç sistemlerindeki kaynaklı imalat operasyonel sürecinin parametrik olarak simülasyon ortamına aktarılması ve sonlu elemanlar analizleri yapılarak, üretim öncesinde yapının termo-mekanik davranışlarının belirlenmesi açısından oldukça efektif sonuçlar alınması itibarıyla vinç sektöründeki ileri mühendislik ve gelecek çalışmaları açısından oldukça önem

taşımaktadır. Vinç sistemlerindeki taşıyıcı kirişlerde kaynaklı imalat operasyonlarında meydana gelen ısı girdisi ve şekil değişimi toleranslar dahilinde olması gerekmektedir. Nihai olarak muhtemel bozulma ve deformasyonların yön ve büyüklükleri, kaynaklı imalat gerilme konsantrasyonunun oluşturduğu istenmeyen deformasyon ve şekil bozuklukları Visual Assembly kaynaklı imalat simülasyon programı ile yürütülen analiz çalışmaları sonucunda imalat operasyonları öncesinde tespit edilebilmektedir.

Vinç sektöründe konstrüksiyonda yer alan güçlendirme plakaları ve takviyeler, kaynak dikişlerinin kiriş boyunca aralıklı süreksiz (metot) kaynak yöntemi kullanılması zorunluluğu bu çalışma kapsamında yapılan analizler sonucunda tespit edilmiştir. İlâveten bu çalışma kapsamında yapılan incelemeler sonucunda vinç konstrüksiyonlarında; TS EN 1993-1-8 standardının kaynaklı imalat operasyonel süreçlerinde doğrudan uygulanması durumunda daha ekonomik; Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları yönetmeliği imalat uygulamalarında tercih edilmesi durumunda ise daha emniyetli ve güvenli bir çelik yapı imal edileceği sonucuna ulaşılmıştır. Kaynaklı bağlantı analitik hesap ve analiz yöntemleri gibi ileri seviye teknik bilgilere erişilmesi için mevzuatlarda ve yönetmeliklerde yer alan ilgili standartlara doğrudan bakılması tavsiye edilmektedir.

Bu çalışmanın devamı şu şekilde düzenlenmiştir. İkinci bölümde, kaynaklı birleşim bağlantı yöntemlerinin vinç sistemleri üzerindeki uygulamaları incelenmiştir. Üçüncü bölümde ise, SYSWELD Visual Assembly bilgisayar destekli kaynak simülasyonu paket programı ve parametreleri ile yürütülen sonlu elemanlar analiz çalışmalarının sonuçları verilmiştir. Dördüncü bölümde kaynaklı imalat standardizasyon araştırmalarına bağlı olarak optimum kaynak parametre değerleri görülmektedir. Beşinci ve altıncı bölümlerde ise, aralıklı metod kaynağı ve son olarak elde edilen sonuçlar ve bulgular verilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

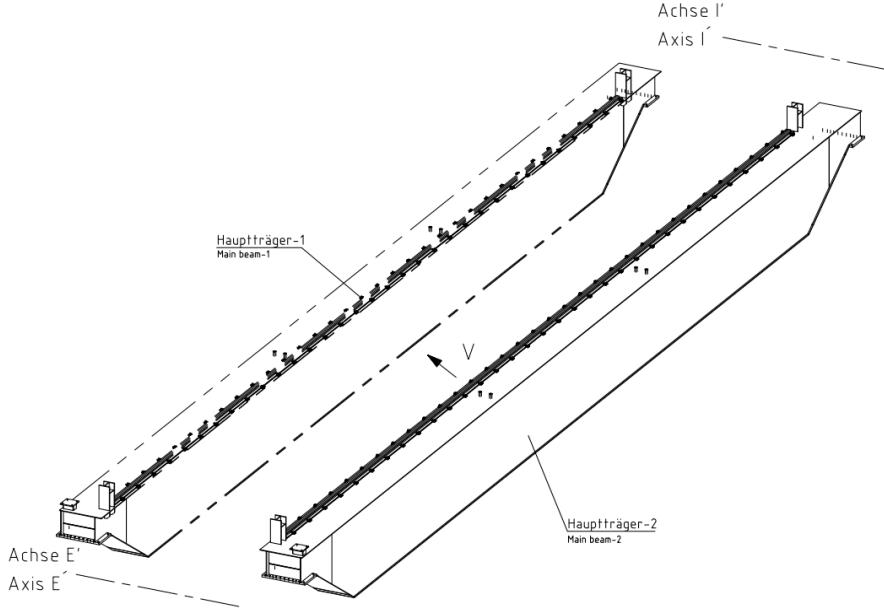
2.1 Vinç Konstrüksiyonlarında Kaynaklı Birleştirme Yöntemleri

Geleneksel vinç sistemlerinde hali hazırdaki kutu kiriş çelik konstrüksiyonlarında operasyonel yük kaldırma prosesinde, yükleme durumunda oluşumu muhtemel burkulma (flambaj) etkisini ekarte etmek amacıyla güçlendirme plakaları (stiffener plate) ve güçlendirme takviyeleri (stiffener) çelik konstrüksiyon yapısına kaynaklı imal usulleriyle uygun kaynak yöntemi belirlenerek birleştirilir. Kirişlerin yapısal olarak tek parça formunda rijit bir şekilde oluşturulmasında güçlendirme elemanları oldukça önem ihtiva etmektedir.

2.2 Kutu Kiriş Güçlendirme Takviyeleri Sürekli Kaynaklı Birleştirme Yöntemi

Vinç sektöründe; müşteri kuruluşlar tarafından doğrudan veya üçüncü şahıs de-

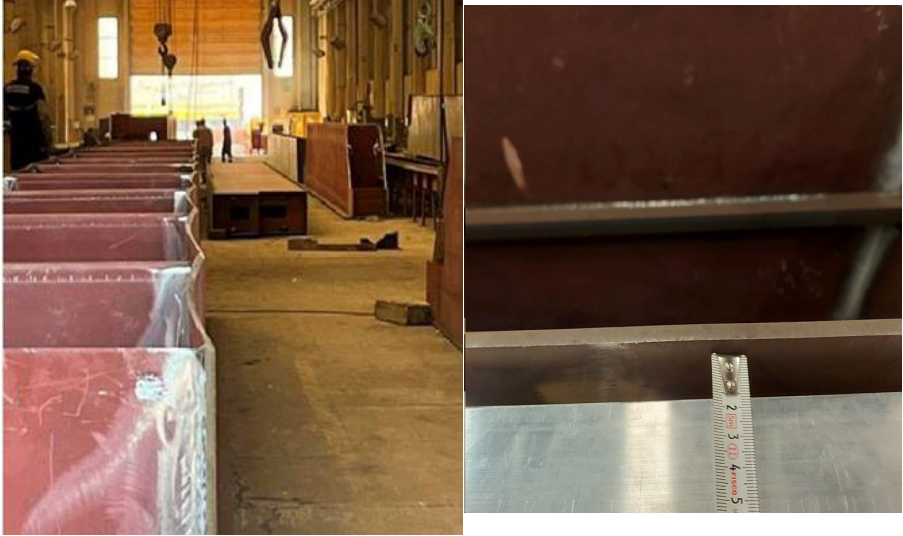
netçi firmalar aracılığıyla kirişlerin kaynaklı imalat operasyonlarına müdahale edildiği durumlar bulunmaktadır. Vinç sistemi özelinde kutu kirişlerin yapısal olarak konstrüksiyondan beklenen çalışma ve servis ömrü isterlerini karşılaması gerekmektedir. Vinç sistemi özelinde projelendirilmiş bir kutu kiriş görseli Şekil 1’de görülmektedir.



Şekil 1. Vinç Yapı Sınıflandırması Açısından Yüksek Çalışma Çevrim Sıklığına Sahip Vinç Sistemi Taşıyıcı Kutu Kiriş Genel Görünüşü

Vinç sistemlerinde mühendislik ve analitik hesaplamaları yapılarak oluşturulan taşıyıcı kiriş kesitlerinin kaynaklı birleştirme üretim operasyonları için Şekil 2’de görüldüğü üzere proje imalat teknik çizimleri gerçekleştirilmektedir. Müşteri kuruluş tarafından belirlenerek, kaynaklı imalat operasyonlarında doğrudan kullanılmak üzere; kaynak dizilimleri, dikiş süreklilikleri, dikiş uzunlukları ve dikiş yükseklikleri de teknik resim detaylarında verilmektedir. Kiriş sisteminde kaynaklı imalat operasyonlarına parametrik olarak müdahale edilen kutu kiriş güçlendirme takviyesi ve güçlendirme plakalarının sürekli (aralıksız) boylu boyunca kaynaklı imalat uygulama görselleri Şekil 3’te verilmiştir.

Vinç sistemleri kutu kiriş çelik konstrüksiyonlarında müşteri kuruluş tarafından spesifik belirlenen kaynaklı imalat proses parametreleri üretim aşamalarında doğrudan uygulanabilmektedir. Güçlendirme takviyelerindeki kaynak dikişlerinin kiriş boyunca sürekli (aralıksız) yekpare kullanılması sonucu, taşıyıcı kirişlerde ısı tesiri altında oluşan ısıl deformasyonlara bağlı bozulmalar ve kalıntı gerilmeleri nedeniyle şekil değişimleri ve yüzey bozulmaları gerçekleşmiştir. Bu durum Şekil 4'teki görselde görülmektedir. Vinç kirişlerinde istenmeyen yapısal hasara neden olan çarpılmalar tespit edilmiştir. Nihai sonuçta ısıl deformasyonlardan kaynaklı kirişlerde meydana gelen bu çarpılma ve bozulmalar nedeniyle kirişlerin konstrüksiyon yapıları vinç sisteminde kullanılmayacak yapısal forma dönüşmüştür.

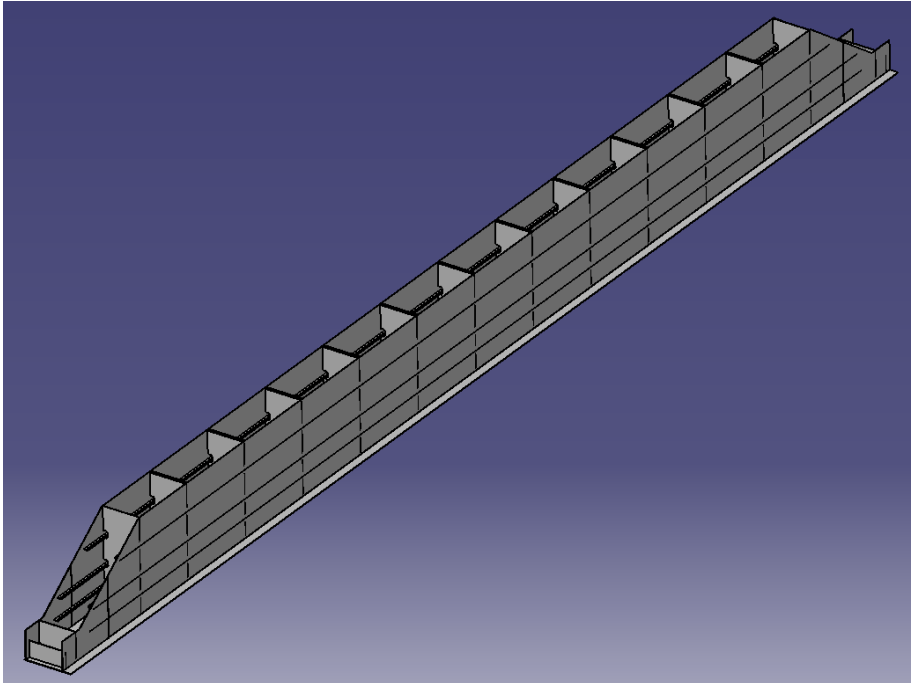


Şekil 4. Vinç Sisteminde Müşteri Kuruluş Tarafından Hatalı Kaynaklı İmalat Parametreleri Belirlenmesinden Dolayı Kiriş Yapısının Hasara Uğrayarak Çarpılma Ve Bozulmaların Meydana Geldiği Konstrüksiyon Görseli

Bilgisayar destekli kaynaklı imalat simülasyon programı SYSWELD Visual Assembly yardımıyla üretim öncesinde olası muhtemel yapıda oluşabilecek ısıl deformasyon etkisinden kaynaklanan çarpılma ve bozulmaların simülasyon ortamında minimum seviyelere indirgenmesi, sonlu elemanlar analiz çalışmaları ile mümkün kılınmıştır. Bu çalışma kapsamında mevcut kaynaklı imalat dataları doğrultusunda Visual Assembly kaynaklı imalat simülasyon programı kullanılarak deformasyona uğrayan vinç kirişlerinin; kaynak proses kurgusu sonlu elemanlar ortamında modellenmiş; çarpılma miktarı yön ve büyüklükleri, kalıntı gerilmeleri ve zamana bağlı sıcaklık değişimleri analiz edilmiştir.

3. Vinç Sistemlerinde Kaynaklı İmalat Simülasyon Analizleri

Günümüzde vinç sistemlerinde bilgisayar destekli kaynaklı imalat simülasyon yazılımlarının teorik olarak temel çalışma prensibi Shrinkage büzülme metoduna dayanmaktadır. Shrinkage metodolojisi ise kaynak prosesinin ısı etkileri nedeniyle yapı veya konstrüksiyon üzerinde meydana gelebilecek büzülme ve genişleme karakteristik davranışları baz alınarak, sistemde oluşabilecek deformasyonların sonlu elemanlar ortamında simüle edilmesi suretiyle çözümlenmesine dayanmaktadır.




Şekil 5. Vinç Kiriş Sistemi Kaynaklı İmalat Simülasyonu 3D Modeli (CAD)

Kaynaklı imalat operasyonel sürecinde kullanılacak çelik malzeme, dolgu teli ve kaynak sıralamasının parametrik olarak imalat kalitesine etkileri, ısı etkileşiminden kaynaklanan kalıntı gerilmelerinin lokal tespiti (Xu, Gilles, Duan ve Yu, 2012), deformasyon optimizasyon çalışmaları, istenilen tolerans değerleri dahilinde optimum kaynak planının oluşturulması, fikstür ve tespit bağlantı noktalarının kaynak sonuçlarına yönelik etkileri, ön imalat risklerine bağlı olarak prototip maliyetlerinde tasarruf edilmesi, mühendislik işçilik efor adam/ay saatlerinin optimizasyonu gibi birçok etmenin erken aşamada önceden tespiti ve proje marjlarının belirlenmesi hassasiyetinde bilgisayar destekli kaynaklı imalat simülasyonları bu noktada oldukça önem taşımaktadır (ESI Group, 2010). Şekil

5'te proje kapsamında SYSWELD Visual Assembly kaynak simülasyonuna hazırlık aşamasında kaynak prosesi özelinde modellenmiş giriş geometrisine ait modelin CAD (Computer Aided Design) görünümü verilmiştir.

3.1 SYSWELD Visual Assembly Kaynaklı İmalat Simülasyonu Parametre Tanımlamaları

Kaynaklı imalat simülasyonunda; malzeme reçetesi (yoğunluk, elastiklik modülü, poisson oranı), kaynak yöntemi ve dikiş parametreleri, operasyonel süreçte optimum kaynak sıralaması planı, parametrik fikstür tanımlamaları (klemp, pim, kontakt, konnektör) ve kaynaklı imalat operasyonunun gerçekleştirildiği ortam sıcaklığı ve kaynak sonrası soğuma prosesi süresi SYSWELD Visual Assembly kaynaklı imalat simülasyon girdileri olarak tanımlandıktan sonra oluşan kalıntı gerilmeleri, ısıl deformasyonlara bağlı çarpılma ve bozulma karakteristik davranış optimizasyonu, zamana bağlı sıcaklık değişimleri ve dağılım karakteristiğine bağlı kaynaklı imalat simülasyon çıktıları analiz sonuçları olarak elde edilmektedir (Bate, Charles ve Warren, 2009).

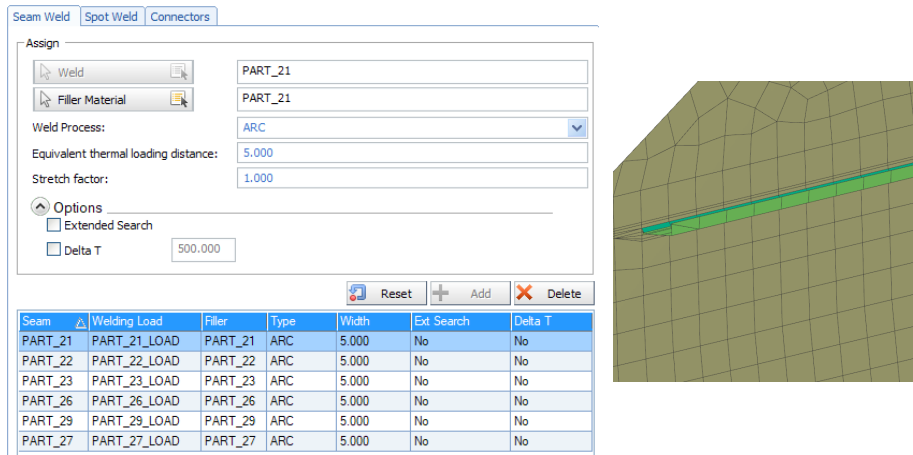
Property	Type	Value	Value Unit	F(*) Unit
Young's Modulus	Const.	209235	N/mm ²	
Poisson's Ratio	Const.	0.3		
Yield Strength	F(STRAIN)		N/mm ²	
Density	Const.	7.804043e-09	ton/mm ³	
Thermal Expansion Coefficient	Const.	2.5e-05	1/K	
Melting Temperature	Const.	1445	C	
Correction Factor Bead Width	Const.	1		

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Comments										
Card Data										
1	MATER /	IDMAT 12	MATYP 1	RHO 304043E-9	ISINT 0	ISHG 2	ISTRAT =	IFROZ		
2	BLANK	AUXID1	AUXID2	AUXID3	AUXID4	AUXID5	AUXID6	QVM	IDMPD	AND
3		0	0	0	0	0	0	1.	0	0
TITLE										
NAME St37 (Solid)										
Meta										
4	G	sigmOPTN	Et	ALPHA	BLANK	BLANK	STRAT1	STRAT2		
	81149.	URVE	0.	2.5E-5			0.	0.		
5	K	EYWORD								
	165421.6	=								
6	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7	LC8		
	12	0	0	0	0	0	0	0		
7	EPSLN1	EPSLN2	EPSLN3	EPSLN4	EPSLN5	EPSLN6	EPSLN7	EPSLN8		
	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.		
8	BLANK	KSI	Fo							
	0.	0.	0.							
9	STRAT3	STRAT4	STRAT5	STRAT6	Q1	Q2	Q3			

Şekil 6. SYSWELD Visual Assembly Kaynaklı İmalat Simülasyonu Malzeme Kartının Entegrasyonu (S235JR)

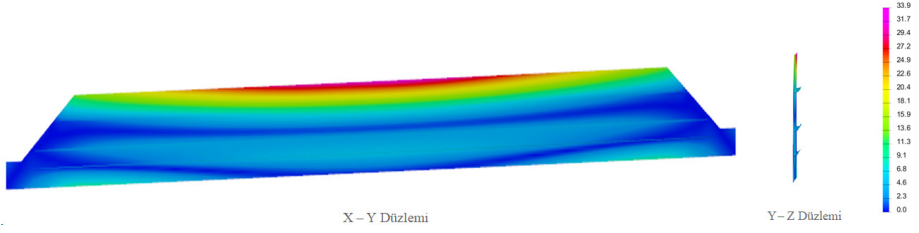
Çalışma kapsamındaki proje özelinde hesaplamalı malzeme mühendisliği çözümü Jmat Pro ile entegrasyon yapılarak, SYSWELD Visual Assembly kaynaklı imalat simülasyon yazılımı ile gerçekleştirilecektir. Mevcut vinç kirişi model montajı ve kaynak teli malzemesi olarak S235JR malzeme kartı özellikleri tanımlanmış, Visual Assembly programına Şekil 6'da verilen malzeme reçetesi aktarımı ve materyal veri transferi gerçekleştirilmiştir.

Vinç kirişi özelinde kaynaklı imalat simülasyon analizleri için gerekli olan kaynak parametreleri ve kaynak planına bağlı kalınarak kaynak dikişlerinin sıralaması vinç sistemi simülasyon geometri modeli üzerine Şekil 7'de görüldüğü üzere parametrik olarak atamaları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yine reel üretim operasyonel süreci göz önünde bulundurularak, imalat sahası ortamında kaynatılacak kiriş modelin fikstür mesnet sabitleme noktaları belirlenerek programa tanımlanmış, analiz için simülasyon hazırlıkları ve Visual Mesh yardımıyla mesh atamaları yapılmıştır.



Şekil 7. Kaynaklı İmalat Simülasyonu (Visual Assembly) Kaynak Parametrelerinin (Kaynak Yöntemi, Kaynak Dikiş Yüksekliği, Kaynak Dizilimleri) Tanımlanması Ve Visual Mesh ile Mesh Dağılımı Konfigürasyonu

Sistemde istenilen sınır şartlarını sağlayabilen optimum kaynak planının haritalanması, deformasyon kaynaklı kalıntı gerilmeleri ve çarpılmaların minimize edilmesi, kaynak prosesi sırasında oluşan zamana bağlı sıcaklık dağılımlarının kontrolü, kaynaklı imalat kalitesinin sabit tutularak belirlenen toleranslar dahilinde montaj sınır şartlarının sağlanması, üretim ve işçilik maliyet kalemlerinin minimize edilmesi gibi kaynaklı imalat ileri mühendislik çalışmalarının yürütüldüğü SYSWELD Visual Assembly simülasyon çarpılma ve kalıntı gerilmelerine ait analiz sonuçları Şekil 8 ve Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 8. Visual Assembly Kaynaklı İmalat Analizleri Çarpılma Sonuçları

Kaynaklı imalat parametreleri doğrultusunda üretim operasyonları gerçekleştirilen mevcut kirişlerdeki gerçek çarpılma miktarı $\delta_{real} = 18$ mm ölçülürken, SYSWELD Visual Assembly kaynaklı imalat analiz sonuçlarında bu değer $\delta_{FEA} = 16$ mm olarak hesaplanmakta ve yaklaşık %11.1 bir sapma değeri ile kabul edilebilir seviyelerde olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu durumda kaynaklı imalat operasyonları öncesinde bilgisayar destekli sonlu elemanlar analizleri yardımıyla taşıyıcı kiriş sistemleri üretilmeden önce yapıda herhangi bir hasarın oluşup oluşmadığı önceden tespit edilebilmektedir. Bu hassasiyette kaynaklı imalat analiz simülasyonu yapılmadan doğrudan müşteri kuruluş kaynaklı imalat proses istekleri doğrultusunda üretim yapılması durumunda; hammadde, malzeme, işçilik ve enerji gibi ek maliyet oluşumlarının önüne geçilebilmektedir.

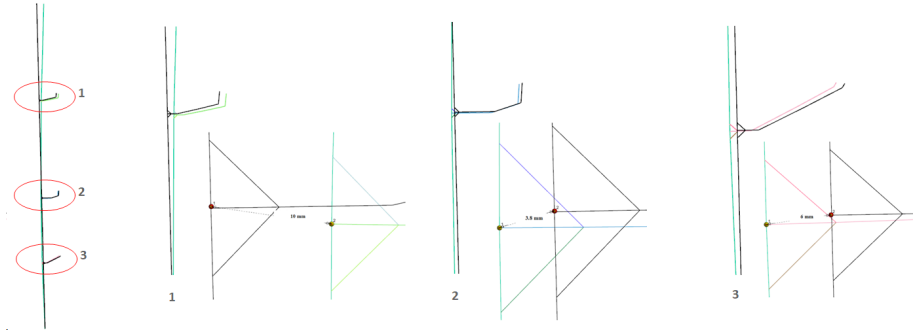


Şekil 9. Visual Assembly Simülasyonu Kalıntı Gerilmeleri Sonuçları ($\sigma_{max} = 416.8$ MPa)

Simülasyon ortamında analiz çıktısı olarak kaynak sonrası çarpılma davranışı karakteristiğine bağlı kirişte mevcut konumlandırılan güçlendirme takviyelerinin negatif yönde yönelimleri ve büyüklükleri Şekil 10'da detaylandırılarak verilmiştir.

Vinç sistemlerinde kirişlerde konstrüksiyona entegre edilen güçlendirme takviyelerindeki kaynak dikişlerinin kiriş boyunca sürekli (aralıksız) kaynaklı imalat yöntemiyle birleştirilmesinden dolayı deformasyon ve yapısal hasarlara neden olan çarpılma ve bozulmalar meydana geldiği çalışma kapsamında yapılan iş özetindeki simülasyon ve analizler neticesinde doğrulanmıştır (Ramos, Tavares ve Castro, 2018). Kaynaklı imalat sürecinde kaynak bölgelerindeki çarpılma durumuna bağ-

lı yapısal çarpılma karakteristik davranışı Şekil 11’de verilmiştir. Görsellerde yer alan siyah renk kirişin referans başlangıç ilk konumunu temsil etmektedir. Ayrıca Şekil 11’de sağ tarafta yer alan görselde kaynak sonrası çarpılma yönelimini ifade etmek amacıyla simülasyonda 10 kat abartılarak gösterilmiştir.



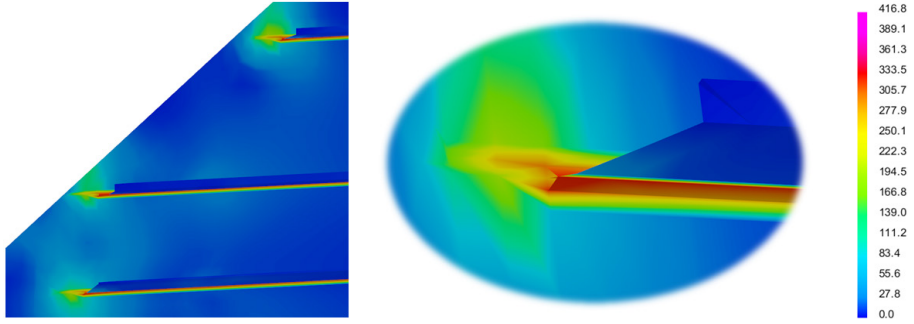
Şekil 10. SYSWELD Visual Assembly Kaynaklı İmalat Simülasyon Analizi Sonucunda Vinç Kirişindeki Yan Saclarda Güçlendirme Takviyelerinin (Stiffener) Her Bir Kaynak Bölgesindeki Çarpılma Durumu (1.Stiffener: 10 mm, 2.Stiffener: 3,8 mm, 3.Stiffener: 6 mm)



Şekil 11. SYSWELD Kaynaklı İmalat Simülasyon Ortamında Kaynak Sonrası Kirişin Çarpılma Davranışı Ve Yönelimleri (Nominal Durum, Soldaki Görsel ve 10 Kat Abartılı Durum, Sağdaki Görsel)

SYSWELD kaynaklı imalat simülasyon analizleri sonucunda; vinç kirişlerinde lo-

kal olarak geometrik daralma bölgelerinde maksimum değerlere ulaşan kalıntı gerilmeleri simülasyon sonuçları Şekil 12’de verilmiştir. Bu doğrultuda vinç sektöründe tersine mühendislik çalışmalarıyla desteklenen talepler doğrultusunda kiriş geometrilerinde spesifik farklı tasarımlara gidilmesi suretiyle oluşması muhtemel kritik kalıntı gerilmeleri optimize edilerek, yapıdaki olumsuz etkilerin bertaraf edilmesi mümkün kılınmıştır.



Şekil 12. SYSWELD Kaynaklı İmalat Simülasyon Analizi Vinç Kirişi Yan Plaka Geometrik Daralma Bölgesi Maksimum Kalıntı Gerilme Bölgeleri

Bu çalışma kapsamında nihai sonuçta müşteri kuruluş tarafından kaynaklı imalat parametreleri belirlenerek; güçlendirme takviyeleri ve güçlendirme plakaları özelinde geleneksel yöntemlere nazaran aralıksız yekpare kaynatılması isterleri sebebiyle kirişlerde çarpılma ve bozulmaların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Diğer taraftan SYSWELD Visual Assembly bilgisayar destekli kaynaklı imalat simülasyon programları yardımıyla ısı tesiri ve distorsiyon etkisinden kaynaklı meydana gelebilecek çarpılma, bozulma ve kalıntı gerilmelerinin üretim öncesinde tespit edilmesine imkan sunulmaktadır (Ramos ve diğ., 2018).

4. Vinç Sistemlerinde Kaynaklı İmalat Operasyonlarının Standardizasyonu Ve Proses Optimizasyon Çalışmaları

4.1 Vinç Sistemlerindeki Kutu Kiriş Güçlendirme Takviyeleri (Stiffener) Aralıklı (Metot) Kaynaklı Birleştirme Yöntemi

Teknolojik ilerlemelerle birlikte Avrupa Topluluğu ülkeler başta olmak üzere 2012 yılından itibaren çelik yapıların tasarım, montaj ve hesaplama yöntemlerini kapsamlı olarak analiz eden Eurocode 3 (EC3) standardının yapı ve konstrüksiyonlara entegrasyonu endüstriyel uygulamalarda zorunluluk haline getirilmiştir. Ülkemizde çelik yapı sektöründe hizmet vermekte olan kuruluşlarda doğrudan uygulanabilmesi ve yaygınlaştırılabilmesi amacıyla Türk Standartları Enstitüsü (TSE) tarafında TS EN 1993-1 şemsiye standardı altındaki alt kırımları

(Örneğin; TS EN 1993-1-1: Çelik Yapıların Tasarımı-Genel Kurallar Ve Binalara Uygulanacak Kurallar) formunda kalite yönetim sistemlerine entegre edilmektedir (European Committee for Standardization, 2005). Çelik yapı konstrüksiyonlarında kaynaklı bağlantı tasarım esasları ve hesaplama yöntemlerini kapsayan EN 1993-1-8 standardı kapsamında EN 1993-1-1 standardına uygun olarak kaynaklanabilen 4 mm ve üzeri ($t \geq 4$ mm) malzeme kalınlıklarındaki yapı çeliklerini kapsamaktadır. Diğer taraftan daha ince et kalınlıktaki malzemelerin ($t < 4$ mm) kaynaklı imalat prosesleri için EN-1993-1-3 referans alınmaktadır (European Committee for Standardization, 2005).

4.2 Vinç Kiriş Köşe Kaynaklarında Etkin Dikiş Kalınlıkları Analitik Hesaplamaları

Bir konstrüksiyonda literatürde yer alan ilgili standartlar ve regülasyonlara bakıldığında; köşe dikişine ait efektif kaynak dikiş kalınlığı a ile gösterilmekte olup, teorik olarak kaynak kök noktasına kadar dikişin içerisine sığdırılabilen ikizkenar veyahut çeşitkenar üçgenin dik yüksekliği olarak kabul edilmektedir. Mevzuatlarda yer alan sınırlandırmalar çerçevesinde köşe kaynağında minimum etkin dikiş kalınlığı (a), sistemdeki kuvvetin emniyetli ve güvenli olarak aktarılabilmesi için Tablo 1’de verilen minimum kaynak dikiş kalınlık değerlerinden az olmaması zorunlu kılınmıştır.

Tablo 1. Köşe Kaynakları Minimum Etkin Kaynak Dikiş Kalınlık Değerleri Karşılaştırılması (TÇY, 2016; AWS, 1978)

Kaynaklı İmalat İle Birleştirilecek Yapı Elemanının Et Kalınlığı t_{min} (mm)	ÇYTHYE Minimum Köşe Kaynak Dikiş Kalınlığı* a_{min} (mm)	AWS D1.1/D1.1M:2020 Minimum Köşe Kaynak Dikiş Kalınlığı a_{min} (mm)
$t_{min} \leq 6$	3.0 mm	3.0 mm
$6 < t_{min} \leq 13$	3.5 mm	5.0 mm
$13 < t_{min} \leq 19$	4,0 mm	6.0 mm
$19 < t_{min}$	5,5 mm	8.0 mm

*Tek pasolu (geçişli) kaynak kuralı tercih edilmelidir.

Kaynaklı imalat yöntemlerinde optimal nüfuziyetin sağlanabilmesi için Tablo 1’de görüldüğü üzere minimum etkin kaynak dikiş kalınlığı (a_{min}) en az 3 mm olarak kaynaklı birleştirme operasyonlarının gerçekleştirilmesi gerekmektedir (Bakınız Şekil 2). Diğer taraftan yine Tablo 1’de yer alan Amerikan Kaynak Cemiyeti (American Welding Society: AWS) tarafından belirlenen minimum kaynak dikiş kalınlıkları, ÇYTHYE yönetmeliğine nazaran daha emniyetli ve güvenli ol-

duğu bu çalışma kapsamında yapılan araştırmalar sonucunda analiz edilmiştir. TS EN 1993-1-8: elik Yapıların Tasarımı: Birleşim Yerlerinin Tasarımı, standardında belirtildiği üzere; bir konstrüksiyonda kaynaklanarak birleştirilecek malzemelerin maksimum et kalınlık “t_{max}” değerine bağlı minimum kaynak dikif kalınlığı “a_{min}” değeri aşağıda verilen formül yardımıyla hesaplanmaktadır (DIN EN 1993-1-8, 2010).

$$a_{\min} \geq - (0.5) [\text{mm}] \quad (1)$$

Kaynaklı imal usulleri ile birleştirilecek konstrüksiyonda ince kenar kesitli yapı elemanının minimum et kalınlığı “t_{min}” baz alınarak, köşe kaynaklarının maksimum dikif kalınlık “a_{max}” değerleri aşağıda verilen denklemler yardımıyla hesaplanmaktadır (TY, 2016). Konstrüksiyonda kaynaklanacak ince kesitli parçanın et kalınlığı 6 mm ve daha ince (t_{min}≤6 mm) olması durumunda; kaynaklı imal usulleri kullanılarak birleştirilecek malzemenin kaynak operasyonu sırasında yanma hadisesi oluşmadan birleştirilebilmesi amacıyla maksimum kaynak dikif kalınlığı aşağıda verilen formül kullanılarak sınırlandırılmaktadır.

$$[t_{\min} \leq 6 \text{ mm}]; a_{\max} \leq t_{\min} \times (0.7) [\text{mm}] \quad (2)$$

Kaynaklı imalat ile birleştirilecek ince kesitli elemanın parça et kalınlığı 6 mm’den daha kalın (t_{min}>6 mm) olması durumunda ise maksimum kaynak dikif kalınlığı aşağıda verilen formül yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$[t_{\min} > 6 \text{ mm}]; a_{\max} \leq (t_{\min} - 2 \text{ mm}) \times (0.7) [\text{mm}] \quad (3)$$

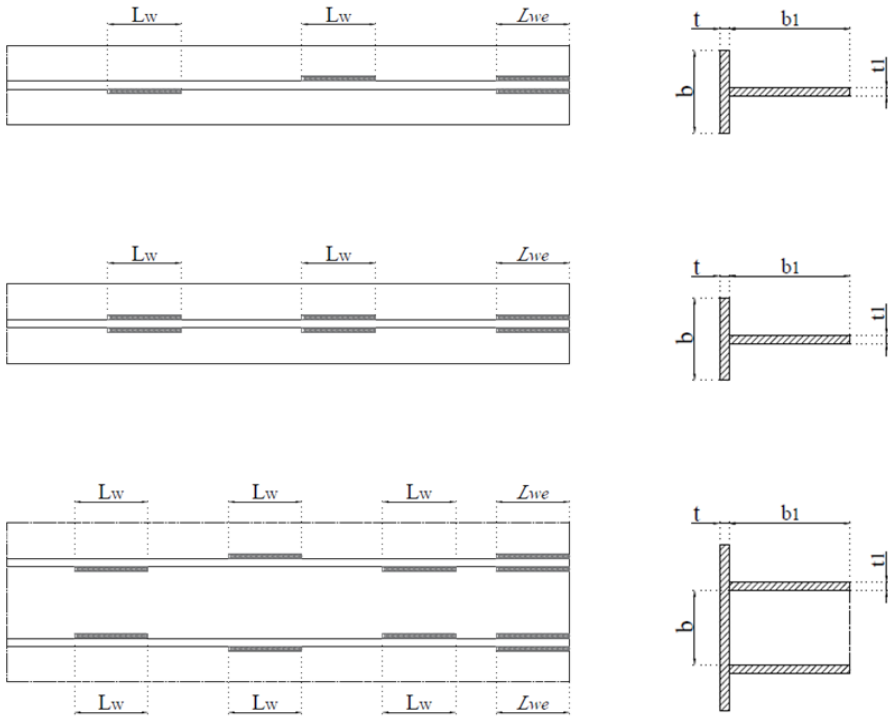
4.3. Aralıklı (Metot) Köşe Kaynaklarının Efektif Kaynak Dikif Uzunlukları ve Dizilimleri

elik konstrüksiyonlarda mevzuatlarda yer alan EN 1993-1-8 standardında da belirtildiği üzere köşe kaynak dikif uzunlukları etkili minimum kaynak dikif uzunluğu 30 mm’den (L_w≥30 mm) veyahut kaynak dikif (boğaz) kalınlığının 6 katından (L_w≥6×a) yapının güvenli ve emniyetli olması açısından daha az olması gerekmektedir. Köşe kaynak dikifi etkin uzunluğu; 30 mm’den veya kaynak etkin dikif boğaz kalınlığının 6 katından daha az olduğu takdirde yapısal olarak sistemdeki kuvvetlerin aktarımında kaynak uzunlukları hesaplamalara dâhil edilmemektedir (EN 1993-1-8, 2010).

ÇYTHYE yönetmeliğinde ise kaynaklı imalatta köşe kaynaklarının minimum etkin kaynak dikif uzunluğu 40 mm’den (L_w≥40 mm) veya yine benzer şekilde kaynak dikif kalınlığının 6 katından (L_w≥6×a) daha az olmaması gerektiği mevzuatlarda açıkça ifade edilmektedir. Ayrıca bu koşul sağlanamadığı takdirde ise etkin kaynak dikif kalınlığı (a), Şekil 13’te görüldüğu üzere etkin kaynak dikif uzunluğunun L_w’nin 1/6’sı oranında olması gerektiği önerilmektedir (Ameen, 2014).

Kesintili süreksiz (metot) köşe kaynak dikişleriyle birleştirilerek oluşturulan bir konstrüksiyonda, yapı elemanlarının bütün uçlarında yer alan kaynak dikişinin uzunluğu olan " L_{we} "; dar ölçüdeki yapı elemanının genişliğinin b veya b_1 (Bakınız Şekil 13) en az $3/4$ 'ü yani yaklaşık olarak minimum %75'i kadar sürekli aralıksız köşe dikişi devam ettirilerek yapının başlangıç ve bitiş uç noktalarının her iki tarafta da sonuna kadar kapatılması gerekmektedir.

Konstrüksiyonda kaynaklı imalat yöntemiyle doğrudan birleştirilecek yapı elemanlarının, yapının uçlarında veyahut kenarlarında tamamlanan köşe kaynakları mümkün olduğunca tam ve konstrüksiyonun sonuna kadar minimum kaynak kenar uzunluğunun en az iki katı ($2 \times L_w$) bir mesafe boyunca köşelerde ve uç kısımlarda süreklilik sağlamak suretiyle operasyonel kaynak sürecinin tamamlanması gerekmektedir (DIN EN 1993-1-8, 2010). Bu bağlamda Tablo 2'de görüldüğü üzere EN 1993-1-8 standardı ile ÇYTHYE yönetmeliği karşılaştırıldığında, sonuç olarak çelik yapıların tasarım, hesap ve yapımına dair esaslar yönetmeliğinin daha emniyetli ve güvenli tarafta kaldığı sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 13. Aralıklı (Süreksiz) Metot Köşe Kaynakları İçin Etkin Dikiş Uzunlukları (L_w , L_{we})

Tablo 2. Köşe Kaynağında Etkin Dikiş Uzunlukları L_w ve L_{we} Karşılaştırılması (European Committee for Standardization, 2005; TÇY, 2016)

	EN 1993-1-8: Çelik Yapıların Birleşim Yerlerinin Tasarımı Standardı	Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları Yönetmeliği (ÇYTHYE)
Köşe Kaynağı Minimum Etkin Uzunluğu (L_w)	$L_w \geq 30 \text{ mm}$	$L_w \geq 40 \text{ mm}$
L_w ile Etkin Dikiş (Boğaz) Kalınlığı (a) Arasındaki Bağlantı	$L_w \geq 6 \times a$	$L_w \geq 6 \times a$
Uç Kaynak Uzunluğu (L_{we}) Minimum Ve Maksimum Değerleri	$L_{we} \geq (0,75) \times b$ [Minimum] $L_{we} \geq (0,75) \times b_1$ [Minimum]	$L_{we} \geq b; b_1$ [Maksimum]

4.4. Aralıklı Süreksiz Metot Köşe Kaynaklarının Kaynak Dikişi Ara Boşlukları

Vinç endüstrisinde yassı ve yapısal hammadde malzemelerinin bir araya getirilmesi suretiyle yapma elemanlardan oluşan taşıyıcı vinç kiriş konstrüksiyonlarının dayanım ve rijitliğinin sabit tutulması koşuluyla en kesit parça birleşim proseslerinde yapının optimum üretilmesi maksadıyla kesintili olarak eşit aralıklı metot köşe kaynakları tercih edilmesi gerekliliği bu kapsamda yapılan çalışmalar sonucunda tespit edilmiştir. Bu doğrultuda EN 1993-1-8 standardına uygun olarak aralıklı metot köşe kaynaklarının ardışık veya atlamalı olarak dizilimleri Şekil 14'te tekli ve çiftli sıra konfigürasyonları halinde verilmiştir. Süreksiz aralıklı (metot) köşe kaynak dikişlerinin EN 1993-1-8: Çelik Yapıların Birleşim Yerlerinin Tasarımı Standardı ile Çelik Yapıların Tasarım, Hesap Ve Yapım Esasları Yönetmeliği (ÇYTHYE) formülasyonlarıyla karşılaştırılarak Tablo 3'te analiz edilmiştir.



Şekil 14. Aralıklı Metot Köşe Kaynak Boşlukları (L_1 , L_2), Dizimleri Ve Eksantrik Yerleşim Planı (Atak ve Şık, 2015)

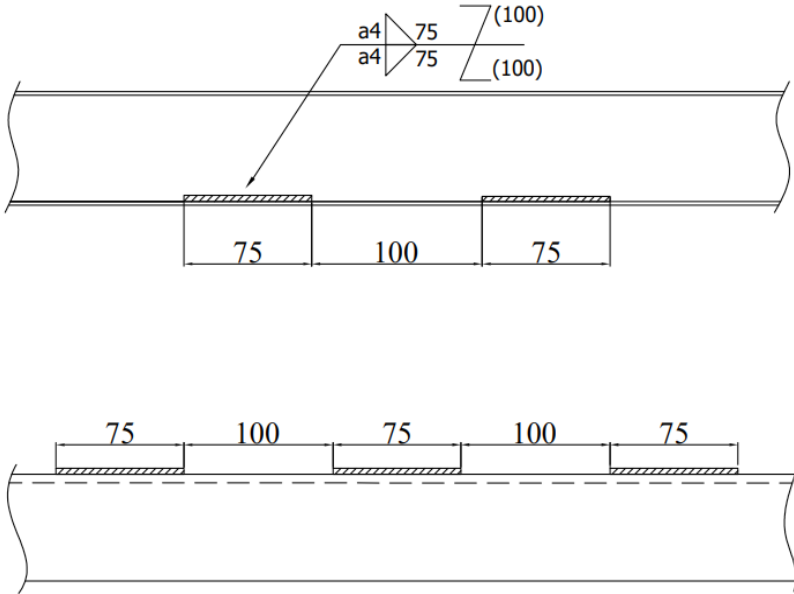
Tablo 3. Aralıklı (Metot) Köşe Kaynak Boşlukları (L_1 , L_2) Karşılaştırma Tablosu (European Committee for Standardization, 2005; TÇY, 2016)

		EN 1993-1-8: Çelik Yapıların Birleşim Yerlerinin Tasarımı Standardı	Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları Yönetmeliği (ÇYTHYE)
Çekme Etkisindeki Enkesitler Optimum Kaynak Boşluğu (L_1)	Kuvveti Yapma İçin	$L_1 \leq 16 \times t$ [Minimum]	$L_1 \leq 14 \times t$ [Minimum]
		$L_1 \leq 16 \times t_1$ [Minimum]	$L_1 \leq 14 \times t_1$ [Minimum]
		$L_1 = 200$ mm	$L_1 = 200$ mm
Basma Veya Kesme Kuvveti Etkisindeki Yapma Enkesitler İçin Kaynak Boşluğu (L_2)	Kuvveti Etkisindeki Yapma Enkesitler İçin	$L_2 \leq 12 \times t$ [Minimum]	$L_2 \leq 12 \times t$ [Minimum]
		$L_2 \leq 12 \times t_1$ [Minimum]	$L_2 \leq 12 \times t_1$ [Minimum]
		$L_2 \leq b/4$	$L_2 \leq (0,25) \times b$
		$L_2 = 200$ mm	$L_2 = 200$ mm

5. Vinç Sistemleri Taşıyıcı Kiriş Güçlendirme Takviyelerinde Optimum Metot Kaynaklı İmalat Uygulamaları

Vinç sistemlerinde kiriş çelik konstrüksiyonlarında; müşteri kuruluş isterleri doğrultusunda kaynaklı imalat proses parametreleri belirlenerek, üretim aşamalarında doğrudan uygulanması kaidesiyle kiriş yapısındaki güçlendirme takviyelerindeki (stiffener) kaynak dikişlerinin kiriş boyunca aralıksız (sürekli) kaynaklı birleşiminden dolayı çelik konstrüksiyonda istenmeyen ısıl deformasyon etkilerinin oluştuğu gözlemlenmiştir.

Söz konusu negatif etki altında (Bakınız Şekil 4) ısıl deformasyonlardan kaynaklanarak, vinç kirişlerinde yapısal hasarlar oluşmaktadır. Konstrüksiyonda oluşan bu deformasyonlar nedeniyle mevcut sistemde kirişler kullanılmayacak yapısal forma dönüşmüştür. Bu nedenle gerek müşteri kuruluş tarafından belirlenen kaynaklı imalat proses parametreleri sonucunda istenmeyen deformasyon oluşumları, gerekse SYSWELD Visual Assembly kaynaklı imalat sonlu elemanlar analiz çıktıları sonucunda; vinç kirişlerinde ideal olan aralıklı (metot) kaynak yönteminin (Khedmati, Rastani ve Ghavami, 2007) ilgili standartlara ve terminolojiye uygun olarak uygulanması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Vinç kirişlerinde optimize edilen kaynaklı imalat parametrelerine ait ikincil jenerasyon köşe kaynak dikiş uzunlukları uygulama detayı Şekil 15'te verilmiştir.



Şekil 15. Vinç Sisteminde Hasara Uğrayarak Çarpılan Mevcut Taşıyıcı Kirişlerin, Yeniden Optimize Edilen Metot Kaynak Dikiş Uzunluk Parametreleri

Çalışma kapsamında incelenen mevcut çift gezer köprülü tavan vinç sistemi özelinde güçlendirme takviyelerinin (stiffener) kaynaklı imalat prosesleri özelinde standartlara uygun olarak yapılan araştırmalar doğrultusunda gerekli hesaplamalar yeniden yapılmıştır (Gintin ve Sitepu, 2015). Bu doğrultuda proje geliştirme sürecinde hali hazırdaki müşteri kuruluş tarafından belirtilen kaynak proses parametrelerinin yerine Şekil 15'te görüldüğü üzere optimum aralıklı metot köşe kaynağı dikiş uzunlukları yeniden hesaplanmış, ikincil jenerasyon yöntem kiriş imalat operasyonlarında doğrudan uygulanmıştır. Nihai olarak optimize edilen kaynaklı imalat proses parametreleri sonucunda yeniden üretilen vinç kirişlerinde ısı tesiri etkisi altında olası deformasyon, bozulma veya çarpılma hadisesi meydana gelmediği tespit edilmiştir. Kaynak çalışmaları ve ilgili standartlar analiz edilerek, kaynaklı imalat sürecinde başarılı sonuç alınmıştır.

Vinç köprü kirişi yan plakalarında burkulma (flambaj) etkisini minimuma indirmek amacıyla kaynaklı imalat süreci ile yapıya sabitlenen köşebentlerin (stiffener) yan taşıyıcı plakalar özelinde standartlara uygun olarak yeniden hesaplanan aralıklı metot köşe kaynak boşluklarının optimum dizilimleri ve lokal kaynak dikiş yerleşimlerine bağlı operasyonel kaynaklı imalat süreci Şekil 16'da verilmiştir.



Şekil 16. Vinç Köprü Kirişi Yan Plakalarında Kaynaklı İmalat Prosesinde İdeal Aralıklı Metot Köşe Kaynağı Dizilimleri

6. Sonuçlar ve Öneriler

Endüstriyel uygulamalarda kaynaklı birleştirme yöntemlerinde en yaygın tercih

edilen köşe kaynağının detaylarıyla anlatılmasının yanı sıra kapsam genişliği nedeniyle tüm kaynak türlerinin incelenmesi mümkün olamamıştır. Diğer taraftan yine aralıklı metot köşe kaynaklı bağlantılar başta olmak üzere standartların ve ilgili yönetmeliklerin kullanımı bu çalışma yardımıyla daha efektif düzeye indirgenmiştir. Kaynaklı bağlantı ve birleştirmelerde hesap ve analiz yöntemleri gibi ileri seviye bilgilere erişilmesi için literatürde yer alan ilgili diğer standartlara ve akademik bilimsel çalışmalara doğrudan bakılması tavsiye edilmektedir.

Kaynaklı imalat operasyonel üretim süreçlerinde birçok kullanım alanı bulunan aralıklı (metot) köşe kaynağı başta olmak üzere; kaynaklı imalat özelinde mevcut ulusal ve uluslararası standartların, yönetmeliklerin ve mevzuatların ülkemizde kullanımına kolaylık sağlanması amacıyla bu çalışma kapsamında detaylı olarak irdelenmiştir. Ayrıca bu çalışma özellikle çelik yapılar başta olmak üzere konstrüksiyonların köşe kaynaklı birleşim bağlantılarının optimizasyon parametrelerini içermesinin yanı sıra literatüre katkı sağlayacak diğer araştırmalar için ön çalışma niteliği taşımaktadır.

Bu çalışma kapsamında; yapı ve konstrüksiyonların aralıklı metot kaynaklı bağlantılarında EN 1993-1-8 ile ÇYTHYE'na göre köşe kaynak; etkin kaynak dikiş kalınlığı, efektif kaynak dikiş uzunlukları ve optimum metot kaynak boşlukları başta olmak üzere kaynaklı imalat proses parametreleri ve kaynaklı imalat tasarım değişkenleri detaylı olarak araştırılmış, irdelenmiş ve analiz edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen bulgulara bakıldığında çelik yapılarda EN 1993-1-8 standardının doğrudan uygulanması halinde optimize edilen operasyonel kaynak süreçleri daha ekonomik, ülkemizde yaygın olarak çelik yapı hesaplamalarında kullanılan ÇYTHYE yönetmeliği tercih edilmesi durumunda ise daha emniyetli ve güvenli bir vinç konstrüksiyonu üretileceği tespit edilmiştir.

Kirişlerde çarpılma ve bozulma etkilerinin ekarte edilmesinin yanı sıra kalıntı gerilmelerinin minimize edilmesi hususunda yürütülen kaynaklı imalat sonlu elemanlar analiz çalışmalarında yapılan mühendislik hesaplamaları doğrultusunda vinç kirişlerinde S235JR malzemesi seçilmiştir. Vinç sistemlerine ait giriş çelik konstrüksiyonlarında bazı durumlarda müşteri kuruluşlar tarafından belirlenen kaynaklı imalat yöntemleri ve proses parametrelerinin üretim aşamalarında doğrudan uygulanması nedeniyle yapıdaki güçlendirme takviyelerindeki (stiffener) kaynak dikişlerinin giriş boyunca aralıksız (sürekli) yekpare kaynaklı birleşiminden dolayı üretimi gerçekleştirilen projelerde vinç kirişlerinde istenmeyen ısıl deformasyon etkisi oluşumları gözlemlenmiştir. Bu durum Şekil 17'de görüldüğü üzere mevcut vinç kirişlerinde yapısal hasara neden olan çarpılmalar, yüzey bozuklukları ve distorsiyon oluşumlarına neden olmaktadır. Isıl deformasyon etkisinden kaynaklanarak kutu kirişlerde oluşan bu hasarlardan dolayı vinç kirişleri kullanılamayacak yapısal formlara dönüşmektedir.



Şekil 17. Vinç Sistemlerindeki Güçlendirme Takviyesi (Stiffener) Aralıksız Sürekli (Soldaki Görsel) ve Aralıklı Metot Kaynağı (Sağdaki Görsel) Uygulanarak Kaynaklı Birleştirme Yapılan Vinç Kiriş Konstrüksiyon Detayı

Bu çalışma kapsamında yürütülen SYSWELD Visual Assembly kaynaklı imalat analiz çalışmaları sonucunda müşteri kuruluş tarafından kaynaklı imalat parametreleri belirlenerek; güçlendirme takviyeleri ve güçlendirme plakaları özelinde geleneksel yöntemlere nazaran aralıksız sürekli kaynatılması sebebiyle kirişlerde çarpılma ve bozulmaların meydana geldiği imalat uygulamalarında gözlemlenmiştir. SYSWELD Visual Assembly gibi bilgisayar destekli kaynaklı imalat simülasyon programları yardımıyla kirişlerde ısıl deformasyon etkisi altında meydana gelebilecek çarpılma, bozulma ve kalıntı gerilme oluşumlarının üretim öncesinde tespit edilmesine imkan sunulurken, yine bu sayede hatalı parametre kullanımdan kaynaklı vinç kirişlerinin kullanılmayacak yapısal forma dönüşmeden öncesinde tespit edilebilmesi mümkün kılınmıştır.

Vinç kirişlerinde kaynaklı imalat operasyonlarında meydana gelebilecek istenmeyen çarpılma ve bozulma etkilerinin ekarte edilmesi maksadıyla kiriş konstrüksiyonunda yer alan güçlendirme takviyeleri (stiffener) kaynak dikişlerinde; kiriş boyunca istisnai özel durumlar haricinde Şekil 17’de görüldüğü üzere aralıklı metot kaynak yöntemi uygulaması gerekliliği bu çalışma kapsamında yürütülen SYSWELD Visual Assembly kaynaklı imalat sonlu elemanlar analiz çalışmaları sonucunda doğrulanmıştır.

Bu çalışmada vinç sistemlerindeki sadece kirişler özelinde Visual Assembly kaynaklı imalat sonlu elemanlar analizleri yürütülmüş; çarpılma davranışı, kalıntı gerilmelerinin değerleri ve yönelimleri, zamana bağlı sıcaklık dağılımları tespit

edilmiştir. Yapılan araştırmaların sonuçlarına dayanarak gelecek çalışmalarda vinç sistemlerinin tamamı için Visual Weld modülünde bilgisayar destekli kaynaklı imalat sonlu elemanlar analiz çalışmaları yürütülerek; çarpılma kontrolleri, kalıntı gerilmeleri ve zamana bağlı sıcaklık dağılımlarına ek olarak faz dağılımları ve dönüşümleri, plastik deformasyon uzama miktarının belirlenmesi planlanmaktadır.

Sonuç itibarıyla esneklik, verimlilik ve sürdürülebilirlik çerçevesinde; endüstri 4.0 ve yalın üretim bakış açısıyla kaynaklı imalat operasyonları sırasında, elastoplastik karakteristik davranış etkisi altında burkulma (flambaj) oluşum etkisi, kaynaklı imalat sırasında oluşan ısıl deformasyon kaynaklı distorsiyon ve kalıntı gerilmeleri oluşumlarının minimuma indirgenmesi amacıyla robotik otomasyon sistemlerinin (Li, Hong,, Gao ve Hong, 2020) vinç sektöründe kaynaklı imalat uygulamalarında doğrudan kullanılması tavsiye edilmektedir.

Bu çalışma, araştırma ve yayın etiği kurallarına uygun olarak hazırlanmıştır. Çalışmada kullanılan tüm veriler doğru ve güvenilir kaynaklardan elde edilmiş olup, herhangi bir intihal veya izinsiz veri kullanımı söz konusu değildir.

Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesine katkı sağlayan ve desteklerini esirgemeyen BVS Bülbüloğlu Vinç Sanayi A.Ş.'ye teşekkürü borç biliriz. Ayrıca bu akademik eserin yazımı sırasında gerekli teknik desteği sağlayan BVS Bülbüloğlu Vinç Ar-Ge Merkezi (BVS CRANES R&D Center) teknik ekibine teşekkür ederiz.

Bu makalenin bir önceki versiyonu, 17-18 Kasım 2023 tarihleri arasında Makine Mühendisleri Odası tarafından düzenlenen 13.Ulusal Kaynak Teknolojisi Kongre'si "Kaynak Teknolojilerinde Tasarım ve Uygulama Örnekleri&Sektörel Çalışmalar" adlı IX.Oturumunda sunulmuş ve sektörel buluşturulmuştur.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynakça

- Ameen, S. H. (2014). Numerical investigation of intermittent weld fillet in T-section structure–A comparison with continuous weld. *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences*, 17(2), 157-164. Erişim Adresi: <http://nahje.com/index.php/main/article/view/217/162>
- Atak, A., & Şık, A. (2015). Çelik yapı kaynaklı bağlantılarının EC3'e göre tasarım ve analiz yöntemi. *Kaynak Teknolojisi IX. Ulusal Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, 277-290. Erişim Adresi: <https://www.researchgate.net/publicati>

on/333038424_CELIK_YAPI_KAYNAKLI_BAGLANTILARININ_EC3%27E_GORE_TASARIM_VE_ANALIZ_YONTEMI

AWS. (1978). *Structural welding code-steel*. Mar Lin.

Bate, S. K., Charles, R., & Warren, A. (2009). Finite element analysis of a single bead-on-plate specimen using SYSWELD. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 86(1), 73-78. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2008.11.002>

DIN EN 1993-1-8. (2010). Çelik yapıların tasarımı; birleşim yerlerinin bağlantıların tasarımı, Almanya.

ESI Group. (2010). *Weld distortion and weld quality simulation: Benefits, capabilities and products*. SYSWELD Toolbox.

European Committee for Standardization. (2005). *Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1.1 General rules and rules for buildings*.

European Committee for Standardization. (2005). *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints*.

European Committee for Standardization. (2005). *Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold formed thin gauge members and sheeting*.

Ginting, R. L., & Sitepu, G. (2019). Structure's strength induced by intermittent welding. *International Journal of Engineering and Science Applications*, 5(2), 147-154. Erişim Adresi: <http://ojs.unimal.ac.id/ijesa/article/view/1541>

Jian, X., Liu, H., Zhao, Z., Wu, X., Lei, M., & Chen, Z. (2021). A study of the mechanical behavior of rectangular steel tubular column strengthened using intermittent welding angle steel. *Structures*, 33, 3298-3310. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.090>

Khedmati, M. R., Rastani, M., & Ghavami, K. (2007). Numerical study on the permissible gap of intermittent fillet welds of longitudinally stiffened plates under in-plane axial compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 63(10), 1415-1428. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2007.01.020>

KK, S., & MJ, J. (2022). Application of Sysweld software in finding weld residual stress: A review. In *Proceedings of the International Conference on Systems, Energy and Environment*.

Kollár, D. (2023). Numerical modelling on the influence of repair welding during manufacturing on residual stresses and distortions of T-joints. *Results in Engineering*, 20, 101535. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101535>

Li, G., Hong, Y., Gao, J., Hong, B., & Li, X. (2020). Welding seam trajectory recogniti-

on for automated skip welding guidance of a spatially intermittent welding seam based on laser vision sensor. *Sensors*, 20(13), 3657. Doi: <https://doi.org/10.3390/s20133657>

- Lima, T. R., Tavares, S. M., & De Castro, P. M. (2017). Residual stress field and distortions resulting from welding processes: Numerical modelling using Sysweld. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, 29(1), e56-e61. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ctmat.2016.11.002>
- Liu, R., Sun, Y., & Ni, J. (2023). Prediction of distortion in a thin-plate structure with intermittent fillet joints using a local-to-global approach. *Journal of Manufacturing Processes*, 99, 718-734. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.05.020>
- Ramos, H. M. E., Tavares, S. M. O., & de Castro, P. M. S. T. (2018). Numerical modelling of welded T-joint configurations using SYSWELD. *Science and Technology of Materials*, 30, 6-15. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.stmat.2018.11.002>
- TÇY. (2016). *Çelik yapıların tasarım, hesap ve yapım esaslarına dair yönetmelik*. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara. Erişim Adresi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2016/02/20160203-5.htm>
- Xu, J. J., Gilles, P., Duan, Y. G., & Yu, C. (2012). Temperature and residual stress simulations of the NeT single-bead-on-plate specimen using SYSWELD. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 99, 51-60. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2012.10.002>



TÜRKİYE'DE BUHAR KAZANI SEKTÖRÜNÜN VIKOR VE EDAS YÖNTEMLERİ İLE YILLARA GÖRE KARLILIK ANALİZİ

Ali SEVİNÇ^{1*}

¹ KOSGEB Ankara Sincan Müdürlüğü

1.OSB Dökümcüler Sitesi 203. Sokak 06935 Sincan / ANKARA

ORCID No : <http://orcid.org/0000 0002 34212357>

Anahtar Kelimeler

Çok ölçütlü karar verme, buhar kazanı sektörü, EDAS yöntemi, VIKOR yöntemi, karlılık analizi

Öz

Buhar kazanı, yaşam alanlarında kullanılmasının yansira, gıda, tekstil, kâğıt gibi birçok sektörde buhar üretimi için kullanılan bir sistemdir. Bu sistemlerin çok yaygın kullanımı, ekosistem içinde bu sektörü değerli kılmaktadır. Buhar kazanı sektörünün, ekonomiye daha fazla katkı sağlayabilmesi, sektörün düzenli büyüme ve gelişme göstermesi ve karlılıkta sürekliliği sağlaması ile mümkündür. Bu açıdan, sektörün karlılık durumunun başarılı bir şekilde yönetilmesi gerekmektedir. Bunun için, buhar kazanı sektörü karlılık durumunu düzenli olarak analiz etmek ve uygun aksiyonlar almak, sektörde karlılığın sürdürülebilirliği için zaruri olmuştur.

Bu çalışmanın amacı, Türkiye'de buhar kazanı sektörünün, 2018-2022 yılları arasında karlılık performansını VIKOR ve EDAS yöntemleri ile analiz edip, yıllar itibarıyla performans değerlendirmesini yapmaktır. Her iki yöntemde, yapılan sektörün karlılık analiz sonucuna göre birinci sırada 2022 yılı, ikinci sırada 2020 yılı, üçüncü sırada 2018 yılı, dördüncü sırada 2021 yılı ve beşinci sırada 2019 yılı yer almıştır. Yılların karşılaştırması neticesinde, en yüksek karlılık performansı 2022 yılında, en düşük karlılık 2019 yılında gerçekleşmiştir. Elde edilen bulgular neticesinde, her iki yöntemde karlılık analizlerinde benzer sonuçlar ortaya çıkmıştır. VIKOR ve EDAS yönteminde benzer bulgular elde edilmesi sonuçların tutarlı olduğunu göstermektedir.

* alisevinc71@gmail.com
doi : 10.46399/muhendismakina.1456837

PROFITABILITY ANALYSIS OF STEAM BOILER SECTOR IN TÜRKİYE WITH VIKOR AND EDAS METHODS BY YEARS

Keywords

Multi-criteria decision making, steam boiler industry, EDAS method, VIKOR method, profitability analysis

Abstract

Steam boiler is a system used for steam production in many sectors such as food, textile, paper as well as being used in living spaces. The widespread use of these systems makes this sector valuable in the ecosystem. It is possible for the steam boiler sector to contribute more to the economy only if the sector shows regular growth and development and ensures continuity in profitability. In this respect, the profitability of the sector needs to be managed successfully. For this purpose, it has become essential to regularly analyse the profitability of the steam boiler sector and take appropriate actions for the sustainability of profitability in the sector.

The aim of this study is to analyse the profitability performance of the steam boiler sector in Türkiye between 2018 and 2022 with VIKOR and EDAS methods and to evaluate the performance by years. According to the results of the profitability analysis of the sector in both methods, 2022 ranked first, 2020 ranked second, 2018 ranked third, 2021 ranked fourth, and 2019 ranked fifth. As a result of the comparison of years, the highest profitability performance was realised in 2022 and the lowest profitability in 2019. As a result of the findings obtained, similar results were obtained in profitability analyses in both methods. Similar findings in VIKOR and EDAS methods show that the results are consistent.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 14.05.2024

Kabul Tarihi : 26.11.2024

Research Article

Submission Date : 14.05.2024

Accepted Date : 26.11.2024

Extended Abstract

Introduction

Steam boiler is a system used to generate heat, pressure and steam. It is a mechanism that generates heat by burning solid, liquid or gas or by using electrical energy. Steam boilers are used for different purposes in many different areas such as living spaces, food and paper industry. It can be said that it is valuable for the ecosystem due to its widespread use and the added value it produces for the general economy. The development, growth and advancement of this industry is possible by ensuring the continuity of profitability. In this respect, in order to understand the profitability level of the sector, it is necessary to carry out profitability analyses by years in order to determine the profitability status.

Objective

The aim of this study is to make a performance evaluation of the steam boiler sector in Türkiye for the years 2018-2022 by analysing the profitability of the sector by using the VIKOR and EDAS method, which is one of the multi-criteria decision-making methods, over the data of net working capital, profitability of sales, profitability of operations, profitability of equity and operating profit before depreciation, country sector averages.

Methodology

In this study, the VIKOR and EDAS methods, which are among the MCDM techniques, are used to analyse the steam boiler industry. The VIKOR method aims to provide a compromise solution by evaluating alternatives according to the criteria of group utility and individual regret. It consists of six steps: building the decision matrix, normalisation, building the weighted normalised decision matrix, calculating the group utility and individual regret criteria, determining the compromise measure and validating the results. Validation requires two conditions: acceptable advantage and acceptable stability. The EDAS method, on the other hand, evaluates alternatives taking into account their deviation from the average solution. This method also includes steps such as selecting criteria, constructing the decision matrix and calculating the positive distance from the mean and negative distance from the mean. Both methods provide reliable and consistent results for sectoral analyses, helping decision makers to gain accurate insights.

Findings

The data representing the national average of Türkiye for the steam boiler sector was obtained from KOSGEB (Small and Medium Enterprises Development Organisation). The analysis using the VIKOR method showed that the conditions of acceptable advantage (K1) and acceptable stability (K2) were met in the decision-making process. When Q_i values were analysed, it was determined that the K1 condition was met according to the $DQ=1/(5-1)=0.25$ criterion. In addition, condition K2 was fulfilled since the alternative A1 with the best Q_i value obtained the best score in at least one of the S and R values. As a result, the analysis for the period 2018-2022 identified 2022 as the year with the highest profitability performance. This was followed by

2020, 2018, 2021 and 2019, respectively. These findings highlight the differences in profitability performance between years, offering valuable insights for decision-making processes. Similarly, the EDAS method also concluded that the best profitability performance in the steam boiler sector occurred in 2022, followed by 2020, 2018, 2021 and 2019, respectively. Similarly, the EDAS method also concluded that the best profitability performance in the steam boiler sector occurred in 2022, followed by 2020, 2018, 2021, and 2019, respectively.

Discussion

In the findings obtained as a result of the profitability analysis of the steam boiler sector in Türkiye, as a result of the five-year performance evaluation from 2018 to 2022, it is seen that although there are positive developments, although there is an increase in the profitability of the sector between 2018 and 2022, when the ranking of each year is taken into account, it is seen that it does not increase consecutively in a regular manner compared to the previous year. While 2022 ranked first, the second year was 2020 and the last year was 2019. It is a positive situation that 2022 is the last year in the first place. When we evaluate the period between 2018-2022 as a whole, when we compare it with the previous years, when we evaluate 2022 with 2021, 2021 with 2020, 2020 with 2019, 2019 with 2018, a positive process has taken place in the profitability of the sector in general.

Conclusion and Recommendations

The presence of a large number of users in the target group of the steam boiler sector is considered valuable for the national economy. As a result of the analysis made with the VIKOR method, according to the ranking that emerged by years, the year with the highest profitability performance between 2018-2022 was determined as 2022. The second rank was 2020, the third rank was 2018, the fourth rank was 2021 and the last rank was 2019. According to the EDAS method, the profitability performance in the steam boiler sector was again realised in 2022. 2020 ranked second, 2018 ranked third, and 2021 ranked fourth. The last year was 2019. Similar results were obtained in both methods. In addition, according to the result of the analysis made with the VIKOR method on the sector averages data, it was seen that acceptable advantage and stability conditions were provided in the decision-making process.

As a result of the application of both methods, according to the results of the evaluations and comparisons between the alternatives, a similar ranking order was provided. This supports the accuracy and reliability of the analyses by showing that the ranking obtained by VIKOR and EDAS methods is consistent. In the profitability analysis of the steam boiler sector, revealing the profitability ranking between 2018-2022 can provide useful information to investors and organisations interested in this sector. By examining the profitability ranking of the sector, entrepreneurs can help them understand whether it is due to the economic conditions of the country or a sector-specific situation.

1. Giriş

Buhar kazanı, sıcaklık, basınç ve buhar üretmek amacıyla kullanılan kapalı bir sistemdir. Katı, sıvı veya gazın yanmasıyla veya elektrik enerjisi kullanılarak ısı üreten mekanizmadır. Çeşitli yollarla üretilen buhar ve ısı enerjisi sanayide; ısıtma, kurutma ve pişirme gibi birçok işlem için kullanılır (Aktürk ve Fidan 2009). Tekstil sanayinde, üretim için ısı transferi amacıyla kullanılan bir sistemdir (Patil vd., 2022; Siraj vd., 2023). Ayrıca, buhar kazanı, termal enerji santrallerinde kullanılmaktadır (Elwardany, 2024). Konut, iş merkezleri vb. yaşam alanlarında merkezi ısıtma sistemlerinde önemli bir işlev görür (İmal, 2021). Gıda işleme tesislerinde, buhar ürünlerinin pişirilmesi, pastörizasyon, sterilizasyon ve temizlik gibi birçok işlem için kullanılmakla birlikte, kâğıt ve selüloz sanayinde, buhar kazanlarından yararlanılmaktadır (Parlak, 2020; Rüşen ve Çevik, 2020; Kıyılmaz vd., 2021). Buhar kazanlarının yaşam alanlarında, gıda ve kâğıt sektörü gibi çok farklı alanlarda, değişik amaçlar için kullanılması, kullanım alanının yaygın olduğunu göstermektedir. Bütün bunlar, bu sektörü ekonomi için değerli kılmaktadır.

Buhar kazanı endüstrisinin üretim, pazarlama, ihracat ve istihdama sağladığı katkı nedeniyle ekosistem için değerli olduğu söylenebilir. Bu endüstrinin gelişmesi, büyümesi ve ileri noktalara taşınması, sektörün karlılık sürekliliğinin sağlanması ile mümkündür. Bu sektörün karlılık seviyesinin anlaşılması için karlılık durumunu tespit etmek amacıyla yıllar itibarıyla karlılık analizlerinin yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmanın amacı, Türkiye’de buhar kazanı sektörünün 2018-2022 yılları itibarıyla çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan VIKOR ve EDAS yöntemiyle, net çalışma sermayesi, satışların karlılığı, faaliyetlerin karlılığı, öz kaynakların karlılığı ve amortisman öncesi faaliyet karı, ülke sektör ortalamaları verileri üzerinden karlılık analizini yaparak, sektörün performans değerlendirmesini yapmaktır.

2. Kavramsal Çerçeve

Kârlılık, belirli bir dönemde karlılık durumunu ifade eder (Sari, Nabella ve Fadlilah, 2022). Bir firmanın, mali durumunu, istikrarını ve rekabet gücünü tespit etmek için önemli bir ölçüttür (Oğuz ve Satır, 2024). Aynı zamanda, firmanın bütün paydaşları için önemli bir gösterge olup, işletmelerin finansal performansının ana göstergelerinden biridir (Pervan, Pervan ve Ćurak, 2019). Ayrıca, karlılık işletmelerin faaliyet sonucu elde ettiği net gelirin, sermayeye oranla ne kadar kazançlı olduğunu gösterir (Demir, 2009). Kârlılık, işletmenin gelir ve giderleri arasındaki dengeyi gösterir (Işık, 2017).

Yüksek kârlılık oranları, dış finansman kullanmada şirketin işini kolaylaştırır ve

şirketlerin mali durumunu güçlendirir. Yüksek kâr sağlayan şirketlerin piyasa değeri yükselir, bu da şirketlerin hissedarların kazançlarını artırır (Antoro, Sanusi ve Asih, 2020). Yüksek kârlılığa sahip firmalar, genellikle yatırımcılar için cazip bir husustur (Pangestuti, Pridarsanti ve Robiyanto, 2021). Karlılığın, firmaların büyümesinde ciddi etkisi vardır (Işık, 2017). Firmaların hayatta kalabilmesi için rekabet edebilmesi ve firmanın sürdürülebilirliği için belli seviyede kâr elde etmesi gereklidir (Sari, Nabella ve Fadlilah, 2022).

Belirli bir kâr marjını yakalamak için firmalar hedef belirler (Siregar ve Harahap, 2021; Demirhan, 2022). Firmalar, büyüme için sürekli kârlarını artırmaya çalışır, bunun için büyük çaba harcar. Bu amaçla, varlıklarını, insan sermayesini, yenilikçi yaklaşımlar ve sistem optimizasyonu gibi faktörleri kullanarak sermayesini artırmaya odaklanır (Škuláňová, 2020).

2.1 İşletme Sermayesinin Önemi

İşletme sermayesi, bir işletmenin hayatta kalabilmesi, faaliyetlerini sürdürülebilirliği için ihtiyacı olan ve kısa vadede nakitte çevrilebilen varlıkların tamamıdır. Ayrıca, işletme performansı için önemli bir unsurdur (Tekin ve Bastak, 2021). Bu açıdan, işletme sermayesinin iyi yönetilmesi gerekmektedir. Çünkü firmada maliyetleri düşürür ve kârlılığını artırır, buda firmaların rekabet gücüne olumlu yansır (Pangestuti, Pridarsanti ve Robiyanto, 2021). Bu nedenle, işletme sermayesi, envanter, alacaklar ve borçlar gibi unsurlarının düzenli olarak izlenmesinde büyük yarar görülmektedir. Aksi takdirde, likidite maliyetleri artırır, bu da firmaların kârlılığını olumsuz etkileyebilir, likidite kaybına neden olabilir. Bütün bunlar, İşletme sermayesinin azalmasına neden olur. İşletme sermayesinin doğru olarak yönetilmesi ve optimize edilmesi, kârlılığı artırma açısından önemlidir (Gołaś, 2020).

3. Literatür Araştırması

Yapılan literatür incelemesinde, çok kriterli karar verme yöntemleri (ÇKKV) kullanılarak, farklı sektörlerde yapılan performans değerlendirmesi ile ilgili çalışmalara rastlanılmıştır.

Şişman (2017). Otomotiv sektöründe risk analizi için bulanık AHP ve VIKOR yöntemleri ile hata türü ve etkilerini değerlendirmiştir. Kısa ve Perçin (2018). Çalışmalarında, bilişim teknolojisi sektöründe, bilgisayar donanım firmalarının performansını ENTROPİ ve VIKOR yöntemleriyle değerlendirmesini yapmışlardır. Yalçın ve Ünlü (2018). Türkiye'deki farklı sektörlerde işletmelerin performansını CRITIC ve VIKOR yöntemleri ile değerlendirmişlerdir. Orhan (2019). Çalışmasında, Türkiye ile Avrupa Birliği ülkelerinin lojistik performansı, ENTROPİ ağırlıklı EDAS yöntemiyle karşılaştırmasını yapmıştır. Mercan ve Çetin (2020). Borsada işlem gören

elektrik endeksindeki firmaların finansal performansını COPRAS ve VIKOR yöntemleri ile analiz ederek her iki yöntemin aynı sonuçları verdiğini bulmuşlardır. Şengül (2020). Çalışmasında, Borsa'da ilk 100'de ana metal sanayi firmalarının performansını veri zarflama analizi (VZA) yöntemi kullanarak etkinlik skorlarında genel bir düşüş trendi olduğunu belirlemiştir. Yetiz ve Kılıç (2021). Çalışmalarında, Türkiye'deki bankaların analizini yapmışlar, finansal oranlara dayanarak en başarılı bankalar ve başarısı düşük bankaların yıllara göre değerlendirmesini yapmışlardır. Yavuz, Öztel ve Öz (2020) ise Türkiye'de kimya sektöründe, bulanık VIKOR yöntemini kullanarak, alt sektörlerin performansı değerlendirmişler, bazı sektörlerin performans sıralamalarında benzerlikler, bazılarında ise farklılıklar olduğunu tespit etmişlerdir. Aydın, Avcı ve Aladağ (2021). Çalışmalarında, Türkiye Milli Futbol Takımı futbolcularının performans değerlendirmesini, VIKOR yöntemi kullanılarak yeni sezon için aday futbolcu seçimlerini yapmışlardır. Lubis, Bustami ve Fitri (2024). Çalışmalarında, Malikussaleh üniversitesi'nde KIP bursiyeri seçimi, EDAS ve VIKOR yöntemlerini kullanarak yapmışlardır.

Terzioğlu ve diğ. (2022). Çalışmalarında, borsa'da işlem gören enerji sektöründeki firmaların finansal performansları, SWARA, VIKOR ve WASPAS yöntemleri ile değerlendirilmiş, en iyi performans gösteren firma tespit edilmiştir. Ersoy (2023). Borsa'da işlem gören kimya, petrol, kauçuk ve plastik mamulleri sektöründe SECA yöntemiyle analizini yapmış, ilk üç sıradaki firma belirlenmiştir. Yılmaz ve Yakut (2022). Türkiye'deki 22 bankanın performansı bulanık ENTROPİ ve TOPSİS yöntemi ile değerlendirmiştir. Son olarak, Oğuz ve Satır (2024) perakende ticaret sektöründe MEREC ve COBRA yöntemlerini kullanarak 2021-2022 yıllarında kârlılıkta önde gelen firmalar tespit edilmiştir.

Yapılan literatür incelemesinde, ÇKKV bulanık mantık tabanlı yöntemler, işletme performansları ve risk değerlendirmeleri ile çalışmaların yapıldığı belirlenmiştir. Otomotiv sektöründe, bulanık AHP ve VIKOR yöntemleriyle risk analizi yapılmış, bilişim teknolojisi sektöründe ENTROPİ ve VIKOR yöntemleriyle firmaların performans sıralaması yapılmıştır. Türkiye'de bazı sektörlerde CRITIC ve VIKOR ile performans analizleri yapılmıştır. Enerji sektöründe SWARA ve VIKOR yöntemleriyle finansal performanslar değerlendirilmiş, iş sağlığı ve güvenliği alanında f-SC yöntemi ile hassas analizler elde edilmiştir. Elektrik sektöründe COPRAS ve VIKOR, ana metal sanayi firmalarla ilgili çalışmalarda, veri zarflama analizi (VZA) kullanılmıştır. Kimya, petrol, kauçuk ve plastik sektöründe SECA, bankacılık sektöründe bulanık ENTROPİ VE TOPSİS, perakende ticarete MEREC ve COBRA yöntemleriyle analizler yapılmıştır. İncelenen literatürde, performans değerlendirilmesi ile ilgili çalışmalar tespit edilmiştir. Ancak buhar kazanı sektöründe çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak karlılık analizine yönelik herhangi bir araştırmaya rastlanmamıştır.

4. Yöntem

Bu çalışmada, çok ölçütlü karar verme yöntemi (ÇKKV) kullanılmıştır. 1950'lerden bu yana birçok deneysel ve teorik bilim insanı, ÇKKV yöntemlerinin matematiksel modelleme yeteneklerini incelemek için çalışmış ve karar verme problemlerini yapılandırmaya ve alternatifler arasında tercihler oluşturmaya yardımcı olabilecek bir çerçeve sunmaya çalışmıştır. Bu yöntem, en iyi çözümü bulmak için farklı niteliksel ve niceliksel kriterleri dikkate almaktadır (Taherdoost ve Madanchian, 2023). Analizlerde, VIKOR (Vise Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje) ve EDAS yönteminden yararlanılmıştır.

4.1 VIKOR Yöntemi

VIKOR yöntemi karar alternatiflerini grup faydası ve bireysel pişmanlık ölçütleri bakımından değerlendirerek uzlaşık bir karara ulaşma hedefi olması ve yöntemin fayda ve maliyet mantığı ile çalışmaktadır (Özbek, 2017).

VIKOR Yöntemi, en uygun karar seçeneklerini belirlemek için seçeneklerden performansı en iyi olanın seçilmesi ya da karar seçeneklerinin performanslarına göre sırlanmasına dayanmaktadır. Yöntemin amacı, karar seçeneklerinin sıralanmasında ideal çözüme en yakın olan uzlaşık çözüme ulaşmaktır. Uzlaşık çözüme ulaşmak için her bir ölçüte göre değerlendirilen her seçeneğin, ideal seçeneğe yakınlık değerleri karşılaştırılır. VIKOR yöntemi, özellikle karar vericilerin kararlı bir şekilde tercih yapamadığı veya tercihlerini açıklayamadığı durumlarda, çok kriterli karar vermede yararlı bir yöntemdir. Hem maliyet hem de fayda kriterlerini bir arada değerlendirmesi yöntemin en önemli avantajlarından biridir (Opricovic ve Tzeng, 2004; Opricovic ve Tzeng, 2007; Özbek, 2017).

Kriterlerin ağırlıklarının belirlenmesi: Karar vericiler tarafından her kriterin hem önemi belirlenir hem de kriterlerin ağırlıkları belirlenir. Bu ağırlıklar, kriterlerin önem sırasına göre belirlenir (Zhang ve Wei, 2013; Liao, Xu ve Zeng, 2014).

VIKOR yöntemi altı adımdan oluşmaktadır (Opricovic ve Tzeng 2004; Özbek, 2017; Aktaş ve Kabak, 2020).

Adım 1. Karar Matrisinin Oluşturulması

Karar matrisi (x), karar vericiler tarafından sürecin başlangıcında oluşturulan matristir. Karar matrisinin satırlarında karar seçenekleri, sütunlarında ise değerlendirme faktörleri yer alır. Karar matrisi Eşitlik (1) de gösterilmiştir.

$$X_{ij} = \begin{matrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{m1} & f_{m2} & \dots & f_{mn} \end{matrix} \quad (1)$$

Adım 2. Normalize Karar Matrisinin Oluşturulması

Kriter değerlerinde birim ve değer aralıkları farklılıklarının verilecek karara etkisinden kurtulmak için normalizasyon yapılır. Bu işlem sonucunda normalize karar matrisi (R) olarak adlandırılır. Normalize değerlerin hesaplanması aşağıdaki Eşitlik (2) kullanılmaktadır. Eşitlik yardımıyla $f_j^+ = \max_i f_{ij}$ ve $f_j^- = \min_i f_{ij}$ kabul edilerek yapılır.

$$r_{ij} = \frac{f_j^+ - f_{ij}}{f_j^+ - f_j^-} \quad (2)$$

Maliyet temelli kriterler için normalize değerler $f_j^+ = \min_i f_{ij}$ ve $f_j^- = \max_i f_{ij}$ kabul edilerek hesaplanır. Normalize karar matrisi Eşitlik (3) deki gibi gösterilir.

$$R = \begin{matrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{matrix} \quad (3)$$

Adım 3. Ağırlıklı Normalize Karar Matrisinin Oluşturulması

Bu adımda, kriterlerin karar üzerinde etki düzeylerinin yansıtılması için ağırlıklı normalize karar matrisi (V) oluşturulur. Normalize karar matrisinin elemanlarının değerleri (r_{ij}) ilgili kritere ait ağırlık değeri (w_j) ile çarpımı ile ağırlıklı normalize karar matrisi elemanlarının değerleri (v_{ij}) hesaplanır. Eşitlik (4) ile ağırlıklı normalize karar matrisini Eşitlik (5) deki gibi oluşturulmaktadır.

$$v_{ij} = r_{ij}w_j \quad (4)$$

$$V = \begin{matrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{i1} & v_{i2} & \dots & v_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{m1} & v_{m2} & \dots & v_{mn} \end{matrix} \quad (5)$$

Adım 4. Grup Faydası ve Bireysel Pışmanlık Ölçütlerinin Hesaplanması

VIKOR yönteminde alternatiflerin sıralamasının belirlenmesinde alternatifler için hesaplama grup faydası ve bireysel ölçütlerin değerlerinden yararlanılır. Grup faydası alternatifin seçilmesi durumunda elde edilecek toplam ağırlıklı normalize değeri ifade ederken, bireysel pışmanlık ise alternatifin seçilmediği durumda bir kriter temelinde oluşacak en büyük kaybı göstermektedir. Grup faydası ve bireysel pışmanlık ölçütlerinde Eşitlik (6) ve Eşitlik (7) kullanılmaktadır.

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \frac{f_j^+ - f_{ij}}{f_j^+ - f_j^-} = \sum_{j=1}^n v_{ij} \quad (6)$$

$$R_i = \max_j (w_j \frac{f_j^+ - f_{ij}}{f_j^+ - f_j^-}) = \max_i v_{ij} \quad (7)$$

Adım 5. Uzlaşma Ölçütünün Hesaplanması 01

Uzlaşma ölçütü (Q_i), alternatiflerin arasında karar verebilmek için grup faydası ve bireysel pışmanlık ölçütlerinin birleştirilmesini sağlamak için hesaplanmaktadır. Uzlaşma ölçütü Eşitlik (8) ile yapılmaktadır.

$$Q_i = \theta \times \frac{S_i - S^+}{S^- - S^+} + (1 - \theta) \times \frac{R_i - R^+}{R^- - R^+} \quad (8)$$

Adım 6. Sonuçların Doğrulanması

VIKOR yönteminde son aşama elde edilen alternatif sıralamasının doğrulanmasıdır. Doğrulama için sonuçların aşağıdaki iki koşulu sağlayıp sağlamadığı incelenir (Özbek ve Erol, 2016).

Koşul 1 Kabul edilebilir avantaj

En düşük Q_i değerine sahip alternatiflerin ($Q(a')$ değerine, en iyi ikinci alternatifin de en düşük ikinci Q_i değerine $Q_i(Q(a''))$ sahip olduğu ve DQ değerinin de $1/(m-1)$ eşit olarak tanımlandığı kabul edilsin. $Q(a') - (a') \geq DQ$ koşulu sağlanırsa, kabul edilebilir avantaj koşulu sağlanmış olur.

Koşul 2 Kabul edilebilir istikrar

En iyi Q_i değerine sahip alternatiflerin aynı zamanda grup faydası ve/veya bireysel pişmanlık ölçütleri arasında en iyi alternatif olması gerekir.

Bu koşullardan her ikisi sağlandığında Q_i değeri en iyi olan alternatif uzlaşık çözüm olarak belirlenir. Yalnızca koşul 1 doğrulanırsa en iyi uzlaşık ölçütü değerine sahip iki alternatif en iyi çözüm olarak belirlenir. Eğer koşul 1 doğrulanmazsa, $Q(a^{(m)}) - Q(a') \geq DQ$ koşulunu doğrulayan m sıradaki alternatife kadar olan tüm alternatifler uzlaşık çözüm olarak belirlenir.

4.2 EDAS Yöntemi

EDAS (Ortalama Çözüm Uzaklığına Dayalı Değerlendirme) yöntemi, Keshavarz Ghorabae vd. tarafından 2015 yılında geliştirilen çok kriterli karar verme yöntemidir (Ghorabae, Zavadskas ve diğ. 2016). Bu yöntem, en iyi alternatifi çok sayıda kriter üzerinden değerlendirilerek seçmek için kullanılır (Özbek, 2017; Keshavarz ve diğ. 2018). Diğer popüler ÇKKV yöntemlerinden (TOPSIS, VIKOR gibi) farklı olarak, EDAS yöntemi, her alternatifin en ideal çözüme olan uzaklığı yerine, ortalama çözümden uzaklığını dikkate alır. Yöntemin geliştiricileri, EDAS'ı VIKOR, TOPSIS, SAW ve COPRAS gibi diğer çok ölçütlü karar verme yöntemleriyle karşılaştırarak geçerliliğini test etmişlerdir (Özbek, 2017; Özbek ve Engür, 2018).

EDAS yöntemi, karar matrisinin oluşturulmasından sıralamanın yapılmasına kadar sekiz aşamalı bir süreçten oluşur (Keshavarz ve diğ. 2015; Kahraman ve diğ. 2017). Bu süreç, alternatiflerin birbirleriyle karşılaştırılmasını ve nihai olarak en uygun çözümün seçilmesini sağlar.

Adım 1: Kriterlerin Seçilmesi

Belirli bir karar problemi için, alternatiflerin tanımlanmasında kullanılan kriterler seçilir.

Adım 2: Karar Matrisi Oluşturulması

Her alternatifin her bir kriter için performans dereceleri belirlenir ve karar matrisi Eşitlik (9) kullanılmaktadır.

$$X_{n \times m} = \begin{matrix} & X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1m} \\ & X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2m} \\ X_{n \times m} = & \dots & \dots & \dots & \dots \\ & \dots & \dots & \dots & \dots \\ & X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{nm} \end{matrix} \quad (9)$$

Adım 3: Ortalama Çözümün Belirlenmesi

Tüm kriterler dikkate alarak ortalama çözüm (AV) Eşitlik (10) ve (11) kullanılmaktadır:

$$AV = [AV_j]_1 \quad (10)$$

Adım 4: PDA ve NDA Hesaplanması

Her alternatif için her kriter açısından Pozitif Ortalama Çözümde Mesafe (PDA) Eşitlik (12) ve Negatif Ortalama Çözümde Mesafe (NDA) Eşitlik (13) kullanılmaktadır.

$$PDA = [PDA_{ij}]_{n \times m} \quad (12)$$

$$NDA = [NDA_{ij}]_{n \times m} \quad (13)$$

Adım 5: SP_i ve SN_i 'nin Ağırlıklı Toplamlarının Hesaplanması

Her alternatif için SP_i ve SN_i ağırlıklı toplamları, her kriterin ağırlığına göre Eşitlik (14) ve (15) göre kullanılmaktadır.

$$SP_i = \sum_j^m w_j PDA_{ij} \quad (14)$$

$$SN_i = \sum_j^m w_j NDA_{ij} \quad (15)$$

Adım 6: Değerlerin Normalize Edilmesi

Her alternatif için SP_i ve SN_i değerlerinin normalize edilmesinde Eşitlik (16) ve (17) kullanılmaktadır.

$$NSP_i = \frac{SP_i}{\max_i(SP_i)} \quad (16)$$

$$NSN_i = 1 - \frac{SN_i}{\max_i(SN_i)} \quad (17)$$

Her alternatif için PDA ve NDA'nın normalize edilmiş değerleri hesaplanır.

Adım 7: Değerlendirme Skoru (AS) Hesaplanması

Her alternatif için değerlendirme skoru (AS) Eşitlik (18) göre hesaplanmaktadır.

$$AS_i = \frac{1}{2} (NSP_i + NSN_i) \quad (18)$$

Burada, $0 \leq AS_i \leq 1$ dir

Adım 8: Alternatiflerin Sıralanması

Alternatifler, değerlendirme skoru (AS) azalan sıraya göre sıralanır. En yüksek AS skoru olan alternatif, en iyi seçenek olarak kabul edilir.

5. Bulgular

Çalışmada kullanılan veri seti, satışların karlılığı (Akyüz,2019). Faaliyetin karlılığı (Kayhan ve Tepeli, 2017). Öz kaynakların karlılığı, (Arslan ve Bora 2022). FAVÖK (Amortisman Öncesi Faaliyet Karı) (Yalçın, 2024). Net çalışma sermayesinden (Demirtaş ve Gençtürk, 2022) oluşmaktadır.

Bu çalışmada, sektör ortalamaları içeren veri seti KOSGEB'den temin edilmiştir. Sektörde yer alan şahıs işletmeleri ve şirketlerin verilerinden oluşmaktadır. Veriler, ilk önce VIKOR yöntemiyle analiz edilmiş, daha sonra elde edilen sonuçları kıyaslamak amacıyla EDAS yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir.

VIKOR Yöntemi, buhar kazanı sektörünün yıllar itibariyle karlılık performans sıralaması için uygun bir yöntemdir. Çalışmada kullanılan buhar kazanı sektör bilanço analizleri ile elde edilen sektör ortalama değişkenlerinden ve sektörde çalışma sermaye ortalaması ise işletmeye konan sermaye maliyet ve işletmelerin operasyon sonucu elde ettikleri karlar fayda olarak kabul edilmiştir. VIKOR yönteminin buna uygun olması nedeniyle tercih edilmiştir.

Yöntem geliştiricileri, EDAS yöntemini, VIKOR yöntemi sonucu ile kıyaslama yaparak VIKOR yöntemi sonucunun geçerliliğini test etmişlerdir. Bu nedenle, bu çalışmada EDAS yöntemi, VIKOR yöntemi sonucunu karşılaştırma yapmak için tercih edilmiştir.

5.1 VIKOR Yöntemi Sonuçları

Buhar kazanı sektörü, 2018-2022 yılları arası çalışma sermayesi ve karlılık ortalamaları veri seti kullanılarak, VIKOR yöntemi ile analiz edilmek üzere "Buhar Kazanı Sektörü Karlılık Durumu Başlangıç Karar Matrisi" oluşturulmuştur. Karar matrisinde kullanılan ölçütler arasında satışların karlılığı, faaliyetin karlılığı, öz kaynakların karlılığı ve FAVÖK (Amortisman Öncesi Kar) kriterleri dikkate alınmıştır. Karlılık ile ilgili ölçütler fayda yönlüdür. Net çalışma sermayesi kriteri ise maliyet yönlüdür. Başlangıç karar matrisi Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo1. Buhar Kazanı Sektörü Karlılık Durumu Başlangıç Karar Matrisi

	Satışların Karlılığı	Faaliyetin Karlılığı	Öz kaynakların Karlılığı	FAVÖK (Amortisman Öncesi Faaliyet Karı)	Net Çalışma Sermayesi
Yıl	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Maliyet
Ağırlık	0,3000	0,2000	0,2500	0,1000	0,1500
2018	0,02	0,05	0,1	14,09	359.460,12
2019	0,02	0,04	0,08	5,47	454.934,36
2020	0,04	0,06	0,11	13,33	465.823,03
2021	0,02	0,03	0,12	11,68	316.341,82
2022	0,05	0,06	0,31	18,98	699.893,20

Başlangıç karar matrisinin oluşturulmasının ardından, VIKOR yöntemi ikinci adımda, karar matrisine yönelik en iyi ve en kötü değerler belirlenmiş, Tablo 2.'de verilmiştir.

Tablo 2. En İyi ve En Kötü Değerler

fi+	0,05	0,06	0,31	18,98	316341,82
fi-	0,02	0,03	0,08	5,47	699893,2

Tablo 3.'te normalize karar matrisi değerleri verilmiştir.

Tablo 3. Normalize Karar Matrisi Tablosu

Yıl / Kriter	Satışların Karlılığı	Faaliyetin Karlılığı	Öz kaynakların Karlılığı	FAVÖK (Amortisman Öncesi Faaliyet Karı)	Net Çalışma Sermayesi
2018	1,000	0,333	0,913	0,362	0,112
2019	1,000	0,667	1,000	1,000	0,361
2020	0,333	0,000	0,870	0,418	0,390
2021	1,000	1,000	0,826	0,540	0,000
2022	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000

VIKOR yönteminde, kriterlerin ağırlıklarının belirlenmesi karar vericilere bırakılmıştır. Normalize karar matrisinde kullanılan ağırlık değerleri, finansmanla ilgili çalışma yapan uzmanların görüşleri doğrultusunda belirlenmiştir. İki mali müşavir ve iki muhasebe müdürünün görüşleri alınarak oluşturulmuştur. Bu çerçevede satışların karlılığı, faaliyetin karlılığı, öz kaynakların karlılığı, amortisman öncesi faaliyet karı ve net çalışma sermayesinin ağırlıkları ortaya çıkmıştır.

Ölçütlerin ağırlıklarının elde edilmesinden sonra normalize matris elemanları ile ölçütlerin ağırlıkları çarpılarak ağırlıklı normalize karar matrisi oluşturulmuştur. Tablo 4'te ağırlıklı normalize karar matrisi verilmiştir.

Tablo 4. Ağırlıklı Normalize Karar Matrisi

Yıl / Kriter	Satışların Karlılığı	Faaliyetin Karlılığı	Öz kaynakların Karlılığı	FAVÖK (Amortisman Öncesi Faaliyet Karı)	Net Çalışma Sermayesi
2018	0,300	0,067	0,228	0,036	0,017
2019	0,300	0,133	0,250	0,100	0,054
2020	0,100	0,000	0,217	0,042	0,058
2021	0,300	0,200	0,207	0,054	0,000
2022	0,000	0,000	0,000	0,000	0,150

Bu adımda, ağırlıklandırılmış karar matrisi değerlerinden yararlanılarak Si ve Ri değerleri hesaplanmıştır. Tablo 5'te bu değerler verilmiştir.

Tablo 5. Si ve Ri Değerleri

Yıl / Kriter	Si	Sıralama	Yıl / Kriter	Ri	Sıralama		
2018	0,648	1,543	3	2018	0,3	3,333	3
2019	0,838	1,194	5	2019	0,3	3,333	5
2020	0,418	2,394	2	2020	0,217	4,6	2
2021	0,761	1,315	4	2021	0,3	3,333	4
2022	0,15	6,667	1	2022	0,15	6,667	1

Tablo 5'te yer alan S_i ve R_i değerlerinin elde edilmesinden sonra bu değerlerin en büyük ve en küçük değerleri belirlenmiştir. Tablo 6'da bu değerler verilmiştir.

Tablo 6. S ve R Maksimum ve Minimum Değerleri

S_i	0,838	R_i	0,300
S_i^*	0,150	R_i^*	0,150

Yukarıdaki tablo değerleri elde edildikten sonra $v=0,5$ değerine göre Q_i değerlerinin sıralaması yapılmıştır. Q_i değerleri küçükten büyüğe doğru sıralanmıştır. Tablo 7'de Q_i değerleri ve sıralaması verilmiştir. Buhar kazanı sektörü, 2018-2022 yılları itibariyle performans sıralaması ortaya çıkmıştır.

Tablo 7. Q_i Değerleri

$v=0,5$		
Yıl	Q_i	Sıralama
2018	0,8622	3
2019	1,0000	5
2020	0,4193	2
2021	0,9440	4
2022	0,0000	1

VIKOR yönteminde tüm değerlerin elde edilmesinin ardından uzlaşık çözüm için aşağıdaki koşullara bakılır.

K1. Kabul edilebilir avantaj:

$$Q(a'') - Q(a') \geq DQ$$

$$DQ = \frac{1}{m-1}$$

$$DQ = \frac{1}{5-1} = 0,25$$

0,4193 0,0000 0,25 K1 koşulu sağlanmıştır.

K2. Karar vermede kabul edilebilir istikrar:

K2 koşulunda, en iyi Q değerine sahip A1 alternatifi S ve R değerlerinin de en az bir tanesinde en iyi skoru elde etmiş olmalıdır. K2 koşulu da sağlanmıştır.

Yukarıdaki koşullar sağlandığı için alternatiflerin Q değerlerine göre sıralama yapılır. Q değerleri küçükten büyüğe doğru sıralanır. Dolayısıyla sıralama Tablo 7'deki gibi gerçekleşmiştir. Buna göre karlılık performansının birinci yıl 2022 yılı, ikinci sırada 2020 yılı, üçüncü sırada 2018 yılı, dördüncü sırada 2021 yılı ve beşinci sırada ise 2019 yılı yer almıştır.

VİKOR yöntemi ile yapılan hesaplamalardan çıkan sonucun doğruluğunu değerlendirmek üzere EDAS yöntemi ile hesaplamalar yapılmıştır.

5.2 EDAS Yöntemi Bulguları

VİKOR yönteminde kullanılan aynı kriterler ile EDAS yöntemi kullanılarak analiz yapmak üzere buhar kazanı sektörü karlılık durumu başlangıç karar matrisi oluşturulmuştur. VİKOR yönteminde kullanılan aynı ağırlık oranları kullanılmıştır. Başlangıç karar matrisi Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Başlangıç Karar Matrisi

	Satışların Karlılığı	Faaliyetin Karlılığı	Öz kaynakların Karlılığı	FAVÖK (Amortisman Öncesi Faaliyet Karı)	Net Çalışma Sermayesi
Ağırlıklar	0,300	0,200	0,250	0,100	0,150
2018	0,02	0,05	0,1	14,09	359.460,12
2019	0,02	0,04	0,08	5,47	454.934,36
2020	0,04	0,06	0,11	13,33	465.823,03
2021	0,02	0,03	0,12	11,68	316.341,82
2022	0,05	0,06	0,31	18,98	699.893,20

Başlangıç karar matrisi oluşturulmuştur. İkinci adımında ortalama çözüm matrisi oluşturulmuştur. Tablo 9'da bu değerler verilmiştir.

Tablo 9. Ortalama Çözüm Matrisi

	Satışların Karlılığı	Faaliyetin Karlılığı	Öz kaynakların Karlılığı	FAVÖK (Amortisman Öncesi Faaliyet Karı)	Net Çalışma Sermayesi
ORT	0,03	0,05	0,14	12,7	459290,5

Ortalama çözüm matrisinin elde edilmesinin ardından pozitif uzaklık matrisi oluşturulmuştur. Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10. Pozitif Uzaklık Matrisi

	Satışların Karlılığı	Faaliyetin Karlılığı	Öz kaynakların Karlılığı	FAVÖK (Amortisman Öncesi Faaliyet Karı)	Net Çalışma Sermayesi
2018	0,000	0,042	0,000	0,109	0,217
2019	0,000	0,000	0,000	0,000	0,009
2020	0,333	0,250	0,000	0,049	0,000
2021	0,0000	0,000	0,000	0,000	0,311
2022	0,667	0,250	1,153	0,493	0,000

Bu adımda negatif uzaklık matrisi değerleri hesaplanmıştır. Tablo 11'de negatif uzaklık matrisi değerleri verilmiştir.

Tablo 11. Negatif Uzaklık Matrisi

	Satışların Karlılığı	Faaliyetin Karlılığı	Öz kaynakların Karlılığı	FAVÖK (Amortisman Öncesi Faaliyet Karı)	Net Çalışma Sermayesi
2018	0,333	0,000	0,306	0,000	0,000
2019	0,333	0,167	0,444	0,570	0,000
2020	0,000	0,000	0,236	0,000	0,014
2021	0,333	0,375	0,167	0,081	0,000
2022	0,000	0,000	0,000	0,000	0,524

Sonraki adımda, pozitif ve negatif uzaklıklar ağırlıklandırılmıştır. Bu işlem için ölçütlerin ağırlıklarından yararlanılmıştır. Tablo 12'de ağırlıklandırılmış pozitif uzaklıklar verilmiştir.

Tablo 12. Ağırlıklandırılmış Pozitif Uzaklık

	SPi
2018	0,0518
2019	0,0014
2020	0,1549
2021	0,0467
2022	0,5875

Ağırlıklandırılmış negatif uzaklık değerleri Tablo 13'te verilmiştir

Tablo 13. Ağırlıklandırılmış Negatif Uzaklık

	SNi
2018	0,1764
2019	0,3014
2020	0,0612
2021	0,2248
2022	0,0786

Yöntemin bu adımında, her bir alternatif için SP değerleri normalize edilmiştir. Tablo 14'te normalize SP değerleri verilmiştir.

Tablo 14. Normalize SP Değerleri

	NSPi
2018	0,0882
2019	0,0024
2020	0,2636
2021	0,0795
2022	1,0000

Sonraki adımda, her bir alternatif için SN değerleri normalize edilmiştir. Tablo 15'te normalize SN değerleri verilmiştir.

Tablo 15. Normalize SN Değerleri

	NSPi
2018	0,4148
2019	0,0000
2020	0,7971
2021	0,2543
2022	0,7393

EDAS yönteminin son adımında, her bir alternatif için değerlendirme skoru hesaplanmıştır. Tablo 16'da normalize AS değerleri ve sıralama verilmiştir.

Tablo 16. Normalize AS Değerleri ve Sıralama

	Asi	Sıralama
2018	0,2515	3
2019	0,0012	5
2020	0,5303	2
2021	0,1669	4
2022	0,8696	1

EDAS yöntemine göre Türkiye'de Buhar kazanı sektörü karlılık sıralamasına göre birinci sırada 2022 yılı, ikinci sırada 2020 yılı, üçüncü sırada 2018 yılı, dördüncü sırada 2021 yılı yer almıştır. Son sırada ise 2019 yılı yer bulmuştur.

VIKOR ve EDAS yöntemleri ile yapılan analiz sonucuna göre benzer sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Her iki yöntemin uygulanması sonucunda, alternatifler arasında yapılan değerlendirmeler ve karşılaştırmalar neticesinde, aynı sıralama düzeninin elde edilmesi dikkat çekicidir. Bu durum, VIKOR ve EDAS yöntemlerinde, sıralamanın tutarlılığını göstermekte, analizlerin doğruluğu ve güvenilirliğini desteklemektedir.

6. Tartışma

Orhan (2019). Çalışmasında, Türkiye ile Avrupa Birliği ülkelerinin lojistik performanslarını ENTROPİ ve EDAS yöntemleri ile kıyaslamıştır. Yavuz, Öztel ve Öz (2020). Türk kimya sektörünün finansal performansını VIKOR yöntemiyle analiz etmiştir. Aydın, Avcı ve Aladağ (2021). Türkiye Milli Futbol Takımı futbolcularının performansını VIKOR yöntemiyle değerlendirmiştir. Yetiz ve Kılıç (2021). Türkiye'de hizmet veren kamu ve özel sermayeli mevduat bankalarının finan-

sal performanslarını VIKOR yöntemiyle değerlendirmiştir. Mohammad ve diğ. (2023). Gaz boru hattı ağlarının optimizasyonunu VIKOR yöntemiyle incelemiştir. Lubis, Bustami ve Fitri, (2024). Malikussaleh Üniversitesi'nde potansiyel bursiyer adaylarını EDAS ve VIKOR yöntemi ile seçmiştir.

VIKOR yöntemi ile bir sektörün yıllar itibariyle performans sıralaması yapılabilir. Yılların performans sıralamasının yapılmasıyla, yılların performans karşılaştırması mümkündür. Dolayısıyla, yılların performans sıralanmasında ideal çözüme en yakın olan uzlaşık çözüm bulunmaktadır. Uzlaşık çözüme ulaşmak için her bir ölçüte göre değerlendirilen her seçeneğin, yani her yılın performansı, en iyi yıl değeri ile kıyaslanabilmektedir. Bu nedenlerle, buhar kazanı sektörünün yıllar itibariyle karlılık analizi için VIKOR yöntemi seçilmiştir.

2018-2022 yılları arası karlılık performansı değerlendirmesi, VIKOR yöntemi ile yapılmıştır. Analiz sonucu elde edilen bulgularda, 1. Sırada 2022 yılı, 2. Sırada 2020 yılı, 3. Sırada 2018 yılı, 4. sırada 2021 yılı, 5. sırada 2019 yılı yer almıştır. EDAS yöntemi ile yapılan analizde benzer sonuçlar elde edilmiştir. 2022 yılında 1. sıra yer almıştır. 2020 yılı ikinci sırada, 2018 yılı üçüncü sırada, 2021 yılı dördüncü sırada yer almıştır. Beşinci ve son sırada ise 2019 yılı yer almıştır.

Türkiye sektör ortalamaları verileri üzerinde VIKOR yöntemi ile yapılan analiz sonucunda elde edilen bulgular, karar verme sürecinde kabul edilebilir avantaj (K1) ve istikrar (K2) koşullarının sağlandığı görülmüştür. Q_i değerleri incelendiğinde, $DQ=1/(5-1)=0,25$ kriterine göre K1 koşulunun sağlandığı ve en iyi Q değerine sahip A1 alternatifinin S ve R değerlerinden en az birinde en iyi skoru elde ettiği için K2 koşulunun da yerine getirildiği tespit edilmiştir.

VIKOR ve EDAS yöntemlerinin benzer sıralama sonuçlarına ulaşılmıştır. İki farklı çok kriterli karar verme yönteminin sonuçlarının tutarlılığı, bu yöntemlerle elde edilen sıralamanın güvenilirliğini artırdığını ifade etmek mümkündür.

Türkiye'de buhar kazanı sektörü, karlılık analizi sonucu elde edilen bulgularda, 2018 yılından itibaren 2022 yılına kadar beş yıllık performans değerlendirmesi sonucu, 1.Sırada 2022 yıl olmasına rağmen, olumlu gelişmeler olmakla birlikte sektörün karlılığın 2018 ve 2022 yılı arasında bir artış olmasına rağmen, her yılın sıralaması dikkate alındığında, bir önceki yıla göre ardışık olarak düzenli bir şekilde artmadığı görülmektedir. 2022 yılı ilk sırada iken ikinci yıl 2020 yılı olup, son sırada ise 2019 yılı yer almıştır. İlk sırada son yıl 2022 olması olumlu bir durumdur. 2018-2022 yılları arasında bütün olarak değerlendirdiğimizde, bir önceki yıllarla kıyasladığımızda, 2022 yılını 2021 yılı, 2021 yılı 2020 yılı, 2020 yılını 2019 yılı, 2019 yılını ise 2018 yılı ile değerlendirdiğimizde, sektörün genel olarak karlılığında olumlu bir süreç işlemiştir.

7. Sonuç ve Öneriler

Buhar kazanı sektörü hedef kitlesinde geniş bir kullanıcı sayısı bulunması, ülke ekonomisi açısından değerli görülmektedir. Bu sektörün ekosistemde, üretim ve pazarlama faaliyetleri sonucu yeni istihdam olanakları oluşturmada, ülke ekonomisine katma değer sağlamaktadır. Buhar kazanı sistemlerinin enerji tasarrufu yönü ve çevreye duyarlı olması nedeniyle ekosistemde etkisinin zamanla artması ve ekonomiye daha fazla katkı sağlayacağı beklenmektedir. Sektörde yaşanan teknolojik yenilikler ve gelişmeler, ülke ekonomisine sağladığı katkıyı ileriye taşıyacaktır.

VIKOR yöntemi ile yapılan analiz sonucu, yıllar itibariyle ortaya çıkan sıralamaya göre 2018-2022 yılları arası karlılık performansının en yüksek olduğu yıl 2022 olarak belirlenmiştir. İkinci sırada 2020, üçüncü sırada 2018, dördüncü sırada 2021 ve son sırada 2019 yılı yer almıştır. EDAS yöntemine göre buhar kazanı sektöründe karlılık performansı yine 2022 yılında gerçekleşmiştir. 2020 yılı ikinci sırada, 2018 yılı üçüncü sırada, 2021 yılı ise dördüncü sırada yer almıştır. Son sırada ise 2019 yılı yer almıştır. Her iki yöntemde benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, sektör ortalamaları verileri üzerinde VIKOR yöntemi ile yapılan analiz sonucuna göre karar verme sürecinde kabul edilebilir avantaj ve istikrar koşulları sağlandığı görülmüştür. 2018 yılının, 2022 yılı ile kıyaslandığında sektörün karlılık artışında olumlu gelişmelerden söz etmek mümkündür.

Her iki yöntemin uygulanması sonucunda, alternatifler arasında yapılan değerlendirmeler ve karşılaştırmalar sonucuna göre, benzer sıralama düzeni sağlanmıştır. Buda, VIKOR ve EDAS yöntemleri ile elde edilen sıralamanın tutarlı olduğunu göstermekte, analizlerin doğruluğunu ve güvenilirliğini desteklemektedir. Bu sonuçlar, buhar kazanı sektörünün yıllar arasındaki performans farklılıklarını ortaya koyarak karar alma süreçlerinde önemli bir katkı sağlayabilir.

Buhar kazanı sektörü, karlılık performans sıralaması, sektörün karlılık durumu seyri hakkında bilgi vermektedir. Sektörün performans sıralamasında yüksek olduğu yıl ve en düşük yıl hakkında fikir sahibi olmak mümkündür. Buna ilaveten, sektördeki karlılık performansı, ülke ekonomisinin büyümesi ile ilişki kurulmaya çalışılabilir.

Buhar kazanı sektöründeki karlılık analizinde, 2018-2022 yılları arasındaki karlılık sıralamasının ortaya konulması, yatırımcılara ve bu sektör ile ilgilenen kuruluşlara faydalı bilgiler sağlayabilir. Girişimciler, sektörün karlılık sıralamasını inceleyerek ülkenin ekonomik koşullarından mı kaynaklı yoksa sektöre özgü bir durum söz konusu olduğunu anlamalarına yardımcı olabilir. Buhar kazanı sektörü, performans bilgileri, geleceğe yönelik planlama çalışmalarında kullanılabilir gibi, bu çalışmaya benzer çalışmalar, buhar kazanı sektörü ile ilişkili diğer

sektörler için uygulanabilir. Buhar kazanı sektörüne yönelik çalışma yapan danışmanlar için faydalı olabilir. Ayrıca, regülatörler, sektörün karlılık sıralamasını inceleyerek, birinci sıradaki yıl ve son sıradaki yılda yaşanan ekonomik koşullar vb. durumları inceleyerek destekleyici politikalar geliştirilebilir.

Destek: Çalışmamızda, veriler Küçük ve Orta Ölçekli İşletmeleri Geliştirme ve Destekleme İdaresi Başkanlığından (KOSGEB) resmi yazı ile temin edilmiştir.

Çıkar Çatışması Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını, makalede araştırma ve yayın etiğine uyulduğunu beyan eder.

Kaynakça

- Aktürk, T. B., ve Fidan, U. (2009). Buhar Kazanı Otomasyon Sistemi İçin Uzakta Görüntüleme Sistemi Tasarımı. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 71-78. Ali, A. (2021). Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/akufemubid/issue/1609/20105>
- Akyüz, H. S. (2019). Çalışma sermayesine ilişkin finansal oranların işletme karlılığına etkisi: BİST imalat sektöründe bir uygulama. *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Uluslararası Sosyal Bilimler Dergisi*, 4(2), 217-233.
- Antoro, W., Sanusi, A., and Asih, P. (2020). The Effect Of Profitability, Company Size, Company Growth On Firm Value Through Capital Structure In Food And Beverage Companies On The Indonesia Stock Exchange 2014-2018 Period. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering (IJASRE)*, 6(9), 36-43. Doi: <https://10.31695/IJASRE.2020.33876>
- Arslan, E., & Bora, A. (2022). Türk bankacılık sektöründe faaliyette bulunan kalınma ve yatırım bankalarının 2015–2020 dönemi performanslarının özkaynak karlılığı bileşenlerine göre incelenmesi. *Balkan Sosyal Bilimler Dergisi*, 11(21), 27-40.
- A., Aktaş, M., Kabak (2020). Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri: MS Excel Çözümlü Uygulamalar. Kabak M, Çınar Y, 1st ed. Nobel Akademik Yayıncılık. Türkiye.
- Aydın, M., Avcı, S., & Aladağ, Z. (2021). Futbolcu Performanslarının VIKOR Yöntemi İle Değerlendirilmesi. *Akdeniz Spor Bilimleri Dergisi*, 4(1), 24-39. Doi: 10.37021/asbid873554
- Demir, F. (2009). Financialization And Manufacturing Firm Profitability Under Uncertainty And Macroeconomic Volatility: Evidence From An Emerging Market. *Review of Development Economics*, 13(4), 592-609. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9361.2009.00522.x>
- Demirhan, D. (2022). İmalat Ve Hizmet Sektörlerinde Karlılık Oranlarını Etkile-

yen Faktörlerin Analizi. *Muhasebe ve Finansman Dergisi*, (94), 31-52. Doi: [https:// 10.25095/mufad.1054212](https://10.25095/mufad.1054212)

- Demirtaş, İ., & Gençtürk, M. (2022). Çalışma sermayesi yönetiminin sistematik derleme yöntemine göre incelenmesi (2002-2021). *Süleyman Demirel Üniversitesi Vizyoner Dergisi*, 13(36), 1287-1304.
- Elwardany, M. (2024). Enhancing Steam Boiler Efficiency Through Comprehensive Energy And Exergy Analysis: A Review. *Process Safety And Environmental Protection*. Doi: [https:// org/10.1016/j.psep.2024.01.102](https://org/10.1016/j.psep.2024.01.102)
- Ersoy, N. (2023). BİST Kimya, Petrol Kauçuk ve Plastik Mamulleri Sektöründe SECA Yöntemi ile Finansal Performans Ölçümü. *Ordu Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi*, 13(2), 1975-1998. Doi: 10.48146/odusobiad.1164930
- Ghorabae, M. K., Zavadskas, E. K., Amiri, M., & Turskis, Z. (2016). Extended EDAS Method For Fuzzy Multi-Criteria Decision-Making: An Application To Supplier Selection. *International Journal Of Computers Communications & Control*, 11(3), 358-371.
- Gołasz, Z. (2020). Impact Of Working Capital Management On Business Profitability: Evidence From The Polish Dairy Industry. *Agricultural Economics/ Zemedelska Ekonomika*, 66(6). <https://doi.org/10.17221/335/2019-AGRICECON>
- Imal, M. An Assessment Of Energetic And Exergetic Performance Analysis Of Central Heating Plant In A University Campus. *International Journal of Scientific and Technological Research*, 20-30. 7-9, 2021 Doi: <https://doi.org/10.7176/JSTR/7-09-03>
- Işık, Ö. (2017). Determinants Of Profitability: Evidence From Real Sector Firms Listed In Borsa Istanbul. *Business And Economics Research Journal*, 8(4), 689-698. doi: <https://doi.org.10.5539/ijef.v9n8p66>
- Kahraman, C., Keshavarz Ghorabae, M., Zavadskas, E. K., Cevik Onar, S., Yazdani, M., & Oztaysi, B. (2017). Intuitionistic Fuzzy EDAS Method: An Application To Solid Waste Disposal Site Selection. *Journal Of Environmental Engineering and Landscape Management*, 25(1), 1-12. <https://doi.org/10.3846/16486897.2017.1281139>
- Kayhan, B., & Tepeli, Y. (2017). Faaliyet Giderlerinin İşletme Kârlılığı Üzerindeki Etkisi: BİST Metal Eşya, Makine ve Gereç Yapım Sektöründe Bir Araştırma. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 9(20), 327-337.
- Keshavarz Ghorabae, M., Zavadskas, E. K., Olfat, L., & Turskis, Z. (2015). Multi-

- Criteria Inventory Classification Using A New Method Of Evaluation Based On Distance From Average Solution (EDAS). *Informatica*, 26(3), 435-451.
- Keshavarz-Ghorabae, M., Amiri, M., Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Antucheviciene, J. (2018). A Comparative Analysis Of The Rank Reversal Phenomenon In The EDAS and TOPSIS Methods. *Economic Computation & Economic Cybernetics Studies & Research*, 52(3). Doi: 10.24818/18423264/52.3.18.08
- Kısa, A. C. G., & Perçin, S. (2020). Bulanık Çok Kriterli Karar Verme Yaklaşımı İle Türkiye İmalat Sanayii'nde Performans Ölçümü. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, 31-56. DOI: 10.18092/ulikidince.522799
- Kıyılmaz, M. B., Keçebaş, A., ve Ertürk, M. (2021). Sanayide Enerji Yönetimi Sistemi İçin Bir Gıda Tesisinin Enerji Verimliliğinin İyileştirilmesi. *International Journal Of Pure And Applied Sciences*, 7(1), 51- 62. Doi: <https://doi.org/10.29132/ijpas.815077>
- Liao, H., Xu, Z., and Zeng, X. J. (2014). Hesitant Fuzzy Linguistic VIKOR Method And Its Application In Qualitative Multiple Criteria Decision Making. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 23(5), 1343-1355. Doi: <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2014.2360556>
- Lubis, K. M. A., Bustami, B., & Fitri, Z. (2024). Comparison of the Results of the Edas and Vikor Methods in the Decision Support System for KIP Scholarship Recipients at Malikussaleh University. *International Journal of Engineering, Science and Information Technology*, 4(2), 43-51. DOI: <https://doi.org/10.52088/ijesty.v4i1.505>
- Mercan, Y., & Çetin, O. (2020). COPRAS ve VIKOR Yöntemleri İle BIST Elektrik Endeksindeki Firmalarının Finansal Performans Analizi. *Uluslararası Afro-Avrasya Araştırmaları Dergisi*, 5(9), 123-139.
- Mohammad, N. E. G., Rawash, Y. Y., Aly, S. M., Awad, M. E. S., & Mohamed, M. H. H. (2023). Enhancing Gas Pipeline Network Efficiency Through VIKOR Method. *Decision Making: Applications In Management and Engineering*, 6(2), 853-879. DOI: <https://doi.org/10.31181/dmame622023868>
- Oğuz, A., and Satır, H. (2024). Analyzing Profitability Performance with the Integrated MEREC-COBRA Method: The Case of BIST Retail Companies. *Business and Economics Research Journal*, 15(1), 33-50. :Doi: <https://doi.org/10.20409/berj.2024.433>
- Opricovic, S., & Tzeng, G. H. (2007). Extended VIKOR method in comparison with outranking methods. *European journal of operational research*, 178(2), 514-529. doi:10.1016/j.ejor.2006.01.020
- Opricovic, S., and Tzeng, G. H. (2004). Compromise Solution By MCDM Methods:

A Comparative Analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal Of Operational Research*, 156(2), 445-455. Erişim adresi: file:///C:/Users/E0569/Downloads/Paper071%20(1).pdf

- Orhan, M. (2019). Türkiye İle Avrupa Birliği Ülkelerinin Lojistik Performanslarının Entropi Ağırlıklı EDAS yöntemiyle karşılaştırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (17), 1222-1238. DOI: 10.31590/ejosat.657693
- Özbek A., (2017). Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ve Excel ile Problem Çözümü, Seçkin Yayınevi, Ankara
- Özbek, A., & Engür, M. (2018). EDAS yöntemi ile lojistik firma web sitelerinin değerlendirilmesi. *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Meslek Yüksekokulu Dergisi*, 21(2), 417-429. <https://doi.org/10.29249/selcuksbmyd.454013>
- Özbek, A., & Erol, E. (2016). Analitik Hiyerarşi Süreci ve Vikor Yöntemleriyle İşgören Seçimi: Tekstil Sektöründe Bir Uygulama. *Kırıkkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 6(1), 93-108. Erişim Adresi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/kusbd/issue/19382/205716>
- Pangestuti, I. R. D., Pridarsanti, K. Y., and Robiyanto, R. (2021). Location, Working Capital, Corporate Governance, And Profitability: The Case Of Indonesian Manufacturing Firms. *International Journal of Business and Society*, 22(2), 881-900. Erişim adresi: <https://publisher.unimas.my/ojs/index.php/IJBS/article/view/3765>
- Parlak, Y. (2020). Geleneksel El Yapımı Kağıt Üretimi: Düzce Üniversitesi Geleneksel Yöntemlerle Hat ve Ebru Kağıt Üretimi Projesi. *Ulakbilge Sosyal Bilimler Dergisi*, 8(48), 589-600. Doi: <https://10.7816/ulakbilge-08-48-09>
- Patil, S. S., Bewoor, A. K., Kumar, R., Ahmadi, M. H., Sharifpur, M., and Praveenkumar, S. (2022). Development Of Optimized Maintenance Program For A Steam Boiler System Using Reliability-Centered Maintenance Approach. İ(16), 10073. Doi: <https://doi.org/10.3390/su141610073>
- Pervan, M., Pervan, I., and Ćurak, M. (2019). Determinants Of Firm Profitability In The Croatian Manufacturing Industry: Evidence From Dynamic Panel Analysis. *Economic Research-Ekonomska İstraživanja*, 32(1), 968-981. Doi:<https://doi.org/10.1080/1331677X.2019.1583587>
- Rüşen, S. E., ve Çevik, M. S. (2020). Bir Gıda Fabrikasında Enerji Verimliliğinin İyileştirilmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 24(3), 539-552. Doi: <https://10.19113/sdufenbed.498966>
- Sari, D. P., Nabella, S. D., and Fadlilah, A. H. (2022). The Effect Of Profitability, Liquidity, Leverage, and Activity Ratios On Dividend Policy In Manufacturing Companies In The Food And Beverage Industry Sector Listed On The

- Indonesia Stock Exchange In The 2016-2020 Period. *Jurnal Mantik*, 6(2), 1365-1375. Doi: <https://doi.org/10.35335/mantik.v6i2.2494>
- Siraj, M. T., Debnath, B., Kumar, A., Bari, A. M., Samadhiya, A., And Payel, S. B. (2023). Evaluating Barriers To Sustainable Boiler Operation In The Apparel Manufacturing Industry: Implications For Mitigating Operational Hazards In The Emerging Economies. *Plos One*, 18(4), E0284423. Doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0284423>
- Siregar, Q. R., and Harahap, D. D. (2021). Influence Current Ratio, Debt to Equity Ratio and Total Asset Turnover on Return on Equity in the Transportation Sector Industry. *International Journal of Business Economics (IJBE)*, 2(2), 99-112. Doi: <https://doi.org/10.30596/ijbe.v2i2.6644>
- Škuláňová, N. (2020). Determinants Of Corporate Profitability Of Companies From Construction and Real Estate Industries In Selected European Countries. *Acta Academica*, 20(2), 48-64. Doi: <https://10.25142/aak.2020.009>
- Şengül, Ü. (2020). BIST 100 De Yer Alan Ana Metal Sanayi Firmalarının Veri Zarflama Analizi ile Performans Ölçümü. *Journal of Life Economics*, 7(2), 161-176. <https://doi.org/10.15637/jlecon.7.011>
- Şişman, B. (2017). Hata Türü Ve Etkileri Analizinde Bulanık Ahp Ve Bulanık Vikor Yöntemleri İle Otomotiv Sektöründe Risk Değerlendirmesi-Risk Evaluating By Fuzzy Ahp and Fuzzy VIKOR Methods In Failure Mode And Effects Analysis For Automotive Sector. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 9(18), 234-250. <https://doi.org/10.20875/makusobed.302942>
- Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2023). Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts. *Encyclopedia*, 3(1), 77-87. Doi: <https://doi.org/10.3390/encyclopedia3010006>
- Tekin, B., ve Bastak, S. N. (2021). Borsa İstanbul'da İşlem Gören En Karlı Şirketlerde İşletme Sermayesi-Karlılık İlişkisinin Araştırılması: Panel Veri Analizi Yöntemi. *Journal Of Financial Politic & Economic Reviews/Finans Politik ve Ekonomik Yorumlar*, 58(658). Erişim adresi: [file:///C:/Users/E0569/Downloads/1641880542%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/E0569/Downloads/1641880542%20(1).pdf)
- Terzioğlu, M. K., Kurt, E. S., Yaşar, A., & Köken, M. (2022). BİST100-Enerji Sektörü Finansal Performansı: SWARA-VIKOR ve SWARA-WASPAS. *Alanya Akademik Bakış*, 6(2), 2439-2455. <https://doi.org/10.29023/alanyaakademik.1079820>
- Yalcin, N., & Ünlü, U. (2018). A Multi-Criteria Performance Analysis Of Initial Public Offering (IPO) Firms Using CRITIC and VIKOR methods. *Technological*

and Economic development of Economy, 24(2), 534-560. <https://doi.org/10.3846/20294913.2016.1213201>

- Yalçın, H. (2024). Finansal Analizde Metrik Çatışması: FAVÖK ve EVA Karşılaştırması ve Bir Uygulama. *Muhasebe Enstitüsü Dergisi*, (70), 39-57.
- Yavuz, H., Öztel, A., & Öz, Y. (2020). Bulanık VIKOR yöntemi ile finansal performans analizi: Türk kimya sektöründe bir uygulama. *Yönetim ve Ekonomi Dergisi*, 27(3), 535-555. Doi Number: 10.18657/yonveek.602919
- Yetiz ve Kılıç, (2021). Bankaların Finansal Performansının VIKOR Yöntemi İle Değerlendirilmesi: *Türkiye Örneği*. *Akademik Araştırmalar ve Çalışmalar Dergisi (AKAD)*, 13(24), 151-164. <https://doi.org/10.20990/kilisiibfakademik.890105>
- Yılmaz, Ö., & Yakut, E. (2022). Bulanık Shannon Entropi Ağırlıklı Bulanık Topsis ve Bulanık Vikor Yöntemleri İle Finansal Performans Değerlendirmesi. *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 20(4), 307-330. <https://doi.org/10.29023/alanyaakademik.1079820>
- Zhang, N., & Wei, G. (2013). Extension of VIKOR method For Decision Making Problem Based On Hesitant Fuzzy Set. *Applied Mathematical Modelling*, 37(7), 4938-4947. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.10.002>



RÜZGAR ENERJİSİ SAHALARINDA İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ ÇALIŞMALARI

Bayram KÖSE^{1*}, Can UZUN², Ahmet Orhan İNCİ³

¹ İzmir Bakırçay Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, İzmir, ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-0256-5921>

² İzmir Bakırçay Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği, İzmir, ORCID No : <http://orcid.org/0009-0008-9527-0009>

³ İzmir Bakırçay Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği, İzmir, ORCID No : <http://orcid.org/0009-0004-7565-5818>

Anahtar Kelimeler

Öz

Rüzgâr enerji sahaları, iş sağlığı ve güvenliği, risk değerlendirme, korelasyon analizi

Son yıllarda artan nüfus ve enerji talebi nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı hızla artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları tesisleri arasında önemli bir yere sahip rüzgar enerjisi santralleri (RES) iş sağlığı ve güvenliği (İSG) açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışma, rüzgar enerjisi santrallerinde karşılaşılan İSG ile ilgili, iş kazası ve meslek hastalıkları risklerinin değerlendirilmesini ele almaktadır. Betimsel araştırma yöntemi kullanılarak yapılan incelemeler sonucunda, iş kazaları konusundaki istatistikler tartışılmış ve korelasyon analizi ile değerlendirilmiştir. Rüzgar enerjisi santralleri alanında iş sağlığı ve güvenliği (İSG) kapsamında iş kazası ve meslek hastalığı riskleri ile alınması gereken tedbirler incelenmiştir. Bu alanda çalışanlara yönelik eğitimlerin artırılmasının gerekli olduğu tespit edilmiştir. Büyüyen sektörle birlikte, artan iş sağlığı eğitimleri ve tedbirler sayesinde iş kazaları durağan ve azalan bir eğilim göstermektedir.

* bayram.kose@bakircay.edu.tr

doi : 10.46399/muhendismakina.151599

OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY PRACTICES IN WIND ENERGY FIELDS

Keywords

Wind energy fields, occupational health and safety, risk assessment, correlation analysis

Abstract

In recent years, the use of renewable energy sources has been increasing rapidly due to increasing population and energy demand. Wind power plants (WPPs), which have an important place among renewable energy resources facilities, have a critical importance in terms of occupational health and safety (OHS). This study addresses the assessment of occupational accident and occupational disease risks related to OHS in wind power plants. Using descriptive research methodology, statistics on occupational accidents are discussed and evaluated by correlation analysis. The risks of occupational accidents and occupational diseases and the measures to be taken within the scope of occupational health and safety (OHS) in the field of wind power plants are analyzed. It is determined that it is necessary to increase trainings for employees in this field. With the growing sector, occupational accidents show a stable and decreasing trend thanks to increased occupational health trainings and measures.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 06.07.2024

Kabul Tarihi : 26.11.2024

Research Article

Submission Date : 06.07.2024

Accepted Date : 21.11.2024

Extended Abstract

In line with the increasing energy demand and sustainable energy policies in recent years, the use of renewable energy sources is rapidly expanding. Among these sources, wind energy stands out due to its low operating costs and environmental friendliness. However, wind power plants (WPPs) are important work sites not only in terms of energy production but also in terms of occupational health and safety (OHS). This study deals with the classification and statistical analysis of occupational accidents encountered in WPPs and measures to reduce the risks encountered.

In the study, the statistics of occupational accidents occurring in WPPs were analysed by using descriptive research method and evaluated by correlation analysis. The data obtained show that the most common types of accidents in WPPs are turbine blade damages, fires, structural accidents, icing-related incidents and site transportation accidents. According to the data between 2000 and 2023, while an increase in WPP occupational accidents was observed over time, a relative stagnation in accident rates was achieved with the increase in occupational health and safety measures, especially after 2013. However, it has been determined that most of the occupational accidents are caused by factors such as the newness of the sector, inexperience of the employees and insufficient prediction of the risks.

Different risk factors stand out in the production, installation, maintenance-repair and dismantling processes of wind power plants. Epoxy resins, chemicals and nano-materials used in the production phase have negative effects such as respiratory diseases and occupational diseases. In the installation and maintenance processes, physical risks such as falling from height, electric shock, lightning strike, fire and icing come to the fore. In the dismantling phase, accidents that may occur during the recycling of turbine blades and other parts constitute an important problem. In this context, it is necessary to increase occupational safety measures at WPP sites and to raise awareness of employees against these risks.

The research also comprehensively addresses the measures that can be taken to prevent occupational accidents at WPP sites. According to the findings of the study, it is of great importance to increase occupational health and safety trainings, to increase the frequency of risk assessments and to audit the applicability of existing OHS legislations at WPP sites. In addition, the European Union and Turkey legislations are discussed comparatively and it is emphasised that WPPs are in the 'very hazardous class' and the mandatory measures to be taken within the scope of the legislation are discussed. This study aims to provide a comprehensive assessment of occupational health and safety issues in the wind energy sector and to develop solutions to reduce occupational accidents. The results of the study are important for businesses operating in the wind energy sector, decision makers and policy makers.

1. Giriş

Dünyada hızlı bir biçimde artan nüfus ve günden güne gelişen teknolojik gelişmeler sebebiyle enerjide üretim tüketim dengesi giderek olumsuz bir biçimde etkilenmektedir. Artan nüfus ile doğru orantılı şekilde artış gösteren küresel enerji tüketimleri geçmiş yıllardaki istatistiklere bakıldığında iki kat ve ilerleyen yıllara göre incelendiğinde ise üç kat artacağı tahmin edilmektedir.

Yer altından çıkarılan fosil kökenli ve rezerv kısıtlı enerji kaynakları çevreye yaydığı zararlı atıklar sebebi ile yeni enerji kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Alternatif enerji kaynakları üzerinde çalışmalar yapılmakta olup, bu kaynaklardan rüzgâr enerjisi öne çıkmaktadır.

Rüzgâr enerji santralleri (RES), ekolojik ve sera gazı emisyonunun olmadığı enerji tesisleridir. Özellikle Avrupa Birliğinde, fosil yakıtlar azaltılırken rüzgâr enerjisi üzerine yapılan yatırımlar ve kullanımı hızla artmaktadır. Bunun en büyük sebepleri, rüzgâr enerjisinin hammadde gerektirmemesi ve düşük işletme maliyetleridir (Öztürk, Şimşek ve Altuntaş, 2021).

Sürdürülebilir kalkınma hedefleri ve Avrupa yeşil mutabakatı hedefleri doğrultusunda rüzgâr enerji santralleri kurulumları dünya çapında artarak büyümeye devam etmektedir ve böylece fosil yakıt kullanımları geleceğimizin dünyasında iyice azalacaktır. Türbin ve çevresel ekipmanların üretimi, taşınması, işletmesi ve söküm-hurdaya kaldırma süreçlerinde oluşan kazalar, hastalıklar ve tedavileri göz önüne alındığında, rüzgar enerjisi sektörünün getirdiği önemli sorunlardan birinin işçi sağlığı ve güvenliği olduğu görülmektedir.

Dünya Sağlık Örgütü (WHO), iş kazalarını, planlanmamış, genellikle bireysel yaralanmalara yol açan, makine, araç ve gereçlerin hasarlanmasına ve üretimin durmasına neden olan olaylar olarak tanımlanmaktadır. Günümüzde iş kazaları her sektörde meydana gelmekte olup bu kazaların insan hatası, makine arızaları veya doğal afetlerle tetiklendiği gözlenmektedir. Ayrıca, işin niteliğine bağlı olarak ortaya çıkan meslek hastalıkları da önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır (Aydın, 2020).

Rüzgâr enerji santralleri sahalarında iş kazaları ve meslek hastalığı problemleri, sektörün gelişimiyle orantılı olarak artmaktadır. Çalışan sayısının her geçen gün artmasıyla birlikte, gelişen teknolojiler ve santral yapılarındaki değişiklikler iş kazası risklerini artırmaktadır. Risklerin artmasının temel nedenleri arasında, sektörün yeni olması, çalışanların deneyim eksikliği ve potansiyel risklerin boyutlarının öngörülememesi yer almaktadır (Aydın, 2020).

Rüzgâr türbini üretim süreçlerinde, epoksiler, kimyasal malzemeler, metal işçiliği ve boya işleri gibi birçok riskli işlem yer almaktadır. Son yıllarda, türbin dayanıklılığını artırmak ve maliyetleri düşürmek amacıyla bu reçinelere nano-

malzemelerin de dahil edildiği gözlemlenmektedir (Beyan ve diğ. 2019). Nano-malzemelerin solunum sistemi, merkezi sinir sistemi ve bağışıklık sistemi gibi birçok vücut sistemi üzerinde olumsuz etkileri olduğu, yapılan hayvan deneyleriyle ortaya konmuştur (Papp, Schiffmann, Weiss, Castranova, Vallyathan, Rahman, 2008)..

İnsan ve çevre sağlığı bakımından odaklanması gereken bahse değer önemli diğer bir husus ise rüzgâr türbinlerinden kaynaklanan hurda ve kaza atıklarıdır. 2050 yılına kadar, dünya genelinde bu tür atıkların toplamda 43 milyon tona ulaşacağı öngörülmektedir (Liu ve Barlow, 2017). Bu atıkların bertaraf edilmesi, ciddi ekonomik maliyetler yaratmasının yanı sıra, çevre sağlığı açısından da önemli sorunlara yol açacaktır.

Görünür makro atıkların yanı sıra, sıvı epoksi reçinelerinin doğada biyolojik olarak kolayca parçalanamaması ve su ortamında biyolojik birikim yapabilmektedir. Bundan dolayı Avrupa Birliği çevre koruma standartlarına göre "tehlikeli" olarak sınıflandırılmaktadır. İnsan ve çevre sağlığı açısından potansiyel riskler oluşturan bu ve benzeri durumlar, gelecekte daha sık tartışılacak konular arasında yer alacaktır (Beyan, Bahadır, Çımrın, 2019).

Rüzgâr enerjisi santrallerinde (RES) iş sağlığı ve güvenliği (İSG) konusunun artan önemi, bu sektörde karşılaşılan yeni risklerle daha da belirgin hale gelmektedir. Özellikle üretim, inşaat, bakım, onarım ve bertaraf süreçlerinde kullanılan kimyasal maddeler, nano-malzemeler ve epoksi reçineler gibi zararlı maddelerin insan sağlığına ve çevreye olan etkileri üzerine yapılan çalışmalar, İSG politikalarının geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu çalışmada, RES'lerde karşılaşılan başlıca iş kazası riskleri detaylı bir şekilde ele alınmakta ve sektörde artan tehlikeler karşısında alınması gereken tedbirler vurgulanmaktadır.

Bu makale, hem iş kazalarını hem de meslek hastalıklarını kapsayan geniş bir İSG perspektifi sunarak, rüzgâr türbini üretim ve işletme süreçlerinde karşılaşılan risklerin değerlendirilmesi açısından literatüre özgün bir katkı sağlamaktadır. Çalışma, aynı zamanda rüzgâr enerjisi sektöründeki büyümenin İSG üzerindeki etkilerini korelasyon analizi ile ilişkisel olarak analiz etmekte ve gelecekte bu alanda yapılacak iyileştirme çalışmaları için önemli bulgular sunmaktadır.

2. Materyal ve Yöntem

Tarihte insanlar, rüzgâr enerjisini suyun yükseltilmesi ve buğday öğütülmesi gibi amaçlarla kullanmışlardır. Son yüzyıl içerisinde ise elektrik üretmek için rüzgar enerjisi santrallerini geliştirmişlerdir. Günden güne çoğalan rüzgâr enerji santralleri beraberinde yeni iş kazalarını getirmektedir. Bu sebeple, lojistik kazaları, montaj kazaları gibi birçok farklı iş kazaları ortaya çıkmakta ve bunlara çeşitli önlemler alınarak insan sağlığı ve güvenliği ön planda tutulmaktadır.

The Caithness Wind Farm Information Forum (CWIF) 2000 ile 31 Mart 2023 arası veriler incelendiğinde; dünyamızın değişik bölgelerinde rüzgâr enerji sahalarında 3287 iş kazası kayıt altına alınmıştır (You, Shaik, Rokonuzzaman, Rahman, Tan, 2023). Bu çerçevede Türkiye ve Dünya’da rüzgar enerji santrallerinin tarihsel gelişimi ve iş sağlığı ve güvenliği (İSG) alanındaki gelişmelere kısaca inceleyerek araştırmaya başlamakta fayda olacaktır.

2.1 Rüzgâr Enerji Santrallerinin Tarihsel Gelişimi

İlk insanlar rüzgârı tahıl öğütme ve yelkenli gemilerde kullanmışlardır. Eski Yunan ve Romalılar, rüzgârı sadece yelkenli gemiler için kullanırken, Orta ve Doğu Asya toplulukları (İran, Pakistan, Afganistan, Doğu Asya ve Çin) dairesel yel değirmenlerinden faydalanmışlardır (Yakan, 2021).

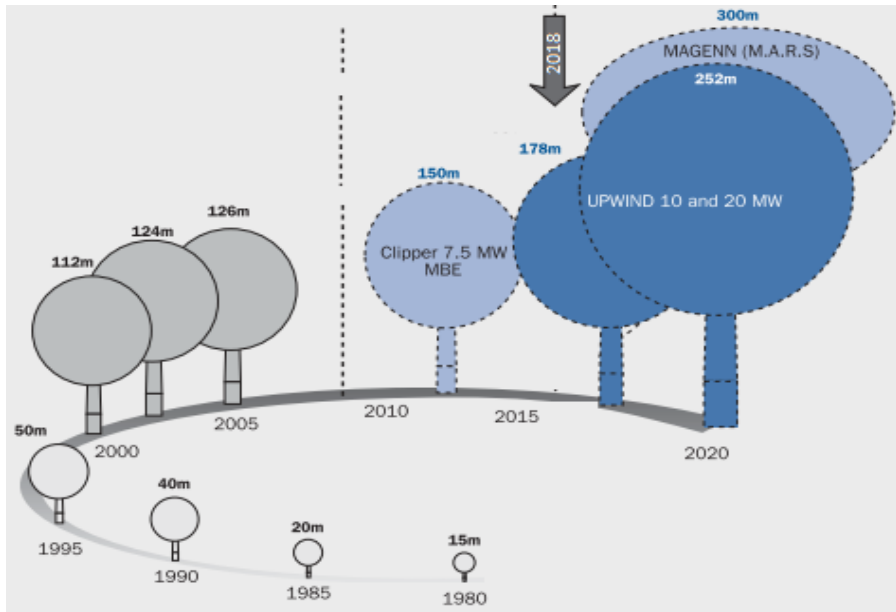
Rüzgâr enerjisinin kullanımı ilk olarak Çin, Tibet, Hindistan ve İran gibi Doğu Medeniyetlerinde kullanılmıştır. M.Ö. 1700’lü yıllarda Babillilerin Mezopotamya’da sulama amaçlı yel değirmenleri kullandığı da bilinmektedir. MÖ. 700’lerde İran’da dikey eksenli yel değirmenleri kullanıldığı kanıtlanmıştır (Yakan, 2021; Köse, 2018; Durak, ve Özer, 2012). Bu konuda yazılı bulgu ise MS 700 yıllarda İran’da elde edilmiştir. MÖ. ikinci yüzyılda yatay eksenli yel değirmenlerinin kullanıldığına dair yazılı kaynaklar mevcuttur. Rüzgâr gücünün Avrupa’ya geçişi 10. yüzyılda olmuş ve bu geçişin en eski kanıtı İngiltere’deki yel değirmenleridir. 1190’larda Alman Haçlıları, yel değirmenlerini Suriye’den ülkelerine taşımışlardır (Yakan, 2021; Köse, 2018; Durak, ve Özer, 2012).

Sanayi Devrimi ve buhar makinesinin icadı sonrasında enerji üretiminde fosil yakıtlar (petrol, gaz, kömür) öne çıkmış ve rüzgâr enerjisinin kullanımı azalmıştır. Fosil yakıtlar, istenildiğinde kullanılabilirler için daha avantajlı hale gelmiştir (Demir, ve Yakışık, 2024).

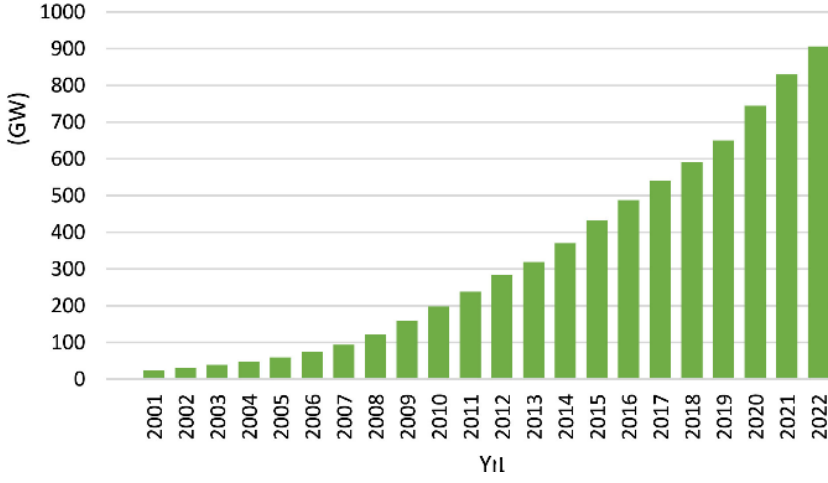
Rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi için Danimarka’da meteorolog Paul La Cour ilk rüzgâr santralini kurmuştur. Modern rüzgâr enerjisi teknolojisinin ilklerinden 200 kW kapasiteli Gedser rüzgâr santrali, 1956’da Danimarka’da kurulmuş ve 11 sene süreyle bakım yapılmaksızın çalışmıştır (Yakan, 2021; Köse, 2018).

Rüzgâr enerjisi teknolojisinde büyük bir gelişme 1970’lerdeki petrol krizine kadar yaşanmamıştır (Demir, ve Yakışık, 2024). Ancak, kriz sonrasında yeni enerji kaynakları arayışına girilmiş ve bu çerçevede rüzgâr enerji alanında santrallerinin gücü ve pervane çaplarının büyümesine önem verilmiştir. Rüzgâr santrallerinin gücü 1995’ten sonra KW seviyelerinden MW seviyelerine çıkmıştır. Günümüzde 6 MW gücünde rüzgâr enerji santralleri bulunmaktadır. Aynı zamanda, rüzgâr türbinlerinin pervane çapları da dikkat çekici şekilde büyümüştür. 1980’lerde pervane çapları 20 metre civarındayken, 2000’lerde 100 metreye, günümüzde ise 150-200 metreye ulaşmıştır (TUBA,2019). Ticari olarak elektrik elde etmek

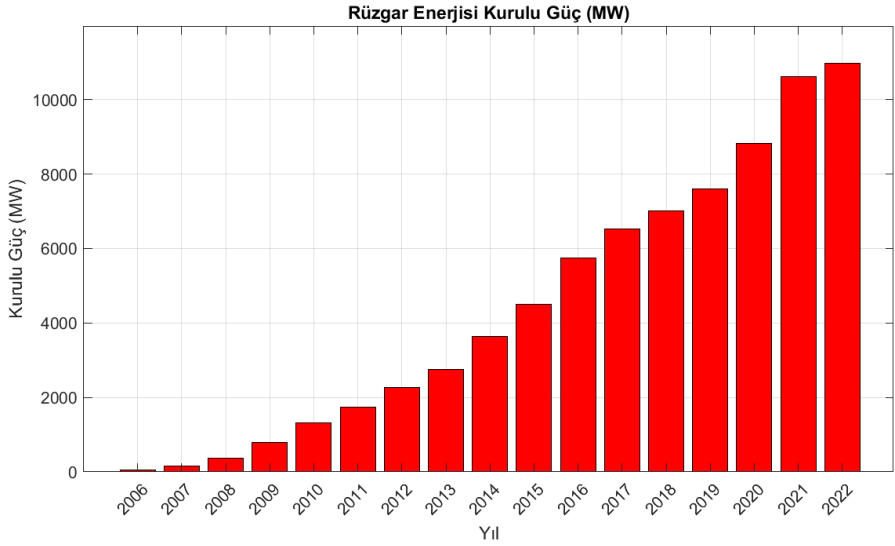
için üretilen rüzgar türbinlerindeki büyüklük güç artışı Şekil 1’de gösterilmektedir (Köse, 2018). Dünya rüzgar enerjisi birikimli kurulu gücündeki artış Şekil 2’de verilmektedir ve 2005’te 59 GW güçten 2019’larda 659 GW güce ve 2022 de 900 GW’a ulaşmıştır. Türkiye’de rüzgâr enerjisi, 1998 yılında Çeşme’de kurulan Germiyan Rüzgâr Enerjisi Santrali (RES) ile başlamıştır. 500 kW gücünde üç türbinden oluşan bu tesis, başlangıçta otoprodüktör olarak kurulmuş, sonradan lisanslı projeye dönüştürülmüştür. Aynı yıl, yine Çeşme’de 600 kW gücünde 12 türbinli ARES RES firması işletmeye alınmıştır. Takvim 2000 yılını gösterdiğinde ise Bozcaada’da 600 kW güce sahip 17 türbinli Bozcaada RES kurulmuştur. Her iki tesis de Yap-İşlet-Devret modeliyle inşa edilmiş ve 20 yıl sonunda devlete devredilecektir. 2003 yılında İstanbul Hadımköy’de iki türbinli Rüzgâr Santrali kurulmuş ve halen işletilmektedir. 2005’te çıkarılan Yenilenebilir Enerji Kanunu ile rüzgâr enerjisine alım garantisi getirilmiş, bu da sektöre olan ilgiyi artırmıştır. Bu yıllardaki Türkiye rüzgar enerjisi birikimli kurulu gücü grafiği Şekil 3’te verilmiştir (TUBA,2019; Köse ve Özgören 2010).



Şekil 1. Zamana Göre Türbin Güç ve Büyüklük Artışı



Şekil 2. Dünya Rüzgar Enerjisi Birikimli Kurulu Gücü



Şekil 3. Türkiye 2006-2022 Rüzgar Enerjisi Birikimli Kurulu Gücü

2.2 İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) Çalışmalarının Tarihsel Gelişimi

Tarihsel kayıtlara göre iş sağlığı ve güvenliğiyle ilgili çalışmaların ilk olarak Mısır'da başladığı, ardından Eski Yunan ve Roma'da gelişerek sürdüğü görülmektedir. Eski Mısır'da piramitlerin yapımı sırasında çalışanların sağlık sorunlarına yönelik bazı tedbirler alındığına dair bulgular mevcuttur. M.Ö. 2000'lerde ise, tarihin ilk yazılı yasalarından biri olan Hammurabi Kanunlarında iş sağlığı ve güvenliğiyle ilgili hükümler yer almaktadır (Turgut, 2022).

Tarihçi ve filozof Herodot, çalışanların verimliliğini artırmak için yüksek enerjili gıdalarla beslenmelerinin önemini vurgulayan ilk kişidir. Hipokrat ise kurşunun zararlı etkilerinden bahsederek kurşun zehirlenmesi üzerine önemli bulgular sunmuştur. Roma döneminde gladyatörlerin başhekimisi olarak görev yapan Pergamonlu Dr. Galen, gladyatörlerin beden hareketlerinin sağlık için önemini vurgulamış ve modern spor hekimliğinin öncüsü olduğunu ortaya koyduğu görülmüştür (Turgut, 2022; Çiçek, ve Öçal, 2016).

Sanayi Devrimi ile birlikte makineleşmenin artması, makine kaynaklı iş sağlığı ve güvenliği problemlerinin çıkmasına sebep olmuştur. Üretim artış odaklı süreçte, işçilerin daha ciddi sorunlarla karşılaştığı ve bu konuda çalışmaların yapıldığı görülmüştür. XVII. ve XVIII. yüzyılda ağır işlerden işçileri yıprandığı ve meslek hastalıklarına sebebiyet verdiği tespit edilmiştir. Diğer taraftan iş verimliliğini artırmak için mesleki sağlık işlerinin iyi organize edilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Yine XVIII. yüzyılda Tissot, meslek hastalıklarının tedavisi için hastanelerde özel bölümler kurulmasını öneren ilk kişi olmuştur (Turgut, 2022).

Sanayi Devrimi sonrasında iş sağlığı ve güvenliği konusunda yasal düzenlemelelere Avrupa'da İngiltere öncülük etmiştir. Percival Pott'un baca temizleyicisi çocuk işçilerin kansere yakalanma riskini araştırması sonucunda 1788'de Baca Temizleyicileri Kanunu çıkarılmıştır. Doktor Thomas Percival, özellikle yedi yaşın altındaki çocuklar ve genç işçilerin çalışma koşullarıyla ilgili araştırmalar yapmış ve bu çalışmaların sonucunda Çırakların Sağlığı ve Morali kanunu 1803 senesinde yürürlüğe girmiştir. Bu yasa, iş sağlığı ve güvenliği konusunda ilk hukuksal düzenleme olarak kabul edilir ve çırakları sağlık ve moral bakımını korumayı amaçlamaktadır (Turgut, 2022).

İngiltere'deki bu gelişmeler Avrupa'nın diğer ülkelerine de örneklik teşkil etmiş, İsviçre 1840'ta, Fransa 1842'de (Villermé Raporu), Almanya ise 1849'da iş sağlığı ve güvenliğiyle ilgili kanunlar çıkarmıştır. 1919'da, Harvard Üniversitesi'nin ilk kadın öğretim üyesi Alice Hamilton'ın madenlerde ve suni ipek sanayinde yaptığı çalışmalar sonucunda ABD'de iş sağlığı ve güvenliği konusunda gelişmeler yaşanmıştır. Aynı dönemde Rusya'da Alexander Semashko, koruyucu sağlık hizmetlerine yönelik politikalar geliştirmiş ve bu politikaların uygulanması için birçok araştırma merkezi ve enstitü kurulmuştur. Dünya genelinde ise 1919'da kurulan Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO), 1946'da BM ile yaptığı anlaşma ile bağımsız bir uzmanlık kuruluşu olmuştur (Turgut, 2022 ; Çiçek, ve Öçal, 2016).

2.3 Türkiye'de İSG Alanındaki Çalışmalar

Sanayi Devrimi çalışma süreleri, barınma koşulları ve işçi haklarıyla ilgili düzenlemelerin en önemli tetikleyicisidir. Bu alanda yapılan ilk düzenleme, 1865 yılında Tanzimat Dönemi'nde hazırlanan "Dilaver Paşa Nizamnamesi"dir. Ereğli Kömür Havzası'nda uygulanan bu tüzükte, işçilerin günlük çalışma süresi 10 saat

olarak belirlenmiş, dinlenme süreleri ve yatacak yer sağlanması ve işçilere çalıştırılmasalar bile işe hazır olmaları durumunda ücret ödenmesi kararlaştırılmıştır. "Maadin Nizamnamesi" ile 1869 tarihinde iş güvenliği kurallarının eksikleri giderilerek daha ayrıntılı hale getirilmiştir. 1876'da yürürlüğe giren "Mecelle Kanunu" ise işverenin, çalışanın zararlarını tazmin etme yükümlülüğünü getirmiştir (Turgut, 2022).

1921'de çıkarılan "Ereğli Havza-i Fahmiyesi Maden Amelesinin Hukukuna Müteallik Kanun" ile maden işçilerine yönelik düzenlemeler getirilmiş, işçilerin 18 yaşından küçük olmaması ve günlük çalışma süresinin 8 saatle sınırlandırılması gibi önemli kararlar alınmıştır (Çiçek ve Öçal, 2016). Cumhuriyet'ten sonra ise ilk çalışmalar 1923'te İzmir İktisat Kongresi'nde başlamış, 1924'te "Hafta Tatili Kanunu" ve 1925'te "Ulusal Bayram ve Genel Tatiller Hakkında Kanun" yürürlüğe girmiştir. 1926'da "Borçlar Kanunu" ile işverenlerin yükümlülükleri artırılmış ve işçinin karşılaşılabileceği tehlikelere karşı işverenin tedbir alması gerektiği hükme bağlanmıştır (Turgut, 2022).

1930'da yürürlüğe giren "Umumi Hıfzıssıhha Kanunu", kadın ve çocukların korunması, işyeri hekimlerinin bulundurulması ve büyük işyerlerinde sağlık hizmetlerinin sağlanması gibi konularda düzenlemeler getirmiştir. 1936'da çıkarılan "İş Kanunu" ise Türkiye'de bu alanda çıkarılan ilk kapsamlı kanun olup, iş sağlığı ve güvenliği konusunda birçok tüzük ve yönetmelik çıkarılmasına öncülük etmiştir (Turgut, 2022).

1971'de yapılan "1475" sayılı İş Kanunu ve buna dayalı tüzük ve yönetmelikler, iş sağlığı ve güvenliği alanında önemli adımlar atmıştır. 2003 yılında kabul edilen "4857" sayılı İş Kanunu ve buna dayalı olarak çıkarılan yönetmelikler, iş sağlığı ve güvenliği çalışmalarını desteklemiştir. 2012'de Borçlar Kanunu'nda yapılan düzenleme ile işverenlerin iş sağlığı ve güvenliği için tüm gerekli önlemleri alması, işçilerin de bu önlemlere uyması yükümlülüğü getirilmiştir. Aynı yıl yürürlüğe giren "6331" sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu, "4857" sayılı Kanun'daki yetersiz düzenlemelerin yerini alarak daha kapsamlı düzenlemeler getirmiştir (Turgut, 2022; Çiçek, ve Öçal, 2016).

2.4 Rüzgâr Enerji Santrallerinde İSG Çalışmaları Aşamaları

Rüzgâr enerji santrali (RES) alanındaki İSG ve işlemleri düşünüldüğünde temel beş düzeye veya aşamaya ayrılabilir ve detaylandırılabilir.

2.4.1 Rüzgâr enerji santrali ekipman üretim aşaması meslek hastalığı ve kazaları
Bu sektörde taşlama, kalıplama, reçine hazırlama gibi bölümlerde çalışan işçilerin epoksi, reçine, sertleştirici (izosiyanat), cam elyaf ve metal tozu gibi maddelere maruz kaldığı ve bu maruz kalımlar sonucunda cilt ve solunum yollarında mesleki hastalıklara yol açtığı görülmüştür.

2.4.2 Rüzgâr enerji santrali inşaat süreci ve kurulum kazaları

Kurulumlar genel olarak kule içi kanat içi gibi kapalı alanlarda yapılmaktadır. Bu nedenle çalışanların maske ve kulaklık gibi ekipmanları kullanması zorunludur. Çalışma alanlarındaki sıcak/soğuk hava koşulları göz önüne alınarak ortamdaki oksijen seviyesi sürekli izlenmelidir. Ayrıca kapalı çalışma alanlarının güvence altına alınması adına Acil Durum Eylem Planları yapılmalıdır.

2.4.3 Rüzgâr enerji santrali ekipmanları lojistik kazaları

Taşınan rüzgâr türbin parçalarının çok büyük ve ağır olmaları trafikte kaza yapma ihtimallerini yükseltmektedir. Araçların dönerken herhangi bir yere çarpması kanata zarar vereceği gibi çevreye, insanlara, araçlara da zarar verebilmektedir. Bu nedenle rüzgâr türbinin taşınmasına ilişkin gece saatlerinde ve trafiğin yoğun olmadığı, koruyucu aracın eşlik ettiği güzergahlarda taşınmalıdır. Ayrıca taşıma aracını kullanan personelin en fazla 8 saat aracı kullanması ve her saat 15 dakika mola vermesi gerekmektedir. Taşımayı yaparken dikkat dağıtıcı (telefon kullanımı, yeme-içme gibi) unsurlardan kaçınılmalıdır (Öztürk ve diğ., 2021). Bu hususlar iş sağlığı ve güvenliği kapsamında personellerin uyması gereken prosedürler arasındadır (Karayolları Trafik Yönetmeliği, mevzuat, 2014).

Sevkiyatta kullanılan araçlar araziye, yola uygun ve iklim şartlarına uygun lastikler seçilmelidir. Sürücünün psikoteknik kontrolleri ile araçların bakımları düzenli olarak yapılmalıdır. Sürücünün araç eğitimleri sağlanmalıdır. Taşınan parçaların kurulum ve bakım süreçlerinde de riskler bulunmaktadır. Kurulan parçaların çok büyük ve ağır olması, yükseğe montajları sırasında büyük tehlikeler oluşturmaktadır. Parçaların düşmesi, yangın çıkması ve oluşan gürültüler çalışanlar için risklerin artmasına neden olmaktadır (Karayolları Trafik Yönetmeliği, mevzuat, 2014).

2.4.4 Rüzgâr enerji santrali işletme ve bakım kazaları

Türbinlerin bakım süreçlerinde ise, türbinlerin tiplerine ve teknolojilerine göre farklılık gösterebilmektedir. Genelde rüzgâr türbinleri üç aylık zaman dilimlerinde bakıma sokulmaktadır. Ek olarak dört beş yılda bir, detaylı mekanik bakımları yapılmaktadır. Rüzgâr türbinlerinde buzlanma yüzünden de riskler bulunmaktadır. Rüzgâr türbinlerinin kurulduğu bölgeler yüksek, soğuk ve nemli olabilmektedir. Bu koşullar, türbin kanatlarında buzlanmaya neden olabilmektedir. Buzlanmaya karşı gerekli önlemler alınmadığı takdirde, oluşan buz kütlelerinin düşmesi veya fırlaması sonucu çevrede bulunan canlılara, tesislere ve ekipmanlara zarar verme riski bulunmaktadır.

Türbinlerin ve santrallerin yıldırımlara ve aşırı gerilimlere karşı korunabilmesi adına topraklama sistemi, eş potansiyel sistem, iç yıldırımlık ve dış yıldırımlık sistemleri tesislerde kullanılmaktadır. Kurulan bu sistemlerin düzenli olarak senede en az bir kez olmak üzere bakımları yapılmalıdır. Tesis devreye alındıktan son-

ra yönetim binasında az sayıda çalışan, güvenlik görevlileri ve planlı plansız bakımlar için bulundurulmuş ekipler dışında çalışan bulunmamaktadır. Tesiste genel olarak rutin kontroller ile uğraşan çalışanlar, yüksek risk altında olmamalarına karşın, yerleşim yerlerinden uzak oldukları için psikososyal zorluklar çekmektedirler. Ayrıca türbinlerin yaratmış olduğu gürültü yüzünden uykusuzluk ve baş ağrısı gibi problemlerde yaşamaktadırlar. Planlı plansız bakımdan sorumlu ekipler yüksekte çalışma, kötü hava koşulları gibi tehlikelerle mücadele etmektedir.

2.4.5 Rüzgâr enerji santrali söküm ve hurda taşıma kazaları

Rüzgâr enerji santrallerinde türbin kanatlarının ve parçalarının zor hava koşullarına karşı dirençli olması nedeniyle ülkemizde henüz hurdaya çıkmış olan bir türbin bulunmamaktadır. Hurdaya ayrılan türbinlerdeki parça sayılarının ağır ve çok olması taşırken farklı kazalara da sebebiyet verebilmektedir. Paslanma kaynaklı ve söküm sırasında sıkışan bağlantı noktalarına önlemler alınarak dikkatlice hurdaya ayırma işlemleri yapılmalıdır.

2.5 Rüzgâr Enerji Sektöründe İş Sağlığı ve Güvenliği Mevzuatı

20 Haziran 2012 tarihli TBMM tarafınca yapılan "6331" Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu, 30 Haziran 2012'de Resmî Gazete'de yayımlanmıştır. Bu kanun, iş yerlerinde çalışanların sağlık ve güvenliğini teminat altına almayı hedefler ve işveren ile çalışanların hak ve sorumluluklarını düzenler. "6331" Sayılı Kanun, kamu ve özel işyerlerinde; işverenler, işveren temsilcileri, çalışan, stajyer ve asistanlar dahil olmak üzere herkes için geçerlidir (Öztürk ve diğ., 2021; İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu,2012).

Rüzgâr enerji santralleri, "35.11.19 NACE" kodu ile "elektrik enerjisi üretimi" kapsamında çok tehlikeli sınıftaki iş yerleri arasında yer almaktadır. Bu kapsamda, iş güvenliği uzmanları için hizmet süreleri, çalışan başına ve tehlike sınıfına göre sırasıyla 10 dakika, 20 dakika ve 40 dakika olarak belirlenmiştir. İşyeri hekimleri için bu süreler çalışan başına 5 dakika, 10 dakika ve 15 dakika şeklindedir. Vardiyalı çalışma yapılan işyerlerinde, işverenin vardiyalara uygun şekilde görevlendirme yapması gerekmektedir. Az tehlikeli sınıfta yer alan ve 50'den az çalışanı bulunan işyerlerinde hizmetlerin verilmesini kolaylaştırmak amacıyla, aylık hizmet sürelerinin birleştirilmesi mümkündür. Bu durum, hizmet sağlayıcının işveren ile anlaşması hâlinde uygulanabilir. Örneğin, iş güvenliği uzmanının işyerini yılda 2 saat veya altı ayda bir 1 saat ziyaret etmesi yeterli kabul edilmektedir (Öztürk ve diğ., 2021; İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu,2012;Avrupa Birliği Yenilenebilir Enerji Direktifi, 2017).

Avrupa Birliği mevzuatında ise, rüzgâr enerji sektörüne dair doğrudan bir yasal düzenleme bulunmamaktadır. Ancak 2009/28/EC sayılı Yenilenebilir Enerji Direktifi, çevre dostu ve sürdürülebilir enerji politikalarının yaygınlaştırılması

amacıyla yenilenebilir enerji sektörünün gelişimini desteklemektedir (Öztürk ve diğ. 2021; Avrupa Birliği Yenilenebilir Enerji Direktifi, 2017).

2.6 Rüzgâr Enerji Sektöründe Kayıtlara Geçmiş Bazı Kaza ve Olaylar

RES iş kazalarının 2000 ile 2014 yılları arasındaki RES iş kazaları sayıları gerçekleşme sebeplerine göre dağılımları Tablo 1’de verilmiştir (Muratdağı, 2025).

Tablo 1. 2000 ile 2014 Yılları Gerçekleşme Sebeplerine Göre RES İş Kazaları Dağılımı

Yıllar	Türbin Kanatları Hasarları	Yangın Kazaları	Kule Yapısı Hasarları	Buzlanma Kazaları	Saha Ulaşım Kazaları
2000	4	3	9	0	4
2001	6	2	3	0	-
2002	15	24	9	2	3
2003	13	17	7	2	6
2004	15	15	4	4	6
2005	12	14	7	4	11
2006	16	12	9	3	12
2007	22	21	13	0	13
2008	20	17	9	3	14
2009	26	17	16	4	19
2010	20	13	9	1	10
2011	19	20	11	1	11
2012	28	19	10	1	11
2013	30	23	14	0	24
2014	28	18	12	1	17

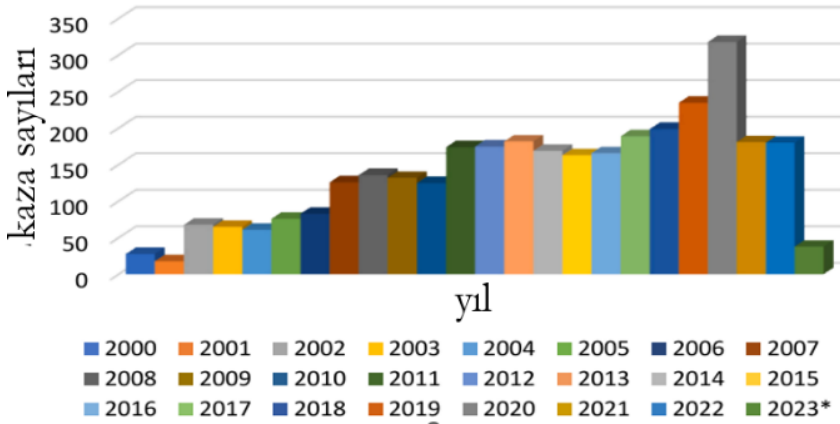
Türbin kanatları hasarları ve yangın kazaları zamanla artış gösterirken, özellikle 2013 yılında türbin kanatları hasarlarının zirveye çıktığı gözlemlenmektedir. Kule yapısı hasarları yıllar içinde dalgalanma göstererek 2013 yılında en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Buzlanma kazaları ise genellikle düşük sayılarda seyretmiş ve küçük artışlar göstermiştir. Saha ulaşım kazaları da 2009 ve 2013 yıllarında önemli bir artış yaşamış ve tutarlı bir seyir izlemiştir. Bu veriler, türbin kazaları-

nın farklı alanlarda yoğunlaşabildiğini ve her bir kaza türünün farklı risk faktörleriyle ilişkili olduğunu göstermektedir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1 İstatistikler

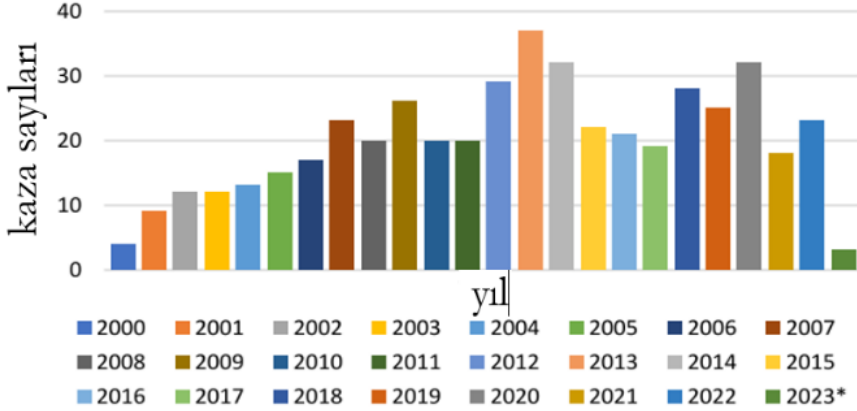
Dünya genelinde 1 Ocak 2000 yılı ile 31 Mart 2023 yılları arasında rüzgâr enerji sahalarında meydana gelen kazalara, Şekil 4'e baktığımızda yıllar içerisinde kaza sayıları 2020'ye kadar artmaktadır. Buradaki temel sebep devreye alınan santiral sayısındaki artış ve sektörde işe başlayan insan sayısıdır. Fakat son yıllarda iş sağlığı ve güvenliği eğitimleri ile önlemlerinin artırılmasından dolayı, 2013 sonrası kaza sayılarında önceki yıllardaki artışa oranla düşüş görülmüştür. 31 Mart 2023 yılına kadar rüzgar enerji sahalarında yaşanan toplam kaza sayısı 3287 olup bu kazaların en önemli 3 türü: kanat parçalanması, yangın ve yapısal kazalardır. CWIF (Caithness Windfarm Information Forum) 2023 verilerine göre bahsedilen kaza grafikleri Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6 ile verilmiştir (Muratdağı, 2015; CWIF,2023).



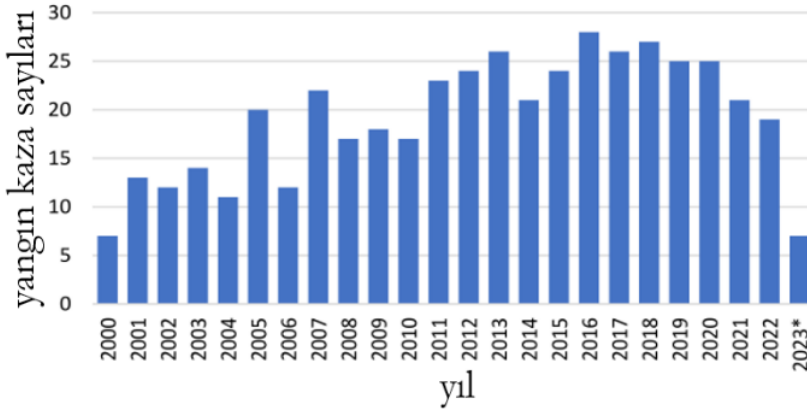
Şekil 4. 2000–31 Mart 2023 Arası Dünya’da Yaşanan Kaza Sayıları (CWIF,2023).

Kanat parçalanmasından kaynaklı 31 Mart 2023 tarihine kadar toplam 481 kazanın olduğu tespit edilmiştir (CWIF,2023). Bu kazaların yıllara göre sayıları aşağıda bulunan Şekil 5’de görülmektedir. Kanat arızası neticesinde türbinlerden kanat parçalanması ve parçaların etrafa saçılması riski bulunmaktadır. Bu konuya ilişkin ise 370 vaka tespit edilmiştir ve kanat parçalarının 1 mil kadar savrulduğu belgelenmiştir. Yaşanan kanat parçalanması üzerine ilişkin Almanya’daki olayda kanatlar insanların yaşadıkları binaların çatılarına düşmüştür. Bu sebeple rüzgar türbinlerinin yerleşim yerlerinden uzağa kurulması gerekliliği ortaya çıkmıştır (Muratdağı, 2015).

Rüzgâr türbinlerindeki olaylarda ikinci sırada yangın kazaları yer almaktadır (You, Shaik, Rokonuzzaman, Rahman, ve Tan, 2023). Bu kazaların yıllara göre dağılımı Şekil 6'da görülmekte olup 31 Mart 2023 tarihine kadar toplamda 459 kazanın meydana geldiği görülmüştür (EWEA, 2009). Bu alanda en ölümlü iş kazaları Çin'de gerçekleşmiştir.

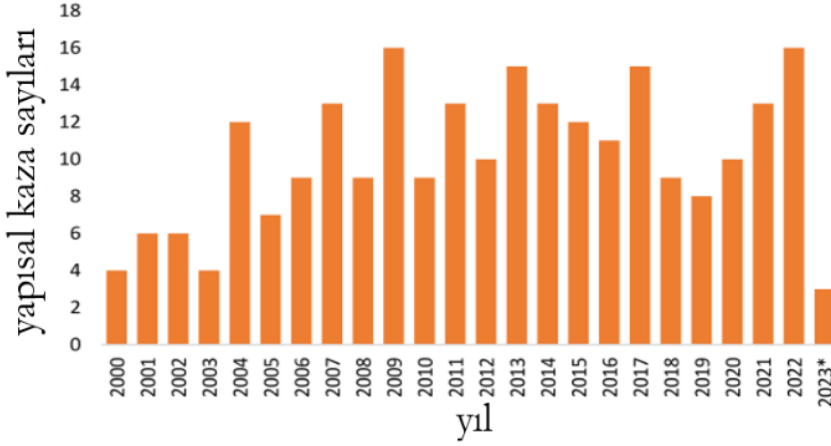


Şekil 5. 2000–31 Mart 2023 arası Dünya’da Yaşanan Kanat Parçalanması Kaza Sayıları Yıl (CWIF,2023)



Şekil 6. 2000–31 Mart 2023 arası Dünya’da Yaşanan Yangın Kaza Sayıları Yıl (CWIF,2023)

Rüzgâr enerji sahalarında üçüncü sırada en çok meydana gelen kaza türü olan yapısal kazalar ise Şekil 7’de görülmekte olup toplam kaza sayısı ise 243’tür (EWEA, 2009). Bu kazaların başlıca nedenleri olarak kurulum aşamasında yaşanan aksaklıklar, bakım onarım eksikliği ve kule çökmesi gibi sorunlar görülmektedir.



Şekil 7. 2000–31 Mart 2023 Arası Dünya’da Yaşanan Yapısal Kaza Sayıları Yıl (CWIF,2023)

Rüzgâr enerji sahalarındaki meslek hastalıkları üzerine 2012-2017 yılları arasında gerçekleşen ve kayıt altına alınan verilere bakıldığında, 2013 ve 2017 yıllarındaki vaka sayıları 2012 yılına göre yaklaşık 5 kat arasında artış göstermiştir. Veriler incelendiğinde 2013 verilerine göre vaka artışları kısmen azalırken 2017’de önemli bir artış söz konusu olmuştur. Vaka sayılarına ilişkin veriler Tablo 2’de görülmektedir (Gül, 2018).

Tablo 2. 2012-2017 Arasında Gerçekleşen Meslek Hastalık Sayıları (Gül, 2018).

Yıllar	Meslek Hastalığı Vaka Sayıları
2012	6
2013	27
2014	19
2015	13
2016	17
2017	36

Tablo 3’de görüldüğü üzere yaşanan toplam 148 ölümcül kazanın sonucunda sektörden 195 kişi hayatını kaybetmiştir. Ayrıca diğer 73 kişi ise sektör dışı, santral civarında kazaya uğrayanlardır. Tablo 3’te 2005 ile 2012 arası veriler öncesi ve sonrası arasında korelasyon analizi yapılmıştır. Burada aynı zamanda Türkiye ve dünyada 2005 ile 2012 yılları İSG kanunlarının gündem geldiği ve bu alandaki eğitimlerin yoğunlaşmaya başladığı aynı zamanda dünya rüzgâr ener-

jisi kurulumlarının nerdeyse üstel artışa geçtiği bir dönemi işaret etmektedir. Rüzgar enerjisi ve ilgili konularda daha detaylı bilgi için kaynaklar incelenebilir (EWEA, 2009; Durak, ve Özer, 2012; Aytekin, Toğral, Yılmaz, 2015; Çelik, ve Utlu.,2013;Muratdağı, 2025;Gül, 2018; Beyan ve diğ. 2019; Aslan, ve Büyükkıncı, 2018; Karabal, 2021;Eyüboğlu ve Özfirat, 2023; Genç, Gündoğan ve Girgin, 2023).

Tablo 3. Yıllara Göre Yaşanan Ölümlü ve Yaralanmalı Kaza Sayıları (Öztürk ve diğ., 2021;Gül, 2018).

Yıllar	Ölümlü Kaza Sayıları	Yaralanmalı Kaza Sayıları	RES Toplam Kaza sayıları
2000 Öncesi	24	5	109
2000-2004	12	11	243
2005	4	6	71
2006	5	10	83
2007	5	16	125
2008	11	18	131
2009	8	9	131
2010	8	14	120
2011	15	12	170
2012	17	15	168
2013	5	9	174
2014	3	9	164
2015	8	9	153
2016	6	10	164
2017	9	13	185
2018	3	4	194
2019	5	7	181

3.2 Analiz

Tablo 3'te verilen istatistiksel tüm veriler arasındaki ilişki korelasyon analizi ile ortaya konulmaya çalışılmıştır. Korelasyon analizi sonuçları Tablo 4'te verilmiştir. Buna göre tüm veriler için, Ölümlü kaza sayıları ile yaralanmalı kaza sayıları arasındaki korelasyon 0,606'dır. Bu değer, pozitif bir orta düzeyde korelasyonu işaret eder. Yani ölümlü kaza sayıları arttıkça yaralanmalı kaza sayılarının da arttığı gözlemlenmiştir, ancak bu ilişki çok güçlü değildir.

Tablo 4'e göre vurgulanan kısım, 2005-2012 yılları arasındaki ölümlü kaza sayıları ile yaralanmalı kaza sayıları arasındaki korelasyon 0,433'tür. Ölümlü kaza sayıları arttıkça yaralanmalı kaza sayılarının da artma eğiliminde olduğunu gösterir, ancak bu ilişki zayıf olarak nitelendirilebilir. Aynı zamanda iş sağlığı ve güvenliği eğitim ve önlemlerinin hissedildiği dönem olup, sektördeki üstel büyüme ve RES-İSG eğitimi almış çalışanların piyasada olamaması ile de açıklanabilir.

Tablo 4. Yıllara Göre Yaşanan Ölümlü ve Yaralanmalı Kaza Sayıları Arsındaki Korelasyon Analizi

Yıl Aralığı		Ölümlü Kaza Sayıları	Yaralanmalı Kaza Sayıları
2005-2019	Ölümlü Kaza Sayıları	1	
	Yaralanmalı Kaza Sayıları	0,606117484	1
2005-2012	Ölümlü Kaza Sayıları	1	
	Yaralanmalı Kaza Sayıları	0,433131371	1
2013-2019	Ölümlü Kaza Sayıları	1	
	Yaralanmalı Kaza Sayıları	0,741440285	1

Tablo 4'e göre c kısmı, 2013-2019 yılları arasındaki ölümlü kaza sayıları ile yaralanmalı kaza sayıları arasındaki korelasyon 0,741'dir. Ölümlü kaza sayıları arttıkça yaralanmalı kaza sayılarının da arttığı gözlemlenmiştir ve bu ilişki oldukça güçlüdür. Bu da İSG önlemlerinin arttığı ama sektörde türbin boyutlarının büyüdüğü döneme karşılık gelmektedir. Bu kazaların ilk defa karşılaşılan durumlar olmasını göstermektedir.

Sonuç olarak tüm veriler arasında orta düzeyde bir korelasyon görülmektedir. Diğer taraftan 2013-2019 yılları arasında ise korelasyon güçlü ve ölümlü kazalar ile yaralanmalı kazalar arasında daha belirgin bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir.

Bir bakımdan iş sağlığı ve güvenliği konusu düşünüldüğünde, enerji sektörü ve birçok sektörde o alanın sağlık biriminde ve bilimlerinde de uzmanlaşma ve gelişmesinin öngörülmesi gerekmektedir. Fakat sektörün yeni olması kendi özelinde olan farklı riskleri barındırması gelecekte bu sahalar için özel uzman istihdamını da gerektirebilir.

Bu alanda ortaya çıkabilecek zorluklara bakacak olursak; çalışma yerlerinden uzak olmaları, zor hava şartları, yüksekte çalışma, yabani hayvanlar ve işin yapılabacağı alanlara ulaşım zorlukları vb. bulunmaktadır. Sağlık sektöründe ise RES iş kazalarına özgü ilkyardımdan tedavi ve rehabilitasyon için uzmanlıklar ele alınmalıdır. Bu konuda daha detaylı bilgi için verilen kaynaklar incelenebilir.

4. Sonuç

İnsanoğlunun artan enerji gereksinimi düşünüldüğünde, tüketilen fosil yakıtların gelecek yıllarda tükenerek olması ve bu yakıtların çevreye vermiş olduğu zararlardan ötürü yenilebilir enerji kaynaklarına yönelim sağlamıştır. Yenilenebilir bir enerji kaynağı olan ve yatırımları hızla artan rüzgâr enerjisi ile elektrik üretimi ülkemizde de hızlı bir biçimde artış göstermiştir. Rüzgâr enerji sektöründe meydana gelen iş kazalarına baktığımızda; taşıma sırasında oluşan kazalardan, tesis-te kurulum aşamasında oluşan kazalara, buzlanma, yangın, yıldırım, elektriksel arızalar gibi birçok kaza türleri yaşanmaktadır. Bu kaza türlerinin yaşanmaması adına alınabilecek önlemlerden en temel olanı İSG eğitimlerinin personellere düzenli olarak verilmesinden geçmektedir. Eğitim alan çalışanların eğitim dışında, donanımlı olmaları da gerekmektedir. Verilen eğitimler ile çalışanların farkındalıkları artırılmalı ve oluşabilecek riskler minimum duruma düşürülmelidir.

Ayrıca rüzgâr türbininden elde edilen enerji, elektrik enerjisine dönüştürüldüğünden ekstra dikkatli olunması gerekmektedir. Bu sebeple yönetmelik ve kanunların dikkatlice incelenmesi ve denetimlerin sıklıkla kontrolü sağlanmalıdır. Çalışma şartları ve koşulları sürekli iyileştirmeli ve riskler en aza indirgenmelidir.

Rüzgâr türbin üretim aşamasında kullanılan malzemelerden kaynaklı yaşanabilecek olan meslek hastalıklarının önüne geçmek amacıyla koruma önlemi olması için nitril eldiven, uzun kollu iş tulumu, filtreli toz maskesi ve vücudun açıkta kalan yerlerini özellikle soğuk yanığı, güneş yanığı veya kimyasal maddelere maruz kalma gibi durumlara karşı bariyer kremler ile korumak önerilmektedir.

Rüzgâr enerji sahalarında kanat parçalanmasından dolayı parçaların çevreye saçılarak etrafındaki canlılara ve yapılara zarar gelmesinin önüne geçmek amacıyla CWIF, rüzgâr santrallerinin yerleşim alanından minimum 2 km uzağa inşa edilmesi bilgisi uygulanmalıdır. Böylece insanların güvenlik endişeleri giderilmelidir.

Kanatlarda meydana gelen buzlanma riskine karşı türbin kanatlarına ısı sensörleri yerleştirilmektedir ve buzlanmanın önlenmemesi durumunda türbin otomatik olarak durmaktadır. Buzlanmanın olabileceği hava koşullarında zorunlu olmadıkça çalışanlar türbin civarında çalışmamalıdır ve uyarı ikaz levhaları ile kazaların önlenmesi amaçlanmalıdır. Hurdaya ayrılacak türbin parçaları adına her ne kadar ülkemizde henüz hurda dönüşümü için uzun yıllar olsa da ülkemiz adına da hazırlıklar yapılmalıdır.

Rüzgâr enerjisi santrallerinde (RES), iş sağlığı ve güvenliği (İSG) kapsamında tedbirler, risk yönetimi ve ilgili mevzuat hakkında bilgilendirici eğitimler düzenlenmektedir. Ancak, marjinal rüzgâr hızları ve yıldırım risklerine ilişkin araştırmaların yanı sıra, kazalar üzerine yapılan incelemelerin daha kapsamlı hale getirilmesi ve güçlendirilmesi gerekmektedir.

Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; Bayram KÖSE, bilimsel yayın araştırması, modelin kurulması, makalenin oluşturulması, makalenin sonuçların analizi ve yorumlanması; Can UZUN, verilerin toplanması, Ahmet Orhan İNCİ, verilerin toplanması, bilgisayara ortamına aktarılması, konularında katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynakça

- Aslan, E., & Büyükkakıncı, B. Y. (2018). Rüzgâr enerji santrallerinde çalışma güvenliği alanında verilen eğitimlerin personel üzerindeki etkileri. *Anadolu Bil Meslek Yüksekokulu Dergisi*, 13(51), 1-15.
- Avrupa Birliği Yenilenebilir Enerji Direktifi. (2009). 2009/28 / EC, Avrupa Birliği içinde yenilenebilir enerji kullanım seviyelerini zorunlu kılan bir Avrupa Birliği direktifi. (2009, 23 Nisan).
- Aydın, M. G. (2020). Rüzgâr enerji santrallerinde işçi sağlığı ve iş güvenliği açısından riskler ve bir örnek alandaki risk değerlendirmesi , *YL tezi, İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü*.
- Aytekin, A., Toğral, A., & Yılmaz, Ö. (2015). Epoksi Reçineleri ve Mesleki Dermatozlarla İlişkisi. *Ankara Medical Journal*, 15(2).
- Beyan, A. Coşkun., Bahadır, H., Çımrın, A. (2019). Rüzgar Tribünü Üretim İş ve Meslek Astimi Riski: Yeşil Enerji Ne Kadar Yeşil? *İzmir Göğüs Hastanesi Dergisi*, 33(2), 103-109.
- CWIF, (2023). <http://www.caithnesswindfarms.co.uk/AccidentStatistics> (erişim: Mayıs, 2024)
- Çelik, Ö., & Utlü., Zafer, (2013). Rüzgar Enerji Santrallerinde İş Sağlığı Ve Güvenliği Uygulamaları. *İstanbul Aydın Üniversitesi Dergisi*, 5(19), 57-64.
- Çiçek, Ö., ve Öçal, M. (2016). Dünyada ve Türkiye’de İş Sağlığı ve İş Güvenliğinin Tarihsel Gelişimi. *HAK-İŞ Uluslararası Emek ve Toplum Dergisi*, 5 (11): 107-129. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/263389>
- Demir, Mehmet Ali., Yakışık, Harun (2024). *Enerjinin Tarihsel Gelişimi, İnsan ve Toplum Bilimleri Araştırmaları Dergisi*, 13 (3), 1333-1353. <https://doi.org/itobiad.1500506>

- Durak, M., Özer, S., (2012), Rüzgar Enerjisi: Teori ve Uygulama, https://enerji.mmo.org.tr/wp-content/uploads/2021/05/RUZGAR-ENERJISI-TEORI-VE-UYGULAMA_MURAT-DURAK-PDF.pdf
- EWEA. (2009). Krohn, S. (editor), Morthorst, P. E., and Awerbuch, S., "The economics of wind energy", A Report By The European Wind Energy Association, (2009).
- Eyüboğlu, A. K., & Özfirat, M. (2023). Rüzgâr Enerjisi Tesislerinde Başlıca Tehlikelerin HTEA Risk Analiz Yöntemi İle Değerlendirilmesi. *Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 1(1), 1-11.
- Genç, M., Gündoğan, M., Girgin, Ö. (2023). Rüzgar Türbini Temellerinde Sık Karşılaşılan Yapısal Problemler, 7. İzmir Rüzgâr Sempozyumu, 21-22 Eylül 2023, İzmir
- Gül, F. (2018). Yenilenebilir Enerji Kaynakları Kullanımında İş Sağlığı ve Güvenliği Uygulamalarının Araştırılması (Doctoral dissertation, *Necmettin Erbakan University* (Turkey)).
- Gül, Fatih., (2018), Yenilenebilir Enerji Kaynakları Kullanımında İş Sağlığı ve Güvenliği Uygulamalarının Araştırılması, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, YL tezi
- İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu. (2012). Resmi Gazete (Sayı:28339) (30.06.2012), Kanun no:6331, İş Güvenliği Uzmanlarının Görev, Yetki, Sorumluluk ve Eğitimleri Hakkında Yönetmelik. (2012, 29 Aralık). Resmî Gazete (Sayı: 28512).
- Karabal, A. (2021). İş sağlığı ve iş güvenliği. *Uluslararası Batı Karadeniz Sosyal ve Beşeri Bilimler Dergisi*, 5(1), 1-21.
- Karayolları Trafik Yönetmeliği. (2014). Araç Kullanma Sürelerine Uyuma Mecburiyeti Ve Denetleme Esasları, <https://mevzuat.gov.tr/anayasa/MevzuatFihristDetayIframe?MevzuatTur=7&MevzuatNo=8182&MevzuatTertip=5> (erişim 4 Ekim 2024)
- Köse, B., (2018) Rüzgar Hız Ve Potansiyelinin Stokastik Süreçlerle Modellenerek Karabük İlinde Uygulanması, *Karabük Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü/Enerji Sistemleri Mühendisliği, Doktora Tezi*
- Köse, Faruk, Özgören, Muammer, (2010), Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Ölçümü ve Rüzgâr Türbini Seçimi, *Mühendis ve Makina - Cilt: 46 Sayı: 551*
- Liu, P., & Barlow, C. Y. (2017). Wind turbine blade waste in 2050. *Waste Management*, 62, 229-240.
- Muratdağı, Tolga, (2015), Rüzgar Türbinlerinin Kurulum ve Bakım Süreçlerin-

deki Risklerin Tespiti, Değerlendirilmesi ve Çözüm Önerilerinin Sunulması Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi Ankara, 2015

Muratdağı, T. (2015). Rüzgar Türbinlerinin Kurulum ve Bakım Süreçlerindeki Risklerin Tespiti, Değerlendirilmesi ve Çözüm Önerilerinin Sunulması. İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi sayfa, 18-54.

Öztürk, E., Şimşek, H., Altuntaş, Ş. (2021). Rüzgâr Enerjisi Santrallerinin İş Sağlığı ve Güvenliği Bakımından Değerlendirilmesi. *İSG Akademik*, 3(1), 127-144.

Papp, T., Schiffmann, D., Weiss, D., Castranova, V., Vallyathan, V., Rahman, Q. (2008). Human health implications of nanomaterial exposure. *Nanotoxicology*, 2(1), 9-27.

Turğut, Melek Mengeş., (2022), Kalite Yönetim Sisteminin İş Sağlığı Ve Güvenliğinde Farkındalık Oluşturmaya Etkisi İstanbul Rumeli Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi,

TÜBA. (2019). TÜBA-Rüzgâr Enerjisi Teknolojileri Raporu. [https://tuba.gov.tr/files/yayinlar/ raporlar/TÜBA-Rüzgâr%20Enerjisi%20 Teknolojileri%20 Raporu.pdf](https://tuba.gov.tr/files/yayinlar/raporlar/TÜBA-Rüzgâr%20Enerjisi%20Teknolojileri%20Raporu.pdf)

Yakan, Akın. (2021) Rüzgar Enerji Santrallerinin Çevre Üzerinde Etkileri ve Hukuki Değerlendirmesi, 20 Aralık 2021, <https://akinyakan.av.tr/ruzgar-enerji-santrallerinin-cevre-uzerinde-etkileri-ve-hukuki-degerlendirmesi/> (erişim 4 Ekim 2024)

You, F. , Shaik, S., Rokonuzzaman, M., Rahman, K. S. and Tan, W. S., (2023) "Fire risk assessments and fire protection measures for wind turbines: A review," *Heliyon*, vol. 9, no. 9, p. e19664, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e19664.



KÖMÜR YAKMA SİSTEMLERİNDE VERİM TAHMİNİ DOĞRULUĞUNU ARTIRAN BİR YÖNTEM

Cem ONAT ^{1*}

¹ Adıyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Adıyaman
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-4295-4860>

Anahtar Kelimeler

Öz

Kömür, yakıcı, alev, görüntü işleme, yapay sinir ağı

Bu çalışmada, bir CCD (Yük Bağlısımlı Cihaz) kamera ile donatılmış evsel kömür yakma sisteminde alev görüntüsünden hava fazlalık katsayısının tahmin doğruluğunu artıran bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntem, kameradan elde edilen sayısal alev bilgisi ve baca gazı sıcaklığının hava fazlalık katsayısı ile ilişkisini ortaya koyan çoklu lineer regresyon bağıntısına dayanmaktadır. Bu bağıntı ile oluşturulan mimarinin basit yapısı pratik uygulamalar bakımından önemli bir avantajdır. Deneysel veriler üzerinden yapılan doğruluk çalışması önerilen sistemin geleneksel sisteme göre doğruluğu kayda değer biçimde artırdığını göstermektedir. Sonuç olarak, önerilen tahmin sistemi kullanılarak daha yüksek doğrulukta yanma durumu izleme sistemleri geliştirilebilir.

* conat@adiyaman.edu.tr
doi : 10.46399/muhendismakina.1557793

A METHOD INCREASING THE ACCURACY OF EFFICIENCY FORECAST IN COAL FIRING SYSTEMS

Keywords

Coal, combustor, flame, image processing, artificial neural network, forecast

Abstract

In this study, a method increasing the forecast accuracy of the excess air coefficient from the flame image in a domestic coal burning system equipped with a CCD (Charge Couple Device) camera has been proposed. The proposed method is based on a multiple linear regression formula that reveals the relationship between the digital flame information obtained from the camera and the flue gas temperature with the excess air coefficient.

The simple structure of the architecture created with this relation is an important advantage in terms of practical applications. The accuracy study based on experimental data shows that the proposed system significantly increases the accuracy compared to the traditional system. As a result, combustion status monitoring systems with higher accuracy can be developed using the proposed prediction system.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 29.09.2024

Kabul Tarihi : 26.11.2024

Research Article

Submission Date : 29.09.2024

Accepted Date : 26.11.2024

Extended Abstract

Coal burning systems are one of the energy production methods used especially in industry and residential heating. These systems produce heat energy by using coal as fuel and use this energy for various purposes. Coal burning systems can be broadly categorized into three main types. Grill type (stoker) boilers are widely used especially in small and medium-sized businesses and residences. Coal is fed continuously onto a grate, where it burns in a controlled manner. Although these systems are low cost and simple in structure, their combustion efficiency is low and their emission values are high. On the other hand, fluidized bed systems are systems in which coal is mixed with air in the form of small particles at high temperatures and combustion occurs. High combustion efficiency, low emission values and compatibility with different fuel types are the advantages of fluidized bed systems. However, their initial investment costs and operating costs are high. Another system is pulverized coal burning systems. In these systems, coal is ground into very thin powder and burned by mixing with air in the combustion chamber. The systems, which can provide consistently high combustion efficiency, are preferred in large power plants. The installation and operation of coal dust systems are more complex than others, and the storage and transportation of coal dust are risky operations.

The gases (carbon dioxide, sulfur dioxide, nitrogen oxides and particles) released during coal burning are very harmful to the environment. Therefore, in modern systems, emissions are controlled by using flue gas purification and filtering systems. Additionally, in modern coal burning systems, the combustion process is controlled automatically. In this way, emissions can be reduced while efficiency is increased. From this perspective, coal burning systems have become a more frequently discussed topic in recent years, especially due to their environmental impacts and interest in renewable energy sources. New technologies continue to be developed to both reduce emissions and increase efficiency. Combustion control designs are among the leading new technologies. In closed-loop combustion systems that aim to control the excess air coefficient (λ) at its ideal value, it is very valuable to extract instant information about combustion from the flame image. Because if air excess coefficient estimation information is produced from flame images, the structural time delay in the system can be eliminated. There are different regression models developed recently for estimating the air excess coefficient from the flame image. Onat and Daskin (2019) created a prediction model by combining the trace value of the gray scale flame image matrix and the flue gas temperature information through an artificial neural network. In this study, it was reported that the trace of the flame image matrix and the flue gas temperature information constitute a good combination in estimating the excess air coefficient. However, their proposed prediction system requires a low-pass filter. On the other hand, Golgiyaz, Talu, Daskin and Onat (2022) managed to predict the air excess coefficient value with 96% accuracy using only flame image features. However, the fact that the prediction model they propose requires 768 inputs makes the system extremely complicated. In this study; A new method is proposed to increase the prediction accuracy of the air excess coefficient from the flame image. The method uses the multiple linear regression formula and offers a practical way to increase prediction accuracy.

The analysis results based on experimental data show that the proposed method can improve the prediction accuracy by around 2.4%.

The system used to generate experimental data is given in Figure 1. Accordingly, hazelnut coal is transported to the combustion chamber through a spiral. The combustion chamber can be viewed via a CCD camera. On the other hand, instantaneous excess air coefficient (λ) and flue gas temperature (T) are measured with the help of a lambda sensor and a temperature sensor (thermocouple device) placed in the chimney. The trace value (M) of the gray scale matrix from the flame images taken from the CCD camera is calculated instantly and recorded in the database. Simultaneously, air excess coefficient and flue gas temperature information are recorded synchronously in the same data bank. In this experimental study, a total of 550 seconds of recording was created by producing data every second. In other words, the size of the M, T and λ vectors is 550x1.

The article, which presents a new method that increases the prediction accuracy of the excess air coefficient in combustion systems, is organized as follows: In the next section, the system is introduced and how data collection is done is presented. Then, the proposed method is explained. In the last section, the effectiveness of the proposed method is demonstrated based on experimental data.

1. Giriş

Kömür yakma sistemleri, özellikle sanayide ve konut ısıtmasında kullanılan enerji üretim yöntemlerinden biridir (Yılmaz ve Uslu, 2007). Bu sistemler, yakıt olarak kömürü kullanarak ısı enerjisi üretir ve bu enerjiyi çeşitli amaçlarla kullanıma sunar. Kömür yakma sistemleri genel olarak üç ana tipte kategorize edilebilir (Erken, 2016). Bunlar ızgara tipi kazanlar, akışkan yataklı sistemler ve toz kömür yakma sistemleridir. Izgara tipi (stoker) kazanlar özellikle küçük ve orta ölçekli işletmelerde ve konutlarda yaygın olarak kullanılır. Kömür, bir ızgara üzerine sürekli olarak beslenir ve burada kontrollü bir şekilde yanması sağlanır. Bu sistemler düşük maliyetli ve basit yapıya sahip olmalarına karşılık yanma verimleri düşüktür ve emisyon değerleri yüksektir. Diğer taraftan akışkan yataklı sistemler, kömürün küçük parçacıklar halinde yüksek sıcaklıkta havayla karıştığı ve yanmanın gerçekleştiği sistemlerdir. Yüksek yanma verimi, düşük emisyon değerleri ve farklı yakıt türleriyle uyumlu olabilmeleri akışkan yataklı sistemlerin avantajlarıdır. Ancak ilk yatırım ve işletme maliyetleri yüksektir. Diğer bir sistem de toz kömür yakma sistemleridir. Bu sistemde kömür çok ince toz haline getirilir ve yakma odasında hava ile karışarak yanar. Kararlı bir şekilde yüksek yanma verimi sağlayabilen bu sistemler büyük santrallerde tercih edilir. Toz kömür sistemlerinin kurulumu ve işletimi diğerlerine göre daha komplekstir ve de kömür tozunun depolanması ve taşınması riskli operasyonlardır.

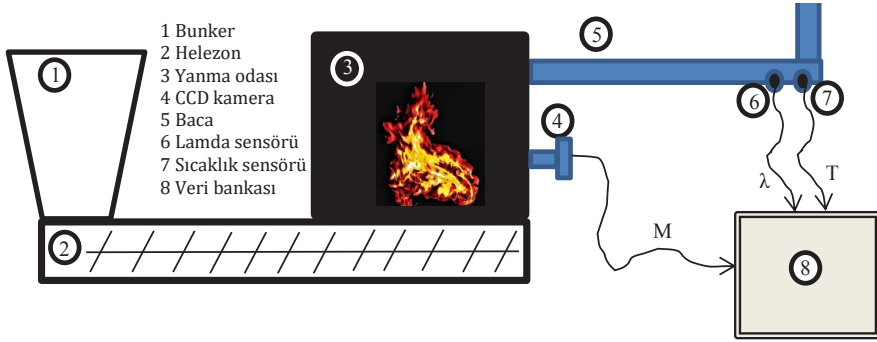
Kömür yakma sırasında açığa çıkan gazlar (karbon dioksit, kükürt dioksit, azot oksitleri ve partiküller) çevreye oldukça zarar verir (Clay, Lewis ve Severnini, 2024). Bu yüzden modern sistemlerde baca gazı arıtma ve filtreleme sistemleri kullanılarak emisyonlar kontrol edilmektedir. Ayrıca modern kömür yakma sistemlerinde, yanma süreci otomatik olarak kontrol edilmektedir. Bu sayede verimlilik artırılırken emisyonlar da azaltılabilmektedir (Yadav ve Mondal, 2019). Bu perspektiften, kömür yakma sistemleri, özellikle çevresel etkileri ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi nedeniyle son yıllarda daha sık tartışılan bir konu olmaktadır. Hem emisyonları azaltmak hem de verimliliği artırmak için yeni teknolojiler geliştirilmeye devam etmektedir. Yeni teknolojilerin başında yanma kontrolü tasarımları gelmektedir (You ve Xu 2010). Hava fazlalık katsayısını (λ) ideal değerinde denetlemeyi amaçlayan kapalı çevrim yakma sistemlerinde alev görüntüsünden yanmaya ilişkin anlık bilgilerin çıkartılması çok kıymetlidir. Zira alev görüntülerinden hava fazlalık katsayısı tahmin bilgisi üretilirse sistemdeki yapısal zaman gecikmesi ortadan kaldırılabilir (Talu, Onat ve Daskin, 2017; Onat, 2019). Alev görüntüsünden hava fazlalık katsayısının tahmini için son zamanlarda geliştirilmiş farklı regresyon modelleri vardır. Onat ve Daskin (2019) gri skala alev görüntüsü matrisinin iz değeri ve baca gazı sıcaklığı bilgilerini bir yapay sinir ağı aracılığıyla birleştirerek bir tahmin modeli oluşturmuşlardır. Bu çalışmada alev görüntüsü matrisinin izi ile baca gazı sıcaklığı bilgilerinin hava

fazlalık katsayısının tahmininde iyi bir ikili oluşturduğu raporlanmıştır. Ancak önerdikleri tahmin sistemi düşük geçiren bir filtreye muhtaçtır. Diğer taraftan Golgiyaz, Talu, Daskin ve Onat (2022) hava fazlalık katsayısı değerini sadece alev görüntüsü özelliklerini kullanarak %96 doğruluk ile tahmin etmeyi başarmışlardır. Ancak önerdikleri tahmin modelinin 768 adet girişe muhtaç olması sistemi fazlasıyla komplike kılmaktadır. Bu çalışmada; alev görüntüsünden hava fazlalık katsayısının tahmin doğruluğunu artırmak için yeni bir yöntem önerilmektedir. Yöntem çoklu lineer regresyon formülünden yararlanmakta olup tahmin doğruluğunu artırmanın pratik bir yolunu sunmaktadır. Deneysel veriler üzerinden yapılan analiz sonuçları önerilen yöntemin tahmin doğruluğunu %2.4 civarında iyileştirebileceğini göstermektedir.

Yakma sistemlerinde hava fazlalık katsayısının tahmin doğruluğunu artıran yeni bir metot sunan makale şöyle organize edilmiştir: Bir sonraki bölümde sistem tanıtarak veri toplamanın nasıl yapıldığı sunulmuştur. Ardından önerilen metot açıklanmıştır. Son bölümde deneysel veriler üzerinden önerilen metodun etkinliği gösterilmiştir.

2. Sistem ve Veri Toplama

Deneysel veri üretmek için kullanılan sistem Şekil 1’de verilmektedir. Buna göre fındık kömür bir helezon aracılığıyla yanma odasına sevk edilmektedir. Yanma odası bir CCD kamera aracılığıyla görüntülenebilmektedir. Diğer taraftan bacaya yerleştirilen bir lamda sensörü ve bir sıcaklık sensörü (termocouple cihaz) yardımıyla anlık hava fazlalık katsayısı (λ) ve baca gazı sıcaklığı (T) ölçülmektedir. Ölçümlerden önce gerekli sonda temizliği titizlikle yapıp emisyonuz ortamda kalibrasyonu yapılmıştır. Cihazın hava fazlalık katsayısını ölçerken kullandığı sensörlerin ölçüm aralığı, doğruluğu ve çözünürlüğü Tablo 1’de verilmektedir. CCD kameradan alınan alev görüntülerinden gri yelpaze matrisinin iz değeri (M) anlık olarak hesaplanıp veri-bankasına kaydedilmektedir. Bununla eş zamanlı olarak hava fazlalık katsayısı ve baca gazı sıcaklığı bilgileri senkronize biçimde aynı veri bankasına kaydedilmektedir. Bu deneysel çalışmada saniyede bir veri üretilerek toplam da 550 saniyelik bir kayıt oluşturulmuştur. Başka bir ifade ile M, T ve λ vektörlerinin boyutu 550x1’dir. Ayrıca belirtilmesi gerekir ki “bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur”.



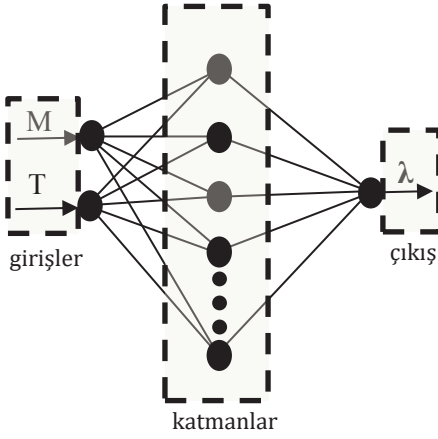
Şekil 1. Deney Sisteminin Şematik Gösterimi

Tablo 1. Ölçüm Cihazının Özellikleri

	Ölçüm aralığı	Doğruluk	Çözünürlük
Baca gazı sıcaklık ölçümü	0 ... +1760 °C	±1 °C	0,1 °C
O ₂ ölçümü	0 ... +25 % hacimsel	±0,8%	0,01 % hacimsel
NO ₂ ölçümü	0 ... +500 ppm	±5 ppm	0,1 ppm
NO ölçümü	0 ... +4000 ppm	±5 ppm	1 ppm
SO ₂ ölçümü	0 ... +5000 ppm	±10 %	1 ppm

3. Önerilen Metot

Bir CCD kamerayı anlık yanma durumlarını yansıtmak amacıyla bir sensör olarak kullanmayı amaçlayan çalışmaların ortak özelliği geleneksel bir yapay sinir ağı kullanmalarıdır. Bu geleneksel yapı Şekil 2'de verilmektedir. Geleneksel yapıda üç aşamadan söz edilebilir. Buna göre ilk aşamada, anlık alev görüntüleri işlenerek görüntü matrisinin iz değeri hesaplanmaktadır. İkinci aşamada senkronize bir şekilde bir veri bankasında toplanmış iz değeri vektörü (M), baca gazı sıcaklığı verisi vektörü (T) ve hava fazlalık katsayısı vektörü (λ) yapay sinir ağının eğitiminde kullanılır. Son aşamada eğitilmiş yapay sinir ağı regresyon modeli gerçek zamanlı giriş verileri üzerinden anlık tahmin değerlerini üretir.



Şekil 2. Geleneksel Yapay Sinir Ağı Regresyon Modeli

Önerilen metod dört aşamada uygulanmaktadır. Birinci aşamada, geleneksel yaklaşımda olduğu gibi, CCD kameradan alınan görüntülerin sayısallaştırılması yapılarak M , T ve λ vektörlerinden oluşan veri kümesi elde edilir. İkinci aşamada çoklu-lineer regresyon formülü elde edilir (Catalina, Iordache ve Caracaleanu, 2013; Brown, 2009). Bunun için ilk önce giriş vektörleri M ve T 'den oluşan X matrisi tanımlanır. X matrisi Denklem 1'de verilmektedir.

$$M = \begin{bmatrix} M_1 \\ \vdots \\ M_{550} \end{bmatrix} \text{ ve } T = \begin{bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_{550} \end{bmatrix} \text{ olmak üzere } X = \begin{bmatrix} 1 & M_1 & T_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & M_{550} & T_{550} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Ardından Denklem 2'de verildiği gibi K matrisi hesaplanır.

$$K = (X^T X)^{-1} \quad (2)$$

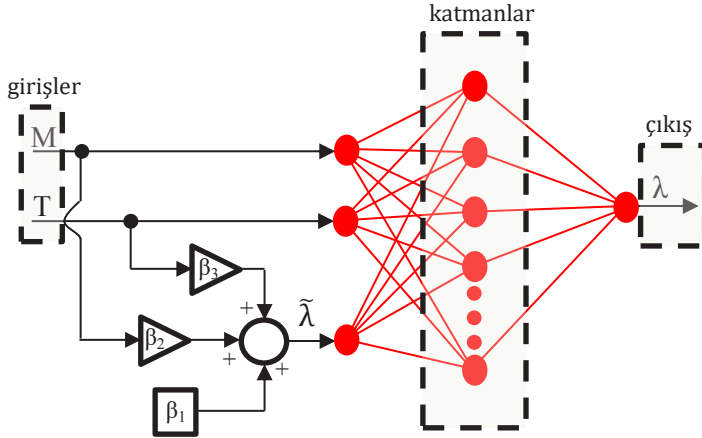
Son olarak X ve K matrisi ile λ çıkış vektörünün Denklem 3'de verilen ifadede değerlendirilmesi ile regresyon bağıntısının katsayıları vektörü β hesaplanır.

$$\beta = KX^T \lambda = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Buna göre λ 'nın regresyon bağıntısı Denklem 4'de verildiği gibi olmaktadır.

$$\tilde{\lambda} = \beta_1 + \beta_2 M + \beta_3 T \quad (4)$$

Yöntemin üçüncü aşamasında, elde edilen tahmin fonksiyonu üçüncü bir giriş gibi yapay sinir ağı mimarisine Şekil 3'de gösterildiği gibi entegre edilir ve ardından sinir ağı eğitilir.



Şekil 3. Önerilen Metot İçin Kullanılan Yapay Sinir Ağı Mimarisi

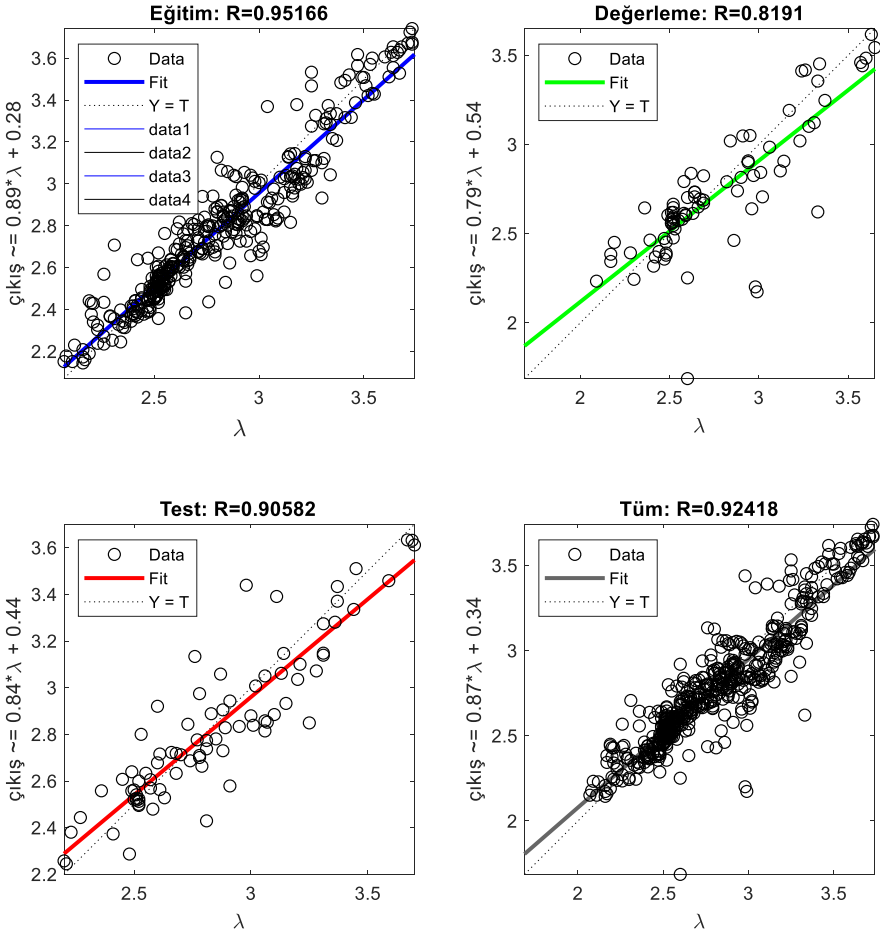
Son aşamada ise eğitilmiş yapay sinir ağıli regresyon modeli gerçek zamanlı giriş verileri üzerinden anlık tahmin değerlerini üretir.

4. Deneysel Sonuçlar

Veri bankasında toplanan M, T ve λ vektörleri kullanılarak önerilen metot uygulanmıştır. Buna göre elde edilen β vektörü Denklem 5'de verilmektedir.

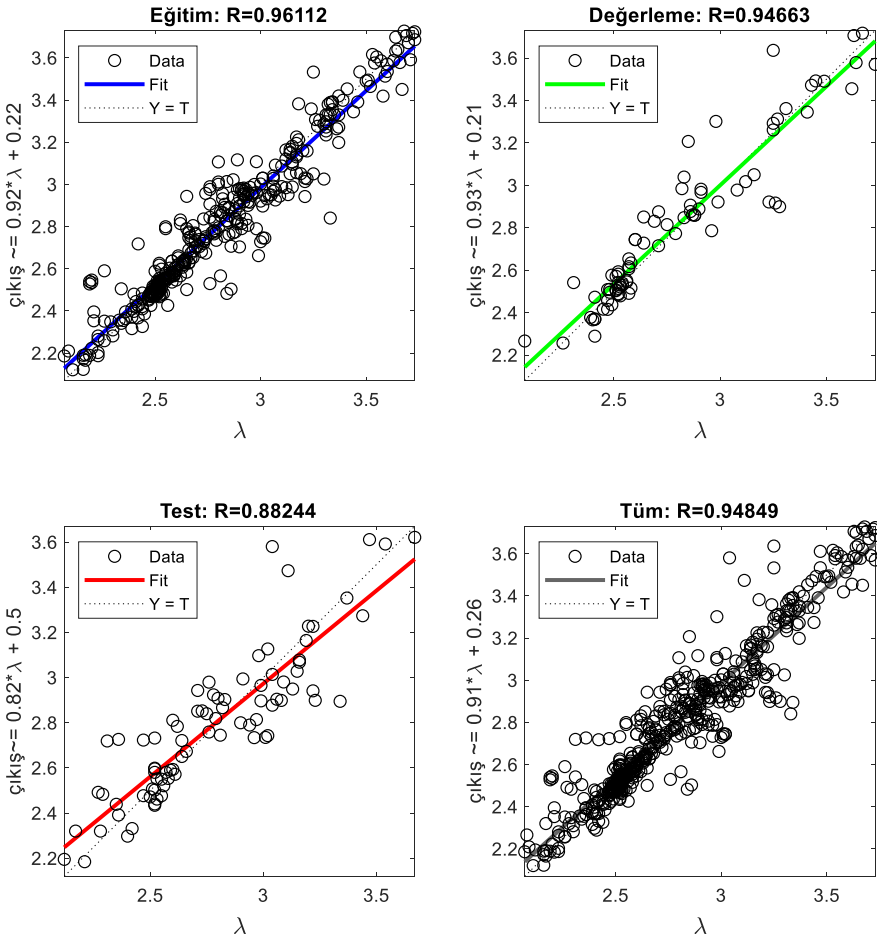
$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6.110251 \\ 0.000035 \\ -0.016563 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Önerilen yapay sinir ağıli regresyon modelinin doğruluk sınaması geleneksel metot ile karşılaştırmalı olarak yapılmıştır. Sinir ağının eğitiminde, her iki durum için de, tek bir katman ve 100 adet sinir hücresi kullanılmıştır. Eğitim algoritması olarak Levenberg-Marquardt algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma mübadilleri ile karşılaştırıldığında hafızadan ve zamandan tasarruf sağlamaktadır (Mammadli, 2017). Ayrıca, yapay sinir ağlarının kullanımına ilişkin detaylı bilgiler için (Der, Ordu ve Basar 2024; Onat, Daskin, Toraman, Golgiyaz 2021) çalışmalarına bakılabilir. Buna göre Şekil 4 ve 5'de sırasıyla geleneksel metot ve önerilen metot tahmin performansları sunulmuştur. Deneysel olarak elde edilen verilerin %70'i eğitimde, %15'i değerlendirilmede ve %15'i de test için kullanılmıştır.



Şekil 4. Geleneksel Yöntem ile Elde Edilen Regresyon Modelinin Doğruluğu

YSA regresyon modeli performansını değerlendirmek için kullanılan en yaygın ölçüt; determinasyon katsayısı (R^2) ölçütüdür. Determinasyon katsayısı; tahmin edilen değerlerin, gerçek değerlere ne kadar iyi uyduğunu gösterir. R^2 değeri 1'e yaklaştıkça modelin performansı artar. Şekil 4'de verilen geleneksel mimari ile %92.4 doğruluk sağlanırken ($R=0.924$), Şekil 5'deki önerilen mimari ile doğruluk %94.8'e ($R=0.948$) yükseltiştir. Buradan geleneksel ve önerilen mimari üzerinden elde edilen regresyon modellerinin determinasyon katsayıları sırasıyla 0.85 ve 0.9 olarak bulunmuştur.



Şekil 5. Önerilen Yöntem ile Elde Edilen Regresyon Modelinin Doğruluğu

5. Sonuç ve Yorum

Bu çalışmada, bir CCD kamera ile yanma odası gözlenen, evsel kömür yakma sisteminde yanma veriminin alev görüntüsünden tahmini için yeni bir yapay sinir ağı mimarisi önerilmiştir. Önerilen sinir ağının fazladan bir girişe ihtiyaç duymaması ve basit yapısı pratik uygulamalarda oldukça avantaj sağlayacaktır. Deneysel veriler üzerinden karşılaştırmalı biçimde yapılan doğruluk analizi önerilen yöntem ile oluşturulan mimarinin geleneksel mimariye göre doğruluğu %2.4 artırdığını göstermektedir. Ölçüm doğruluğu, ölçüm sisteminin kullanıldığı kapalı çevrim kontrol sisteminin performansına da aynı katkıyı yapacağı düşünülürse kontrolcü performansının da %2.4 daha iyi olacağı anlamına gelmektedir. Bu

artışın, 100000 kcal/h kapasiteli evsel bir kömür yakıcısı özelinde saatte 2400 kcal enerjiden tasarruf edileceği anlamına geldiği değerlendirilmektedir. Bu sistemlerin yanma verimini maksimize etmeyi amaçlayan kapalı çevrim kontrolcü uygulamalarında kullanıldığı düşünüldüğünde söz konusu doğruluk artışının kontrolcü performansına büyük katkı sağlayacaktır. İleriki çalışmalarda görüntü matrisinin farklı özelliklerinin doğruluk üzerine etkileri çalışılabilir.

Teşekkür

Bu çalışma 114M116 numaralı TÜBİTAK 3001 projesinden elde edilen veriler ile gerçekleştirilmiştir. TÜBİTAK'a ve destekçi firma MİMSAN AŞ'ne verdikleri destek sebebiyle teşekkür ederim.

Kaynakça

- Brown S H., (2009). Multiple Linear Regression Analysis: A Matrix Approach with MATLAB, *Alabama Journal of Mathematics*, Vol.34, pp.1-3.
- Catalina T., Iordache V. ve Caracaleanu B., (2013). Multiple regression model for fast prediction of the heating energy demand, *Energy and Buildings*, 57, pp 302–312. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.010>
- Clay K., Lewis J. ve Severnini E., (2024). The historical impact of coal on cities, *Regional Science and Urban Economics*, 107 (2024) 103951 pp 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2023.103951>
- Erken H T., (2016). Pulverize Kömür Kazanında Yakıcı Açılarının Alev Yapısı Üzerine Etkisinin İncelenmesi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul.
- Der O., Ordu M., ve Basar G., (2024). Optimization of cutting parameters in manufacturing of polymeric materials for flexible two-phase thermal management systems, *Materials Testing*, 2024. doi.org/10.1515/mt-2024-0127
- Golgiyaz S., Talu M F., Daskin M. ve Onat C. (2022). Estimation of excess air coefficient on coal combustion processes via gauss model and artificial neural network, *Alexandria Engineering Journal*, 61, 1079–1089. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.06.022>
- Mammadli S., (2017). Financial time series prediction using artificial neural network based on Levenberg-Marquardt algorithm, *Procedia Computer Science*, 120, pp 602–607.
- Onat C. (2019). A new design method for PI–PD control of unstable processes with dead time, *ISA Transactions*, 84, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2018.08.029>

- Onat C. ve Daskin M., (2019). A Basic ANN System for Prediction of Excess Air Coefficient on Coal Burners Equipped with a CCD Camera, *Mathematics and Statistics* 7(1) pp 1-9. DOI: 10.13189/ms.2019.070101
- Onat C., Daskin M., Toraman S., Golgiyaz S. ve Talu M F., (2021). Prediction of combustion states from flame image in a domestic coal burner, *Measurement Science and Technology*, 32(7), pp 1-10. DOI: 10.1088/1361-6501/abe446
- Talu M F., Onat C. ve Daskin M., (2017). Prediction of excess air factor in automatic feed coal burners by processing of flame images, *Chinese J. Mech. Eng.* 30 (3) (May 2017) 722–731. <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0095-3>.
- Yadav S. ve Mondal S S., (2019). A complete review based on various aspects of pulverized coal combustion, *Int J Energy Res.* 2019;43 pp 3134–3165. <https://doi.org/10.1002/er.4395>
- Yılmaz A O. ve Uslu T.,(2007). The role of coal in energy production—Consumption and sustainable development of Turkey, *Energy Policy* 35 pp 1117–1128 <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.02.008>
- You C F. ve Xu X C., (2010). Coal combustion and its pollution control in China, *Energy* 35 pp 4467–4472. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.04.019>



GAZ TÜRBİNİ PERİYODİK BAKIMLARININ SİSTEM PERFORMANSINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Orhan Özay KÖSE¹, M. Zeki YILMAZOĞLU^{2*}

¹ TEMSAN Türkiye Elektromekanik San. A.Ş., Ankara
ORCID No : <http://orcid.org/0009-0004-9110-5066>

¹ Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Müh. Böl., Ankara
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-7874-768X>

Anahtar Kelimeler

Öz

Gaz türbini, periyodik bakım, muayene, sistem performansı, hava giriş filtresi

Gaz türbinlerinin sürdürülebilir bir şekilde işletilmesi için periyodik bakımlarının zamanında yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada, Alstom (GE) GT13E2 1996 model bir gaz türbininin 8. C tipi (combustion) bakımı incelenmiştir. Bakım kapsamında yapılan işlemler, elde edilen bulgular ve iyileştirmeler hakkında bilgi verilmiştir. Türbin giriş havası filtre sistemindeki kirlenmenin sistem çalışma performansına etkileri incelenerek filtre değişim periyotlarının maliyet analizi yapılmıştır. Türbin giriş havası filtre sistemindeki basınç farkının (Δp) türbin işletme saatine (OH) göre değişim profili oluşturularak, basınç farkının $\Delta p=15$ mbar değerine kadar artışının giriş hava debisi, yakıt tüketimi, türbin çıkış gücü, ısı oranı ve verim üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen veriler ve yapılan hesaplamalara göre her 2,5 mbar basınç düşüşünde giriş hava debisinde %0,26 azalma, yakıt tüketiminde %0,25 azalma, türbin çıkış gücünde %0,46 azalma, ısı oranında %0,18 artış ve sistemin genel veriminde %0,19 düşüş olduğu sonucuna varılmıştır. Türbin giriş havasındaki basınç farkı artışının sistem performansına etkileri yönünden filtre değişiminin maliyet analizi yapıldığında, belirlenen koşullar altında, her 2500 işletme saatinde (OH) ve basınç farkının $\Delta p=5$ mbar değerine ulaştığında filtrelerin yenilenmesinin maliyet yönünden optimum seçenek olduğu değerlendirilmiştir. Ayrıca gaz türbininde yapılan C tipi bakım kapsamında tespit edilen bulgulara yönelik uygulanan işlemlerin gaz türbinindeki degradasyon etkilerini azaltarak bir sonraki bakıma kadar emre amadelikte ve güvenilirlikte önemli bir artış sağlayacağı öngörülmektedir.

* zekiyilmazoglu@gazi.edu.tr
doi : 10.46399/muhendismakina.1564458

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF GAS TURBINE PERIODIC MAINTENANCE ON SYSTEM PERFORMANCE

Keywords

Gas turbine, periodic maintenance, inspection, system performance, air inlet filter

Abstract

Gas turbines require periodic maintenance on time for sustainable operation. In this study, the 8th C-type (combustion) maintenance of an Alstom (GE) GT13E2 1996 model gas turbine is investigated. The operations performed during the maintenance, findings, and improvements are summarized. The effect of blockage due to contamination in the turbine inlet air filter system on the operating performance of the system is examined and the cost analysis of the filter replacement periods is carried out. By profiling the variation of the differential pressure (Δp) in the turbine inlet air filter system according to the turbine operating hours (OH), the effects of the differential pressure increase up to $\Delta p=15$ mbar on inlet air flow rate, fuel consumption, turbine output power, heat rate, and efficiency are analyzed. According to the data obtained, it was concluded that for every 2.5 mbar pressure drop there is 0.26% decrease in inlet air flow rate, 0.25% decrease in fuel consumption, 0.46% decrease in turbine output power, 0.18% increase in heat rate and 0.19% decrease in overall efficiency of the system. When the cost analysis of the filter replacement in terms of the effects of the differential pressure increase in the turbine inlet air on the system performance is performed, it is evaluated that under the specified conditions, replacement of the filters at every 2500 operating hours (OH) and when the differential pressure reaches $\Delta p=5$ mbar is the optimum option in terms of cost. In addition, it is predicted that the treatments applied for the findings detected within the scope of C-type maintenance performed on the gas turbine will provide a considerable increase in availability and reliability until the next maintenance by reducing the degradation effects on the gas turbine.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 11.10.2024

Kabul Tarihi : 26.11.2024

Research Article

Submission Date : 11.10.2024

Accepted Date : 26.11.2024

Extended Abstract

Introduction

Gas turbines are widely used in electricity generation and cogeneration systems. Today, energy demand is increasing gradually with the developing economy and industry, which greatly increases the importance of energy supply security. To ensure energy supply security, it is important to conduct periodic maintenance of gas turbines used to provide uninterrupted and quality energy at continuous and certain performance values in electricity generating facilities on time. The periodic maintenance should be conducted within a predetermined equivalent operating hours (EOH). As a result of the periodic maintenance, sustainable working conditions of gas turbines and uninterrupted energy production at the desired performance and efficiency values are largely ensured. The development of gas turbines and their increased efficiency also provide benefits in terms of environmental impacts. Efficiency improvements in basic terms mean less fuel and more energy at a lower cost. In addition, the reduction in fuel consumption contributes to the reduction of greenhouse gas effects by releasing less emissions into the environment, thus reducing the negative impacts on the environment.

Objectives and Research Purpose

In this study, basic information about gas turbines, their classification, and the important components that constitute the gas turbine system are given. In addition, the degradation factors that occur in gas turbines due to various reasons and the effects of degradation factors on gas turbine components are examined. To minimize the effects of degradation factors, the periodic maintenance performed to minimize the effects of degradation factors, maintenance methods, determination of the intervals used in the implementation of maintenance, which operations are performed within the scope of maintenance, and the findings and degradation factors encountered in the maintenance operations performed in a gas turbine combined cycle power plant installed in Türkiye are discussed. In addition, the effects of the pressure drop in the inlet air as a result of the contamination of the filters over time on the gas turbine inlet air flow rate, fuel consumption, output power, heat rate, and efficiency are evaluated and the results obtained with the field data are analyzed in terms of filter replacement period and cost. Although there are many studies on gas turbines, there is no study focused on the effects of periodic maintenance, the findings that occur within the scope of maintenance and the pressure drop effects in the inlet air as a result of the contamination. In addition, this study aims to contribute to the continuous and sustainable operation of the power plants, which have an important place in the energy production of our country, at the desired performance and efficiency values by providing basic information about gas turbines to the sector shareholders who operate and maintain the gas turbine power plants installed in Türkiye.

Methodology

In this study, the 8th C-type (combustion) maintenance of an Alstom (GE) GT13E2 1996 model gas turbine is investigated. The operations performed during the maintenance, findings, and improvements are summarized. The effects of contamination in the turbine inlet air filter system on the operating performance of the system are

examined and the cost analysis of the filter replacement periods is made. By profiling the variation of the differential pressure (Δ_p) in the turbine inlet air filter system according to the turbine operating hours (OH), the effects of the differential pressure increase up to $\Delta_p=15$ mbar on inlet air flow rate, fuel consumption, turbine output power, heat rate, and efficiency are analyzed.

Results and Conclusions

According to the data obtained and calculations made, with an increase in the differential pressure in the gas turbine inlet air from 5 mbar to 15 mbar, a pressure drop of 10 mbar, a loss of approximately 1.045% in the turbine inlet air is observed. Thus, it is concluded that for every 2.5 mbar pressure drop, the inlet air flow rate decreases by approximately 0.26%. For every 2.5 mbar pressure drop in the gas turbine inlet air, the turbine output power decreases by approximately 0.46%. It is concluded that for every 2.5 mbar pressure drop, the gas turbine heat rate increases by approximately 0.18%. The reduction in the amount of fuel consumed in the gas turbine is 1.0014% at a pressure drop of 10 mbar. Thus, it is concluded that for every 2.5 mbar pressure drop, fuel consumption decreases by approximately 0.25%. The overall efficiency calculated according to these values decreased from 34.92% to 34.66%. In this case, it is calculated that there is a decrease of approximately 0.75% in the overall efficiency of the system with a pressure drop of 10 mbar in the turbine inlet air filters. As a result, it is determined that every 2.5 mbar pressure drop in the turbine inlet air decreases the overall efficiency of the system by approximately 0.19%.

According to the analysis made by calculating the filter replacement periods, filter costs, shutdown times and replacement labor according to the changes in the output power and fuel consumption amounts with the increase in the differential pressure in the turbine inlet air, the difference between income and expenditure is negative due to the high fuel costs and relatively low electricity sales price in today's conditions. In two-stage filter systems, it is recommended to change the filter between 5000 and 10 000 operating hours (OH). However, according to the cost analysis based on the current situation with current prices, it seems to be the optimum option to replace the inlet air filters of the power plant when $\Delta p=5$ mbar and approximately every 2500 OH operating hours.

The quality of the air entering the gas turbine system affects the pressure difference variation profile. The variation profile considered in this study is based on the ambient conditions in which the turbine is located and the information obtained from the field. Performing the filter replacement at the appropriate time will allow the gas turbine to operate at higher performance with minimum power loss and minimized degradation factors such as corrosion, erosion, oxidation, etc. identified within the scope of maintenance.

In addition, it is evaluated that a significant increase in the availability and reliability of the power plant will be achieved as a result of the improvements in bearing and shaft vibrations with turbine bearing replacement, the partial cleaning of the unit from degradation factors such as corrosion, erosion, oxidation, etc. occurring in the compressor and replacement of all stages of turbine blades with new ones. This can only be determined by the availability and operation statistics of the unit during the period until the next maintenance.

1. Giriş

Gaz türbinlerinin elektrik üretiminde ve kojenerasyon sistemlerinde kullanımı oldukça yaygındır. Günümüzde enerji talebinin gelişen ekonomi ve sanayi ile birlikte gün geçtikçe artması enerji arz güvenliğinin önemini de büyük oranda artırmaktadır. Enerji arz güvenliğini sağlamak amacıyla, elektrik üreten tesislerde sürekli ve belirli performans değerlerinde kesintisiz ve kaliteli bir enerji sağlamak için kullanılan gaz türbinlerinin periyodik bakımlarının zamanında yapılması önem arz etmektedir. Bu periyodik bakımların önceden belirlenmiş bir eşdeğer işletme saatinde yapılması gerekmektedir. Yapılan periyodik bakımlar sonucunda gaz türbinlerinin sürdürülebilir çalışma koşulları ve istenilen performans değerlerinde kesintisiz enerji üretimlerinin sağlanması büyük oranda güvence altına alınmaktadır.

Gaz türbini teknolojisinin enerji sektöründe özellikle son 40-50 yıl içerisinde büyük bir gelişme gösterdiği günümüzde kullanılan türbinlerin verimlerinden de anlaşılmaktadır. Enerji sektöründe kullanılan gaz türbin modelleri ele alındığında geçmişten bugüne kadar gaz türbini verimleri %15 seviyelerinden %45 seviyelerine çıkmakla birlikte, kombine çevrim santrallerinde toplam çevrim verimliliklerinde %65 seviyelerine ulaşıldığı gözlemlenmektedir.

Gaz türbinlerinin gelişmesi ve verimliliklerinin artması çevresel etkiler yönünden de fayda sağlamaktadır. Verimlilik artışı en temel mantığıyla değerlendirildiğinde daha az yakıt ve daha düşük maliyetle daha fazla enerji elde etmek anlamına gelmektedir. Bunun yanında, yakıt tüketiminin azalması, daha az miktarda emisyonların çevreye bırakılarak sera gazı etkilerinin azalmasına ve bu sayede çevreye zarar veren olumsuz etkilerin de azalmasına katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmada, gaz türbinleri, gaz türbini bileşenleri ve gaz türbinlerinin sınıflandırılması hakkında temel bir bilgilendirme yapılmıştır. Buna ek olarak, gaz türbinlerinde çeşitli nedenlerle ortaya çıkan degradasyon (bozulma) faktörleri, degradasyon faktörlerinin gaz türbini bileşenlerine etkileri, bu etkileri en aza indirebilmek için özellikle kompresörde ve diğer bileşenlerde uygulanan işlemler incelenmiştir. Gaz türbinlerini genel bir sistem olarak ele aldığımızda gaz türbinlerinin tasarımında ortaya konulan ve testlerle doğrulanan performans ve verim değerlerinin zaman içerisinde değişimleri ve bu değişimlerin hangi seviyede geri döndürülebildiği veya döndürülemediği değerlendirilmiştir. Degradasyon faktörlerinin etkilerini en aza indirilebilmek için yapılan periyodik bakımların neler olduğu, bakım yöntemleri, bakımların uygulanmasında kullanılan aralıkların belirlenmesi, bakım kapsamlarında hangi işlemlerin yapıldığı ve Türkiye’de kurulu bulunan bir gaz türbinli kombine çevrim santralinde yapılan bakım işlemlerinde elde edilen bulgular ve karşılaşılan degradasyon faktörleri ele alınmıştır. Ayrıca, gaz türbinlerinin çalışma ömürleri ile çıkış gücü, verim, ısı

oranı ve yakıt tüketimi değerlerine etki eden türbin giriş havasındaki basınç farkı artışı ile filtre değişiminin zaman ve maliyet yönünden incelemesi yapılmıştır.

Bu çalışmanın amacı, Türkiye’de kurulu bulunan gaz türbinli santrallerin işletilmesi ve bakımını yapan sektör paydaşlarına gaz türbinleri hakkında temel bilgi aktarımı sağlayarak, ülkemizin enerji üretiminde önemli bir yere sahip olan bu santrallerin sürekli ve sürdürülebilir bir şekilde istenilen performans ve verim değerlerinde çalıştırılmasına katkı sağlamaktır. Bu nedenle, özellikle bu santrallerde zaman içerisinde meydana gelebilecek degradasyon faktörleri ve etkileri detaylı incelenerek gaz türbinlerinin ömürlerine doğrudan etki eden türbin giriş hava kalitesini sağlayan filtrelerdeki basınç düşüşü ve bunun sonucunda yapılması gereken bakım ve yenileme işlemlerine yol göstermesi açısından bir katkı sağlaması hedeflenmektedir. Bu çalışmada yöntem olarak sahadan alınan verilerle yapılan hesaplamalar ve incelemeler, sektördeki literatür bilgileriyle karşılaştırılarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, gaz türbini periyodik bakımlarının önemi, etkileri ve içeriklerinin belirlenmesinde ele alınacak faktörler ortaya konulmuştur.

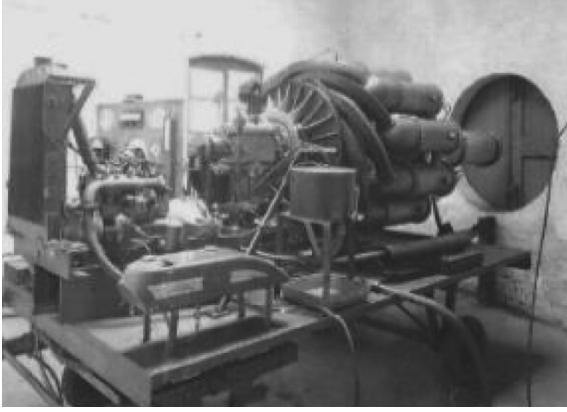
2. Gaz Türbinleri

Gaz türbinleri turbo makineler arasında birçok farklı kullanım alanına sahiptir. Enerji üretimi, petrol ve gaz, havacılık, proses tesisleri vb. kritik öneme sahip alanlarda kullanılmaktadırlar. Günümüzde doğal gaz, dizel yakıt, nafta, metan, ham petrol, düşük ısı değerli gazlar, buharlaşmış akaryakıt ve biyokütle gazlarıyla çalışan gaz türbinleri bulunmaktadır. Gaz türbinlerinin gelişimine malzeme teknolojisi, yeni kaplama yöntemleri, soğutma sistemleri ve kombine çevrimler büyük katkı sağlamışlardır. Basınç oranlarının 7:1’den 45:1’e kadar yükselmesiyle birlikte basit çevrimli gaz türbini ısı verimliliği yaklaşık %15’ten %45’e kadar çıkmıştır. Gaz çevriminin atık ısısının kullanılarak buhar çevrimi üzerinden elektrik elde edilen kombine çevrim santrallerinde %55 verim değerleri elde edilebilmektedir. Son yıllarda gaz türbini teknolojisindeki tasarım iyileştirmeleriyle birlikte kombine çevrim verimlilikleri %65’lere kadar çıkmaktadır. Genel bir kural olarak verimlilikteki %1’lik bir artış, yaklaşık olarak %3,3 daha fazla sermaye yatırımı yapılabileceği anlamına gelmektedir (Boyce, 2012). Ancak, verimlilikteki artışın emre amadelikte bir düşüşe yol açmamasına dikkat edilmelidir.

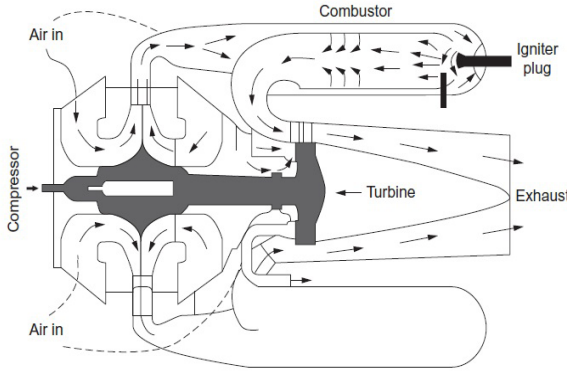
Bir buhar santralının kurulumundan üretime kadar geçen süre yaklaşık 42 ile 60 ay arasında iken, kombine çevrim gaz türbin santralleri için bu süre yaklaşık 22 ile 36 ay arasındadır. Kombine çevrim gaz türbin santrallerinde inşaat süresi yaklaşık 18 ay iken, çevre izinlerinin alınması çoğu durumda 12 ay, mühendislik ise 6 ile 12 ay arası sürmektedir. Santralin faaliyete geçmesi için geçen süre santralin ekonomisini etkilemektedir. Yatırılan sermaye ne kadar uzun süre geri

dönüş olmadan kullanılırsa o kadar fazla faiz, sigorta ve vergi maliyetleri ortaya çıkmaktadır (Boyce, 2012).

Günümüzün modern gaz türbininin babası olarak birçok kişi Frank Whittle'ı kabul etmektedir. Whittle türbini Ocak 1930'da üretilmiştir ve yaklaşık olarak 4450 N itme gücüne ve %14 verimliliğe sahiptir. Whittle'ın tasarımında hava santrifüj-lü bir kompresörde sıkıştırılmakta ve daha sonra radyal girişli bir türbin aracılığıyla genişletilmektedir. Resim 1'de Whittle türbininin bir fotoğrafı ve Şekil 1'de şematik diyagramı gösterilmektedir. 1903 yılında General Electric bir turboşarj motoru geliştirmiş ve 1941 yılında Amerika'nın ilk uçak motoru için Whittle türbinini modifiye etmiştir. 1945 yılında Westinghouse, yalnızca ABD tasarımına dayanan ilk gaz türbinini geliştirmiştir. Gaz türbini aksenal akışlı bir kompresör, bir türbin ve dairesel bir yakıcı içermektedir (Meher-Homji, 2000).



Resim 1. Whittle Türbini (Meher-Homji, 2000)



Şekil 1. Whittle Türbini Şematik Diyagramı (Meher-Homji, 2000)

Günümüzde ise gaz türbinlerinin birçok farklı verimlilik artırıcı uygulamalar ve malzeme teknolojilerindeki gelişmelerin de katkısıyla üretici ve geliştirici konumunda bulunan çok uluslu şirketler tarafından temin ve tesis edildiği gözlemlenmektedir. Bu firmalardan bazılarını sektördeki satış ve kurulu tesislere göre verecek olursak; GE, Siemens, MHI (Mitsubishi Heavy Industries), Ansaldo, Solar Turbines, Rolls-Royce, United Tech vb. birçok firma bulunmaktadır.

2.1 Gaz Türbinlerinin Sınıflandırılması

Gaz türbinlerinin kullanım alanları ve güçlerine göre sınıflandırılması şu şekildedir (Boyce, 2012).

1. Dış karkaslı ağır hizmet gaz türbinleri

Bu türbinler basit çevrim konfigürasyonunda 3 ila 480 MW arasında değişen büyük güç üretim üniteleridir ve verimlilikleri %30 ila %48 arasında değişmektedir.

2. Uçak türevi (aeroderivatif) gaz türbinleri

Aeroderivatifler, adından da anlaşılacağı gibi uçakların ana taşıyıcısı olarak havacılık endüstrisinde ortaya çıkan güç üretim üniteleridir. Güçleri yaklaşık 2,5 ila 50 MW arasında değişmektedir. Bu ünitelerin verimlilikleri %35 ila %45 arasında değişmektedir.

3. Endüstriyel tip gaz türbinleri

Bu türbinler yaklaşık 2,5 ila 15 MW arasında değişmektedir. Petrokimya tesislerinde kompresör tahrik sistemleri için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu ünitelerin verimlilikleri düşük ve yaklaşık %30'lardadır.

4. Küçük gaz türbinleri

Bu gaz türbinleri yaklaşık 0,5 ila 2,5 MW aralığındadır. Genellikle santrifüj kompresörlere ve radyal akışlı türbinlere sahiptirler. Basit çevrim uygulamalarının verimlilikleri %15 ila %25 arasında değişmektedir.

5. Mikro türbinler

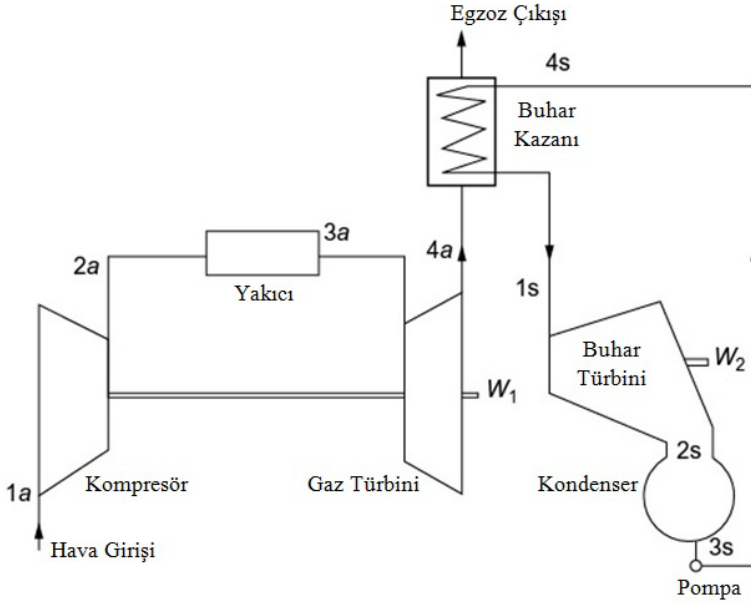
Bu türbinler 20 ila 350 kW aralığındadır. Bu türbinlerin büyümesi, bölgesel elektrik üretim pazarında bir artış olduğu için 1990'ların sonlarından itibaren hızlı olmuştur.

6. Araç gaz türbinleri

Bu türbinler 300 ila 1.500 HP arasında değişmektedir. İlk araç türbini 1954 yılında Chrysler Corporation tarafından üretilmiş ve bunu Ford Motor Company'nin kamyon motoru izlemiştir. Çok başarılı olan tek araç türbini ABD ordusu Abrams tankında kullanılan gaz türbini olmuştur.

2.2 Gaz-Buhar Kombine Çevrimi

Gaz türbini ve buhar türbinleri günümüzde birçok elektrik üretim santralinde ve endüstriyel proses tesislerinde kullanılmaktadır. Gaz-buhar (Brayton-Rankine) kombine çevrimi, gaz türbininde meydana gelen yanma sonucu dışarı atılan sıcak egzoz gazlarının buhar türbini için kızgın buhar oluşturmak amacıyla kullanılmasına dayanan bir sistemdir. Şekil 2'de bu çevrimin şematik gösterimi verilmiştir.

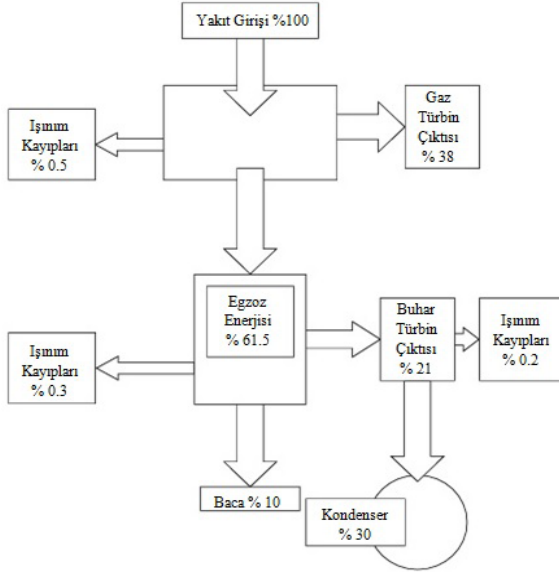


Şekil 2. Gaz-Buhar (Brayton-Rankine) Kombine Çevrimi Şematik Gösterimi (Boyce, 2012)

Kombine çevrim işi, net gaz türbini işi ile buhar türbini işinin toplamına eşittir. Tasarım çıktısının yaklaşık üçte biri ile yarısı egzoz gazlarında enerji olarak mevcuttur. Türbinden çıkan egzoz gazı geri kazanım kazanına ısı sağlamak için kullanılır. Dolayısıyla, bu ısı genel çevrime dahil edilir. Bu sistemde net iş, bir buhar enjeksiyon çevriminde beklenenle hemen hemen aynıdır ancak verimlilik çok daha yüksektir. Bu sistemin dezavantajı yüksek kurulum maliyetidir. Bununla birlikte, buhar enjeksiyon çevriminde olduğu gibi, kullanılan gaz türbinine bağlı olarak egzozundaki NO_x hemen hemen aynı düşük seviyelerdedir. Bu çevrim, yüksek adyabatik ısı verimliliği nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır (Boyce, 2012).

Şekil 3'te genel olarak bir kombine çevrim santralinde sisteme giren toplam %100 birim enerjinin faydalı bileşenlerine dağılımı, kondenser ve baca kayıpla-

ryıla ilişkili enerji kayıpları gösterilmektedir. Bu dağılım, daha verimli ekipman, ısı geri kazanım sistemleri ve baca kayıpları azaldıkça değişiklik gösterebilir fakat genel itibarla şekilde gösterilen oranlara yakındır (Boyce, 2012).



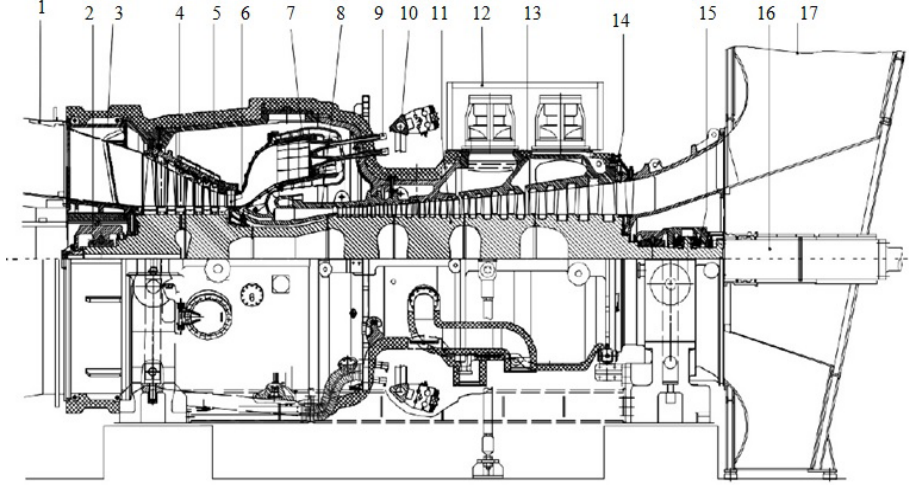
Şekil 3. Kombine Çevrim Santrali Enerji Dağılımı Akış Diyagramı (Boyce, 2012)

2.3 Gaz Türbini Bileşenleri

Şekil 4'te kesit resmi gösterilen GT13E2 modeli bir gaz türbinine ait ana parçalar Tablo 1'de verilmiştir. Bu gaz türbini modelinde kompresör ve türbin birbirine kaynaklanmış tek bir dövme şaft üzerinde çalışmaktadır. Türbin şaftı 2 adet kaymalı yatak ve 1 adet kılavuz yatak üzerinde dönmektedir. Türbin yatakları sıcak bölgede bulunmamaktadır.

Türbin ve kompresör dış muhafazaları döküm malzemeden üretilmiştir ve iki parçalı olarak tasarlanmıştır. İki parçalı tasarım türbin ekseninin her iki tarafına da kolayca ulaşım sağlamaktadır. Gaz türbini çalışma sıcaklıklarında özellikle sıcak gaz yolunda bulunan parçaların soğutulması için hava soğutmalı sistem bulunmaktadır. Bu sistem; türbin ilk 3 kademe hareketli kanatlar ve ilk 2 kademe sabit kanatlarda bulunmaktadır. Türbinde toplam 5 kademe hareketli ve sabit kanatlar bulunmaktadır. Ayrıca kompresör tahliyesinden çıkan hava ile rotor ve kanat taşıyıcısı soğutulmaktadır. Yanma odasında toplam 72 adet çevresel yakıcı bulunmaktadır. Bu çevresel yakıcıların sayısı ve konumlandırılması homojen bir sıcaklık dağılımı ve tam yanma sağlamaktadır. GT13E2 modeli gaz türbinlerinde

fuel-oil ve doğalgaz yakıtlarının her ikisi de kullanılarak enerji üretilebilmektedir (Alstom, 2003).



Şekil 4. GT13E2 Gaz Türbini Kesit Gösterimi (Alstom, 2003)

Tablo 1. GT13E2 Gaz Türbini Kesiti Parça Listesi (Alstom, 2003)

Sıra No	Parça Adı	Sıra No	Parça Adı
1	Egzoz difüzörü	10	Yakıt dağıtım sistemi
2	Çıkış kaymalı yatak	11	Rotor
3	Egzoz muhafazası	12	Blöf vanalar
4	Türbin sabit kanat taşıyıcısı	13	Kompresör muhafazası ve kanatlar
5	Türbin muhafazası	14	Ayarlanabilir giriş kılavuz kanatları (IGV)
6	Türbin hareketli ve sabit kanatlar	15	Giriş kaymalı ve kılavuz yatakları
7	Yanma odası	16	Ara şaft
8	Yakıcı iç muhafazası	17	Hava giriş manifoldu
9	Yakıcılar		

Kompresörde toplam 21 kademe bulunmaktadır. Kompresör kanatları çevresel T yuvalarına ara parçalarla birlikte sabitlenmiştir. Kompresörün ilk 5 kademesindeki kanatlar erozyon ve korozyon etkilerine karşı kaplanmıştır. Şaftın, türbin

bölgesinde meydana gelen yüksek sıcaklıktan etkilenmemesi için yüzeyi ısı kal-kanı segmentleri ile kaplanmıştır. Kompresörün tahliye ucundan alınan hava bu segmentler için ek soğutma sağlamaktadır. Bu hava aynı zamanda türbin kanat-larının ilk üç sırasını soğutmak için de kullanılır (Alstom, 2003).

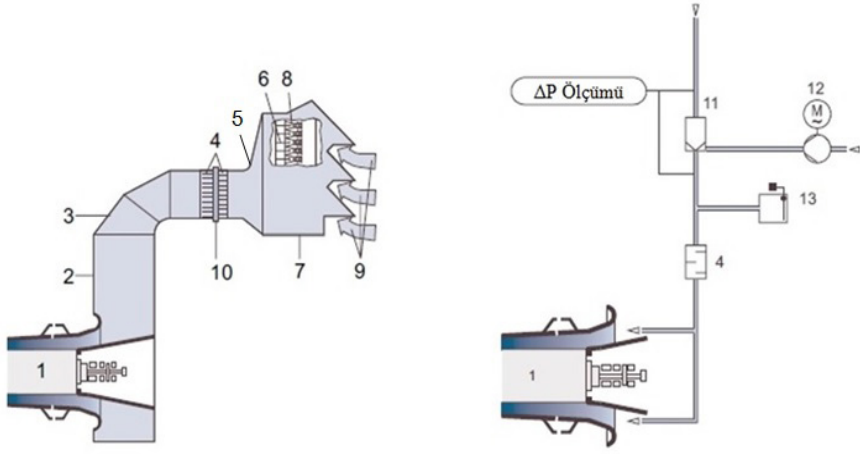
2.3.1 Hava Giriş ve Filtre Sistemi

Gaz türbinleri, çalışma sırasında buldukları ortamın havasını iş akışkanı ola-rak sisteme alırlar. Ortam havası sisteme girerken, havanın içerisinde bulunan kirleticilerden en iyi seviyede arındırılmış olması gerekmektedir. Giriş havasının kalitesi sistem performansı ve ömrü için önemli bir parametredir. Hava içerisin-de bulunan partiküller ve kirleticiler kompresör ve gaz türbin parçalarında aşın-ma, korozyon, oksidasyon ve degradasyona neden olabilmektedir.

Gaz türbinlerinde kullanılan filtre sistemlerinde bariyer, kendi kendini temiz-leme sistemi, vana, seperatörler ve ızgara uygulamaları bulunmaktadır. Kara tabanlı uygulamalar için çoğunlukla ya bariyer filtreler ya da kendi kendini tem-izleyen filtre sistemleri kullanılır. Kendi kendini temizleyen filtre sistemleri esasen filtre malzemesini darbeli olarak temizlemek için ara sıra basınçlı hava kullanımına izin veren bariyer filtrelerdir (Kurz, Meher-Homji, Brun, Moore ve Gonzalez, 2013)

Şekil 5'te kesit resmi gösterilen GT13E2 modeli bir gaz türbinine ait hava giriş ve filtre sistemi parçaları Tablo 2'de verilmiştir. Şekil 5'te gösterilen gaz türbini giriş havası filtre sistemi yoğun toz ortamlarında (çöl) kullanılabilecek şekilde dizayn edilmiştir. Ayrıca bu sistem düşük toz yoğunluklu soğuk kutup ortamlarına da uygundur.

Kendi kendini temizleme özelliğine sahip bu sistemde ana akışın tersi yönde kısa bir basınçlı hava jeti vasıtasıyla çalışma sırasında filtre elemanlarının oto-matik olarak kontrollü bir şekilde temizlenmesi sağlanır. Filtre kartuşlarının kirlenme derecesi ise basınç farkı (diferansiyel basınç) ölçümü ile izlenir. Filtre elemanları, basınç farkı önceden ayarlanan seviyeye ulaştıktan sonra veya sabit zaman aralıklarında otomatik olarak temizlenir. Filtreyi ve filtre muhafazasını aşırı diferansiyel basınçtan (toz veya kar yağışı nedeniyle filtrenin tıkanması nedeniyle) korumak için filtre muhafazasında filtreden aşağı yönde baypas ka-pakları bulunur. Gaz türbinlerinde giriş hava kalitesi sistemin performansı ve ömrü için çok önemli bir parametre olması nedeniyle gaz türbinlerinin çalış-ma ortamlarına göre hava giriş ve filtrasyon sistemleri özel olarak dizayn edil-mektedir. Ortam havasındaki kirleticilerin etkilerinin zaman içerisinde türbin parçaları ve malzemelerinde ortaya çıkardığı değişimlere göre her geçen gün filtre sistemlerinde teknolojik gelişmeler ve yeni tasarımlar uygulanmaktadır (Alstom, 2003).



Şekil 5. GT13E2 Gaz Türbini Hava Giriş ve Filtre Sistemi (Alstom, 2003)

Tablo 2. Gaz Türbini Hava Giriş ve Filtre Sistemi Parça Listesi (Alstom, 2003)

Sıra No	Parça Adı	Sıra No	Parça Adı
1	Kompresör	8	Filtre elemanları
2	Giriş manifoldu	9	Hava girişi
3	Giriş dirseği	10	Genleşme flanşı
4	Susturucu	11	Pulse filtre
5	Bağlantı konisi	12	Pulse havası kompresörü
6	Filtre temizleme havası	13	By-pass kapağı
7	Filtre muhafazası		

2.3.2 Kompresör

Gaz türbini uygulamalarında genellikle (5 MW üzeri) aksel akışlı kompresörler kullanılmaktadır. Bu kompresörler, akışın kompresöre aksel yönde girdiği ve gaz türbininden yine aksel yönde çıktığı bir yapıya sahiptirler. Aksel akışlı kompresörler, akışkan hızlandırarak ve basınç artışı elde etmek için yayılmasını sağlayarak çalışma akışkanını sıkıştırırlar. Kanatçıklar sayesinde akışkan hızlandırılır ve basınç artışı elde edilir. Kompresörler birden fazla kademeye sahiptir ve her kademe bir rotor-stator kombinasyonu bulunmaktadır.

Eksel akışlı bir kompresörde hava bir kademedan diğerine geçerken her kademe basınç bir miktar yükseltmektedir. Birden fazla kademenin kullanılması, bazı havacılık ve uzay uygulamalarında 40:1'e kadar genel basınç artışlarına

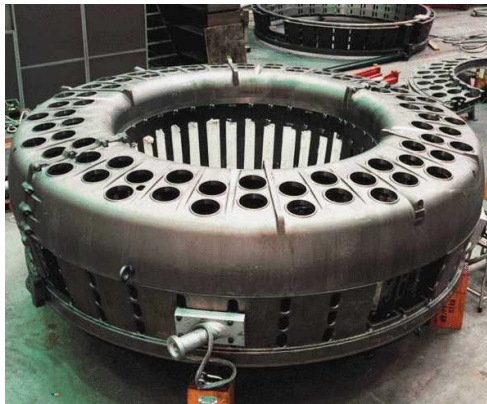
ve bazı endüstriyel uygulamalarda 30:1'lik bir basınç oranına izin vermektedir (Boyce, 2012).

2.3.3 Ayarlanabilir Giriş Kılavuz Kanatları (IGV)

Gaz türbini uygulamalarında aksel akışlı kompresörlerin girişindeki akışı ayarlamak ve kısmi yükte çalışmalarda optimum verimliliği sağlamak için "Ayarlanabilir giriş kılavuz kanatları (IGV)" sistemi kullanılmaktadır. Gaz türbini çalışırken IGV sistemi bir kontrol devresi aracılığıyla otomatik olarak konumunu ayarlamaktadır. Bu çalışma sistematığının kullandığı parametreler ise egzoz gazının izin verilebilen maksimum sıcaklığı ile istenilen yükte sistemin optimum verimliliğini sağlamak üzere oluşturulmuştur.

2.3.4 Yanma Odası ve Yakıcılar

Brayton çevrimi temelinde çalışan gaz türbinlerinde ısı girdisi yanma odası tarafından sağlanır. Yanma odası, kompresörden gelen belirli bir sıcaklık ve basınçtaki havayı alarak ideal koşullarda herhangi bir basınç kaybı olmadan yüksek sıcaklıkta türbine gönderir. Yanma odası, yakıtın üst ve alt ısıl değerlerine bağlı olarak kompresör tahliye havasının yaklaşık %8 ile %30'u arasında neredeyse stokiyometrik olarak yakıldığı doğrudan ateşlemeli bir hava ısıtıcısıdır. Tüm gaz türbini yanma odaları yüksek basınçlı gazın sıcaklığını artırarak aynı işlevi yerine getirmektedir. Yanma odası giriş sıcaklığı basınç oranına, yüke, türbin tipine ve özellikle düşük basınç oranlarında türbinin rejeneratif olup olmamasına bağlıdır. Yanma odası performansı verimlilik, meydana gelen basınç düşüşü ve yanma odası çıkış sıcaklık profilinin düzgünlüğü ile ölçülmektedir (Boyce, 2012).



Resim 2. GT13E2 Gaz Türbini Dairesel Yakıcı Yanma Odası (Alstom, 2003)



Resim 3. GT13E2 Gaz Türbini EV Yakıcı (Alstom, 2003)

Resim 2’de GT13E2 gaz türbini dairesel yanma odası yakıcı ringi gösterilmektedir. Yanma odasındaki yakıcılar türbin muhafazası içinde, kompresör ve türbin arasındaki resimde görülen yakıcı ringine monte edilmiştir. Bu yakıcı ringi, gerçek yanmanın gerçekleştiği birincil bölge ve sıcak gazı çok az kayıpla türbine gönderen bir ikincil bölgeden oluşmaktadır. İkincil bölge yüksek sıcaklığa dayanıklı plakalardan oluşmaktadır (Alstom, 2003).

Resim 3’te gösterilen GT13E2 gaz türbinlerinde kullanılan EV yakıcı, düşük NO_x özellikli, basit bir tasarıma sahip, güçlü girdap akımlı bir ön karışımli yakıcıdır. EV yakıcı, aksel olarak bölünmüş ve iki yarısı birbirinden çapraz olarak yer değiştirmiş içi boş bir koniden oluşmaktadır. Yanma havası, ortaya çıkan yarıklardan yanma bölgesine akmaktadır. GT13E2 gaz türbinlerindeki dairesel yanma odası, türbinden önce eşit sıcaklık dağılımı sağlamaktadır. Bu yanma odasında toplam 72 EV yakıcı bulunmaktadır. Bu yakıcılar ikili çiftler halinde yerleştirilmiştir. Tek dairesel yanma odası ve yakıcıların yerleşimi sıcak gazın çok iyi karışmasını sağlamaktadır. EV yakıcılar sayesinde sıcak gazın homojen yayılımı sağlanmaktadır (Alstom, 2003).

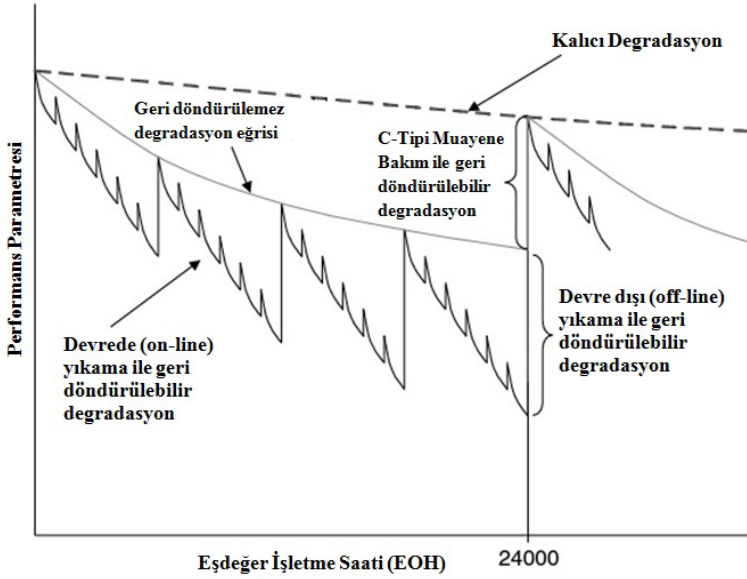
2.4 Gaz Türbinlerinde Degradasyon

Her güç ünitesi zaman içinde degradasyon (bozulma) etkilerini hisseder. Degradasyonun herhangi bir makinenin performansı üzerindeki etkilerini tahmin etme sorunu günümüzün en önemli tartışma konusudur. Bir gaz türbininin işlevi birçok farklı bileşenin hassas şekilde bir araya gelmesinin bir sonucu olduğundan izole bileşenlerden ziyade bir sistem olarak tüm gaz türbini sistemini ele almak gerekmektedir. Gaz türbininin bir sistem olarak ele alınması, degradasyonun tüm bileşenlerin uyumu üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır (Kurz ve Brun, 2000).

Gaz türbini sistemini ele aldığımızda, hava girişi, difüzör, kompresör, türbin ve egzoz bölümlerindeki tüm bileşen ve parçalar zaman içerisinde degradasyona maruz kalarak tüm sistemin bu durumdan etkilenmesi kaçınılmazdır. Gaz türbini sistemindeki yüksek basınç, nem, yüksek sıcaklık, kirlenme ve aşınmaya doğrudan veya dolaylı olarak maruz kalan tüm bileşenler zaman içerisinde çeşitli degradasyon faktörlerinden etkilenmektedir. Degradasyona sebep olan birçok farklı mekanizma bulunmaktadır.

Gaz türbini kanatları, çalışması sırasında boyutsal ve metalürjik degradasyona maruz kalmaktadır. Boyutsal degradasyon; aşınma, çentikler, oyuklar, sıcak korozyon ve kanatlardaki kaplamanın hasarlanarak sıyırılması veya yeniden kaplanmış kanatlardaki kaplamanın yeterince yapışmamış olmasından dolayı ortaya çıkmaktadır. Metalürjik degradasyon ise esas olarak malzeme yaşlanması, yorulma ve yüksek sıcaklıkta sürünmeden kaynaklanır (Tejedor, Singh ve Philididis, 2013).

Kirlenme, korozyon, oksidasyon, erozyon ve sürtünmenin etkileri gaz türbini sisteminin bir bütün olarak degradasyona uğramasına veya zaman içerisinde güç ve verimliliğinin azalmasına önemli ölçüde katkıda bulunur. Degradasyonun performans üzerindeki tipik etkisi Şekil 6'da gösterilmektedir. Şekil 6'da genel bir yaklaşım sağlamak amacıyla devrede ve devre dışı temizlik (yıkama) ve bir C-tipi muayene veya bakımın degradasyon etkileri yönüyle olası performans iyileştirmeleri ortaya konulmuştur.



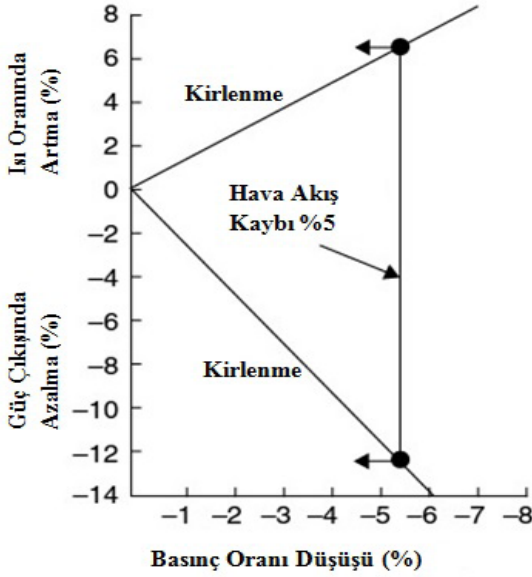
Şekil 6. Gaz Türbini Eşdeğer İşletme Saatine Göre Performans Degradasyonu (Kappis, 2013)

2.4.1 Kirlenme (Fouling)

Kirlenme, partiküllerin kanat profillerine ve dairesel yüzeylere yapışmasından kaynaklanmaktadır. Yapışmaya yağ veya su buharı neden olmaktadır. Bunun sonucunda, yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olan ve bir dereceye kadar kanat profilini değiştiren bir malzeme birikimi meydana gelmektedir. Kirlenmeye neden olan parçacıklar tipik olarak 2 ila 10 μm 'den daha küçüktür. Duman, yağ buharı, karbon ve deniz tuzları yaygın örneklerdir (Kurz ve Brun, 2000).

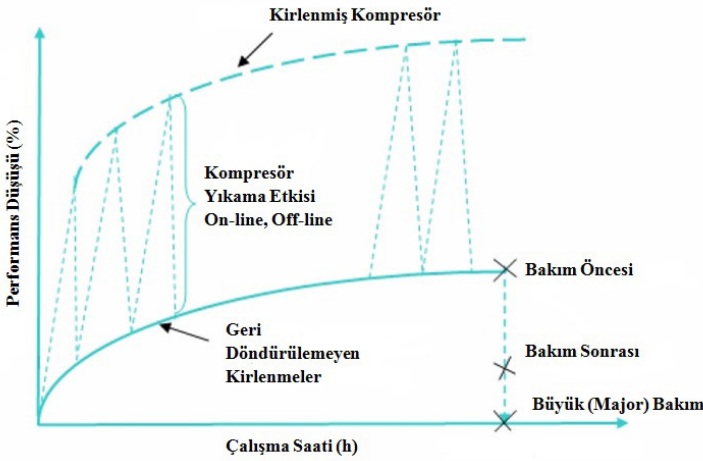
Gaz türbini sisteminde kirlenmeye neden olan en önemli faktör sisteme giren havadır. Bir gaz türbininde üretilen her bir megavat güç için dakikada yaklaşık 200 - 255 m^3 havanın sisteme girdiği değerlendirildiğinde giriş havasının kirlenmeyi önleyecek düzeyde iyi filtrelenmesi gerekmektedir (Boyce, 2012).

Tipik bir aksenal kompresör için yapılan hesaplamalar kanat kirlenmesi ve artan boşlukların etkilerinin basınç oranı kaybına, verimlilik kaybına, menzil veya durma marjı kaybına yol açtığını ortaya koymaktadır. Özellikle, artan açıklıklar daha düşük bir akışta boğulmaya neden olarak kompresörden geçen maksimum akışın azalmasına yol açmaktadır. Kirlenmenin ısı katsayısı, güç çıkışı ve kompresör basınç oranına etkilerini gösteren grafik Şekil 7'de %5 hava giriş kaybına göre oluşturulmuştur (Kurz ve Brun, 2001).



Şekil 7. Kirlenmenin Isı Katsayısı, Basınç Oranı ve Güç Çıkışına Etkisi (Loud, 1991)

Kompresör kirlenmesindeki performans düşüşünün büyük bir kısmı kompresörün sık sık yıkanmasıyla geri kazanılabilmektedir. Fakat yıkama ile telafi edilemeyen performans düşüşü kayıplarını geri kazanmak veya performans düşüşünü önlemek için sisteme bakım yapılması gerekmektedir. Bunun yanında literatürde major overhaul olarak adlandırılan büyük bakımda ise akış yolundaki parçalarının tamamen yenilenmesinden sonra kalıcı performans düşüklüğü ortadan kaldırılabilmektedir. Şekil 8'de kirlenmeye bağlı performans düşüşü gösterilmektedir (Diakunchak, 1992).



Şekil 8. Kirlenmeye Bağlı Performans Düşüşü (Diakunchak, 1992)

2.4.2.Korozyon

Korozyon, metalin bulunduğu ortamla kimyasal reaksiyona girmesi sonucu yüzey metallerinin aşınmasıdır. Genellikle metal havadaki oksijenle reaksiyona girer, ancak farklı korozyon mekanizmalarına katılabilecek başka birçok kimyasal reaksiyon da vardır. Bazı korozyon türleri (oksidasyon, sülfatlaşma ve sıcak korozyon gibi) esas olarak gaz türbininin sıcak bölümüne etki etmektedir. Aralık korozyonu ve çukurcuk korozyonu gibi diğer türler daha çok gaz türbininin kompresör bölümünde bulunur.

Gaz türbini uygulamaları için en önemli korozyon mekanizmaları şunlardır (Brun ve Kurz, 2010):

Oksidasyon, tip 1 sıcak korozyon, tip 2 sıcak korozyon, çukurcuk korozyonu ve aralık korozyonu. Bu mekanizmalar gaz türbinleri için oldukça önemlidir ve türbinlerin ömrünü ve performansını etkileyebilmektedir (Kurz, Meher-Homji, Brun, 2014).

Bir metalin oksidasyonu, metalin nötr durumdan pozitif yüklü bir iyon haline gelmesine neden olan bir veya daha fazla elektron kaybıdır. Bu da yüzeyde metal oksit oluşumuyla sonuçlanır. Paslanma tipik bir oksidasyon sürecidir. Yüzeydeki oksit tabakası, metal üzerinde koruyucu bir bariyer (pasivasyon filmi olarak da adlandırılır) olarak faydalı olabileceği gibi, metalin mekanik özelliklerinde hızlı bir azalmaya yol açacak oranda devam ettiğinde zararlı olabilmektedir (Kurz ve diğ., 2014).

Tip I veya yüksek sıcaklık korozyonu, 730 ila 950°C sıcaklık aralığında meydana gelir. Tip II veya düşük sıcaklık korozyonu ise 550 ila 730°C sıcaklık aralığında

meydana gelir. Gaz türbinlerinde sülfatlaşma ve vanadyum destekli sıcak korozyon, metalin beklenenden daha erken bozulmasının ve kırılmasının en önemli nedenidir. Örneğin, türbin kanatlarında sıcak korozyondan dolayı kanat metal yüzeyinin sürekli incilmesi ve ardından mekanik gerilimler altında yüzey altı çatlaklarının büyümesi olan sıcak gerilimli korozyon çatlama, birçok uçak ve kara tabanlı gaz türbinleri arızalarının temel nedeni olarak kabul edilmektedir (Kurz ve diğ., 2014).

Çukurcuk korozyonu, metal yüzeyde küçük ancak derin deliklerin oluşmasına yol açan bölgesel bir korozyon mekanizmasıdır. Metal parçanın geri kalanı tamamen temiz, parlak ve cilalı görünebileceğinden, bu delikler genellikle tespit edilemez ve beklenmedik arızalar için önemli bir tehlike oluşturur. Çukurlaşma genellikle gaz türbini kompresör kanatlarında görülür ve tuzlu su gibi iletken kirliliklerin metal yüzeydeki küçük yüzey çatlaklarına girmesinden kaynaklanır (Kurz ve diğ., 2014).

Aralık korozyonunun fiziksel süreci çukurcuk korozyonuna benzemektedir. Ancak aralık korozyonu parçalar arasındaki temas alanları, sızdırmazlık elemanları ve contaların altında veya kanat aralıklarındaki sertleşmiş kalıntı kirlilikler gibi boşluklarda meydana gelir. Bu aralıklardaki kirliliklerin konsantrasyonu çok yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Bu aralıklar parçalar sökülmeden kolayca kontrol edilemediğinden, aralık korozyonu önemli bir arıza riski oluşturmaktadır. Gaz türbinlerinde, rotor kanat tabanı ve disk yuvaları arasındaki yüksek gerilimli birleşme yüzeylerindeki aralık korozyonu, kanatlar sökülene (gaz türbini onarılmadıkça/revizyona alınmadıkça genellikle yapılmaz) veya kanat bağlantısı kırılarak sıcak gaz yoluna zarar verene kadar yıllarca fark edilmeyebilmektedir (Kurz ve diğ., 2014).

2.4.3 Erozyon (Partiküle Bağlı Aşınma)

Erozyon, kanat malzemesinin genellikle çapı 5-10 mikrondan büyük olan kum ve uçucu kül gibi sert parçacıklar tarafından aşındırılarak uzaklaştırılmasıdır. Erozyon, kanat aerodinamik performansını ve mekanik mukavemetini olumsuz etkiler. Erozyonun ilk etkisi yüzey pürüzlülüğünde artış ve kompresör verimliliğinde düşüştür. İlerledikçe kanat ön ve arka kenarlarda ve kanat ucunda kanat profili kontur değişiklikleri meydana gelir. Kanadın çıkış kenarının incilmesi yorulma mukavemetine zarar verir ve kanat arızasına neden olur. Kanat ucu mukavemetindeki önemli bir kayıp kompresörde basınç dalgalanmasına neden olabilmektedir. Bir rotor kanadı için en yaygın metal kaybı uçta olurken, bir stator için bu alan köke yakındır. Genel bir kural olarak, kesit alanı kaybı %10-15'i aştığında kanat değişimi dikkate alınmalıdır (Kurz ve diğ., 2013).

Endüstriyel uygulamalar için kullanılan son teknoloji filtreleme sistemleri büyük

partiküllerin sisteme girişini büyük oranda engellediğinden erozyon daha çok uçak motorları için bir sorun teşkil etmektedir. Fakat endüstriyel uygulamaların bulunduğu dış ortam koşullarının da, özellikle kum fırtınaları veya uçucu küllerin fazlalığında, erozyon için uygun ortam oluşturacağını da dikkate almak gerekmektedir.

2.4.4 Abrazyon (Sürtünmeye Bağlı Aşınma)

Abrazyon, dönen bir yüzey sabit bir yüzeye sürtündüğünde meydana gelir. Birçok makinede, uygun boşlukları oluşturmak için makinenin alıştırılması sırasında belirli bir miktar sürtünmeye izin verilen aşınabilir yüzeyler kullanılır. Malzemenin kaldırılması tipik olarak sızdırmazlık veya uç boşluklarını artıracaktır. Bu etkilerden bazıları makinenin temizlenmesi veya yıkanmasıyla tersine çevrilebilirken, diğerleri bileşenlerin düzeltilmesini, onarılmasını veya değiştirilmesini gerektirir (Diakunchak, 1992).

2.5. Gaz Türbini Bakımları

Bakım, bir tesis içindeki en önemli işlemlerden biridir. Gaz türbinlerinin üretimi ve bakımı tamamen farklı disiplinlere sahiptir. Üretim süreci parçaların belirli toleranslara uygun olarak şekillendirilmesi ve montajını içerirken, bakım süreci ise bu toleransların ve sağlanması gereken asgari performansa en yakın değerlerin, belirli bir plan çerçevesinde uygulanan işlemler yoluyla yeniden elde edilmesini içermektedir. Bakıma ilişkin plan ve prosedürler her zaman tartışmalıdır çünkü; bakımın tanımı ve içeriği her bakım sorumlusunun bireysel yorumuna göre değişir. Bakımın kapsamı, sıkı bir planlama ve uygulama, inceleme ve revizyon, bütünsel raporlar ve maliyet hesaplamalarını içermektedir.

Bakım maliyetleri, gaz türbinlerinin işletme koşullarının kalitesine bağlı olarak minimize edilebilmektedir. Bunun yanında sistemdeki her bir ekipmanın planlı bir bakım programı altında çalıştırılması etkin bir şekilde takip edilerek, izlendiğinde daha kesintisiz işletme ve uzun vadeli ömür elde edilebilmektedir. Ekipmanın yanlış işletilmesi ise öngörülen işletme süresinden çok daha kısa sürede bozulmalara ve sistemin devre dışı kalmasına neden olabilmektedir. Dolayısıyla, işletme ve bakım birbirine bağlı fakat ayrı birer uzmanlık ve tecrübe isteyen farklı disiplinlerdir.

Genel bakım sistemi bölümlere ayrılmıştır ve birçok farklı bakım kavramına dayanmaktadır. Aşağıda büyük enerji santralleri, petro-kimya tesisleri ve diğer proses tipi endüstriler için geliştirilmiş ve mükemmel bakım sistemine ulaşmayı hedefleyen beş temel bakım prensibi yer almaktadır (Boyce, 2012):

1. Arızalara dayalı panik bakım
2. Önleyici bakım

3. Performans bazlı bakım
4. Performans üretken bakım
5. Performansa dayalı toplam üretken bakım (PTPM)

Arızalara dayalı panik bakım prensibinde, belirgin sorunlar ortaya çıktığında hasarlı ekipmanın onarılması veya değiştirilmesi yer almaktadır. Bu tür sorunlara hızlı bir şekilde müdahale edebilmek için sahada büyük bir yedek parça stoku bulundurmak gerekmektedir. Stok maliyeti oldukça pahalı olduğundan düşük kaliteli parçalar satın alarak ve düşük ücretli işgücü çalıştırarak dengelemenin sağlanması istenmektedir ve sonuçta yapılan hizmetin kalitesi de düşük olmaktadır. Bu durumda, santralin her an devre dışı kalma olasılığı yüksektir. Santral devre dışı kaldığında üretim kaybı sonucu ortaya çıkan maliyet ve yedek parça stok malzeme maliyeti oldukça yüksektir (Boyce, 2012).

Önleyici bakım prensibinde, bakım faaliyetlerinin belirli bir plan ve program çerçevesinde yürütülmesi gerekmektedir. Bakım faaliyetleri arasındaki sürelerin ve parça değişim zamanlarının çok iyi kontrol edilmesi gerekmektedir. Bakım veya değişim işlemleri parçaların çalışma saatleri iyi durumdayken ve çok erken yapılırsa gereksiz yere üretimin durmasına, işletme ve bakım maliyetlerinin artmasına sebebiyet vermektedir. Bunun yanında, bakım veya değişim işlemleri parça çalışma saatleri dolmasına rağmen yapılmazsa bu durum önceden tespit edilemeyen büyük arızalara neden olabilmektedir (Boyce, 2012).

Performansa dayalı toplam üretken bakım, ekipman etkinliğini, verimliliğini ve bakım aralıkları arasındaki süreyi maksimize etmeyi amaçlar. Ekipmanın tüm ömrü boyunca kapsamlı bir bakım sistemi kurarak üst düzey yönetimden en alttaki işçilere kadar her bir çalışanı içerir. Mühendislik, bakım, işletme gibi tüm departmanlardaki çalışanlar üst yönetimin motivasyonu ile birlikte sistemin en iyi şekilde çalışması için görev alırlar. Buradaki "toplam" kelimesinin anlamı; maksimum tesis verimliliğini ve minimum işlem dışı kalma süresini, ekonomik verimlilik veya karlılığı, önleyici bakım prensibindeki gibi bakım önleme ve sürdürülebilirlik iyileştirilmelerini içerir. Ayrıca tüm çalışanların tam katılımını ve operatörlerin küçük grup faaliyetleri aracılığıyla otonom bakımını içeren bütünsel bir bakım sistemini işaret eder (Boyce, 2012).

İyi bir bakım programının hedefi "Sıfır arızadır. Bu hedefe ulaşmak için beş karşı tedbir bulunmaktadır (Boyce, 2012).

Bunlar aşağıda listelenmiştir:

1. İyi düzenlenmiş temel koşulların sürdürülmesi (temizlik, yağlama ve civatalama).
2. Uygun işletim prosedürlerine uyulması.
3. Toplam durum izleme (performans, mekanik ve teşhis tabanlı).

4. Tasarımdaki zayıflıkların iyileştirilmesi.

5. İşletme ve bakım becerilerinin geliştirilmesi.

2.5.1 Emre Amadelik ve Güvenilirlik

Bir gaz türbininin emre amadeligi, gaz türbininin herhangi bir dönemde, ihtiyaç olsun veya olmasın kurulu gücünde elektrik üretmeye hazır olduğu zamanın yüzdesidir. Gaz türbininin kurulu gücü, tesisin kabulü için yapılan performans testleri sonucunda belirlenen tasarım veya referans koşullarında gaz türbininin net elektrik enerjisi üretim kapasitesidir (Boyce, 2012).

Emre amadelik faktörü (AF), (ISO 3977-9, 1999) standardında aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$AF = 1 - \frac{FOH+POH}{PH} = \frac{AH}{PH} = 1 - \frac{UH}{PH} \quad (1)$$

Eş. 1’de FOH, zorunlu kesinti saatleri, POH, planlı kesinti saatleri, AH, kullanılabilir saatleri, UH, kullanım dışı saatleri, PH, toplam dönem saatlerini ifade etmektedir.

Güvenilirlik ise gaz türbininin talep edilen güçte belirli bir süre boyunca hedeflenen ve yeterli şekilde tanımlanmış bir ortamda arıza olmadan çalışma olasılığı olarak tanımlanır.

Güvenilirlik faktörü (RF) ise bir ünitenin, ana ekipmanın veya bileşenin ihtiyaç duyulduğu bir zamanda zorunlu kesinti durumunda olmama olasılığıdır ve Eş. 2 ile verilir (ISO 3977-9, 1999).

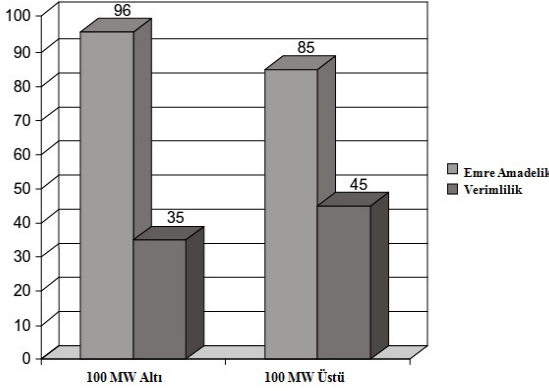
$$RF = 1 - \frac{FOH}{PH} = 1 - FOF \quad (2)$$

burada, FOH, zorunlu kesinti saatleri, PH, toplam dönem saatleri, FOF, zorunlu kesinti faktörünü ifade etmektedir.

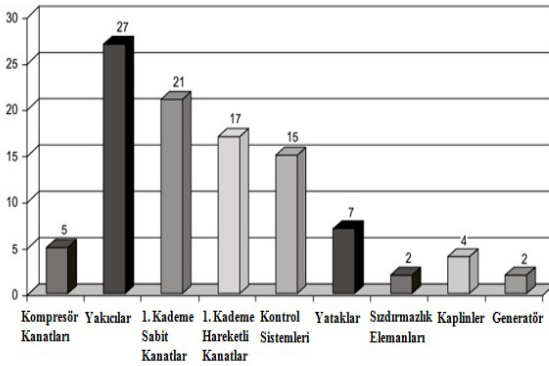
Yeni teknolojiye sahip gaz türbinlerinde 100 MW’ın altındaki üniteler için emre amadelik faktörü %94-97 arasındayken, 100 MW’ın üzerindeki daha büyük üniteler %85-89 emre amadelik faktörüne sahiptir. Daha büyük üniteler iki kat daha fazla üretim yapmaktadır, ancak emre amadelik faktörü %95’ten %85’e düşmüştür. Tüm üreticiler için 7-10 puanlık bir düşüş söz konusudur. Bu düşüşün bir kısmı daha büyük makinelerin tamirinin daha fazla zaman almasıyla ilgilidir. Ayrıca, yüksek sıcaklık ve basınçtan da kaynaklanmaktadır. Daha yüksek türbin giriş sıcaklığı ve daha yüksek basınç oranı ile birlikte ünite boyutu ve karmaşıklığındaki artış genel gaz türbini verimliliğinde bir artışa yol açmıştır. Verimlilikteki %7-10’luk artış birçok durumda Şekil 9’da görüldüğü gibi aynı miktarda veya daha

fazla emre amadelik düşüşüne yol açmıştır. 100 MW'lık bir tesiste emre amadelikteki %1'lik bir düşüş yılda 500.000 \$ gelir kaybına mal olabilir, dolayısıyla birçok durumda verimlilikteki kazanımları dengelemektedir. Bir tesisin güvenilirliği yakıt türü, önleyici bakım programları, çalışma modu, kontrol sistemleri ve ateşleme sıcaklıkları gibi birçok parametreye bağlı olmaktadır (Boyce, 2012).

Gaz türbinlerini komple bir sistem olarak düşündüğümüzde, içerisinde birçok farklı ekipman ve sistem bulundurmaktadır. Bu bileşenlerin çalışma koşullarına bağlı olarak sistemin genelini etkileyebilecek ve ünitenin devre dışı kalmasını sağlayabilecek nitelikte kısıtları bulunmaktadır. Günümüze kadar gelen birçok farklı tasarım ve uygulama metodu olmasına rağmen genel olarak oluşturulan istatistiklere göre Şekil 10'daki grafikten de görüleceği üzere yakıcılar, 1. kademe sabit ve hareketli kanatlar ile kontrol sistemleri gaz türbinlerinin duruş sürelerinin artmasına en çok etki eden ana bileşenlerdir.



Şekil 9. Emre Amadelik-Verimlilik Grafiği (Boyce, 2012)



Şekil 10. Gaz Türbini Bileşenlerinin Duruş Süresine Katkıları (Boyce, 2012)

2.5.2 Gaz Türbini Muayene ve Bakım Tipleri

Hazırda bekleme (stand-by) bakımları özellikle aralıklı hizmette kullanılan gaz türbinleriyle ilgilidir. Başlatma güvenilirliği birincil öneme sahiptir. Bu bakım, akü sisteminin rutin bakımını, filtre değişimini, yağ ve su seviyelerinin kontrolünü, rölelerin temizlenmesini ve cihaz kalibrasyonlarının kontrolünü içermektedir. Bu bakım tipi, türbinin emre amadeliğini kesintiye uğratmadan enerji talebinin yoğun olmadığı dönemlerde gerçekleştirilebilir. Periyodik test çalıştırması, stand-by bakımının önemli bir parçasıdır (Knorr ve Jarvis, 1975).

Devrede muayene ve bakım, ünitenin çalışır durumdaki genel ve sürekli gözlemlerden oluşmaktadır. Bu bakım tipi, yeni bir ünitenin çalıştırılması sırasında ve herhangi bir büyük demontaj çalışmasından sonra temel çalışma verilerinin oluşturulmasıyla başlar. Bu taban çizgisi daha sonra ünitedeki bozulmanın (degradasyon) ölçülebileceği bir referans görevi görür.

Yanma muayenesi ve bakımı (C-tipi muayene ve bakım) yakıt nozüllerinin, yakıcı gömleklerinin, geçiş parçalarının, çapraz alev borularının ve tutucularının, buji tertibatlarının, alev dedektörlerinin ve yakıcı akış manşonlarının nispeten kısa bir demontaj muayenesidir. Yanma muayenesi ve bakımı, gaz türbini uygulamalarında C-tipi (combustion type) muayene ve bakım olarak da adlandırılmaktadır. Bu muayene ve bakım işlemi iyi bir bakım programında ilk değiştirilmesi ve onarılması gerekenler olarak kabul edilen yakıcı gömlekleri, geçiş parçaları, yakıt nozülleri ve yakıcı başlıklarına odaklanır. Bu parçaların uygun şekilde incelenmesi, bakımı ve onarımı türbin sabit ve hareketli kanatları gibi sıcak gaz yolu parçalarının daha uzun ömürlü olmasına katkıda bulunacaktır.

Sıcak gaz yolu muayenesinin amacı, yanma işleminden çıkan sıcak gazlar nedeniyle yüksek sıcaklıklara maruz kalan parçaları incelemektir. Sıcak gaz yolu muayenesi, yanma muayenesinin tüm kapsamını ve ek olarak stator gövdesinin, türbin sabit ve hareketli kanatlarının ayrıntılı bir muayenesini içerir. Bu muayeneyi gerçekleştirmek için türbin muhafazasının üst yarısı çıkarılmalıdır. Muhafazanın çıkarılmasından önce, rotorun statora göre hizalanmasını sağlamak, yeterli boşlukları elde etmek ve stator muhafazasının bükülmesini önlemek için mekanik krikolar kullanılarak rotorun uygun bir şekilde merkez hattından desteklenmesi gereklidir (Beagle, Moran, McDufford, Merine, 2021).

Majör bakımın amacı, gaz türbininin girişinden egzozuna kadar tüm döner ve sabit bileşenleri incelemektir. Büyük çaplı bir bakım programı, gaz türbinine daha önce uygulanan boroskop incelemeleri ve sıcak gaz yolu muayenelerinin sonuçlarına göre planlanmalıdır. Majör bakımın kapsamı, gaz türbininin normal çalışması sırasında bozulmaya maruz kalan tüm bileşenlerinin incelenmesini içermektedir. Bu bakım, yanma ve sıcak gaz yolu muayenelerinin tüm kapsamlarını içererek gaz türbininin tamamının yatay bağlantılara kadar açılmasını

gerektirmektedir. Majör bakım kapsamında tüm üst muhafazaların sökülmesi, kompresör hareketli ve sabit kanatlarının yanı sıra yatak tertibatlarına da erişim sağlamaktadır. Muhafazaları, kovanları ve çerçeveleri çıkarmadan önce ünite uygun şekilde desteklenmelidir (Beagle ve diğ., 2021).

2.5.3 Eşdeğer İşletme Saati (EOH)

Muayene ve bakımlar arasındaki gaz türbini çalışma süresinin en yüksek yük ve gerilimlere sahip parçaların kümülatif aşınmasına dayandırılarak elde edilen formüllere göre hesaplanan çalışma süresine eşdeğer işletme saati (EOH) adı verilmektedir. Gaz türbinlerinin farklı koşullar altında çalışmalarına rağmen EOH formüllerine göre elde edilen eşdeğer işletme saati değeri, muayene ve bakım gerekliliği yönünden bir değerlendirme yapmaya olanak sağlamaktadır. Aşağıdaki hesaplama yönteminde Siemens firmasının kullanmış olduğu EOH formülasyonu verilmiştir (Cilindro, 2015).

$$t_{EOH} = a_1n_1 + a_2n_2 + \sum_{i=1}^n t_i + \sum_{l=1}^{n_{OH}} (f_l w_l b_l \Delta t_l) \quad (3)$$

burada, t_{EOH} eşdeğer işletme saatini (EOH), a_1 başlatma faktörünü, n_1 başlatma sayısını, a_2 hızlı yüklemelerin faktörünü, n_2 hızlı yüklemelerin sayısını, n hızlı sıcaklık değişikliklerinin sayısını, t_i hızlı sıcaklık değişiklikleri için eşdeğer işletme saatini, n_{OH} işletme sırasındaki veri noktalarının sayısını, f_l yakıt faktörünü, w_l su faktörünü, b_l işletim faktörünü ve Δt_l iki veri noktası arasındaki süreyi göstermektedir.

2.6 Gaz Türbini C-Tipi Bakım Çalışması

Bu çalışmada, Alstom (GE) GT13E2 1996 model, bir gaz türbininin 8. C tipi (combustion) bakımı incelenmiştir. Seçilen türbindeki bakım çalışması 8. C tipi bakımdır. Bakım kapsamında yapılan işlemler şu şekildedir.

- Bakım öncesi bakım yapılacak saha hazırlanarak kullanılacak malzeme, yedek malzeme, özel takımlar ayarlanması,
- Çalışma izinlerinin alınarak gerekli iş sağlığı ve iş güvenliği kontrollerinin yapılması,
- Türbinin devreden çıkarılmasından önce işletme kayıtlarının alınması, analizi, düzensizliklerin tespit edilmesi ve arıza listelerinin incelenmesi,
- Bakım öncesi kompresör girişi, türbin çıkışı, yanma odası ve difüzörde genel olarak gözle muayenelerin yapılması,
- Türbin izolasyonlarında ve izolasyon yastıklarında durum tespiti yapılması, çözümlerin incelenmesi, yanma izlerinin kontrol edilmesi,

- Egzoz kanalında ve sac malzemelerde hasar, kayma, boşluk, yanma izleri ve yağ kaçaıklarının gözden geçirilmesi,
- Ünitenin devreden çıkarılması,
- Ünitenin soğuması için gerekli sürenin beklenmesi,
- Termal blok üzerindeki muhafazanın sökülmesi,
- İşçi çalışma alanlarının açılması ve gerekli iç aydınlatmanın sağlanması,
- Türbin izolasyon ve yastıkların sökülmesi,
- Sistemdeki yağın drenajının yapılarak uygun bir depolama kabına boşaltılması,
- Enstrümanların sökülmesi,
- Hava giriş ve egzoz üst karkaslarının (casing) sökülmesi,
- Yakıcıların sökülmesi,
- Kompresör ve yanma odası üst dış karkaslarının (casing) sökülmesi,
- Yanma odası muhafazalarının ve üst parçalarının sökülmesi,
- Generatör ile kaplin bağlantılarının ayrılması,
- Yatakların üst muhafazalarının sökülmesi,
- Mevcuttaki hassas ölçülerin alınarak kaydedilmesi,
- Rotorun taşıyıcı sehpa üzerine alınması,
- Alt gövde ve yakıcı alt parçalarının sökülmesi,
- Filtre odaları, hava giriş kanalları ve susturucularda kalıntı malzeme (deposit), hasar, korozyon ve yabancı cisimlerin kontrolü, tespiti, gerekli muayenelerinin yapılarak bakım ve temizliğinin yapılması,
- Filtrelerin durumlarının tespiti, gerekli görülmesi halinde yenilenmesi,
- Türbinin tüm kademelerdeki hareketli ve sabit kanatlarının, sabit kanat taşıyıcılarının, rotor ve statorunun ve bağlantı parçalarının gözle kontrolü ve muayenesinin yapılması,
- Türbinin 1. 2. ve 3. kademe sabit kanatlarının ve diğer komponentlerinin (stator heat shield vb.) değişiminin yapılması, 4. ve 5. kademe kanat köklerinde hassas kontrollerin yapılması, 4. ve 5. kademe kanatların sökülmesi, temizlenmesi, gözle ve tahribatsız muayenelerinin gerçekleştirilerek gerekirse yenileri ile değiştirilmesi,
- Türbin 1. kademe kanatların hassas radyal boşluklarının sağlanması için uçlarının taşlanması,
- Kompresörün tüm kademelerdeki hareketli ve sabit kanatlarının, sabit kanat taşıyıcılarının, rotor ve statorunun ve bağlantı parçalarının gözle kontrolü ve muayenesinin yapılması,
- Kompresör girişinde, IGV ekipmanında, yatak muhafazasında, desteklerde ve genel yapısında kalıntı malzeme (deposit), hasar, korozyon ve yabancı cisim-

- lerin kontrolü, tespiti, gerekli muayenelerin yapılarak bakım ve temizliğinin yapılması,
- Yakıcı borularında solma, çarpılma, çatlakların gözle muayenesinin yapılması ve bağlantıların kontrolü,
 - Yakıcı desteklerinin muayenesinin yapılması,
 - Yakıcı manşonlarında çatlak, deformasyon, açıklık ve tıkanma kontrollerinin yapılması,
 - Yakıcıların değiştirilmesi,
 - Yağ filtre sisteminin tümünün kontrolünün yapılması, filtrelerin yenileri ile değiştirilmesi, filtre sisteminde düzeltici bakım ve onarım işlemlerinin yapılması,
 - Doğalgaz ve motorin kontrol ve acil durdurma valflerinin gözle muayenesi ve fonksiyon testlerinin yapılması,
 - Türbin ve kompresör yatağı, yatak muhafazaları, kaidesinde, geri dönüş, sızıntı, giriş yağ hatlarında gözle muayenelerinin yapılması,
 - Türbin alt gövde, alt yatak ve kanat taşıyıcıların ve rotorun yerine konması, boşlukların ölçülmesi, gerekli ayarların yapılması,
 - Üst türbin kanat taşıyıcıların konulması ve boşluk kontrolünün yapılması,
 - Montaj prosedürüne göre tüm parçalar ve yardımcı sistem ekipmanının montajının yapılması,
 - İzolasyon yastıkları ve sargılarının tamamlanması,
 - Muhafazaların kapatılması,
 - Devreye alma ve I&C ekipleri tarafından tüm son kontroller ve testlerin yapılarak ünitenin işletmeye hazır hale getirilmesi,

2023 yılında gerçekleştirilen bakım kapsamında elde edilen bulgular ve iyileştirmeler aşağıda özetlenmiştir.

Resim 4'te, hava giriş sistemindeki filtre odasının girişindeki kanatlarda kirlilik ve kanat yüzeylerinde sert ve kabuklaşmış kalıntılar tespit edilmiştir. C tipi bakım kapsamında su jeti yardımıyla temizlenerek kalıntı kirlilikler giderilmiştir. Resim 5'te, filtre giriş ızgarasında ölü böcek kalıntıları ve yağlı siyah tortular bulunmuştur. C tipi bakım kapsamında giriş havasının geçtiği tüm ince filtreler değiştirilmiştir fakat kalın filtrelerin değiştirilmesine santral işletmecisi tarafından gerek görülmemiştir.



Resim 4. Hava Giriş Kanatları

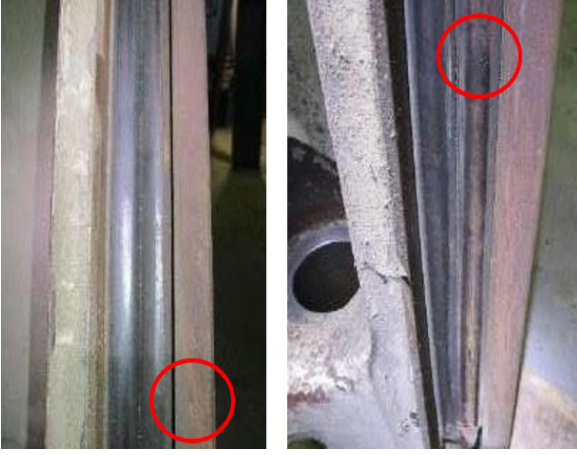


Resim 5. Filtre Giriş Izgarası

Resim 6'da hava giriş sistemindeki hava kanallarının iç yüzeylerinde sistem çalışırken sisteme giren hava içerisindeki nem ve tuz nedeniyle boyalı yüzeylerde soyulmalar ve bu bölgelerde paslanmaların meydana geldiği tespit edilmiştir. Bakım kapsamında, tüm kanalların temizliği yapılmıştır. Soyulan boya yüzeyleri ve paslı bölgeler zımpara işlemi yapıldıktan sonra yeniden bölgesel olarak boyanmıştır. Resim 7'de, hava giriş sistemindeki hava kanallarının iç yüzeylerinde sistem çalışırken sisteme giren hava içerisindeki nem ve tuz nedeniyle boyalı yüzeylerde soyulmalar ve bu bölgelerde paslanmaların meydana geldiği tespit edilmiştir. Bakım kapsamında, tüm kanalların temizliği yapılmıştır. Soyulan boya yüzeyleri ve paslı bölgeler zımpara işlemi yapıldıktan sonra yeniden bölgesel olarak boyanmıştır.



Resim 6. Hava Kanalları



Resim 7. Hava Giriş Üst Muhafazası Sızdırmazlık Contası

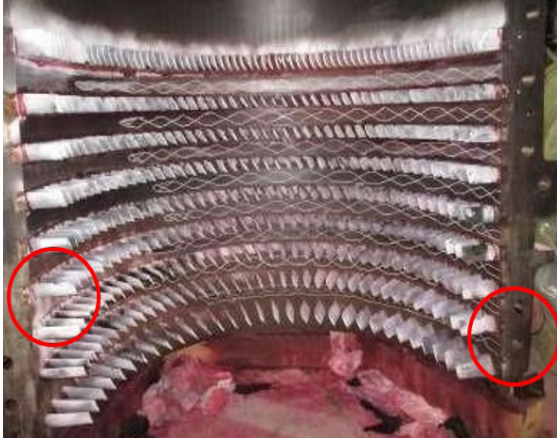
Resim 8’de, ayarlanabilir giriş kılavuz kanatları (VIGV), leading-edge’ten (ön basınç kenarı) başlayarak her iki kanat profili boyunca kaplamada aşınma (erozyon) ve soyulma tespit edilmiştir. Ayrıca leading edge’te çukurcuk korozyonu başlamış ve yapışkan-yagli tortularla kirlilik kalıntıları (fouling) tespit edilmiştir. Bakım kapsamında, VIGV kanatlarının üç döngü bakım süresince değiştirilmemiş olması ve yedeklerinin depo stoklarında bulunması nedeniyle yenileriyle değiştirilmiştir.



Resim 8. Ayarlanabilir Giriş Kılavuz Kanatları (VIGV) (Tuğran Enerji, 2023)

Resim 9’da görülen kompresör sabit kanat taşıyıcı (CVC) üst parça ve alt parçada iç yüzeylerde kirlenme ve korozyon tespit edilmiştir. Yapışma yüzeyi, civata deli-

ği ve dişi dış kısmında aşınma tespit edilmiştir. Bakım kapsamında, çevresel tüm yüzeyler özel solvent ve deterjanla temizlenmiştir. Bileme taşı ile yapışma yüzeyi boyunca hassas yüzey temizleme yapılmıştır. Dişi civata deliğine kılavuz çekilerek dişler uygun forma getirilmiştir. Resim 10'da görülen kompresör sabit kanatlarında (vane) 1. sıradan 4. sıraya kadar (4 dahil) kaplamanın yaklaşık %10'unda erozyon olduğu ve leading-edge'ten kanat profili boyunca kaplamada aşınmanın başladığı ve ayrıca yapışkan yağlı birikintilere sahip kirlenmelerin olduğu tespit edilmiştir. Bakım kapsamında kompresör sabit kanatlarında (vane) 1. sıradan 4. sıraya kadar (4 dahil) özel solvent ve temizlik malzemeleriyle temizlik işlemleri yapılmıştır. Bu bakım kapsamında ilk 4 sıranın değişimi öngörülmemiştir. Bir sonraki bakımda ilk 4 sıra kanatların temini yapılarak mevcut kanatların yeni kanatlar ile değiştirilmesi planlanmıştır.

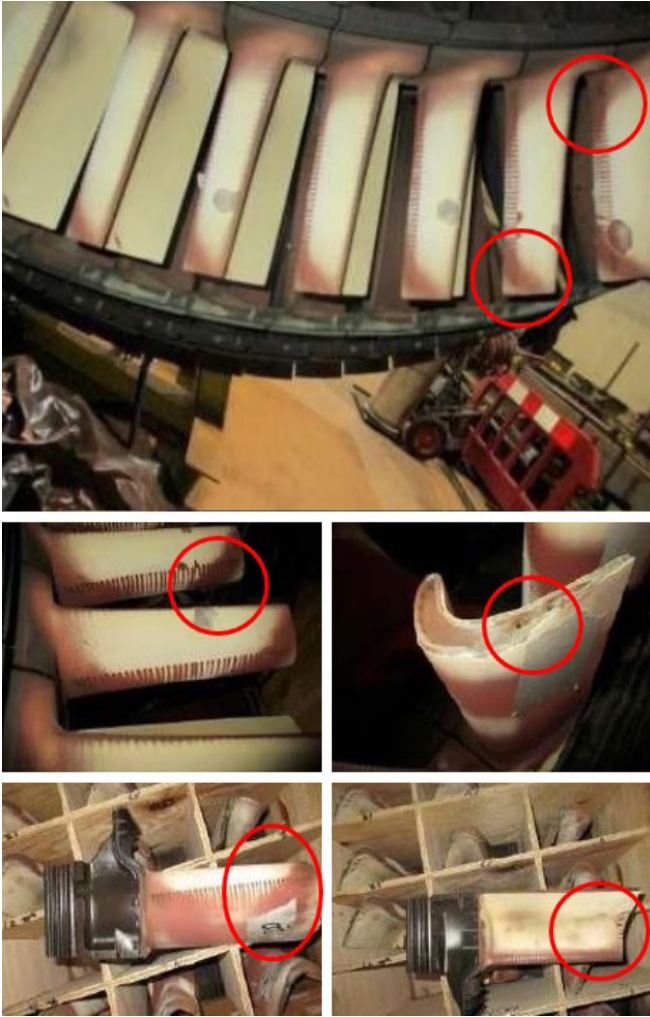


Resim 9. Kompresör Sabit Kanat Taşıyıcısı (CVC)



Resim 10. Kompresör Sabit Kanatları (1-4. sıra)

Resim 11’de görülen türbin 1. kademe hareketli kanatlarda oksidasyon, korozyon ve kanat uçlarında malzeme kaybı tespit edilmiştir. Bakım kapsamında 1. kademe hareketli kanatların tamamı yenileriyle değiştirilmiştir. Resim 12’de görülen türbin radyal yataklardan birinde aşınma, yağ ve vernik kalıntıları ile yüzeyde çatlak tespit edilmiştir. Bakım kapsamında yatak yüzeyinde yapılan temizlik ve tahribatsız muayene işlemleri neticesinde tespit edilen süreksizliklerin kabul kriterlerinin dışında olması nedeniyle yatağın kullanılmaması gerektiğine karar verilerek yenisi ile değiştirilmiştir. Türbin radyal yatağının değiştirilmesi ve shaft vibrasyonundaki iyileştirmeler nedeniyle türbin yatağı ve shaft vibrasyonu değerleri bakım öncesi değerlere göre daha iyi duruma getirilmiştir.



Resim 11. Türbin 1. Kademe Hareketli Kanatlar



Resim 12. Türbin Radyal Yatağı

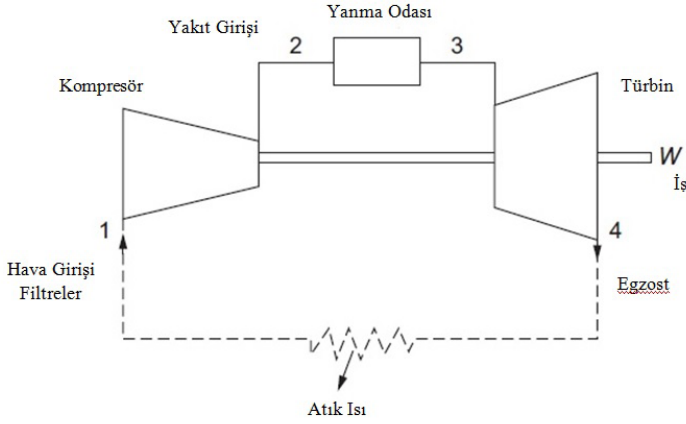
3. Filtre Değişiminin Etkisine ve Ekonomik Analizine İlişkin Hesaplamalar

Bakım kapsamında performans analizi yapılan gaz türbini, Şekil 11'de açık çevrimli bir sistem modelinde şematik olarak gösterilmiştir. Sistemin net gücü (\dot{W}_{net}), türbin gücünden (\dot{W}_T) kompresör gücünün (\dot{W}_K) çıkarılması ile hesaplanmaktadır. Aşağıdaki eşitliklerde termodinamik analizlerde kullanılan formüller verilmiştir.

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_T - \dot{W}_K \quad (4)$$

$$\dot{W}_T = \dot{m}_g(h_3 - h_4) = \dot{m}_g(c_{pg(T3)}T_3 - c_{pg(T4)}T_4) \quad (5)$$

$$\dot{W}_K = \dot{m}_h(h_2 - h_1) = \dot{m}_h(c_{ph(T2)}T_2 - c_{ph(T1)}T_1) \quad (6)$$



Şekil 11. Açık Çevrim Bir Gaz Türbini Şematik Gösterimi (Boyce, 2012)

burada, T_1 çevre sıcaklığı (K), T_2 kompresör çıkış sıcaklığı (K), T_3 türbin giriş sıcaklığı (K), T_4 türbin çıkış sıcaklığı (K), m_h hava debisi (kg/s), m_g gaz debisi (kg/s), \dot{W}_T türbin gücü (kW), \dot{W}_K kompresör gücü (kW) ve \dot{W}_{net} net güç (kW)'tür. Havanın ve yanma gazlarının sabit basınçtaki özgül ısıları c_{ph} ve c_{pg} , sıcaklığın fonksiyonu olarak Eş. 7 ve 8'de gösterilmiştir (Çetin, 2005).

$$c_{ph}(T) = 1,04841 - 0,000383719 T + \left(\frac{9,45378 T^2}{10^7} \right) \quad (7)$$

$$- \left(\frac{5,49031 T^3}{10^{10}} \right) + \left(\frac{7,92981 T^4}{10^{14}} \right) \quad [\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$$

$$c_{pg}(T) = 0,991615 + \left(\frac{6,99703 T}{10^5} \right) + \left(\frac{2,71298 T^2}{10^7} \right) - \left(\frac{1,22442 T^3}{10^{10}} \right) \quad [\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})] \quad (8)$$

Kompresör çıkış sıcaklığı T_2 ve türbin çıkış sıcaklığı T_4 Eş. 9 ve 10 ile hesaplanabilir.

$$T_2 = T_1 \left[1 + \frac{P_{rc}(k_h - 1)/k_h - 1}{\eta_{cis}} \right] \quad (\text{K}) \quad (9)$$

$$T_4 = T_3 \left[1 - \eta_{tis} \frac{1}{P_{rt}(k_g - 1)/k_g} \right] \quad (\text{K}) \quad (10)$$

burada, P_{rc} kompresör basınç oranı, P_{rt} türbin basınç oranı, k_h havanın özgül ısı oranı, k_g yanma gazının özgül ısı oranı, η_{cis} kompresör izentropik verimi ve η_{tis}

türbin izentropik verimidir. Basınç oranı, gerçek durumda basınç kayıpları için basınç kaybı değerleri ise Eş. 11-14 ile bulunabilir.

$$P_{rc} = \frac{P_2}{P_1} \quad (11)$$

$$P_3 = P_2 (1 - \varepsilon_{YO}) \quad (\text{bar}) \quad (12)$$

$$P_4 = P_1 (1 + \varepsilon_C) \quad (\text{bar}) \quad (13)$$

$$P_{rt} = \frac{P_3}{P_4} \quad (14)$$

burada, ε_{YO} yanma odası basınç kayıp parametresi (sbt: 0,02) ve ε_C çıkıştaki basınç kayıp parametresi (sbt: 0,02) olarak kabul edilmiştir. Gazların (\dot{m}_g) ve yakıtın (\dot{m}_y) kütledebileri, termodinamiğin birinci kanununa göre yanma odasındaki kütle ve enerji dengesinden Eş. 15 ve 16 ile bulunabilmektedir (Çetin, 2006).

$$\dot{m}_g = \dot{m}_h + \dot{m}_y \quad (15)$$

$$\dot{m}_y = \dot{m}_h \left[\frac{c_{pg}(T_3) T_3 - c_{ph}(T_2) T_2}{LHV \eta_Y - c_{pg}(T_3) T_3} \right] \quad (16)$$

burada, LHV yakıtın alt ısıl değeri, 46 286 (kJ/kg), η_Y yanma verimi, 0,98 olarak kabul edilmiştir ve \dot{Q}_{YO} yanma odasına verilen ısıl güçtür (Eş. 17). Sistemin verimi ve ısı oranı ile ilgili hesaplamalar Eş. 18 ve 19 ile bulunabilir.

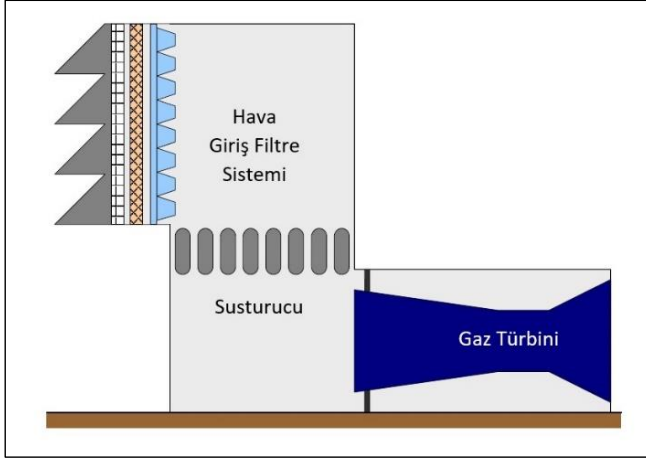
$$\dot{Q}_{YO} = \dot{m}_y LHV \eta_Y \quad (17)$$

$$\eta_G = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{YO}} \quad (18)$$

$$HR = \frac{3600}{\eta_G} \quad (19)$$

Gaz türbinlerinde hava giriş filtre sistemleri önemli bir ekipmandır. Gelişen teknoloji ile birlikte gaz türbinlerindeki filtre sistemleri kaba partiküllerin giderilmesinden, 0,01 mikrondan daha küçük parçacıklar ve sıvı partiküllerin tutulmasına kadar bir değişim göstermiştir. Gaz türbinlerinde, çalışma ortamlarına göre giriş hava filtre sistemlerinin tasarımlarının yapılması gerekmektedir. Giriş hava kalitesindeki düşüş gaz türbini çalışma performansı, çıkış gücü, verimi ve ömrü gibi birçok önemli parametreyi etkilemektedir. Ayrıca kirlenme, erozyon, korozyon gibi degradasyon faktörlerinin ortaya çıkmasına da yol açmaktadır. Şekil

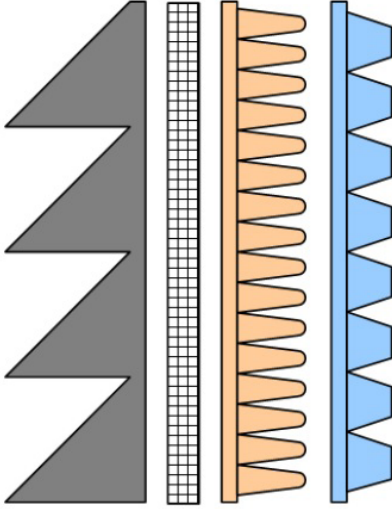
12’de gaz türbini hava giriş filtre sisteminin konumu şematik gösterimi verilmiştir. Filtre sistemleri, giriş havasının içeriğinde bulunan kirleticilerin gaz türbinine etkilerini en aza indirmek için tasarlanmıştır. Havadaki farklı kirletici türleri gaz türbini güvenilirliğini, emre amadeliliğini, bakım ve revizyon sürelerinin aralıklarını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Filtre sistemlerinin gaz türbininin içinde bulunduğu ortam koşullarına göre optimum faydayı sağlayacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Gaz türbini giriş havası içeriğindeki kirleticilerin tutularak kalitesinin iyileştirilmesi gaz türbini bileşenlerinde zaman içerisinde meydana gelebilecek erozyon, korozyon, oksidasyon, kirlenme vb. degradasyon faktörlerinin oluşum sürelerini uzatarak ömrünü artırmaktadır. Bunun yanında; ihtiyaçtan fazla derecede yapılan filtrasyon işlemleri, girişte basınç kaybına, hava debisinin azalmasına, verim ve güç kaybına neden olmakla birlikte üretim maliyetlerini de artırmaktadır. Bu çalışmada ele alınan Alstom (GE) GT13E2 tipi gaz türbinindeki filtre sisteminde Şekil 13’te gösterilen bir tasarım yapılmıştır.



Şekil 12. Filtre Sistemi Şematik Gösterimi (Wilcox, Baldwin, Garcia-Hernandez, Brun, 2010)

Şekil 13’te gösterilen filtre tasarımına göre soldan sağa doğru yağmur ve kar etkisinden filtre sisteminin korunması için hava şartları koruma başlığı bulunur. Sonrasında ikinci sırada havadaki böcek, sinek, yaprak vb. uçsuz canlı veya cansız varlıkların sisteme girişini engelleyen bir perdeli süzgeç yapısı bulunur. Ardından üçüncü sırada paket tip, 8 cepli, ePM10, %60 MIN filtre sınıfına sahip kaba ön filtre yer almaktadır. Kaba filtre, arkasında yer alan yüksek verimli ince filtrenin çok hızlı bir şekilde aşırı yüklenmesini de önlemektedir. Son olarak ise, kaset tipi, ePMI %80 MIN filtre sınıfına sahip yüksek verimli ince filtre yer almaktadır. Bu çalışmada incelenen Alstom (GE) GT13E2 tipi gaz türbinine ait filtre

sisteminde 320 adet ince ePM1 F9 %80 MIN ve 320 adet kaba ePM10 M6 %60 MIN filtre bulunmaktadır.



Şekil 13. Filtre Sistemi Tasarımı (Wilcox ve diğ., 2010)

Tablo 3. Kaba Filtre Teknik Özellikleri (Freudenberg)

Özellik	Parametre
Filtre sınıfı	ePM10 %60 MIN
Tipi	Paket tip - 8 cepli
Ölçüler	592 x 592 x 650 mm
Başlangıç basınç kaybı	65 Pa (0,65 mbar)
Son basınç kaybı	450 Pa (4,5 mbar)
Aktif filtrasyon alanı	6 m ²
Nominal debi	4250 m ³ /h
Toz tutma kapasitesi	4200 g (800 Pa'a kadar)
Yüzey hızı	3,2 m / h
Ağırlık	3,1 kg
Adeti	320 adet

Tablo 4. İnce Filtre Teknik Özellikleri (Freudenberg)

Özellik	Parametre
Filtre sınıfı	ePM11 %80 MIN F9
Tipi	Kaset tip
Ölçüler	592 x 592 x 292 mm
Başlangıç basınç kaybı	145 Pa (1,45 mbar)
Son basınç kaybı	625 Pa (6,25 mbar)
Aktif filtrasyon alanı	21 m ²
Nominal debi	4250 m ³ /h
Toz tutma kapasitesi	800 g (625 Pa'a kadar)
Ağırlık	7,6 kg
Adeti	320 adet

Bakımın yapıldığı 2023 yılında filtrelerin son değişim tarihinden bu yana yaklaşık 5 yıl geçmiştir. Sahadan alınan verilerin aşağıdaki koşullarda yapılan hesaplamalar ile karşılaştırılması sonucunda elde edilen sonuçların gerçek sonuçlarla arasında yaklaşık %0,89 sapma tespit edilmiştir. Buna istinaden, hava giriş filtrelerinde zaman içerisinde meydana gelen kirlenmenin basınç farkı değerlerine göre ortaya çıkan etkileri analiz edilmiştir. Analizlerde basınç kaybı parametresi değiştirilirken diğer faktörler sabit tutulmuştur.

Δp : 5 / 6 / 9 / 12 / 15 mbar

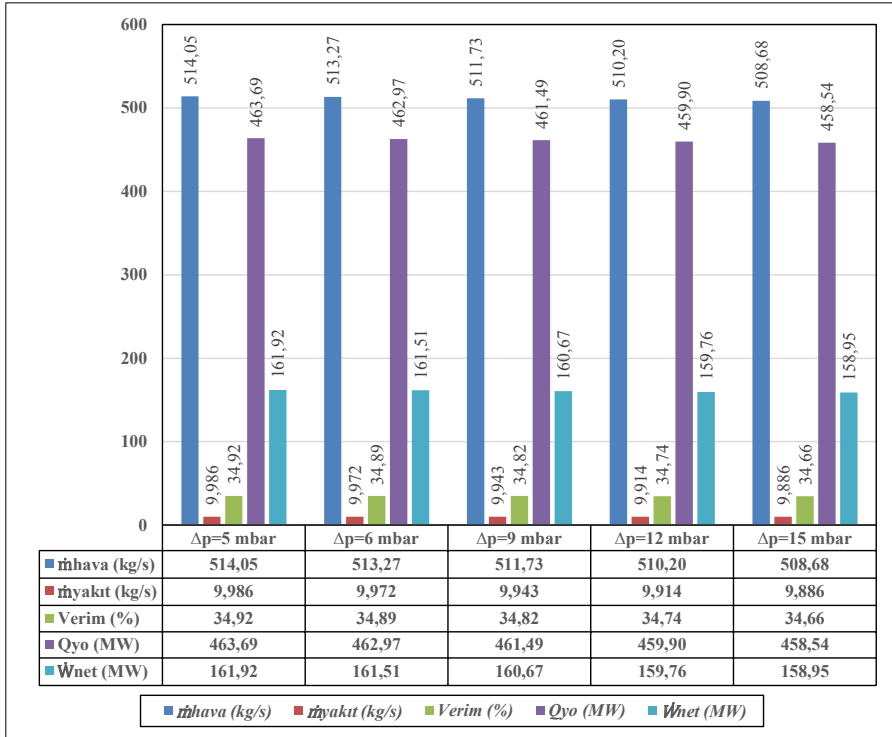
Bağıl nem %64

Dış ortam sıcaklığı 13°C

Dış ortam basıncı 1022 mbar

Filtre sistemindeki basınç farkının zamanla artması giriş havasındaki kirletici partiküller, nem, yağ, toz vb. dış ortam şartlarından kaynaklanmaktadır. Bu durumda giriş hava debisi düşmekte ve gaz türbininin ürettiği güç de zamanla azalmaktadır. Bu güç azalmasıyla birlikte sistemin veriminde de düşüş görülmektedir. Gaz türbinleri ile ilgili yapılan testler ve ölçümlerde literatürde; "Filtrelerin kirlenmesi nedeniyle basınç oranında meydana gelen düşüş türbin genel veriminde ve üretilen güçte önemli bir düşüşe yol açmaktadır. Giriş havasındaki basınç farkında 2,5 mbar artış yaklaşık olarak güçte %0,5 düşüşe neden olmaktadır" (Boyce, 2012) ibaresi yer almaktadır.

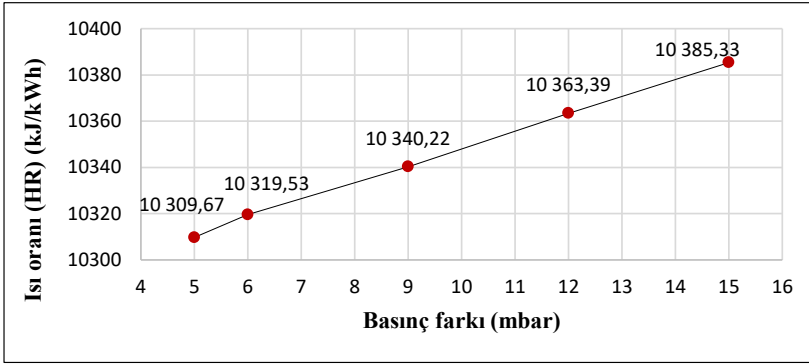
Bu çalışmada incelenen Alstom (GE) GT13E2 tipi gaz türbinindeki filtre sistemindeki basınç farkı değerlerine göre hava debisinin, yakıt debisinin, verimin, yanma odası gücünün ve sistem net gücünün değişimi Şekil 14'te verilmiştir. Gaz türbini giriş hava filtre sisteminde ilk olarak ele alınan Δp basınç farkı değeri 5 mbar'dır.



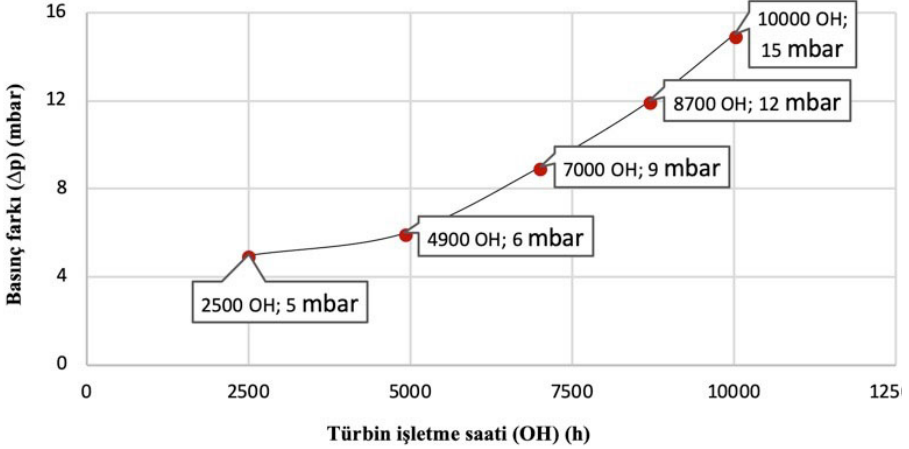
Şekil 14. Filtre Basınç Farkı Nedeni İle Sistem Parametrelerinin Değişimi

Bu değerde türbinde üretilen çıkış gücü 161,92 MW olarak hesaplanmıştır. Δp değeri 15 mbar seviyesine çıktığında türbin çıkış gücü 158,95 MW olmaktadır. Basınç farkındaki 10 mbar artış türbin çıkış gücünde 2,97 MW'lık bir azalmaya yol açmaktadır. Bu değerdeki bir çıkış gücü kaybı yaklaşık %1,84 olmaktadır. Yukarıda yer alan gaz türbinleri literatüründeki test ve ölçümler sonucunda her 2,5 mbar basınç düşüşünde yaklaşık %0,5 değerine çok yakın bir değer elde edilmiştir. Bu çalışmada her 2,5 mbar basınç düşüşünde yaklaşık olarak ortalama %0,46 türbin çıkış gücünde azalma sonucuna varılmıştır. Filtrelerdeki basınç düşüşüne göre ısı oranında meydana gelebilecek değişimlerin iki farklı literatüre göre değişik değerlerle ifade edildiği tespit edilmiştir. Bunlardan bir kaynağa göre basınç düşüşündeki 2,5 mbar artış yaklaşık olarak ısı oranında %0,3 artışa neden olduğu (Boyce, 2012), bir diğer kaynakta da %0,1 artışa neden olduğu (Wilcox ve diğ., 2010) belirtilmektedir. Analiz sonuçlarına göre gaz türbini filtre sistemindeki basınç düşüşü değerlerine göre ısı oranında, her 2,5 mbar basınç düşüşünde yaklaşık olarak ortalama %0,18 artış olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 15'te ısı oranının filtrelerin yol açtığı basınç farkı ile değişim grafiği yer almaktadır. Gaz türbini giriş hava sistemindeki filtrelerde meydana gelen basınç düşüşünün giriş

hava debisi ve yakıt tüketimi miktarlarına etkileri Şekil 14'te belirtilmiştir. Δp değerinin 5 mbar'dan 15 mbar'a kadar artışıyla birlikte giriş hava debisinde ve sistemin veriminde düşüş gözlemlenmiştir. Giriş hava debisinin 514,05 kg/s değerinden 508,68 kg/s değerine kadar azalmasıyla birlikte yakıt tüketiminde de 9,99 kg/s değerinden 9,89 kg/s değerine doğru bir miktar düşüş ortaya çıkmıştır. Bunun yanında, sistemin genel verimi ilk durumda %34,92 olarak hesaplanmıştır. Bu değer de girişteki basınç düşüşünün 10 mbar artışı ile birlikte %34,66 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 15. Isı Oranının Filtrelerin Yol Açtığı Basınç Farkı İle Değişimi



Şekil 16. Türbin İşletme Saatine Göre Basınç Farkı Değerlerinin Değişimi

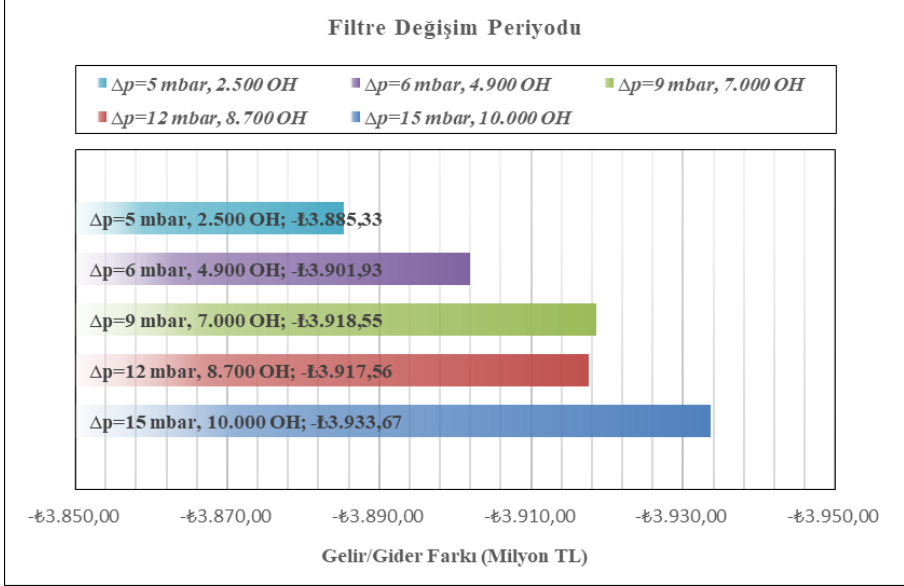
Santralde kullanılan filtrelerin değişim periyodu için basınç kaybı değerinin et-

kileriyle ilgili bir maliyet analizi yaparak analiz sonuçlarına göre değiştirmek uygulamada daha çok kullanılmaktadır. İki kademeli filtre sistemlerinde 5000 ile 10.000 işletme saati (OH) aralığında değişim yapılması tavsiye edilmektedir (Wilcox ve diğ., 2010). Santralden elde edilen verilere göre filtre değişim periyotlarını çeşitli zaman dilimlerine göre değerlendirmek için öncelikle Δp artışının işletme saatine göre dağılımı belirlenmiştir. Toplamda 10.000 OH üzerinden bir değerlendirme yapılması planlanmıştır. Bu değerlendirmeye göre Şekil 16'daki Δp değişim grafiği oluşturulmuştur.

Şekil 16'ya göre, $\Delta p=5$ mbar'da 2500 OH, $\Delta p=6$ mbar değerinde 2400 OH, $\Delta p=9$ mbar değerinde 2100 OH, $\Delta p=12$ mbar değerinde 1700 OH ve $\Delta p=15$ mbar değerinde 1300 OH işletme saatinde toplamda 10.000 OH değerine göre hesaplamalar yapılmıştır. Santralin ürettiği elektrik enerjisinin 2024 yılı Mayıs ayı EPIAŞ verilerine göre ortalama satış fiyatı 2250 MWh/TL alınmıştır. Doğalgaz alışı fiyatı ise BOTAŞ 2024 yılı Mayıs ayı ortalama verilerine göre KDV ve ÖTV dahil 14,16 TL/Sm³ alınmıştır. Filtre fiyatları 2024 yılı Mayıs ayı itibarıyla ince filtre için 4000 TL, kaba filtre için 1000 TL'dir. Ayrıca, sistemdeki filtrelerin tamamının değişimi için 5 işçi çalıştırılarak, toplam 48 saat santralde duruş gerektiği hesaba katılarak 2024 yılı işçi çalışma ücreti toplam 250 TL/h olarak alınmıştır. Bu verilere göre yapılan filtre değişimi odaklı gelir gider hesaplamaları sonucunda santralin giriş hava filtrelerinin değişiminin $\Delta p = 5$ mbar değerine ulaştığında ve yaklaşık olarak her 2500 OH çalışma süresi aralığında yapılması optimum seçenek olarak gözükmektedir. En iyi durum olan 5 mbarlık basınç düşümüne ait değerler Tablo 5'te, tüm durumlar için özet grafik Şekil 17'de belirtilmiştir.

Tablo 5. $\Delta p=5$ mbar, 2500 OH filtre değişim periyodu

GELİR					Duruş Gideri (TL)	Net Gelir (TL)
Δp (mbar)	OH (h)	\dot{W}_{net} (MW)	Enerji (MWh)	Gelir (TL)		
5	2500	161,92	404 787,91	910 772 807,05	17 486 837,90	893 285 969,15
5	2500	161,92	404 787,91	910 772 807,05	17 486 837,90	893 285 969,15
5	2500	161,92	404 787,91	910 772 807,05	17 486 837,90	893 285 969,15
5	2500	161,92	404 787,91	910 772 807,05	17 486 837,90	893 285 969,15
TOPLAM				3 643 091 228,18	69 947 351,58	3 573 143 876,60
GİDER				Gelir/Gider Farkı (TL)		
\dot{m}_y (m ³ /s)	Yakıt (TL)	Filtre (TL)	Gider (TL)	-3 885 326 665,92		
14,90	1 862 957 635,63	1 660 000,00	1 864 617 635,63			
14,90	1 862 957 635,63	1 660 000,00	1 864 617 635,63			
14,90	1 862 957 635,63	1 660 000,00	1 864 617 635,63			
14,90	1 862 957 635,63	1 660 000,00	1 864 617 635,63			
TOPLAM	7 451 830 542,52	6 640 000,00	7 458 470 542,52			



Sekil 17. Basınç Farkı Değişimine Göre Gelir Gider Farkının Değişimi

4. Sonuçlar ve Öneriler

Elektrik üretiminde ve kojenerasyon sistemlerinde kullanımı oldukça yaygın olan gaz türbinlerinin, gelişen ekonomi ve sanayi ile birlikte günümüzde devamlı artmakta olan enerji talebinin karşılanması için sürdürülebilir bir şekilde işletilmesi önem arz etmektedir. Bu kapsamda enerji arz güvenliğini sağlamak amacıyla, elektrik üreten tesislerde sürekli ve belirli performans değerlerinde kesintisiz ve kaliteli bir enerji sağlamak için gaz türbinlerinin periyodik bakımlarının özenle, yeterli teknik donanım ve kalifiye personelle, sistemin ihtiyaç duyduğu zamanda, belirli bir plan çerçevesinde yapılması gerekmektedir. Yapılan periyodik bakımlar sonucunda gaz türbinlerinin sürdürülebilir çalışma koşulları ve istenilen performans değerlerinde kesintisiz enerji üretimlerinin sağlanması büyük oranda güvence altına alınmaktadır.

Bu çalışmada, Alstom (GE) GT13E2 1996 model, bir gaz türbininin 8. C tipi (combustion) bakımı incelenmiştir. Bakım kapsamında gaz türbininde sahada yapılan işlemler, elde edilen bulgular ve bu bulgulara yönelik uygulanan iyileştirme çalışmaları hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca gaz türbinlerinde özellikle türbin giriş havasından kaynaklanan, filtre sisteminde meydana gelen kirlenmenin sistem çalışma performansına etkileri incelenerek filtre değişim periyotlarının maliyet analizi yapılmıştır. Türbin giriş havası filtre sistemindeki basınç farkının türbin işletme saatine göre değişim profili oluşturularak, bu değişimin türbin giriş hava debisi, çıkış gücü, ısı oranı, yakıt tüketimi ve verim üzerindeki etkileri incelen-

miştir. Sahadan alınan verilerle yapılan hesaplamalara göre elde edilen sonuçlarla aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır.

- Gaz türbini giriş havasındaki basınç farkının 5 mbar değerinden 15 mbar değerine kadar artmasıyla birlikte yani, 10 mbar'lık basınç düşüşünde türbin giriş havasında yaklaşık olarak %1,045'lik bir kayıp tespit edilmiştir. Böylece, her 2,5 mbar basınç düşüşünde giriş hava debisinde yaklaşık olarak %0,26 azalma sonucuna varılmıştır.
- Gaz türbini giriş havasındaki her 2,5 mbar basınç düşüşünde türbin çıkış gücünde yaklaşık olarak %0,46 azalma tespit edilmiştir.
- Gaz türbini ısı oranında, her 2,5 mbar basınç düşüşünde yaklaşık olarak %0,18 artış olduğu sonucuna varılmıştır.
- Gaz türbininde tüketilen yakıt miktarındaki azalma ise 10 mbar basınç düşüşünde %1,0014 oranında meydana gelmiştir. Böylece, her 2,5 mbar basınç düşüşü için yakıt tüketiminde yaklaşık olarak %0,25 azalma sonucuna varılmıştır.
- Bu değerlere göre hesaplanan genel verim %34,92 değerinden %34,66 değerine düşmüştür. Bu durumda türbin giriş hava filtrelerindeki 10 mbar'lık basınç düşüşü ile sistemin genel veriminde yaklaşık %0,75'lik bir düşüş olduğu hesaplanmıştır. Sonuç olarak, türbin giriş havasındaki her 2,5 mbar basınç düşüşünün sistemin genel verimini yaklaşık olarak %0,19 düşürdüğü tespit edilmiştir.

Türbin giriş havasındaki basınç farkının artmasıyla birlikte çıkış gücü ve yakıt tüketim miktarlarındaki değişimlere göre filtre değişim periyotlarının, filtre maliyetleri, duruş süreleri ve değişim işçilikleri hesaplanarak yapılan analizlere göre günümüz koşullarında yakıt maliyetlerinin yüksekliği ve elektrik satış fiyatının nispeten düşük olması nedeniyle gelir gider arasındaki fark eksi çıkmaktadır. İki aşamalı filtre sistemlerinde 5000 ile 10.000 işletme saati (OH) aralığında filtre değişiminin yapılması tavsiye edilmektedir (Wilcox ve diğ., 2010). Buna karşın, güncel fiyatlarla mevcut duruma göre yapılan maliyet analizine göre santralin giriş hava filtrelerinin değişiminin $\Delta p = 5$ mbar değerine ulaştığında ve yaklaşık olarak her 2500 OH çalışma süresi aralığında yapılması optimum seçenek olarak gözükmektedir.

Gaz türbini sistemine giren havanın kalitesi basınç farkı değişim profilini etkilemektedir. Bu çalışmada ele alınan değişim profili türbinin içerisinde bulunduğu dış ortam şartları ve sahadan elde edilen bilgilere göre oluşturulmuştur. Filtre değişiminin uygun zamanda yapılması gaz türbininin asgari düzeyde güç kaybı yaşamasına ve bakım kapsamında tespit edilen korozyon, erozyon, oksidasyon vb. degradasyon faktörlerinden en az düzeyde etkilenecek daha yüksek performansta çalışmasına olanak sağlayacaktır.

Ayrıca bakım kapsamında ünitenin, kompresöründe meydana gelen korozyon, erozyon, oksidasyon vb. degradasyon faktörlerinden temizleme yoluyla kısmen arındırılması, gaz türbini tüm kademe kanatlarının yenileri ile değiştirilmesi ve türbin yatak değişimi ile yatak ve şaft vibrasyonlarındaki iyileştirmeler sonucunda santralin emre amadelik ve güvenilirliğinde önemli bir artış sağlanacağı değerlendirilmektedir. Bunun tespiti ise bir sonraki bakıma kadar geçen süredeki ünitenin emre amadelik ve çalışma istatistikleri ile ancak yapılabilecektir.

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynakça

- Beagle, D., Moran, B., McDufford, M., Merine, M. (2021). GER-3620P(01/21) Heavy-duty gas turbine operating and maintenance considerations. *GE Power*. Atlanta, GA. Erişim Adresi: <https://www.gevernova.com/gas-power/resources/technical-downloads/ger-3620p-operation-maintenance-considerations>
- Boyce, Meherwan P. (2012). *Gas Turbine Engineering Handbook*. (Fourth Edition). Waltham: Butterworth-Heinemann.
- Brun, K., Kurz, R. (2010). *Turbo myth busters*. *Turbomachinery International*, 51(2), 40.
- Cilindro, A. (2015). Performance analysis and economic effects of maintenance and hot gas path inspection of a combined cycle power plant. Master Thesis, *Università degli studi della Campania Luigi Vanvitelli, Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione*, Caserta.
- Çetin, B. (2005). Çok amaçlı enerji üretim sistemlerinin termoekonomik optimizasyonu. Doktora Tezi, *YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Çetin, B. (2006). Gaz türbinlerinin optimal performans analizi. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 7(1) 59-71.
- Diakunchak I. S. (1992, April). Performance degradation in industrial gas turbine. *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, 114(2), 161-168. Doi: <https://doi.org/10.1115/1.2906565>
- Freudenberg Filtration Technologies Product Catalog International. (2024). *Compact pocket filter T 60 T 60 1/1 8L Viledon*.
- Freudenberg Filtration Technologies Product Catalog International. (2024). *Maxipleat cassette filters box type series, MX 98 R-D Viledon*.
- ISO 3977-9:1999, (1999). *Gas turbines – Procurement – Part 9: Reliability, availability, maintainability and safety standard*.

- İnternet: Alstom GT13E2 gas turbine information documentation. (2003). Erişim Adresi: :<https://www.scribd.com/document/411248140/GT13E2-General-Data-pdf> Son Erişim Tarihi: 15.06.2024
- Kappis, W. (2013). Compressors in gas turbine systems. Modern gas turbine systems, high efficiency, low emission, fuel flexible power generation, *Woodhead Publishing Series in Energy*, 20, Chapter 4.
- Knorr, R. H., Jarvis, G. (1975). Maintenance of industrial gas turbines. ASME Publication 75-GT-93. *General Electric Company. Schenectady*, New York.
- Kurz, R., Brun K. (May 2000). Degradation in gas turbine systems, *Conference Paper in Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*.
- Kurz, R., Brun, K. (2001). Degradation in gas turbine systems, *Transactions of the ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 123(1), 70-77. Doi: <https://doi.org/10.1115/1.1340629>
- Kurz, R., Meher-Homji, C., Brun K., Moore J., Gonzalez F. (2013, October 1-3). Gas turbine performance and maintenance, *Proceedings of the Forty-Second Turbomachinery Symposium*, Houston, Texas, US.
- Loud, L. A. A. S. (1991). Gas turbine inlet air treatment. *General Electric Company. Schenectady*, New York.
- Meher-Homji, Cyrus B. (2000). The historical evolution of turbomachinery. *Proceedings of the 29th Turbomachinery Symposium*, Texas, 281-322.
- Tejedor, T. A., Singh, R., Pilidis P. (2013). Maintenance and repair of gas turbine components. Modern gas turbine systems, high efficiency, low emission, fuel flexible power generation, *Woodhead Publishing Series in Energy*, 20, Chapter 13.
- Tuğran Enerji A.Ş. (2023). EÜAŞ Tekirdağ Combined Cycle Power Plant (A) GT13E2 8th C-inspection Report. Tekirdağ.
- Wilcox, M., Baldwin, R., Garcia-Hernandez, A., Brun, K. (2010, April) *Guideline for gas turbine inlet air filtration systems*. Release 1.0. Gas Machinery Research Council, Southwest Research Institute.



IMPORTANCE AND COST OF MAINTENANCE PRACTICES IN WIND TURBINES

Eylem YILMAZ ULU^{1*}

¹ Pamukkale University, Technology Faculty, Automotive Department, Denizli
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-6257-984>

Keywords

Wind energy, wind turbine efficiency, wind turbine facility, wind turbine maintenance, maintenance costs

Abstract

The daily increase in global demand for energy the use of renewable energy sources. Global warming, environmental pollution, and the depletion of fossil fuels require energy production sources to be clean and renewable. Among the renewable energy technologies wind energy is the most preferred technology after solar. Advancements in technology, increases in capacity factors, and decreases in initial investment costs contribute to the growing number of wind energy facilities. The most important component of wind energy facilities is the wind turbine. As with any operating device, wind turbines can face malfunctions for various reasons. Ensuring that turbines operate safely, efficiently, and with longevity is possible through regular maintenance and repairs. Mechanical and electrical malfunctions can cause interruptions in energy production and financial losses. Planned maintenance practices can ensure the continuity of energy production and prevent losses. It has been determined that if the necessary maintenance are not carried out on time, a financial loss of 613.2 \$ / per day will occur for 1 MW wind power plant operating with %35 capacity factor, based on the unit energy production pricing of 73 \$/MWh as listed in the Electricity Market YEKDEM and according to Law No. 3453. This study examines the importance of maintenance practices and the cost of maintenance in wind energy facilities.

* eyilmaz@pau.edu.tr
doi : 10.46399/muhendismakina.1537198

RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE BAKIM UYGULAMALARI VE BAKIM MALİYETİ

Anahtar Kelimeler

Öz

Rüzgar enerjisi, rüzgar türbini verimi, rüzgar türbin santrali, rüzgar türbini bakımı, bakım maliyeti

Tüm dünyada enerjiye olan talebin günden güne artması yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını zorunlu kılmaktadır. Küresel ısınma, çevre kirliliği, fosil yakıtların tükeniyor olması; enerji üretim kaynaklarının temiz ve yenilenebilir olmasını gerektirmektedir. Yenilenebilir enerji teknolojileri arasında rüzgar enerjisi güneşten sonra en çok tercih edilen enerji teknolojisidir. Gelişen teknoloji, kapasite faktörlerinin her geçen gün artması, ilk yatırım maliyetlerinin azalması rüzgar enerjisi santrallerinin kurulmasını her geçen gün arttırmaktadır. Rüzgar enerji santrallerinin en önemli bileşeni rüzgar türbinleridir. Çalışan her cihaz gibi rüzgar türbinlerinde de çeşitli nedenlerle zaman zaman arızalar meydana gelmektedir. Türbinlerin uzun ömürlü, güvenli ve verimli şekilde çalışmaya devam edebilmesi, düzenli şekilde bakım ve onarımlarının yapılması ile mümkündür. Meydana gelebilecek mekanik ve elektriksel arızalar enerji üretiminde kesintiye ve maddi kayıplara sebep olmaktadır. Planlı bakım uygulamaları, enerji üretiminin devamlılığını ve kayıpları engelleymeyi mümkün kılmaktadır. Bu çalışmada rüzgar enerji santrallerinde bakım uygulamalarının önemi ve bakım maliyeti incelenmiştir.

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 22.08.2024

Submission Date : 22.09.2024

Kabul Tarihi : 07.02.2025

Accepted Date : 07.02.2025

1. Introduction

The global wind energy sector is poised for substantial growth in the coming years. According to the Global Wind Energy Council (GWEC), annual wind energy installations are projected to double from 78 GW in 2022 to 155 GW by 2027, bringing the total global wind capacity to approximately 1,581 GW(URL-1). By technological advancements, increasing demand for renewable energy, and supportive government policies worldwide, the global wind energy market was valued at \$62.1 billion in 2019 and is expected to reach \$127.2 billion by 2027(URL-2).

The gradually increasing use of fossil fuels causes global warming, disrupting the natural balance, leading to rapid melting of glaciers, temperatures deviating from seasonal norms, droughts in some regions, and floods in others. All these negative effects can be reduced by obtaining the energy needed from renewable sources and using it efficiently.

Türkiye is abundant in renewable energy sources. As stated in data reported by official sources, the potential for wind energy is 48,000 MW(URL-3; Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources (2023). The first wind energy facility in Türkiye began operating in 1998 in Çeşme, İzmir, with a capacity of 55 kW (Çanka Kılıç, 2012). Investments have increased since 2005, and many wind energy facilities have been established (İlkılıç, 2009; Koç and Şenel, 2013; Hayli, 2001). Today, the installed capacity has exceeded 10 GW (URL-4). While the number of onshore/offshore wind turbine increasing daily, 2 MW onshore and 5 MW offshore are being projected (URL-5).

Wind energy is an energy source that stands out among renewable energy sources with its environmental sustainability and economic benefits. Wind turbines play a key role in the production of this energy. However, regular maintenance is very important for the turbines to operate effectively and continuously. Due to the energy loss resulting from the failure of the wind turbine must be covered by fossil fuels.

Periodic maintenance in wind turbines ensures the smooth operation of these systems, the safety of the system and employees, the long life of the turbine components, the continuity of energy supply, the reduction of environmental impacts with less energy loss and maximum efficiency in energy production. Otherwise, energy losses occur and system performance is adversely affected (Öztürk, 2020). Maintenance costs, although they may seem high in the short term, will prevent the costs of possible problems in the long term (Mishnaevsky, 2019).

Wind turbines are complex systems subject to various types of failures, which can be broadly categorized into external and internal failures. Damage to the turbine's exterior components, usually the blades, named external failures(Bird

strikes, Lightning strikes, rain, hail,..). And malfunctions within the turbine's mechanical and electrical systems named internal failures(Gearbox Failures, Generator Failures, Bearing Failures, Nacelle Fires,..). Understanding these failure modes is crucial for developing effective maintenance strategies and improving the reliability and longevity of wind turbines(Chen, 2018).

Mishnaevsky (2020) investigate the failure mechanisms of wind turbine blades by scale testing of blades in laboratories, a post-mortem analysis of failed blades, analysis of incident reports and computational modelling. high velocity region, transitional and tapered areas, interface and bonded regions determined the most endangered regions of the blades.

Tchertchian and Millet (2023) determined that a systematic maintenance organisation would be able to resolve the failure in a shorter time and shorten the energy downtime. Thus, energy production can continue with zero emission by ensuring that wind turbines are available as soon as possible.

The wind energy industry continuously improves its operation and maintenance practices to reduce the levelized cost of energy. Predicting failures in wind turbines enables early warning and timely intervention, thereby minimizing costly corrective maintenance as much as possible. Additionally, it helps prevent production losses due to prolonged downtime. Latiffianti, Sheng and Ding(2022), developed an early warning system that can detect gearbox failures in turbines by following 5 wind turbine data for 2 years.

The maintenance costs of wind turbines rise significantly when they operate under challenging and unpredictable conditions. Furthermore, the aging of wind turbines adds to the frequency of unplanned maintenance activities. Some components like gearbox, power generator, blades and control systems cover the %80 of the total maintenance cost according to Jimmy, McDonald, and Carroll, J. (2020), Dao, Kazemtabrizi, and Crabtree (2019) and Perez and Ntaimo(2015)

Santelo, Oliveira and Maciel (2021), consider that 2 MW wind turbine paid US\$36.00/MWh for energy generation. According to the study, for 2 MW turbine, maintenance cost US\$44,000.00/year if preventive interventions are not made and if one preventive maintenance is made US\$8000.00/year.

Rezamand, Kordestani, Carriveau, Ting, Orchard and Saif (2020), search the effect of climatic conditions and turbine types over the reliability and availability behavior of the wind turbine. The results show that colder climates significantly affect rotor blade performance, leading to longer downtimes and higher failure rates. Additionally, lightning has emerged as a major cause of rotor blade failures in colder climate regions. It is concluded that the turbine type and installation

location should be taken into consideration when determining the operation and maintenance strategy.

This study examines the malfunctions in wind turbines, their causes, detection methods, the importance of maintenance practices, the cost analysis of potential failures in wind turbines, and the energy losses that can be prevented through maintenance practices.

2. Materials and Methods

2.1 Conversion of Wind to Energy

Wind turbines are systems that convert the kinetic energy of the wind into mechanical energy and then into electrical energy. The mathematical formula expressing the portion of the theoretical power of the wind that converts into electrical energy is presented in Equation (1) (Yavuz and Özbay, 2020).

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \times C_p \quad (1)$$

P : Net power generated by the wind turbine (W)

ρ : Air density (kg/m^3)

A : Area swept by the wind turbine blades (m^2)

v : Average wind speed at the turbine installation site (m/s)

C_p : Turbine efficiency percentage

According to the mathematical formula, the factors affecting the amount of energy produced include the wind speed at the installation site and the blade length of the wind turbine.

2.2 Maintenance Practices in Wind Turbines

Turbines with a capacity at the MW level and an average lifespan of 25 years are being produced nowadays. Factors determining the lifespan include the environment where the turbine is located, operating conditions linked to climatic factors such as wind, temperature, humidity, and lightning, material quality, and most importantly, regular maintenance and repair activities. The basic components of wind turbines; tower, rotor blade, nacelle, hub can be shown in Figure 1.

Adverse weather conditions such as storms, lightning, heavy rainfall, freezing cold, or metal fatigue in turbine components can lead to malfunctions, reduced efficiency, interruptions in energy production, or shortened turbine lifespan. Re-

pairs due to wear-related malfunction in turbines can be prolonged or the malfunctions can be permanent. Depending on the severity of the malfunction, solutions involve either part replacement or repair. If energy production is halted for an extended period during the solution process, then the cost becomes significantly higher. Rapid detection of malfunctions and immediate part replacement when necessary prevents the failure of other turbine components. Short-term, temporary faults due to sensor or grid issues can be resolved by temporarily shutting down and restarting the system and they cause only energy production losses. Figure 2 shows a wind turbine blade damaged by lightning.

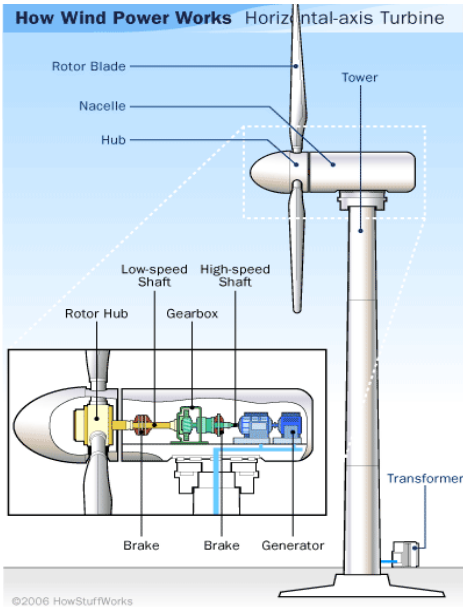


Figure 1. Basic Components of a Wind Turbine (URL-4)



Figure 2. Wind Turbine Lightning Damage & Maintenance (URL-5)

Adverse weather conditions such as storms, lightning, heavy rainfall, freezing cold, or metal fatigue in turbine components can lead to malfunctions, reduced efficiency, interruptions in energy production, or shortened turbine lifespan. Repairs due to wear-related malfunction in turbines can be prolonged or the malfunctions can be permanent. Depending on the severity of the malfunction, solutions involve either part replacement or repair. If energy production is halted for an extended period during the solution process, then the cost becomes significantly higher. Rapid detection of malfunctions and immediate part replacement when necessary prevents the failure of other turbine components. Short-term, temporary faults due to sensor or grid issues can be resolved by temporarily shutting down and restarting the system and they cause only energy production losses. Figure 2 shows a wind turbine blade damaged by lightning.

Sudden changes that might occur in atmospheric weather conditions can create mechanical imbalances in the turbine blades and lead to vibration issues (Eric and Bayrak, 2015; Bayrak, Eric and Küçüker 2016). Therefore, it is very important to ensure that turbines operate within the specified wind speed limits. Operating outside these limits reduces efficiency, remarkably affects turbine lifespan, or may cause much larger failures. Monitoring systems help mitigate potential losses by early detection of mechanical imbalances (Herbert-Acero, Probst, Réthoré, Larsen and Castillo-Villar 2014; Hansen, 2008; Gong and Qiao, 2010). The most common failures in wind turbines are mechanical failures; however, periodic maintenance and data tracked by monitoring systems reduce efficiency loss, energy interruptions, and potential financial losses (Ramlau and Niebsch, 2009).

2.3 Failure Costs in Wind Turbines

The annual operation and maintenance cost of wind turbines corresponds to approximately 3%-5% of the installation cost (Milborrow, 2010). When compared to the installation cost, malfunctions that can be resolved at a much lower cost consist of four primary cost components. Equation (2) expresses the failure cost(CF) in a wind turbine, which consists of four main costs:

$$C_F = C_M + C_S + C_0 + C_L \quad (2)$$

C_M : The cost of parts that need to be replaced due to failure

C_S : The service cost related to the facilities and equipment required due to failure

C_0 : The cost of revenue loss in electricity generation due to the failure

C_L : The total labour cost required for the repair

The performance of a wind turbine's energy production is expressed by the capacity factor (Boccard, 2009). The capacity factor provides information on how

many hours in a year (8760 hours) the energy production systems operate at full capacity. In Türkiye, a wind power plant operates with an average capacity factor of 35%, although this can vary according to region. Considering a 1 MW wind power plant operating at a 35% capacity factor, the annual energy produced can be calculated as follows:

$$E_{\frac{Produced}{year}} = 1 \text{ MW} \times 8760 \text{ hour} \times 0.35 = 3066 \text{ MWh/year} \quad (3)$$

The daily energy production can be calculated as:

$$E_{Produced/day} = 3066 \frac{\text{MWh}}{\text{year}} \div 365 \text{ Days} = 8.4 \text{ MWh/day} \quad (4)$$

The financial loss that would occur in case of a malfunction at a wind power plant and a one-day halt in energy production, based on the unit energy production pricing of 73 \$/MWh as listed in the Electricity Market YEKDEM (Renewable Energy Resources Support Mechanism) List and according to Law No. 3453 of the Renewable Energy Law (URL-6) can be calculated as follows:

$$E_{Loss \text{ cost}} = 73 \text{ $/MWh} \times 8.4 \text{ MWh/day} = 613.2 \text{ $/day} \quad (5)$$

Preventative maintenance and inspections can prevent such malfunctions before they occur, thus prevent potential production losses and associated financial damages.

2.4 Malfunctions in Wind Turbines: Causes, Detection Methods

A malfunction occurs when a device no longer operates as intended. Various types of malfunctions may occur in wind turbines, which can cause partial or complete halts in energy production. Primarily, malfunctions that lead to a total loss of electricity generation occur when the main components of the turbine, as listed in Table 1.1, fail or are damaged. Minor malfunctions such as surface damage and cracks, oil leaks, or loose connections are less significant as they do not stop energy production, but if ignored and not addressed, they can lead to major malfunctions.

Table 1. Wind Turbine Subcomponents and Main Components (Kahrobaee and Asgarpoor, 2011)

Subcomponent	Main Components
Structure	Nacelle, Tower, Foundation Structure
Rotor	Blades, Hub, Brake
Mechanical Brake	Brake Disc, Spring, Motor Mechanical Brake
Main Shaft	Shaft, Bearing, Couplings
Gearbox	Gears, Pump, Oil Heater/Cooler, Hoses
Generator	Shaft, Bearings, Rotor, Stator, Coil
Yaw System	Yaw Drive, Yaw Motor
Converter	Power Electronics Switch, Cable, DC Bus
Hydraulic Pistons	Cylinders, Hoses
Electrical System	Starter, Capacitor, Transformer, Cable, Switchgear
Pitch System	Pitch Motor, Gears
Control System	Sensors, Anemometer, Communication System, Processor, Relays

Malfunctions in wind turbines can arise from a variety of causes, as detailed in Table 2, including weather conditions, mechanical failures, electrical issues, or wear and tear. The performance and lifespan of wind turbines can be significantly influenced by various factors such as weather conditions, mechanical failures, electrical issues, and wear and tear. Weather conditions including high wind speeds, lightning strikes, and ice accumulation can reduce the turbine's efficiency and cause mechanical damage. Extreme winds may cause the turbine to automatically shut down, while lightning strikes can result in short circuits in electrical components, and ice buildup can impair aerodynamic performance. Mechanical failures often arise from the wear of turbine components. For instance, cracks and erosion in the blades reduce efficiency, while failures in the gearbox and bearings can cause the turbine to stop functioning. Electrical issues such as generator malfunctions and control system failures can lead to power generation interruptions and complete turbine shutdowns. Wear and tear from continuous operation results in component degradation over time, leading to efficiency loss and increased maintenance needs. All of these factors can disrupt turbine operations, causing production losses, higher maintenance costs, and reduced turbine lifespan. As a result, these issues can lead to financial losses. Regular maintenance and monitoring are essential for ensuring that turbines operate efficiently and have a long service life.

Table 2. Causes of Turbine Malfunctions

Weather Conditions	Mechanical	Electrical	Wear and Tear
High wind speed	Production and material defects	Grid faults	Aging
Icing	Human error	Overload	Corrosion
Lighting	External damages	Human error Software error	

Different methods can be employed to detect malfunctions in wind turbines, as outlined in Table 3. Detecting malfunctions in wind turbines is crucial for maintaining their efficiency and minimizing downtime. Modern detection methods, such as vibration monitoring, temperature sensors, condition monitoring systems, and predictive analytics, offer significant advantages in identifying issues early. These technologies help operators take preventive action, reduce repair costs, and extend the operational lifespan of turbines. Regular monitoring, combined with advanced diagnostic tools, is essential for ensuring the reliability and performance of wind turbine assets.

Table 3. Malfunction Detection Methods

Control / Inspection	Visual Auditory
Condition Monitoring	Vibration analysis Oil analysis Infrared thermography Ultrasonic
Maintenance	Time-based Condition-based

Among the malfunction detection methods, the most commonly used ones are visual/auditory inspections or those conducted during the general maintenance of the turbine. However, the fastest and most reliable method is online condition monitoring. Vibration analysis, oil analysis, infrared thermography, and ultrasonic monitoring are among the fastest malfunction detection analyses within online condition monitoring methods (Wu, Lang, Zargari and Kouro., 2011).

In developing countries, malfunction detection and maintenance practices for wind turbines differ significantly from those in developed countries due to fac-

tors such as infrastructure, technology access, workforce expertise, economic resources, and local conditions.

Infrastructure and technology in developing countries often lack advanced tools like Condition Monitoring Systems (CMS) and predictive maintenance software, which are commonly used in developed nations for real-time data analysis and early fault detection. As a result, maintenance in developing countries relies more on manual methods and basic diagnostic equipment, leading to delayed fault detection and higher costs.

2.5 The Importance of Maintenance in Wind Turbines

Maintenance of wind turbines plays a very important role in efficiency, safety, durability, cost reduction, and minimizing environmental impact.

- Regular maintenance of wind turbines ensures that they operate at maximum efficiency.
- Conducting maintenance regularly ensures safe operation of turbines and safety of operational personnel.
- Routine maintenance extends the durability and lifespan of wind turbines.
- Preventive maintenance helps reduce operational costs by preventing unexpected malfunctions and downtimes.
- Regular maintenance enhances the sustainability of wind energy and contributes to reduced carbon dioxide emissions and environmental impact.

Maintenance is divided into two categories: planned and unplanned. Unplanned maintenance is performed when machinery and equipment fail or malfunction. In planned maintenance, maintenance is conducted according to a schedule (Öztürk, 2020). Li, Jia, Ren and Li.(2024) conducted a study by scientifically formulating a maintenance strategy that can optimize the cost-effectiveness of wind energy generation systems per unit time and address the challenges of developing a reasonable maintenance strategy for wind turbine components, as well as the issues of high operation and maintenance costs.

Planned Maintenance methods can be implemented in three different ways:

- Preventive Maintenance : Preventing failures at the initial stage before they occur. Small adjustments in lubrication systems or operating conditions can eliminate the causes of failures.
- Predictive Maintenance: By analyzing measurement results taken at specific intervals from certain points, potential failures in machinery and equipment

are detected in advance. Predictive Maintenance prevents untimely production stoppages and unnecessary part replacements.

Unplanned Maintenance methods can also be classified into four groups:

- Routine Maintenance
- Corrective Maintenance
- Emergency Maintenance
- Opportunistic Maintenance

Unplanned Maintenance is conducted when failures occur. Neglecting failures can lead to more significant breakdowns or severe damage.

This study complied with research and publication ethics.

Findings and Analyses

Neglecting regular maintenance on wind turbines can lead to efficiency losses and high repair costs, resulting in financial losses. A wind turbine, if not properly maintained, can lose 5-10% of its annual efficiency. This translates into a revenue loss of \$5,000-10,000 annually, depending on the energy sales price. In the event of a major malfunction due to a lack of maintenance, repair costs can increase significantly. A small maintenance issue can evolve into a major breakdown over time, causing the turbine to be out of operation, leading to both revenue loss and higher repair expenses. As a result, the financial impact of maintenance neglect extends beyond just efficiency loss and can be compounded by high repair costs and prolonged production downtime.

Conclusions

It is possible to mitigate the impacts of global warming caused by fossil fuels by using renewable and clean energy. Among renewable energy sources, wind energy investments have been increasingly common in recent years, as the initial investment costs continue to decrease with technological advancements. Wind turbines are long-lasting and uncomplicated energy production systems. Regular maintenance of wind turbines is of great importance in terms of efficiency, safety, durability, cost-effectiveness, and environmental sustainability. It reduces energy production losses, minimizes the risk of accidents and failures, and enhances the lifespan and efficiency of the equipment.

It has been determined that if the necessary maintenance/controls are not carried out on time, a financial loss of 613.2 \$ / per day will occur for 1 MW wind power plant operating with %35 capacity factor, based on the unit energy pro-

duction pricing of 73 \$/MWh as listed in the Electricity Market YEKDEM and according to Law No. 3453.

Not performing the necessary maintenance operations at specific intervals on wind turbines can shorten their lifespan and, in some cases, cause the turbines to become completely inoperative. Compared to the cost of the turbine itself, addressing faults through planned or unplanned maintenance can be managed at significantly lower costs. Preventing failures that may arise from adverse weather conditions, mechanical and electrical faults, or corrosion-induced wear requires various fault detection methods such as online condition monitoring, vibration analysis, oil analysis, infrared thermography, or ultrasonic monitoring. These methods help to identify issues and prevent sudden turbine shutdowns, thereby avoiding energy production losses. The role of technological innovations and predictive approaches in this field is increasing, contributing to the sustainability of wind energy. In the future, the development of more intelligent and integrated maintenance systems will enable us to benefit more from wind energy.

Energy, money, and time are crucial factors. Therefore, the maintenance of wind turbines, which require significant investment, is vital. Neglecting maintenance can lead to decreased energy production, higher repair costs, and prolonged downtime. Regular maintenance of critical components such as rotors, generators, and gearboxes is essential to prevent costly failures. Without it, small issues can snowball into major problems, resulting in substantial financial losses and operational disruptions. In short, maintaining wind turbines is key to maximizing energy efficiency, controlling costs, and ensuring long-term profitability.

References

- Bayrak, M., Eric N., Küçüker, A., (2016). Detection of mechanical unbalanced faults in wind turbines by using electrical measurements, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31(3), 687-694. Doi: <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.258920>
- Boccard, N., (2009). Capacity Factor of Wind Power Realized Values vs. Estimates. *Energy Policy*, 37(7), 2679-2688.
- Çanka Kılıç, F., (2012). Solar Energy, Its Recent Status In Türkiye and Production Technologies. *Mühendis ve Makine Dergisi*, 614, 103-115.
- Chen X. Fracture of wind turbine blades in operation—Part I: A comprehensive forensic investigation. *Wind Energy*. 2018;21:1046–1063. doi: <https://doi.org/10.1002/we.2212>
- Dao, C., Kazemtabrizi, B., & Crabtree, C. (2019). Wind turbine reliability data re-

- view and impacts on levelised cost of energy. *Wind Energy*, 22(12), 1848-1871. <https://doi.org/10.1002/we.2404>.
- Eric N., Bayrak M., (2015). Wind turbine mass and aerodynamic imbalances determination, *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, 4 (2), 224-233.
- Gong, X., Qiao, W., (2010). Simulation investigation of wind turbine imbalance faults. 2010 *International Conference on Power System Technology* (s. 1-7), Zhejiang, China.
- Hansen M., (2008). The Importance Of Wind Energy, The Situation In The World and Türkiye. *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 11(1), 1-26.
- Herbert-Acero, J.F., Probst, O., Réthoré, P., Larsen, G.C., & Castillo-Villar, K.K. (2014). A Review of Methodological Approaches for the Design and Optimization of Wind Farms. *Energies*, 7, 6930-7016. Doi: <https://doi.org/10.3390/en7116930>
- İlkılıç, C., (2009). Wind Energy Potential and Utilization in Türkiye, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 50 (593), 26-32.
- Jimmy, G., McDonald, A., & Carroll, J. (2020). Energy yield and operations and maintenance costs of parallel wind turbine powertrains. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 11(2), 674-681.
- Kahrobaee, S. and Asgarpoor, S., (2011). Risk-Based Failure Mode and Effect Analysis for Wind Turbines (RB-FMEA): North American Power Symposium (NAPS), *Faculty Publications from the Department of Electrical and Computer Engineering*, 172.
- Koç, E., Şenel, M. C., (2013). The State of Energy in World and Türkiye - General Evaluation, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 54 (639), 32-44.
- Latiffianti, E., Sheng, S. and Ding, Y., (2022). Wind Turbine Gearbox Failure Detection Through Cumulative Sum of Multivariate Time Series Data, *Frontiers in Energy Research*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.904622>
- Li, J.H., Jia, S., Ren, L. and Li, X. (2024), Research on wind turbines preventive maintenance strategies based on reliability and cost-effectiveness ratio, *Industrial Lubrication and Tribology*, Vol. 76 No. 10, pp. 1168-1176. <https://doi.org/10.1108/ILT-05-2024-0153>
- 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> (Date of Access: 24.03.2024)

- Mishnaevsky L., Jr. Repair of wind turbine blades: Review of methods and related computational mechanics problems. *Renewable Energy*. 2019;140:828-839. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.113>
- Mishnaevsky, L, Jr., Thomsen K. Costs of repair of wind turbine blades: Influence of technology aspects. *Wind Energy*. 2020;23:2247-2255.
- Öztürk, H. K., (2020). Operation and Maintenance for Wind Turbines, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 61(701), 262-279. Doi : <https://doi.org/10.46399/muhendismakina.747092>
- Pérez, E., Ntamo, L., & Ding, Y. (2015). Multi-component wind turbine modeling and simulation for wind farm operations and maintenance. *Simulation*, 91(4), 360-382. <https://doi.org/10.1177/0037549715572490>
- Ramlau R., Niebsch J., (2009). Imbalance estimation without test masses for wind turbines, *ASME J. Sol Energy Eng.*, 131 (1): 011010. Doi: <https://doi.org/10.1115/1.3028042>
- Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources (2023). *Energy Reports*. <https://enerji.gov.tr/info-bank-energy>. (Date of Access: 09.12.2023)
- Rezamand, M., Kordestani, M., Carriveau, R., D. S. . -K. Ting, M. E. Orchard and M. Saif, "Critical Wind Turbine Components Prognostics: A Comprehensive Review," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, no. 12, pp. 9306-9328, Dec. 2020.
- Santelo, T.N., de Oliveira, C.M.R., Maciel, C.D. et al. Wind Turbine Failures Review and Trends. *J Control Autom Electr Syst* 33, 505-521 (2022). <https://doi.org/10.1007/s40313-021-00789-8>
- Tchertchian, N., & Millet, D. (2022). Which eco-maintenance for renewable energy? A simulation model for optimising the choice of offshore wind farm maintenance vessel. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 22(1), 1-11. <https://doi.org/10.1080/20464177.2022.2044584>
- 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. eBook ISBN: 978-1-118-02900-8
- Yavuz, İ., Özbay, H., (2020). Installation and Maintenance Processes in Wind Turbines: The Case of Bandırma. *Müh. Bil. ve Araş. Dergisi*, 2 (2), 5 8 - 6 8. Doi: <https://doi.org/10.46387/bjesr.800527>
- URL-1 : <https://gwec.net/gwwo-23-27/> (Date of Access: 22.01.2025)
- URL-2 : <https://www.alliedmarketresearch.com/wind-energy-market-A10536> (Date of Access: 22.01.2025)

URL-3 : <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-ruzgaren> (Date of Access: 24.05.2024)

URL-4 : <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik> (Date of Access: 25.05.2024)

URL-5 : IRENA (International Renewable Energy Agency), "Wind Energy", <https://www.irena.org/wind> (Date of Access: 27.06.2024)

URL-6 : <https://www.long-intl.com/blog/wind-turbine-basics/> (Date of Access: 14.08.2024)

URL-7 : <https://www.rasswind.com/tr/ruzgar-turbini-yildirim-hasar-tamiri--id> (Date of Access: 04.08.2024)

URL8 : <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-72/yekdem> (Date of Access: 24.06.2024)

ARAŞTIRMA MAKALELERİ

Research Articles

- Toz Metalürjisi ve Sıcak Preslemeyle Üretilen Al7075-Si₃N₄ Kompozitlerin Mikroyapısının ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi** 1-22
Investigation Of The Microstructure and Mechanical Properties Of Al7075-Si₃N₄ Composites Produced By Powder Metallurgy and Hot Pressing
Aleyna TAŞKIN, Elif IŞIK, Mahmut Can ŞENEL
- Investigation of Induction Sinterability of Powder Metal Parts of Different Shapes and Sizes** 23- 38
Farklı Şekil ve Boyutlardaki Toz Metal Parçaların İndüksiyon ile Sinterlenebilirliğinin Araştırılması
Can ÇİVİ, Enver ATİK
- Vinç Sistemlerinde Kirişlerin Kaynaklı Birleşim Yerlerinin Bağlantı Tasarım Optimizasyonlarının Modellenmesi, Sysweld Kaynaklı İmalat Sonlu Elemanlar Simülasyonu ve Analizi** 39-65
Modelling of Connection Design Optimizations of Welded Joints of Brackets in Crane Systems, Finite Element Simulation and Analysis of Sysweld Welded Manufacturing
Samet DÖNERKAYA, Sinan Alp AKYOL
- Türkiye’de Buhar Kazanı Sektörünün Vikor ve Edas Yöntemleri ile Yıllara Göre Karlılık Analizi** 66-93
Profitability Analysis of Steam Boiler Sector in Türkiye With Vikor and Edas Methods By Years
Ali SEVİNÇ
- Rüzgar Enerjisi Sahalarında İŞ Sağlığı ve Güvenliği Çalışmaları** 94-115
Occupational Health and Safety Practices in Wind Energy Fields
Bayram KÖSE, Can UZUN, Ahmet Orhan İNCİ
- Kömür Yakma Sistemlerinde Verim Tahmini Doğruluğunu Artıran Bir Yöntem** 116-128
A Method Increasing the Accuracy of Efficiency Forecast in Coal Firing Systems
Cem ONAT
- Gaz Türbini Periyodik Bakımlarının Sistem Performansına Etkilerinin İncelenmesi** 129-172
Investigation of The Effects of Gas Turbine Periodic Maintenance on System Performance
Orhan Özay KÖSE, M. Zeki YILMAZOĞLU
- Importance and Cost of Maintenance Practices in Wind Turbines** 173-188
Rüzgar Türbinlerinde Bakım Uygulamaları ve Bakım Maliyeti
Eylem YILMAZ ULU