

# MÜHENDİS VE MAKİNA

## ENGINEER AND MACHINERY

ISSN 1300-3402 E-ISSN 2667-7520



tmmob makina mühendisleri odası yayın organı

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



Cilt/Vol 65 Sayı/No 716  
Temmuz-Eylül/July-September 2024



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 : 2024

CİLT/VOLUME : 65

SAYI/ ISSUE : 716



**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 Eylül 2024



#### 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 (PSSSEL), 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](http://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 |
|--|----------|
| <b>Covid 19 Pandemisinin Kocaeli İli Toplu Ulaşım Sistemi Enerji Tüketimi Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi</b><br>Investigation of The Effect Of The Covid 19 Pandemic On Energy Consumption of Natural Gas Buses In Kocaeli Province Public Transportation System<br>İsmail GÜLSOY, Mustafa ÖZCAN | 360-373  |
| <b>Hayvan Gübresinden Biyogaz Üretim Potansiyelinin Belirlenmesi: Ankara, Gaziantep, Kars</b><br>Determination Of Biogas Production Potential From Animal Manure: Specific To The Provinces Of Ankara, Gaziantep, Kars<br>Utku CANCI MATUR, Aytaç ATASAYIN   | 409-431  |
| <b>The Impact Of Covid-19 On The Technology Sector: The Case Of The Turkish Consultancy Company</b><br>Covid-19'un Teknoloji Sektörüne Etkisi: Bir Danışmanlık Şirketi Örneği<br>Eda GÖZÜTOK, İlayda ÜLKÜ  | 432-461  |
| <b>Ticari Biyokütle Yakma Sistemlerinde Kül Kaynaklı Problemler Üzerine Bir Değerlendirme</b><br>An Assessment On Ash-Related Issues In Commercial Biomass Combustion Systems<br>Anıl BADEM, Hayati OLGUN  | 462-486  |

### Derleme Makaleleri / Review Articles

|  | Sayfalar |
|--|----------|
| <b>Compliance Strategy For The Certification of Environmental Control System In Military Applications</b><br>Çevresel Kontrol Sistemi'nin Askeri Uygulamalara Özel Uçuşa Elverişlilik Sertifikasyonuna İlişkin Uyum Doğrulama Stratejisi<br>Emre GÜLER | 374-408  |
| <b>Matris Malzemesi Olarak Alüminaya Titanyum ve Grafen İlavelerinin Etkilerinin Belirlenmesi</b><br>Determination Of The Effects Of Titanium and Graphene Additions To Alumina As A Matrix Material<br>Samet YAVUZ, Mevlüt GÜRBÜZ                     | 487-520  |
| <b>Electricity Generation Methods From Solar Energy</b><br>Güneş Enerjisinden Elektrik Üretim Yöntemleri<br>Berire Şen AYVAZ, Alper BAYRAK   | 521-557  |



## COMPLIANCE STRATEGY FOR THE CERTIFICATION OF ENVIRONMENTAL CONTROL SYSTEM IN MILITARY APPLICATIONS

Emre GÜLER\*

Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. (TUSAŞ), Department of Airworthiness and  
Certification, Ankara, ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-4938-9320>

### Keywords

*Certification,  
environmental control  
system, means of  
compliance, military  
standard, safety*

### Abstract

*This review paper provides the compliance strategy for the certification activity of environmental control systems (ECS) according to the military standard. Firstly, the paper defines the ECS. Secondly, it outlines the steps for the system's certification activities in the concept of the means of compliance. Thirdly, it recommends the minimum set of documents with technical explanations obtained by academic learning, vocational training and recommendations from the regulations for compliance with the given requirements in military certification of ECS. Then, the differences in terms of compliance methods are specified. Finally, it is concluded that a specific compliance strategy for military certification of ECS is required for a systematic and comprehensive approach.*

\* [emrelug@gmail.com](mailto:emrelug@gmail.com)  
doi : 10.46399/muhendismakina.1257053

## ÇEVRESEL KONTROL SİSTEMİ'NİN ASKERİ UYGULAMALARA ÖZEL UÇUŞA ELVERİŞLİLİK SERTİFİKASYONUNA İLİŞKİN UYUM DOĞRULAMA STRATEJİSİ

### Anahtar Kelimeler

### Öz

*Sertifikasyon, çevresel kontrol sistemi, uyum doğrulama metodu, askeri standart, emniyet*

*Bu makale, çevresel kontrol sistemlerinin (ECS) askeri standartlara göre sertifikasyonu için uyum doğrulama stratejisi sağlayan derleme bir yayındır. Makalede ilk olarak çevresel kontrol sistemi tanımlanmış, ikinci olarak, uyum doğrulama metotları kapsamında, sistem sertifikasyon süreci ana hatlarıyla sunulmuştur. Daha sonra çevresel kontrol sistemlerinin askeri sertifikasyonu için önerilen minimum gereksinim doğrulama dokümanları, akademik bilgiler ile iş tecrübeleri ve yönetmelik tavsiyeleri göz önüne alınarak teknik açıklamaları ile birlikte verilmiş, uyum doğrulama metotlarındaki farklılıklar ortaya konmuştur. Son olarak ise, ECS özelinde sistematik ve geniş kapsamlı bir askeri sertifikasyon süreci için spesifik bir uyum doğrulama veri seti sunulmuştur*

Derleme Makalesi

Başvuru Tarihi : 27.02.2023

Kabul Tarihi : 09.11.2023

Review Article

Submission Date : 27.02.2023

Accepted Date : 09.11.2023



## 1. Introduction

Aircraft is a large-scale and complex vehicle consisting of multiple systems to function throughout its flight envelope. ECS is one of the aircraft systems that provides pilots not only a comfortable environment but also a safe environment since it is related to human activities.

ECS is the system associated mainly with ventilation, air conditioning, and pressurization in occupied compartments for safe and comfortable flight (Parsons, 1999). It also provides pressurized bleed air to critical safety air customer systems such as canopy seal, defog, anti-g, and oxygen systems.

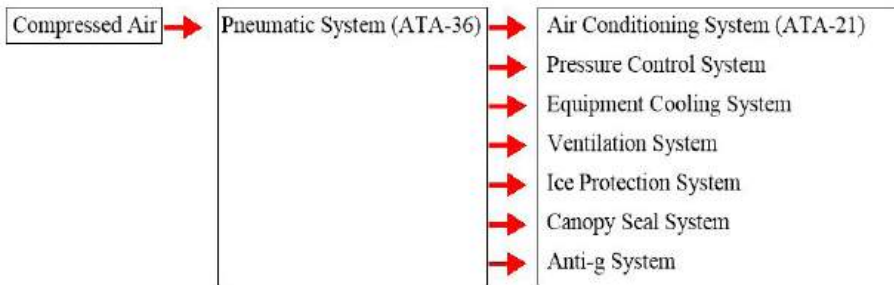


Figure 1. Environmental Control System (Sarçyakupoglu, 2020)

The main ECS functions in military applications are presented as follows:

- Supply pressurized bleed air to air cycle machine (ACM) consisting of compressor and turbine.
- Supply conditioned air to the cockpit to provide the pilot comfortable environmental conditions throughout the flight envelope.
- Provide cooling energy to avionics, especially the safety-critical ones.
- Provide air to critical interfacing systems such as on-board oxygen generating systems (OBOGS) and anti-g systems.
- Supply heated air to the windshield for defog and anti-icing/de-icing capability for extensive and clear visibility.
- Provide smoke evacuation in the cockpit when required.
- Provide air to the canopy seal system.
- Provide radar pressurization.
- Monitor, detect, and alert the bleed air leakage.

- Provide fuel efficiency (An efficiently designed ECS contributes to fuel savings by optimizing temperature distribution and reducing the load on the aircraft power systems.)

Military aircraft typically do not circulate cabin air which is exhausted over-board. It usually has one pack. A typical system architecture is illustrated in Figure 2.

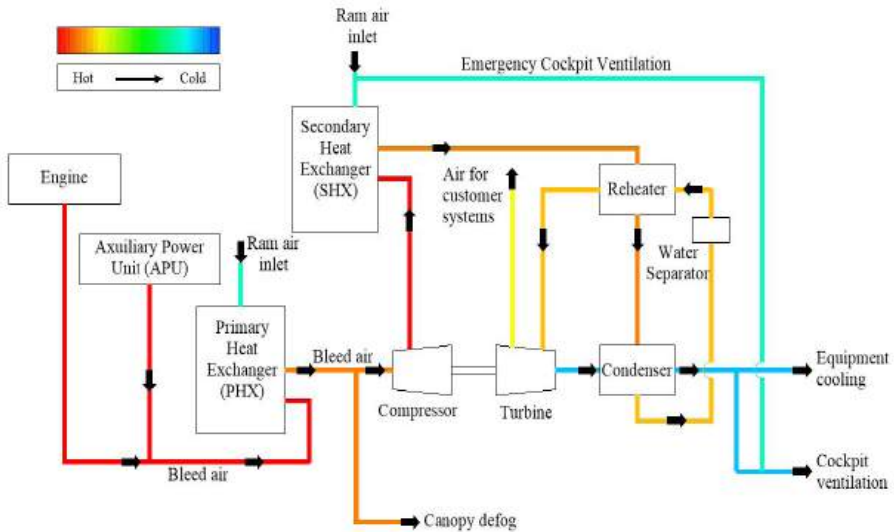


Figure 2. Typical ECS Schematic for Military Applications (The figure was re-illustrated based on the information (Chowdhury, Ali & Jennions, 2023))

ECS takes pressurized bleed air from the powerplant or pressurized air from ground support equipment (GSE). Bleed air then passes through the primary heat exchanger (PHX), and its temperature drops to a certain range to get efficient performance from the compressor. It also branches to a defog line to supply relatively hot air to the canopy to provide a sufficiently extensive view for safe operation when required.

The air passes through the compressor which is one of the main components of air cycle machine (ACM). While passing through it, the pressure of air increases, so the temperature does. The high temperature due to compression decreases again with the help of a secondary heat exchanger (SHX). A condenser which is downstream of SHX provides air to drop its moisture by cooling it. A water separator (WS) is designed to extract water droplets from the air. The turbine's blades may get damaged since the frozen the water droplets may hit the turbine

blades with high rotational speeds (Yang, Yuan, Kong, Zheng & Li, 2022). The air drops some of its water content. However, it may still be in the condensation temperature zone. A reheater is placed just at downstream of the water separator. It heats the air to escape the condensation temperature zone to prevent any more condensation before passing through the turbine. Air finally goes through the turbine. Its temperature decreases to a certain range to supply the cockpit and/or equipment cooling. Some air is directed to critical safety air customer systems such as anti-g, on-board oxygen generating, and canopy seal systems.

ECS is an essential and safety-critical system in military aircraft since it serves to pilot and flight critical equipment. It also provides air to the safety critical systems such as the anti-g system, oxygen generating system, and canopy seal system. ECS may face the following failures that can put the flight in a catastrophic failure condition:

- Bleed air contamination,
- Bleed air leakage,
- Pressurization failure,
- ECS supply failure to critical systems such as OBOGS and anti-g systems,
- Smoke evacuation failure in the cockpit,
- Partial or total loss of cooling for flight-critical avionics,
- Loss of windshield defog capability,
- Loss of windshield anti-icing or deicing capabilities,
- ECS supply failure to canopy seal,

Since there are many serious failure conditions, necessary safety precautions are required within the design. It is expected to comply with the safety requirements for the airworthiness certification of ECS. Certification is the legal recognition that the applicant with its organization, service, and product complies with the directives of the regulations as illustrated in Figure 3(SAE Standard, 1996).

This paper focuses on only the certification of the applicant's product, which consists of many complex systems such as landing gear, mechanical, propulsion, avionics, etc. Those systems, including ECS are subject to certification activities. A plan is prepared to manage the certification activities with a systematic approach. Therefore, certification planning provides a division of overall regulation into manageable task in a systematic manner (SAE Standard, 1996).

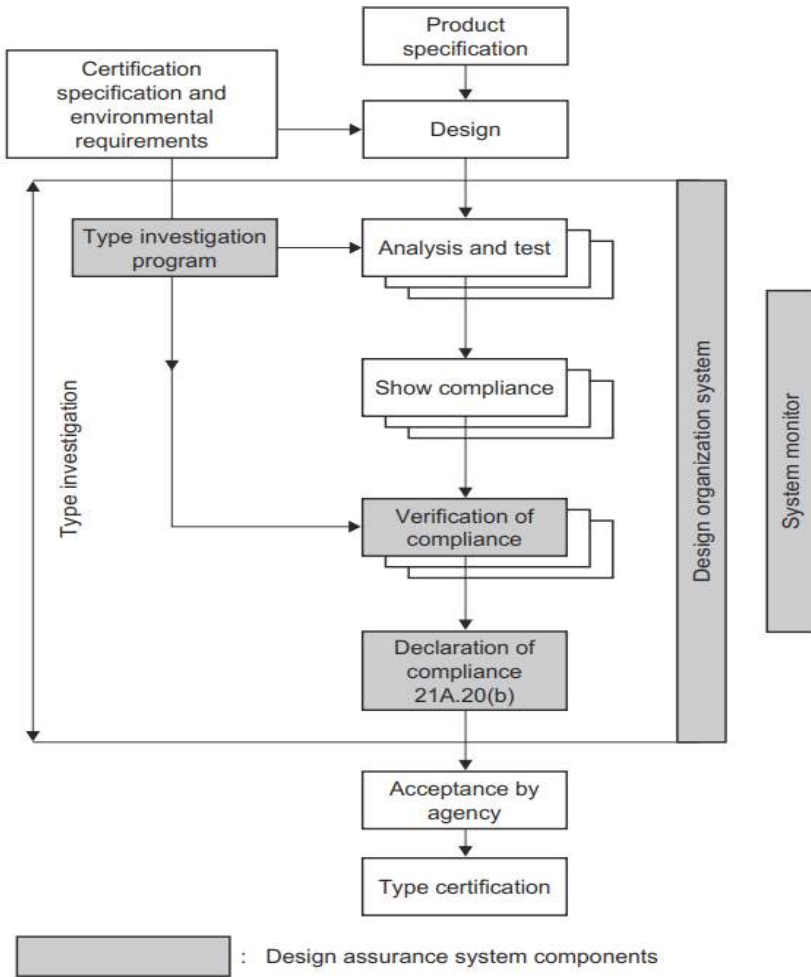


Figure 3. Relationship between Design, Design Assurance, and Type Investigation (Florio, 2006)

The project certification plan defines the certification basis, which outlines the applicable set of standards according to the regulations. Since military aircraft has many systems, more than one certification plan may be prepared and dedicated to the system’s response to decrease complexity and workload. ECS certification plan is one of those separate plans and includes system definition, applicable requirements, compliance methods and documents at least. There are many means of compliance (compliance method) and proof of compliance (associated compliance document), as found in Table 1.

Table 1. Means of Compliance Codes (European Union Aviation Safety Agency Regulation, 2021)

| Type of compliance      | Means of Compliance (MC) #  | Associated Compliance Documents  |
|-------------------------|---|--|
| Engineering evaluation  | MC0:<br>- Compliance statement<br>- Reference to design data<br>- Election of methods, factors, etc.<br>- definitions | - Design data<br>- Recorded statements   |
|                         | MC1: design review  | - Descriptions<br>- Drawings   |
|                         | MC2: calculation/analysis   | - Substantiation reports   |
|                         | MC3: safety assessment  | - Safety analysis  |
|                         | MC4: laboratory tests   |  |
| Tests                   | MC5: ground tests on related product(s)   | - Test programs<br>- Test reports  |
|                         | MC6: flight tests   | - Test interpretations   |
|                         | MC8: simulation   |  |
| Inspection              | MC7: design inspection/audit  | - Inspection or audit reports  |
| Equipment qualification | MC9: equipment qualification  | Note: Equipment qualification is a process that may include all previous means of compliance at the equipment level. |

Since there are many means of compliance for the system’s certification verification, a systematic approach is necessary not to skip any document for compliance with the applicable requirements. A compliance strategy document is beneficial in this aspect, including;

- The applicable requirements are based on certification basis,
- Methods of compliance that satisfies the safety requirements given in the regulation.
- Proof of compliance to cover all technical data to show that the minimum required safety level is provided for the system.

In civil aviation, International Civil Aviation Organization (ICAO) is a global organization that has regulations and recommendations to provide safety requi-

rements for civil aviation (Purton & Kourousis, 2014; Purton, Clothier & Kourousis, 2014; Saraçyakupoğlu, 2022) It is also commonly known as Chicago Convention(International Civil Aviation Organization Regulation, 2006). There is a statement in ICAO such as “this convention shall be applicable only to civil aircraft and shall not be applicable to state aircraft”(Purton, Clothier & Kourousis, 2014; Saraçyakupoğlu, 2022; ICAO, 2006). State aircraft is defined as aircraft designed for special purposes for countries’ own benefits, such as military aircraft.

In military aviation, there is no international organization like ICAO. That means there is no global set of regulations for military applications which have higher level of safety risks. There are many safety regulations and guidelines in military applications for the applicant who is responsible for showing compliance to the applicable airworthiness regulations (Ashforth & Ilcewicz, 2017). MIL-HDBK-516C is one of the regulations used for the purpose of ECS’s airworthiness certification in military applications. It is strong in providing high level system requirements in a qualitative manner for guidance. However, it is not clear in the debate between applicants and authorities which are necessary to give a rationale for certification judgments (Linling, Wenjin & Kelly, 2011). This paper intends to develop a compliance strategy to make an explicit justification in terms of means of compliance and to provide a systematic approach to airworthiness certification activities of ECS in military applications.

It is considered that this study may be beneficial within the military aerospace industry, including all shareholders such as design, engineering, maintenance, state military aviation authorities, airworthiness specialists, and manufacturers.

This study is complied with research and publication ethics.

## **2. ECS Compliance Methods For The Applicable Requirements From MIL-HDBK-516C**

MIL-HDBK-516C has criteria, standards, and compliance means to guide the applicant in certification activities. This chapter takes the criterion from MIL-HDBK-516C as it is. Then, the compliance methods and its technical explanations from all applicable military regulations and vocational experience are expressed as the study on the compliance for each requirement.

### **2.1 Design for Safety**

Criterion as it has been stated in the standard: “Verify that the design incorporates the system safety requirements of the air vehicle” (DoD Standard, 2014).

The safety design approach includes at least the following items (Kritzinger, 2006; DoD Standard, 1993; DoD Standard, 2013) :

- Design for minimizing risk,
- Safety devices,
- Warning devices,
- Training,
- Redundancy,
- Independency,
- Fail-safe mechanism,
- Fault tolerance.

These items about safety design should be included in the system description document (SDD). Details for the items mentioned above should be carefully considered for effective risk management.

Besides, the routine and emergency operating procedures for all operations are also reviewed for ECS's design integration with aircraft in safety. Therefore, it had better submit the manuals for the flight and the maintenance as compliance documents.

System safety assessment (SSA) defines the functional hazard cases to provide incorporation of safety requirements into the functions. Failure mode and effect analysis are used to examine failure situations and recommend safety designs and procedures as illustrated in Table 2.

Table 2. Sample of Failure Mode and Effect Analysis (SAE Standard, 1996)

| FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS (FMEA) - Sample for pressure regulating and shut-off valve (PRSOV) pressure sensor |               |                    |   |              |                    |                  |          |
|--|---------------|--------------------|---|--------------|--------------------|------------------|----------|
| System: ECS  |               |                    | FMEA Description: Loss of indication of PRSOV outlet pressure |              |                    |                  | Date:    |
| Subsystem: Air Conditioning  |               |                    | Author:   |              |                    |                  |          |
| Item ATA: ATA-21   |               |                    | FTA References:   |              |                    |                  | Rev:     |
| Function Names   | Function Code | Failure Mode       | Mode Failure Rate   | Flight Phase | Failure Effect     | Detection Method | Comments |
| Pressure Sensor  | -             | Loss of indication | 1,00E-05  | All          | Loss of ECS Supply | ECS Controller   |          |

Flight test confirms the performance of the environmental control system and

other connected systems involving thermal stability for flight safety (DoD Standard, 2014).

The means of compliance with the requirement are MC1, MC3, MC5, and MC6.

## 2.2 Integration

Criterion as it has been stated in the standard: “Verify that the ECS meets safety requirements when operating under intended conditions over the design envelope and maintains integration integrity to ensure the weapon system’s safety of flight” (DoD Standard, 2014).

This chapter differs from the chapter “Design for Safety” since it focuses on meeting safety requirements of operational conditions.

System safety assessment document (SSA) confirms that the ECS does not have negative effect on the flight safety. Quantitative analysis in SSA helps to get target failure rates that flow from the aircraft level to ECS component level. Components are required to be designed according to the target failure rates given in SSA.

The equipment qualification form of which a sample is illustrated in Table 3, shows that the components in ECS have complied with environmental qualification and safety requirements over the operating envelope.

Table 3. Sample of Environmental Qualification Form (Federal Aviation Administration, 1993)

| <b>Qualification Evidence Report - Sample</b> |         |                                |
|---|---------|--------------------------------|
| Conditions                                    | Section | Description of tests conducted |
| Temperature and altitude                      |         |                                |
| Temperature variation                         |         |                                |
| Humidity                                      |         |                                |
| Operational shock and crash safety            |         |                                |
| Vibration                                     |         |                                |
| Explosive atmosphere                          |         |                                |
| Waterproofness                                |         |                                |
| Fluids susceptibility                         |         |                                |
| Sand and dust                                 |         |                                |
| Fungus  |         |                                |



Salt fog test  
Magnetic effect  
Power input  
Voltage spike  
Audio frequency susceptibility  
Induced signal susceptibility  
Radio frequency susceptibility  
Radio frequency emission  
Lighting induced transient susceptibility  
Lighting direct effects  
Icing  
Electrostatic discharge  
Fire, flammability  
Other tests

---

Ground test or simulator (if possible) demonstrates ECS's safe operation over the operating envelope (DoD standard, 2014).

The flight test is the final verification method for ECS's safe operation in all operating conditions. Flight test also validates safety analysis results.

The means of compliance with the requirement are MC3, MC4 or MC5 or MC8, MC6, and MC9.

### **2.3 Alternate Cooling**

Criterion as it has been stated in the standard: "Verify the availability of alternate means of thermal conditioning of safety-critical avionics (including the control station) and sufficient cockpit ventilation when the primary ECS is nonoperational" (DoD Standard, 2014) .

The avionics need to be cooled are listed in SDD. Safety-critical avionics may be defined as mission-essential or safe return avionics (DoD Standard, 2013). Design approach may be defined for the alternate cooling, such as ram air design for air-cooled equipment and liquid cooling design for liquid cooled avionics.

An appropriate level of redundancy and independence are the factors that should be analyzed carefully in case of a failure in cooling system components. In the failure condition of the cooling system, the safety-critical avionics are expected to continue their operation without cooling over a required time period.

Thermal performance for safety-critical avionics is calculated with thermal analysis. This helps to comply with cooling requirements regarding avionics' thermal stability.

MIL-HDBK-516C recommends conducting a ground test. However, the ground test may not be an appropriate method to analyze safe return or mission completion concepts. Instead, flight test can be conducted for more accurate results.

The flight test demonstrates that enough cooling exists for the safety-critical avionics considering flow rate and temperature distributions along the avionics. The flight test is conducted in hot, cold, warm, and dry atmospheric conditions. It is advantageous to have avionics close to the end product. However, the prototype may give close results for the test. The cooling system is tested to verify that the temperature for avionics remains in the specified operational range (SAE Standard, 2015). However, flight tests should be reconsidered since they may be risky if safety-critical avionics cannot operate.

The means of compliance with the requirement are MC1, MC2, and MC6.

## 2.4 Pressurization

Criterion as it has been stated in the standard: "Verify that normal and emergency pressurization requirements are met in the air vehicle system and, as appropriate, are indicated or monitored at the control station to ensure safety of flight" (DoD Standard, 2014).

The pressure schedule is determined for pilot comfort and aircraft safety. It is controlled by a cabin pressurization control system (CPCS) which precludes rapid changes in cabin pressure (Sathiyaseelan & Selvan, 2022; DoD Standard, 1998). The rapid pressure change may cause aviation diseases such as barotrauma and decompression sickness (DoD Standard, 2015; Auten, Kuhne, Walker & Porter, 2010). Hypoxia may be another disease due to improper operation of CPCS (Sathiyaseelan, 2014). It is required to have coordination with oxygen system designers to confirm that the crew has appropriate environment for breathing. A common schedule is applied to prevent such undesired conditions. A typical CPCS schedule is illustrated in Figure 4.

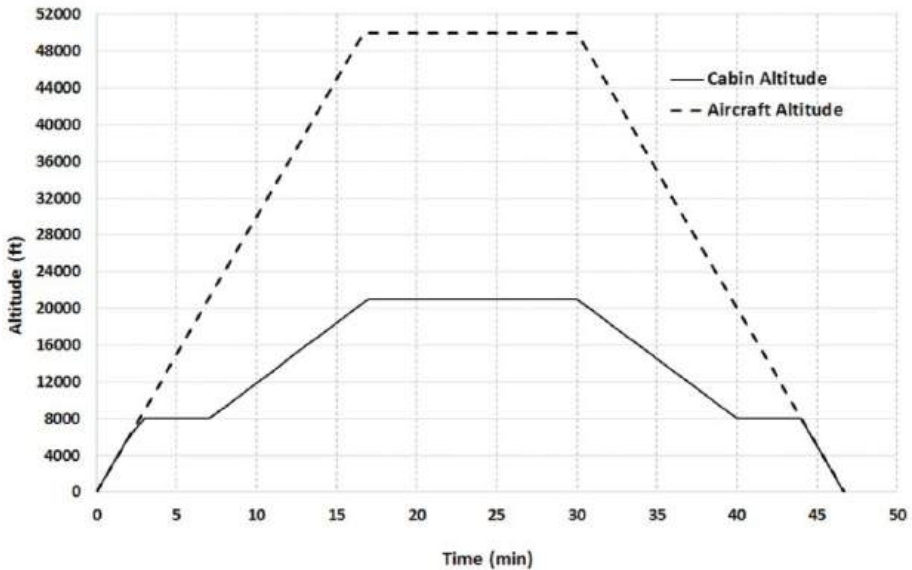


Figure 4. Typical CPCS Schedule (Pleil, 2017; Arunachalam & Varadappan, 2023)

The pressure schedule should be demonstrated in SDD to verify that the pressure design is within safe limits.

Analyses and/or simulations show the needs for cockpit’s pressurization. The adequacy of pressurization system is confirmed with the capability analysis (DoD Standard, 2014).

Laboratory tests provide a chance to evaluate interaction between regulators before the flight test (DoD Standard, 2013). However, the laboratory cannot simulate the whole system. Therefore, flight tests are necessary to show the final compliance including all operating conditions.

Flight test verifies the appropriate operation of the pressurization system. Although a flight test is usually preferred for verification, the analysis may be sufficient in case safety cannot be provided in verification activity in flight, such as the failure of the pressurization system.

The means of compliance with the requirement are MC1, MC2, MC6, and MC9.

## 2.5 Degraded System Operation

Criterion as it has been stated in the standard: “Verify that the effects of loss of some or all ECS functions on air vehicle system safety and performance are understood and acceptable” ((DoD Standard, 2014) .

Loss of some or all ECS functioning may cause interfaced systems to operate in a degraded mode. Onboard oxygen system generating system, anti-g system, and canopy seal system that require pressurized supply air are highly sensitive to degradation of ECS functions. Safety-critical avionics is another system that has an interface with ECS and needs cooling energy from ECS. SDD defines the continuous operation of safety-critical avionics in all ECS's failure scenarios. Safety critical components are required to have function to land safely in case of all possible ECS failure scenarios.

The structural integrity is required to be provided for the rotating equipment in ECS. Equipment manufacturer needs to show that components of all rotating equipment are contained so that parts resulting from the failure of rotating equipment do not cause any negative effect on system safety.

SSA verifies the air vehicle system's safe operation and acceptable performance after losing some or all ECS functions. It is recommended to check that the failure risks of ECS are within the safe limits at first hand.

The means of compliance with the requirement are MC1, MC3, and MC9 according to Table 1.

## **2.6 Technical Manuals**

Criterion as it has been stated in the standard: "Verify that normal and emergency operating procedures, limitations, restrictions, servicing, and maintenance information are included in the flight and maintenance manuals and training curriculum" (DoD Standard, 2014) .

Aircraft flight manual (AFM), aircraft maintenance manual (AMM), and training curriculum are delivered to confirm that necessary instructions of which a sample is presented in Figure 5, are provided to ensure the safe operations under all operating conditions including emergency over the flight envelope.

**COCKPIT PRESSURE/TEMPERATURE MALFUNCTION**

Loss of cockpit pressurization could be caused by canopy seal, air-conditioning system, or cockpit pressure regulator safety valve malfunctions or ECS shutdown or failure.

Certain ECS equipment malfunctions result in temporary shutdown of the ECS. These shutdowns are more prevalent at high altitude during low speed flight with high engine thrust settings. An ECS shutdown is characterized by an oily, smokey smell, followed by loss of cockpit noise and airflow and gradual loss of pressurization. These temporary shutdowns typically last from 20-45 seconds or, on occasion, up to 2 minutes. The EQUIP HOT caution light may illuminate if the shutdown lasts longer than 20 seconds.

**WARNING**

With the ECS shut down or the AIR SOURCE knob in OFF or RAM, the g-suit does not inflate **6D** and PBG is disabled.

Most AUTO position temperature failures can be corrected by use of the MAN position.

If cockpit pressure altitude exceeds **6E** 22,500, **LESS** **6E** 27,000 feet, the CABIN PRESS caution light illuminates.

If the cockpit temperature is excessive and does not respond to AUTO or MAN temperature commands or cockpit pressure is lost, proceed as follows:

1. OXYGEN – 100%.
2. Altitude – 25,000 feet maximum.
3. Airspeed – 500 knots maximum.
4. AIR SOURCE knob – OFF (10-15 seconds), then NORM.

If cockpit pressure is not regained but all other systems dependent on the ECS are operational:

5. Flight may be continued below 25,000 feet.

If ECS has failed or cockpit temperature control is not regained:

5. AIR SOURCE knob – OFF.
6. AIR SOURCE knob – RAM (after cockpit is depressurized).

**NOTE**

External fuel cannot be transferred in OFF or RAM. Consider jettisoning tanks to decrease drag if range is critical and ECS cannot be turned on for short periods of time to transfer fuel.

7. Nonessential electrical equipment – Off.

**NOTE**

If in VMC and the ADI and HSI are not required for flight, the INS should be considered nonessential.

8. Land as soon as practical.
9. Check for failed essential dc bus(es). Refer to EMERGENCY POWER DISTRIBUTION, this section.

Figure 5. Sample of ECS Directive in F-16A Aircraft Flight Manual (DoD Standard, 2003)

The environment is getting contaminated over time. The build-up of contamination in ECS may cause partial or total loss of ECS functions. Therefore, a health monitoring system can provide updated health data about ECS's critical components, such as heat exchangers, to the maintenance crew to prevent failures. Hence, conditioned maintenance may also be considered with scheduled maintenance (Fellague, Nwadiogbu, Menon, Borghese & Patankar, 2012; Hare, Gupta, Najjar, D'Orlando & Walthall, 2015). It is recommended to check data about conditioned maintenance in AMM to preclude any unexpected failure of components that are highly sensitive to contaminated environments.

The means of compliance with the requirement are MC1.

## 2.7 Operator Interface

Criterion as it has been stated in the standard: “Verify that adequate controls and displays for the environmental control system are installed in the crew station/control station or other appropriate locations to allow the environmental control system to function as intended” (DoD Standard, 2014) .

In the study about human factors in aircraft accidents (Australian Transport Safety Bureau, 1996), over 70% of flight information is received by the pilot’s eyes. Another study stated that human factors cause more than 80% of flight accidents (Kamaleshaiah & Guruprasad, 2022). This underlines the importance of human-centered design to reduce accidents sourced from pilot’s workload. In the aspect of human-centered design, ergonomics analysis is recommended to verify that the pilot’s workload is acceptable (EASA Regulation, 2023).

ECS and crew system specialists should be in coordination to show compliance with the requirement. Appropriate caution and warning indicators are necessary to alert the crew to act on time without any injury or increased workload in case of failure in ECS. The locations of caution and warning indicators should also be carefully designed considering minimum head and eye movements according to the pilot’s visual fields as illustrated in Figure 6.

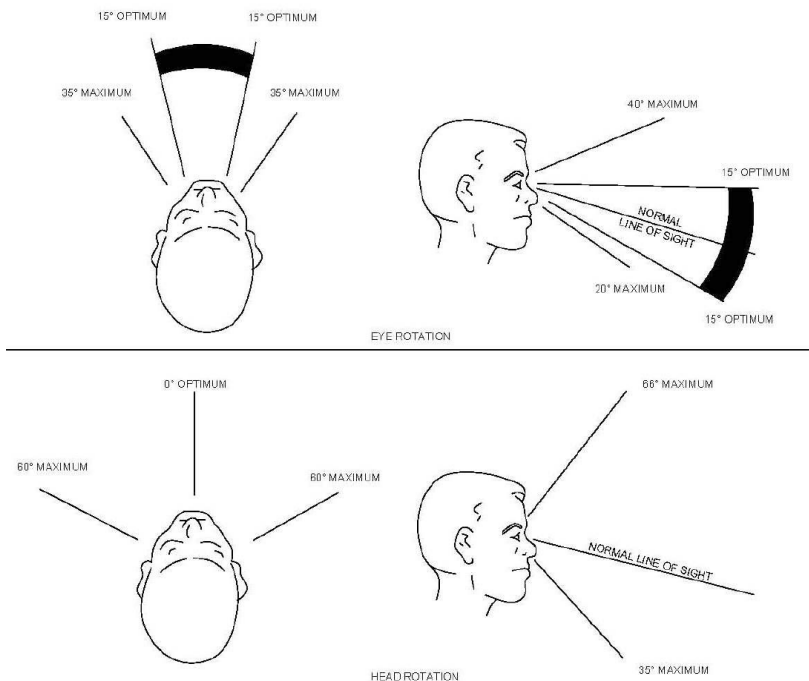


Figure 6. Eye and Head Rotations for a Pilot (DoD Standard, 2012)

Inspection of drawings including ECS control items confirms that the required control, cautions, advisories, and warnings are incorporated (DoD Standard, 2013). This would be an indication, control and advisory system (ICAS) installation plan.

Failure analysis may provide a benefit for checking the error conditions in ECS monitoring system. The safety design approach regarding redundancy or independence may be studied if error condition in the monitoring system has a higher probability than expected. Such design approaches should be included in SSA for mitigation if required.

Crew station mockup is used to verify adequate controls and displays for ECS.

Qualification tests conducted in laboratory provide safe and relatively inexpensive method to test possible failure scenarios and an initial assessment of the control precision. It can identify problems in the early development stages to save money and time. Besides, it provides an environment where risky conditions can be simulated rather than executed in flight tests.

Flight test gives the last confirmation that the system complies with the requirements. It is the only method to substantiate the performance under all conditions including transients.

The means of compliance with the requirement are MC1, MC3, MC4, MC5, and MC6.

## **2.8 Personnel Accommodation**

Criterion as it has been stated in the standard: “Verify that the environmental control system meets the requirements for personnel atmosphere, including adequate crew/occupant thermal conditioning, humidity control, and ventilation; and protective flight garment supply systems (e.g., oxygen equipment, pressure suits, anti-g garments, or ventilation garments)” (DoD Standard, 2014) .

SDD defines thermal conditioning and ventilation in the cockpit and suits for the crew such as anti-g, nuclear, biological, and chemical protection (NBC) and mask. Required temperature, flow rate, and pressure levels should be designed concerning the crew’s physiological needs.

Analysis and laboratory tests provide data to show compliance with the requirements for personnel atmosphere.

SSA provides safety analysis to prove that flight safety failure rates are within tolerable limits.

Ground and flight tests substantiate the requirement. They also supply the final

approval that ECS provides a safe atmosphere to the crew over the flight envelope.

The means of compliance with the requirement are MC1, MC2, MC3, MC4, MC5, and MC6.

### 2.9 Environmental Protection

Criterion as it has been stated in the standard: “Verify that subsystems used for environmental protection (e.g., windshield rain/snow/ice removal, ice protection, and defog) provide for safe operation of the air vehicle system throughout the specified design envelope” (DoD Standard, 2014).

Ice protection and defog on a windshield can be provided by thermal, electro-thermal, electromagnetic, chemical, mechanical, and other approved methods (DoD Standard, 1985; Martínez, 1995). SDD includes methods of protection against severe environmental conditions for flight safety. The cockpit must be arranged so that the pilots have a sufficiently extensive and clear view to perform any maneuvers within the limits (EASA Regulation, 2023). It is crucial to specify the critical view area for safe operation as illustrated in Figure 7. Critical view areas should always be kept clear throughout the flight envelope.

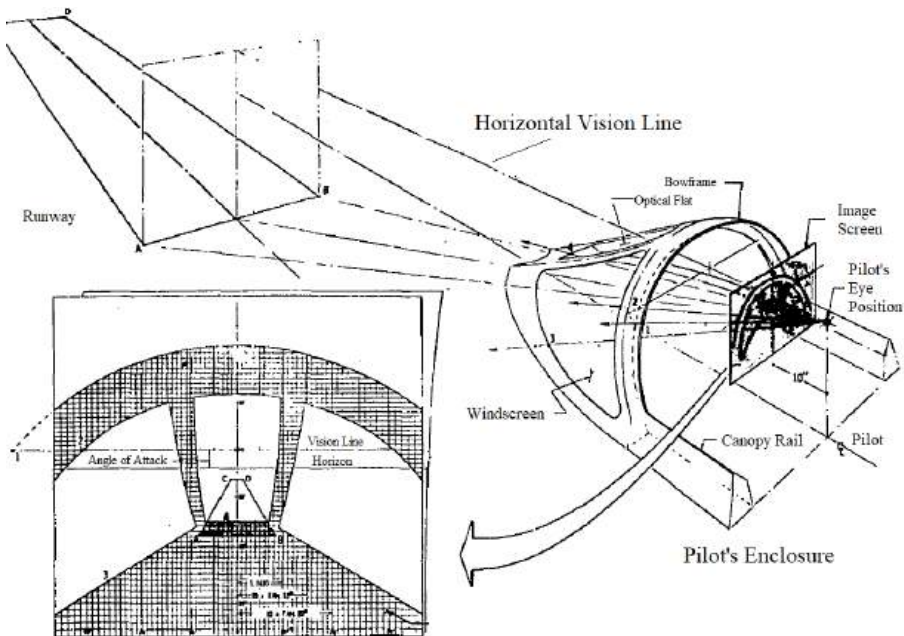


Figure 7. Pilot's External Vision Plot (DoD Standard, 1970)



Fog and ice formation on the windshield usually are cleaned with either electrical input and/or a hot air supply. The maximum temperature limit of the windshield structure should be considered not to damage the structure when heat is applied. It is recommended that temperature limit control in the hot air supply line for defog should be verified for compliance with the requirement considering the failure case in ECS.

Inlets and vents provide air transfer in ECS. Ice formation at inlets/vents disturbs air transfer, so the performance of ECS may be degraded. This may cause endanger the safety of flight. Technical analysis on inlets/vents helps the applicant to decide the severity of the environment. The applicant then decides whether these locations are ice-free or need an ice protection system (Heinrich, Ross, Zumwalt, Provorse, Padmanabhan, Thompson & Riley, 1991; Vukits & Hann, 2012). Freezing rain may cause safety problems at ECS's vents even if ice formation is tolerable and no ice protection is designed. Technical analysis will also help to decide the capacity of the system concerning the severity of the atmosphere where the aircraft operates.

SSA verifies that any environmental protection subsystem failure does not affect flight operations' safety. Provisions against fog and frost are required to be analyzed in case of a failure in ECS system. Design must show that supply to fog and frost protection is continuously available in all flight phases and failure conditions in ECS.

Critical viewing areas should be defined before ground and flight tests. Before the tests, it should be checked that the compartment is not preheated.

The means of compliance with the requirement are MC1, MC2, MC3, MC5, and MC6.

## **2.10 Personnel Air Quality**

Criterion as it has been stated in the standard: "Verify that the operators'/crew members' breathing air is protected from contamination in all forms, including oil leakage in the engine and nuclear, biological, and chemical (NBC) warfare conditions" (DoD Standard, 2014).

Contamination of bleed air degrades the quality of air supplied to pilot and threatens the health of the pilot in military applications.

It is referred "Contaminated Air in Aircraft" as the supplied air to the occupied space and contaminated by synthetic engine oils, hydraulic fluids, or deicing fluids (Michaelis, 2011). The contamination may occur due to oil seal failure, poor maintenance, or inefficiency in design (Chupp, Hendricks, Lattime & Steinetz, 2006; Johnson, 2018; Michaelis, 2018; Peng, Chunpin & Shuguang, 2014; The

Boeing Company, 2021). The oil may release harmful substances such as CO, CO<sub>2</sub>, and other toxic compounds for human health when exposed to high bleed air temperatures (Roth, 2015).

Ke Peng et al. (Peng, Chunpin & Shuguang, 2014) stated that half of the incidents of bleed air contamination are sourced from oil in engine or APU. Lubricant problems can occur at high speeds and temperatures in turbine engines (Johnson & Bisson, 1955). Besides, the Society of Automotive Engineers (SAE) reported that lubricant oil may leak at the engine startup or APU, at the time of transient operations and when the engine shuts down (SAE Standard, 2005). This means that even if the design is verified, air contamination may occur due to the engine's operation or APU. However, this chapter focuses on preventing bleed air contamination due to design deficiency.

In design, ECS gets pressurized air from the compressor section of the engine or auxiliary power unit during in-flight phases. Engines may have multiple compression stages to extract bleed air, such as a low-pressure port that supplies bleed air during take-off and cruise when the engine is at high power and a high-pressure port that supplies bleed air during landing when the engine is at low power (Roth, 2015).

For a standard operation scenario, the engine manufacturer should guarantee that bleed air meets the air purity requirements given in Table 4. A document including bleed air gas concentration data from the engine manufacturer should be submitted to show that substances are below the maximum allowable concentration for flight safety.

Table 4. Maximum Allowable Contaminant Concentrations (DoD Standard, 2015)

| Substance         | Maximum Allowable Concentration (ppm) |
|-------------------|---------------------------------------|
| Acrolein          | 0.1                                   |
| Aldehydes         | 1.0                                   |
| Carbon Dioxide    | 5000.0                                |
| Carbon Monoxide   | 50.0                                  |
| Ethanol           | 1000.0                                |
| Fluorine (as HF)  | 0.1                                   |
| Hydrogen Peroxide | 1.0                                   |
| Methyl Alcohol    | 200.0                                 |
| Methyl Bromide    | 20.0                                  |
| Nitrogen Oxides   | 5.0                                   |

|                              |                         |
|------------------------------|-------------------------|
| Ozone                        | 0.1                     |
| Oil Breakdown Products       | 1.0                     |
| Total Remaining Hydrocarbons | 250.0                   |
| Vapor Phase Water            | +75°F Dew Point Maximum |
| Nickel                       | 0.5 mg/m <sup>3</sup>   |
| Cobalt                       | 0.1 mg/m <sup>3</sup>   |
| Submicron Particles          | 0.5 mg/m <sup>3</sup>   |

In the failure mode of the engine oil system, ECS air causes a catastrophic effect when oil leaks to the bleed air. European Aviation Safety Agency (EASA) reports that fume or smoke events are mostly associated with oil leakage in the engine or Auxiliary Power Unit (APU) (EASA Regulation, 2009). A design of a sensor measuring CO and CO<sub>2</sub> in the cockpit may be beneficial to warn the crew about the bleed air contamination. Besides, shut-off means should be provided to prevent smoke, toxic gases, or other contaminants from penetrating the pilot compartment. SDD explains the methods to provide warning and mitigation methods. In addition to SDD, SSA defines the failure conditions of shut-off means and mitigations to provide flight safety.

Nuclear, biological, and chemical substances are another source of air contamination. Therefore, NBC protection may be designed according to the assigned mission profile for the aircraft. Laboratory test conducted with simulants and live agent confirms that NBC system performs as intended. NBC protection may not be considered an airworthiness issue since it may be considered it is because of enemy aggression. However, the effects of NBC system on other systems should be considered for integration into the aircraft.

The ground test is conducted to check shut-off means to operate as designed so that contaminated air does not flow to the occupied compartment in any system failure.

Flight test verifies that air in the pilot compartment does not contain any contaminants exceeding their allowable limits.

The means of compliance with the requirement are MC1, MC3, MC4, MC5, and MC6.

### 2.11 Leak Monitoring/Detection

Criterion as it has been stated in the standard: “Verify that the bleed air or other compressed air duct system is monitored for leaks and structural integrity. Ver-

ify that hot air leaking from damaged ducting does not create an ignition source for any flammable fluids or other materials, or cause damage to safety of flight items/critical safety items” (DoD Standard, 2014).

This requirement is mainly related to Fireworthiness and Fire Protection. So, it should be analyzed with the coordination of fireworthiness and fire protection engineers. Engine bleed air’s temperature is usually higher than fuel auto-ignition temperature when the engine power is not idle. Therefore, any leakage in the bleed air duct can start a fire in the area where bleed air intersects fuel or oil lines.

Overheat detectors around the bleed air duct can detect heat when any leakage occurs as illustrated in Figure 8.

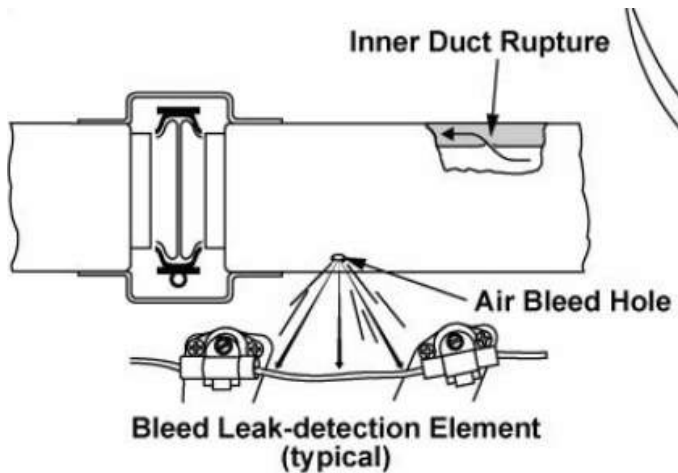


Figure 8. Typical Overheat Detector around Bleed Air Duct (The figure was re-illustrated based on the information (Majeed, 2010))

A warning alarm is initiated at the cockpit. Besides, shut-off means are necessary to make the bleed air flow stop so does the leakage. All these technical design details should be included in SDD. Inspection of SDD will provide a type of leak monitoring/detection system, and shut-off means. Inspection of drawings will provide the locations and positions of shut-off means and leak-detecting elements.

System safety hazard analysis provides the proper action items after the detection of a leakage in bleed air for the safety of flight. Quantitative analysis helps provide data showing that the bleed air duct’s failure probability is within the allowable limits.

Leakage-detecting tests may have a high risk when executing on aircraft. Therefore, a test rig may provide the benefit of verifying and validating that the leakage-detecting system operates as requested. Shut-off means may also be tested in the laboratory or even on aircraft since the on-off function is checked. The leak detector sensors should be tested in laboratory to make sure that they can operate in the desired environment and recover after disclosure to the leakage.

The means of compliance with the requirement are MC1, MC3, MC4, and MC9.

### 2.12 Bleed Air Shut-Off

Criterion as it has been stated in the standard: “Verify that bleed air shut-off provisions are available at, or as close as possible to, the bleed source” (DoD Standard, 2014).

Bleed air shut-off provisions prevent contaminants from entering the cockpit due to any probable failure in the pneumatic system. Bleed air shut-off valve is commonly used for the shut-off provision as illustrated in Figure 9.

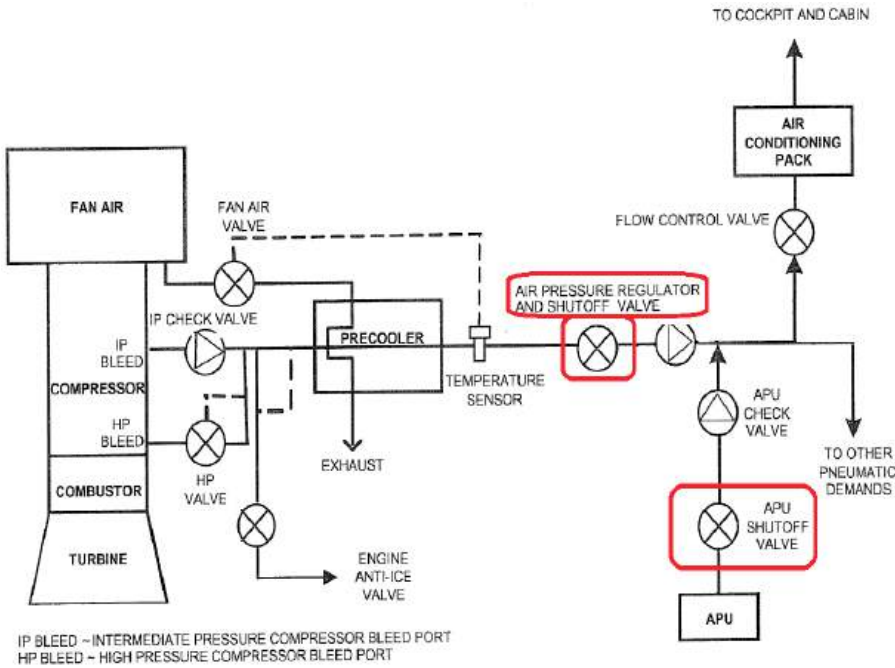


Figure 9. Bleed Air Shut-off Valve (SAE Standard, 2020)

The shut-off mechanisms should be controlled by the crew in cockpit. Inspection of SDD and drawings verify that shut-off means are designed in a safe manner.

Criteria for safe manner may be the optimum distance of shut-off means from the source. JSSG expresses that the most appropriate location for these provisions is near the bleed port of the engine (DoD Standard, 2013).

Safety analysis provides that failure of the bleed air system is within the allowable limits. It is recommended to analyze the failure of the bleed air shut-off function in the safety analysis.

The operation of bleed air shut-off provisions is verified for the normal operating condition in ground and flight tests.

The means of compliance with the requirement are MC1, MC3, MC5, and MC6.

### 2.13 Pressurization Stabilization Control

Criterion as it has been stated in the standard: "Verify that pressurization rate control is available to preclude pressure surges in the cockpit, control station, and avionics environment" (DoD Standard, 2014).

Military combat aircraft usually employ a fixed isobaric and differential pressure schedule as illustrated in Figure 10 (SAE Standard, 2015).

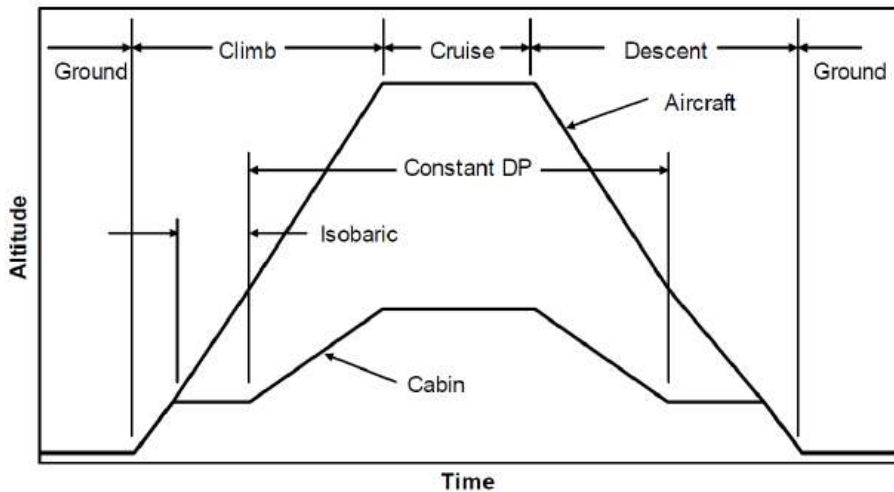


Figure 10. Typical Cockpit Pressure Schedule for Military Aircraft (SAE Standard, 2015)

The inspection of SDD provides the designed pressure schedule for the fighter aircraft. It is recommended to reconsider the pressure schedule when collective NBC protection (DoD Standard, 2013) is operating in the aircraft.

Safety analysis provides qualitative and quantitative data about the failure condi-

tions of the pressurization system including the safety critical components. Since the system is safety-critical, a safety design approach such as redundancy and independency should be considered and given as mitigation in the safety analysis.

Analysis and flight tests verify that the system can adapt to the changes in the altitude. This can be accomplished only by an automatic system with a fast response. The commonly accepted tolerance is 0.2 psi for the pressurized range and 0.5 psi for the unpressurized range (SAE Standard, 2011). Laboratory test may not give the exact results about the dynamic response, interaction of the engine bleed system, pressurization system, and flight conditions. Flight tests are required for steady-state and transient conditions. The ground test is conducted to demonstrate the relief ways (DoD Standard, 2014).

The pressurization system components, such as the outflow valve, safety relief valve, and control elements, should be tested in laboratory to confirm that they are operational throughout the envelope.

The means of compliance with the requirement are MC1, MC2, MC3, MC5, MC6, and MC9.

### 2.14 Nuclear, Biological, and Chemical (NBC) Protection Provisions

Criterion as it has been stated in the standard: “Verify that NBC equipment and/or procedures are provided for protecting or maintaining environmental control system air free from contaminants” (DoD Standard, 2014).

Nuclear, biological, and chemical materials penetrate the aircraft via the bleed air or ECS inlet/vents. Three ways to protect aircraft against NBC attack are individual protection, collective protection, and a combination of these two (SAE Standard, 2011) as illustrated in Figure 11.

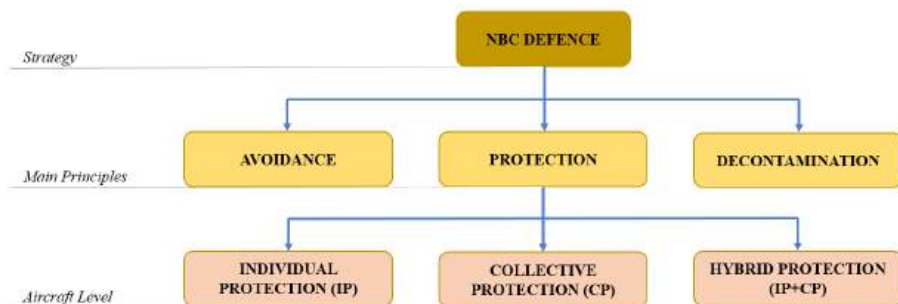


Figure 11. Strategy for NBC Defence (Based on author’s knowledge)

Individual protection requires the protection equipment which is involving a res-

piratory system and a protective suit. On the other hand, the collective protection means that the overpressure system which is the built-up of purified air in the aircraft as illustrated in Figure 12.

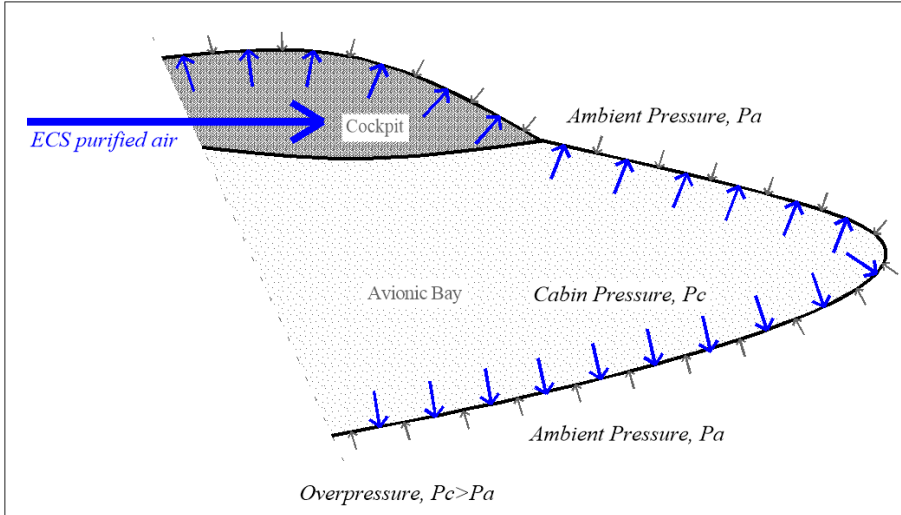


Figure 12. Schematic of Overpressure in Aircraft (Based on author's knowledge)

SDD can give technical explanations about the protection methods as a compliance document. Training curriculum, flight and maintenance manuals supply the procedures for flight safety under all operating conditions.

Showing compliance with the requirement may be exhaustive since live agent testing can only show that NBC operates as designed (DoD Standard, 2013). A chemical simulant may also be an option for laboratory tests. A flight test is always the final verification method to analyze the requirements. However, it may not be the proper case since an appropriate environment may not be provided on the flight.

NBC protection may not be considered an airworthiness requirement with the consensus between the applicant and the military authority. However, it should be checked that any hardware or software of NBC protection should not cause ECS to reduce its reliability in all flight conditions, whether it is operational or not.

The means of compliance with the requirement are MC1 and MC4.

## 2.15 Thermal Management

Criterion as it has been stated in the standard: "Verify that the air vehicle's ther-



mal management system is stable and meets all safety of flight performance requirements throughout the design envelope” (DoD Standard, 2014).

Thermal design is presented in SDD, such as components, control elements, operating sequence, interface with heat-released equipment, and other technical details. Inspection of SDD provides safety precautions and performance parameters such as operating procedures of thermal management in an emergency.

Thermal analysis or cockpit thermal balance analysis shows that ECS provides a suitable environment not only to pilot but also to safety-critical avionics, including the data such as the required mass flow rate and supply temperature as defined in the Equation (1).

$$Q_{in} - Q_{out} = \Delta Q_{storage} = m_{supply} \times c_p \times (T_{supply} - T_{cockpit}) \quad (1)$$

where:

- $Q_{in}$  : Heat gain by the cockpit interior, (in kW).
- $Q_{out}$  : Heat loss from the cockpit interior to the ambient, (in kW).
- $\Delta Q_{storage}$  : Change in heat within the cockpit, (in kW).
- $m_{supply}$  : Required mass flow rate to keep the temperature inside the cockpit same, (in kg/s).
- $c_p$  : Specific heat for the supplied air, (in kJ/kg.K).
- $T_{supply}$  : Supply air’s temperature, (in K).
- $T_{cockpit}$  : Cockpit interior air temperature, (in K).

The components for heat gain by the cockpit interior ( $Q_{in}$ ) are expanded in Equation (2).

$$Q_{in} = Q_p + Q_s + Q_c + Q_A + Q_L + Q_V \quad (2)$$

where:

- $Q_p$  : Sensible heat gain due to the pilot’s metabolism, (in kW).
- $Q_s$  : Heat gain due to the solar radiation, (in kW).
- $Q_c$  : Heat gain from the adjacent compartments, (in kW).
- $Q_A$  : Heat gain due to the heat releases from avionics, (in kW).
- $Q_L$  : Heat gain due to the heat releases from cockpit lighting, (in kW).
- $Q_V$  : Heat gain due to the aerodynamic heating, (in kW).

The components for heat loss from the cockpit interior ( $Q_{out}$ ) are expanded in Equation (3).

$$Q_{out} = Q_{cond} + Q_{conv} + Q_{rad} + Q_{evap} \quad (3)$$

where:

- $Q_{cond}$  : Heat loss due to the conduction through the cockpit surfaces, (in kW).
- $Q_{conv}$  : Heat loss due to the convection by the air flowing over the cockpit surfaces, (in kW).
- $Q_{rad}$  : Heat loss due to the radiation from the cockpit surfaces, (in kW).
- $Q_{evap}$  : Heat loss due to evaporation of sweat from the pilot, (in kW).

In the aspect of thermal management in the cockpit, pilot envelope temperature is a satisfactory requirement for military aircraft, and it should be included in the thermal analysis. Pilot envelope temperature gives the measurement at the ankle, knees, hips, chest, shoulders, and head (DoD Standard, 2014).

SSA provides that there is no loss of critical function in the case of ECS's failure.

A test rig helps to identify problems early before proceeding to ground and flight tests.

Components in the system should have the required qualifications regarding their installation zones and conditions that they are exposed to. Equipment qualification documents should be submitted to verify the requirement.

Final verification is provided with ground and flight tests. Flight tests in the only method to confirm the performance under all operating conditions.

The means of compliance with the requirement are MC1, MC2, MC3, MC4, MC5, MC6, and MC9.

## 2.16 Smoke Removal

Criterion as it has been stated in the standard: "Verify adequate smoke clearance is available to ensure safe operation with or without an operational ECS" (DoD Standard, 2014).

Smoke may be originated from onboard sources apart from the bleed air source. There are many onboard smoke or fume sources, such as electrical components, fans, fuel, exhaust, hydraulic fluids, duct insulation, deicing fluid, and air conditioning packs (Anderson, 2021). In the condition of smoke or fume in the cockpit, the smoke removal system is designed to provide a safe environment over the flight envelope.

Inspecting drawings shows the provisions for emergency ventilation and smoke removal. However, the performance which is the time to remove the smoke

from the cockpit, is required to be evaluated with analysis and verified by tests.

Safety analysis provides the failure condition, such as loss of ventilation in case of smoke (both main and emergency ventilation), to verify that failure classifications and probabilities are within the design limits to sustain the flight safety.

The means of compliance with the requirement are MC1, MC2, MC3, MC5, and MC6.

### 2.17 Surface Touch Temperatures

Criterion as it has been stated in the standard: “Verify that all surface touch temperatures remain within required limits to maintain the safety of flight operations of the air vehicle” (DoD Standard, 2014).

All surfaces that the crew can touch should be maintained within the allowable limits to preclude thermal contact hazards (DoD Standard, 2013). Temperature exposure limits are illustrated in Table 5. Surface temperatures should be checked to show compliance with the requirement.

Table 5. Temperature Exposure Limits (DoD Standard, 2012)

| Exposure                      | Temperature Limits |      |                 |
|-------------------------------|--------------------|------|-----------------|
|                               | Metal              | Gas  | Plastic or Wood |
| Momentary contact             | 60°C               | 68°C | 85°C            |
| Prolonged contact or handling | 49°C               | 59°C | 69°C            |

Analysis, component tests, and ground/flight tests verify that surface temperatures are within the safe limits for human (DoD Standard, 2014).

Safety analysis should be performed to ensure no hazards are observed and that is verified in the flight test.

The means of compliance with the requirement are MC2, MC3, MC5, MC6, and MC9.

### 3. Recommendations For Compliance Strategy

The recommended technical descriptions for compliance strategy not included in MIL-HDBK-516C are listed below:

- MIL-HDBK-516C recommends conducting a ground test for alternate cooling. However, the ground test may not be an appropriate method to analyze

safe return or mission completion concepts. They should be verified in the flight test.

- Laboratory tests prior to the flight test may help to show that interaction between regulators are as expected for pressurization.
- It is recommended to check data about conditioned maintenance in AMM to preclude any unexpected failure of components that are highly sensitive to contaminated environments.
- It is crucial to specify the critical view area for safe operation in environmental protection. The critical view area should always be kept clear throughout the flight envelope. Moreover, it is recommended that temperature limit control in the hot air supply line for defog should be verified for compliance with the requirement considering the failure case in ECS. Freezing rain may cause safety problems at ECS's vents even if ice formation is tolerable and no ice protection is designed.
- The document, including bleed air gas concentration data from the engine manufacturer, should be submitted to show that substances are below the maximum allowable concentration for flight safety to verify the requirements for air quality.
- The leak detector sensors should be tested in laboratory to make sure that they can operate in the desired environment and recover after disclosure to the leakage.
- It is recommended to install the shut-off provisions near the bleed port of the engine to stop the bleed airflow when required.
- It is recommended to reconsider the pressure schedule when collective NBC protection is operating in the aircraft. CPCS should act quickly to adapt to changes in flight altitude. This can be accomplished only by a quick-reacting, automatic system with a usually 0.2 psi for the pressurized range and 0.5 psi for the unpressurized range.
- NBC protection may not be considered as airworthiness requirement with the consensus between the applicant and the military authority. However, it should be checked that any hardware or software of NBC protection should not cause ECS to reduce its reliability in all flight conditions, whether it is operational or not.
- Pilot envelope temperature is a satisfactory requirement for military aircraft and should be included in the thermal analysis. Pilot envelope temperature should include measurements of ankle, knees, hips, chest, shoulders, and head.
- Smoke removal time should be evaluated by analysis and verified by tests. 4.

#### 4. Conclusion

A compliance strategy, including a systematic approach with the coordination of other interlinked systems, is necessary to assure safety in military applications since the certification activities have high complexity and many interfaces, and there is no common rule for verification methods.

Academic education, such as recommended practices from many standards and technical information from the handbook, is reviewed. Besides, vocational training, such as experience in the field, is mixed with academic education to prepare a comprehensive compliance strategy for airworthiness certification of ECS in military applications presented in this study.

In the aspect of the certification, the compliance strategy provides the followings:

- Specific safety requirements to ECS for the safety of flight.
- The coordination with other systems responsible that has an interface to get the maximum technical support to verify the requirements.
- Certain means of compliance with a comprehensive technical explanation to show compliance with the requirements.
- Specific technical information must be observed, measured, or searched in the documents or tests since it is crucial to the system's safety.

#### Acknowledgement

I would like to express my gratitude to my wife Özge Güler and my son Can Güler, for their invaluable contribution and moral support.

A special thanks to Dr. Eyüp Sabah and Dr. Tamer Saraçyakupoğlu for assessing the content of my article and their suggestion on the depth of the research.

I am also grateful to Metin Kiran and Tolga Vergün at Turkish Aerospace Industries for their enthusiastic guidance.

#### Conflict of Interest

The author declares no known conflict of interest.

#### References

- Anderson, J. (2021). Sources of onboard fumes and smoke reported by U.S. airlines. *Aerospace*, 8(5), 122. doi: <https://doi.org/10.3390/aerospace8050122>
- Arunachalam, S., Varadappan, A.M.S. (2023). Effect of Supply Air Failure on Cabin Pressure Control System of a Fighter Aircraft. *Int. J. Aeronaut. Space Sci.* 24, 570–580. <https://doi.org/10.1007/s42405-022-00526-8>

- Ashforth, C., & Ilcewicz, L. (2017). Certification and compliance considerations for aircraft products with composite materials. *Comprehensive Composite Materials II*, 3, 1-25. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.09944-6>
- Australian Transport Safety Bureau. (1996). Human factors in fatal aircraft accidents. Bureau of Air Safety Investigation.
- Auten, J. D., Kuhne, M. A., Walker, H. M., & Porter, H. O. (2010). Neurologic decompression sickness following cabin pressure fluctuations at high altitude. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 81(4), 427-430. doi: <https://doi.org/10.3357/ASEM.2406.2010>
- Chowdhury S.H., Ali F., Jennions I.K. (2023) A review of aircraft environmental control system simulation and diagnostics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. 237(11):2453-2467. doi: <https://doi.org/10.1177/09544100231154441>
- Chupp, R. E., Hendricks, R. C., Lattime, S. B., & Steinetz, B. M. (2006). Sealing in turbomachinery. NASA.
- Department of Defense Standard. (1970). System safety (MIL-STD-850B).
- Department of Defense Standard. (1983). Environmental control systems, aircraft, general requirements for (MIL-E-18927E).
- Department of Defense Standard. (1985). Transparent areas on aircraft surfaces (windshields and canopies), rain removing and washing systems for, de-frosting, de-icing, defogging, general specification for. (MIL-T-5842B).
- Department of Defense Standard. (1993). System safety (MIL-STD-882E).
- Department of Defense Standard. (1998). Crew Systems Oxygen Systems Handbook (JSSG 2010/10).
- Department of Defense. (2003). Flight Manual for USAF/EPAF Series Aircraft F16A/B (Pub Nr: 036802).
- Department of Defense Standard. (2012). Human engineering (MIL-STD-1472G).
- Department of Defense Standard. (2013). Air Vehicle Subsystems (JSSG 2009A).
- Department of Defense Standard. (2014). Airworthiness Certification Criteria (MIL-HDBK-516C).
- Department of Defense Standard. (2015). Aircraft Crew Breathing Systems using on-board oxygen generating system (OBOGS) (MIL-STD-3050).
- European Aviation Safety Agency Regulation. (2009). Cabin air quality onboard large aeroplanes.

- European Union Aviation Safety Agency Regulation. (2021). Easy access rules for airworthiness and environmental certification (748/2012).
- European Union Aviation Safety Agency Regulation. (2023). Easy Access Rules for large aeroplanes (CS-25).
- Fellague, K., Nwadiogbu, E., Menon, S., Borghese, J. & Patankar, R. (2012). Heat exchanger fouling detection in aircraft environmental control systems. SAE International. doi: <https://doi.org/10.4271/2012-01-2107>
- Florio, F. D. (2006). Airworthiness: An introduction to aircraft certification and operations. Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096802-5.10003-0>
- Hare, J., Gupta, S., Najjar, N., D'Orlando, P. & Walthall, R. (2015). System-level fault diagnosis with application to the environmental control system of an aircraft. SAE International. doi: <https://doi.org/10.4271/2015-01-2583>
- Heinrich, A., Ross, R., Zumwalt, G., Provorse, J., Padmanabhan, V., Thompson, J., & Riley, J. (1991). Aircraft icing handbook. Federal Aviation Administration (FAA).
- International Civil Aviation Organization (ICAO) Regulation. (2006). Convention on international civil aviation.
- Johnson, D. W. (2018). Turbine engine lubricant and additive degradation mechanisms. Aerospace Engineering. doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.82398>
- Johnson, R. L., & Bisson, E. (1955). Bearings and lubricants for aircraft turbine engines. Bearings and lubricants for aircraft turbine engines. SAE International. doi: <https://doi.org/10.4271/550014>
- Kamaleshaiah, M. S., & Guruprasad, R. (2022, September 7). Role of human factors in preventing aviation accidents: an insight: by Kamaleshaiah Mathavara and Guruprasad Ramachandran. In: Aeronautics - New Advances,1-26. Retrieved from <https://nal-ir.nal.res.in/13649/>
- Kritzinger, D. (2006). Aircraft system safety: Military and civil aeronautical applications. Cambridge, UK: Woodhead Publishing
- Linling, S., Wenjin, Z., & Kelly T. (2011). Do safety cases have a role in aircraft certification?. Procedia Engineering, 17, 358-368. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.10.041>
- Majeed, O. (2010). Aircraft Environmental Control Systems -A Presentation of Current Systems and New Developments, Specific Range Solutions. Carleton University AERO 4003 Lecture. <http://www.srs.aero/wordpress/>

wp-content/uploads/2010/11/AERO-4003-ECS-Lecture-Final.pdf, accessed October 27, 2023.

- Martínez, I. (1995). Aircraft environmental control. Retrieved January 30, 2023, from <http://imartinez.etsiae.upm.es/~isidoro/tc3/Aircraft%20ECS.pdf>
- Michaelis, S. (2011). Contaminated aircraft cabin air. *Journal of Biological Physics and Chemistry*, 11(4), 132-145. doi: <https://doi.org/10.4024/41111/11-4-abs1.jbpc.11.04>
- Michaelis, S. (2018). Aircraft clean air requirements using bleed air systems. *Engineering*, 10(4). doi: <https://doi.org/10.4236/eng.2018.104011>
- Parsons, R. A. (Ed.). (1999). HVAC applications: Aircraft. Atlanta, Georgia: ASHRAE.
- Peng, K., Chunpin, S., & Shuguang Z. (2014). Airworthiness requirements and means of compliance about the bleed air contamination. *Procedia Engineering*, 80, 592-601. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.115>
- Pleil, J. D. (2017). F/A-18 and E/A-18 Fleet Physiological Episodes (No: NESC-RP-17-01205). NASA.
- Purton, L., Clothier, R., & Kourousis, K. (2014). Assessment of technical airworthiness in military aviation: implementation and further advancement of the bow-tie model. *Procedia Engineering*, 80, 529-544. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.110>
- Purton, L., & Kourousis, K. (2014). Military airworthiness management frameworks: a critical review. *Procedia Engineering*, 80, 545-564. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.111>
- Roth, J. (2015). Bleed air oil contamination particulate characterization (master of science thesis). Kansas State University, Manhattan, Kansas.
- Saraçyakupoğlu, T. (2020). Emniyet irtifasından bilgiler: Genel havacılık, üretim ve bakım süreçleri. Ankara: Nobel Academic Publishing. ISBN : 978-625-402-030-8
- Saraçyakupoğlu, T. (2022). Major Units and Systems in Aircraft. In: Kuşhan, M.C., Gürgen, S., Sofuoğlu, M.A. (eds) Materials, Structures and Manufacturing for Aircraft.Sustainable Aviation. *Springer, Cham*. Doi: [https://doi:10.1007/978-3-030-91873-6\\_10](https://doi:10.1007/978-3-030-91873-6_10)
- Saraçyakupoğlu, T. (2022). The Certification Steps for the Additively Manufactured Aviation-Grade Parts. *The European Journal of Research and Development*, 2 (4), 33-42. Doi: <https://doi.org/10.56038/ejrnd.v2i4.133>
- Sathiyaseelan, A. (2014). Military aircraft oxygen system. *IOSR Journal of Me-*



*chanical and Civil Engineering*, 61-65. doi:1 <https://doi.org/0.13140/RG.2.2.25317.76005>

- Sathiyaseelan, A. & Selvan, A.M. (2022). Modeling and simulation of a fighter aircraft cabin pressure control system using AMESim. SAE International. doi: <https://doi.org/10.4271/2022-28-0078>
- Society of Automotive Engineers Standard. (1996). Guidelines and methods for conducting the safety assessment process on civil airborne systems and equipment (SAE ARP 4761).
- Society of Automotive Engineers Standard. (1996). Guidelines for development of civil aircraft and systems. (SAE ARP 4754A).
- Society of Automotive Engineers Standard. (2005). Airborne chemicals in aircraft cabins (SAE AIR 4766/2A).
- Society of Automotive Engineers Standard. (2011). Aerospace pressurization system design (SAE AIR 11168/7A).
- Society of Automotive Engineers. (2011). NBC protection considerations for ECS design (SAE AIR 4362A).
- Society of Automotive Engineers Standard. (2015). Aircraft cabin pressurization criteria (SAE ARP 1270B).
- Society of Automotive Engineers Standard. (2015). Cooling of military avionic equipment (SAE AIR 1277B).
- Society of Automotive Engineers Standard. (2020). Engine bleed air systems for aircraft (SAE ARP 1796B).
- Society of Automotive Engineers Standard. (2021). Testing of airplane installed environmental control systems (ECS) (SAE ARP 217D).
- The Boeing Company. (2021). Seal assembly and method for reducing aircraft engine oil leakage. (U.S. Patent No. 10927845). Washington, USA.
- United States. Federal Aviation Administration. (1993). Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment (RTCA/DO-160G).
- Vukits, T., & Hann, R. (2012). Overview and Risk Assessment of Icing for Transport Category Aircraft and Components. Paper presented at the meeting of 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, NV. doi: <https://doi.org/10.2514/6.2002-811>
- Yang, B., Yuan, W., Kong, X., Zheng, T., & Li, F. (2022). Mass transfer study on high-pressure membrane dehumidification applied to aircraft environmental control system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 202, 1-14. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123680>



## HAYVAN GÜBRESİNDEN BİYOGAZ ÜRETİM POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ: ANKARA, GAZİANTEP, KARS\*

Utku CANCI MATUR<sup>1\*\*</sup>, Aytaç ATASAYIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> İstanbul Gedik Üniversitesi, Gedik MYO, Mekatronik Programı, İstanbul,  
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-6342-5645>

<sup>2</sup> İstanbul Gedik Üniversitesi, Makine Mühendisliği, İstanbul,  
ORCID No : <http://orcid.org/0009-0007-5641-2644>

### Anahtar Kelimeler

### Öz

*Biyogaz, enerji, biyokütle, yenilenebilir enerji, elektrik*

*Gelişen teknoloji ve artan nüfusa paralel olarak enerji talebi gün geçtikçe hızla artış göstermiştir. Enerji talebinin artışı bu alanda yapılan çalışmalara hız kazandırmıştır. Halihazırda emre amade kullanılan konvansiyonel enerji kaynakları tükenebilme riski ve olumsuz çevre etkileri nedeniyle kullanımına sınır getirilmek istenen enerji kaynakları durumuna gelmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları bu anlamda konvansiyonel enerji kaynaklarına alternatif oluşturmuşlardır. Tükenme riski olmayan çevre dostu yenilenebilir enerji kaynakları son dönemlerde sıklıkla çalışılan konulardandır. Yenilenebilir enerji kaynağı olarak biyokütlenin kullanılması tarım ve hayvancılık alanında gelişmeye sebep olmuştur. Yapılan tarım ve hayvancılıkta atık olarak görünen ürünler değerlendirilerek, geri kazanım sağlanmış olacaktır. Hayvan dışkısı doğada kaldığı sürece açığa çıkan metan gazı sera etkisi yaratarak küresel ısınmaya neden olur. Suya karıştıktan sonra insan sağlığına zararlı hale gelir. Bu nedenle elektrik ve ısı enerjisi elde ederek geri dönüşümlü olarak bertaraf edilmesi önem arz etmektedir. Yapılan bu çalışma kapsamında ülkemizin farklı bölgelerinde bulunan Ankara, Gaziantep ve Kars illerindeki hayvan dışkısının toplanabilirliği dikkate alınarak biyogazdan elde edilebilecek potansiyel elektrik enerjisi araştırılmıştır. Bu kapsamda, Ankara ilinden 375.497,55 Mega Watt Saat Elektrik /Yıl (MWh/yıl), Gaziantep ilinden 115.452,27 MWh/yıl, Kars ilinden de 198.691,4 MWh/yıl elektrik enerjisinin biyogazdan elde edilebilme potansiyeline sahip oldukları belirlenmiştir.*

\* Bu makale, İstanbul Gedik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Fen Bilimleri Ana Bilim Dalı, Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programında hazırlanan " HAYVAN GÜBRESİNDEN BİYOGAZ ÜRETİM POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ: ANKARA, GAZİANTEP, MANİSA, MERSİN, KARS, SAKARYA, SAMSUN İLLERİ ÖZELİNDE" isimli yüksek lisans tez çalışmasından üretilmiştir.

\*\* [utku.canci@gedik.edu.tr](mailto:utku.canci@gedik.edu.tr)

doi : 10.46399/muhendismakina.1330243

---

## DETERMINATION OF BIOGAS PRODUCTION POTENTIAL FROM ANIMAL MANURE: SPECIFIC TO THE PROVINCES OF ANKARA, GAZİANTEP, KARS

---

### Keywords

*Biogas, energy, biomass, renewable energy, electric*

### Abstract

*Developing technology and increasing population trigger the increasing of the energy demand. As a result, increase in energy demand has accelerated the studies in this field. Conventional energy sources were used currently as usual however it was desired to be limited due to the risk of depletion and negative environmental effects. Therefore, environmentally friendly and no risk of depletion renewable energy sources have created an alternative to conventional energy sources were the frequently studied topics recently. The use of biomass as a renewable energy source has led to development in agriculture and animal husbandry. Products that appear as waste in agriculture and animal husbandry will be evaluated and recycled. If animal feces remain in nature, the methane gas released creates a greenhouse effect and causes global warming. It becomes harmful to human health after mixing with water. For this reason, it is important to obtain electrical and heat energy and dispose of it recyclable. Within the scope of this study, the potential electrical energy that can be obtained from biogas was investigated, considering the collectability of animal feces in Ankara, Gaziantep and Kars provinces located in different regions of our country. In this context, it has been determined that 375,497.55 Mega Watt Hour Electricity (MWhe/year ) from Ankara, 115,452.27 MWhe/year from Gaziantep, and 198,691.4 MWhe/year from Kars have the potential to obtain electrical energy from biogas.*

---

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 20.07.2023

Kabul Tarihi : 20.12.2023

Research Article

Submission Date : 20.07.2023

Accepted Date : 20.12.2023

---

## Extended Abstract

### Introduction

The need for energy, which could work, is increasing day by day with the increase in population and the development of technology. Among the resources used to obtain energy, there are exhaustible and clean energy sources. Solar, wind, biomass, hydraulic, geothermal are seen as clean energy sources. These energy sources are both renewable and environmentally friendly. Considering the energy supply throughout the world, it was found to be 13,961 MTEP in 2020, according to the International Energy Agency. When the sources of energy supply are examined, the energy obtained and its source are 4.114 MTEP of oil, 3.741 MTEP of coal, 3.306 MTEP of natural gas, 1.373 MTEP of biofuels and waste, 697 MTEP of nuclear, 354 MTEP of wind and solar (International Energy Agency, 2020).

Considering the proportions of gases in the biogas released from animal manure, Methane (CH<sub>4</sub>) 40-75%, Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) 15-60%, Water vapor (H<sub>2</sub>O) 1-5%, Nitrogen (N<sub>2</sub>) 0-5%, Oxygen (O<sub>2</sub>) <2%, Hydrogen (H<sub>2</sub>) <1%, Ammonia (NH<sub>3</sub>) 0-500 ppm, Hydrogen Sulfide (H<sub>2</sub>S) 0-5000 ppm (Bharathiraja, B., Sudharsana, T., Jayamuthunagai, J., Praveenkumar, R., Chozhavendhan, S., Iyyappan, J., 2018.)

The potential energy to be gained from the cogeneration system to be made with methane gas obtained from animal manures of Bursa province was conducted. According to this research conducted in 2015, it has been determined that there is 2,788 TJ of thermal energy and 271 GWh of electrical energy.

According to the research conducted in Çanakkale province, the potential electrical energy to be obtained from biogas was found to be 8.33 107 kWh/year. A study was conducted on animal breeds and numbers (Özpinar S., 2018).

There are carbon emission rates determined in the literature in energy production. Although this rate varies according to each country, it is accepted that 0.58 g of carbon dioxide is emitted for 1 kWh electricity production for Turkey (Yağlı H., Koç Y., 2019). When renewable energy sources are used, the amount of CO<sub>2</sub> released into the atmosphere is also reduced.

### Material and Methods

The collectibility of animal manure is an important factor in the amount of biogas to be obtained. Calculation on the collected fertilizers will give more accurate information. In Turkey, the collectibility rate of animal manure has been accepted as 50% (Yağlı H., Koç Y., 2019).

The information necessary to find the potential amount of biogas is available. This information is the type of animal, the number of animals, the daily manure amount of the animal, the amount of wet manure according to the tests and acceptances, the amount of solid matter, the amount of volatile solids. The efficiency of the gas turbine to be used for the calculation of the electricity to be produced is also important. This rate varies between 35%-40%. In the calculations, this efficiency was accepted as 35%.

When making the calculations, the number of animal species is multiplied by the average amount of fertilizer. To find a one-year amount, it is necessary to multiply it again by 365 days. To find the amount of collectable fertilizer, the annual amount of fertilizer is multiplied

lied by the collection rate. The amount of solid matter is found by multiplying the amount of collectable manure with the solid matter ratio in the wet manure. When the volatile solids ratio is multiplied by the solids amount, volatile solids are found. The amount of methane is calculated by multiplying the amount of methane in the volatile solids with the volatile solids. The amount of methane is multiplied by the generator efficiency and the kWh value of the methane gas, which is 10kWh, to find the potential electrical energy.

### **Biogas Potential in Determined Provinces**

When Ankara province is examined, the total number of animals is 18.437.040, the total methane amount is 107.285.013,99 m<sup>3</sup>-CH<sub>4</sub>, the energy value is 3.862.260.50 GJ/year, the potential electrical energy is 375,497.55 MWhe/year and the potential of the facility to be established is 42 in total. It was found to be 87 MW.

When Gaziantep province is examined, the total number of animals is 7.031.749, the total amount of methane is 32.986.363.06 m<sup>3</sup>-CH<sub>4</sub>, the energy value is 1.187.509.07 GJ/year, the potential electrical energy is 115.452.27 MWhe/year and the potential of the facility to be established is 13 in total. It was found to be 18 MW.

When Kars province is examined, the total number of animals is 2.125.962, the total methane amount is 56,768,971.15 m<sup>3</sup>-CH<sub>4</sub>, the energy value is 2.043.682.96 GJ/year, the potential electrical energy is 198.691.40 MWhe/year and the potential of the facility to be established is 22 in total. It was found to be 68 MW.

### **Discussion and Conclusions**

The 375,497.55 MWhe/year electrical energy to be obtained from the biogas facilities in Ankara will meet the 2.5% of the total electricity expenditure according to the 2020 data of Tedaş. Since energy will be obtained from renewable sources, a total of 217,278.57 tons of CO<sub>2</sub> emissions will be prevented. Due to the large amount of sheep, it will be recommended to give priority to sheep farms.

115,452.27 MWhe/year electrical energy to be obtained from biogas facilities in Gaziantep will meet 1.3% of the total electricity expenditure according to the 2020 data of Tedaş. Since energy will be obtained from renewable sources, a total of 66,962.31 tons of CO<sub>2</sub> emissions will be prevented. Due to the large amount of cattle, priority will be given to sheep farms.

198,691,40 MWhe/year electrical energy to be obtained from biogas facilities in Kars province will meet 62% of the total electricity expenditure according to the 2020 data of Tedaş. Since energy will be obtained from renewable sources, a total of 115,241.01 tons of CO<sub>2</sub> emissions will be prevented. Due to the large amount of sheep, it will be recommended to give priority to sheep farms.

## 1. Giriş

İş yapabilme yeteneği olan enerjiye gerek sanayide gerekse kişilerin günlük hayatlarında oldukça ihtiyaç duyulmaktadır. Nüfusun ve teknolojinin artması ile enerji ihtiyacı açığı ortaya çıkmıştır (Koç, E., Kaya, K., 2015). Bu ihtiyaç tükenebilen enerji kaynakları ya da yenilenebilir enerji kaynakları ile sağlanabilir. Temiz enerji olarak adlandırılan ve günümüzde önemini artıran güneş, jeotermal, hidrolik, rüzgâr ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji elde edilebilmek mümkündür (Mao C, Feng Y, Wang X, Ren G., 2015). Bu kaynaklardan elde edilen enerji hem çevreci hem de daha uzun ömürlüdür. Dünya geneline bakıldığında Uluslararası Enerji Ajansı'nın (International Energy Agency) yapmış olduğu çalışmaya göre 2020 yılında toplam 13.961 mega ton eşdeğer petrol (MTEP) enerji arzı gerçekleşmiştir. Bu enerji arzının dağılımı incelendiğinde 4.114 MTEP ile %29,5'lik paya sahip olan enerji çeşidinin petrol olduğu, %26,8'lik paya sahip olanın da kömürden 3.741 MTEP ' lik enerji elde edildiği belirlenmiştir. Doğalgazdan 3.306 MTEP, biyoyakıt ve atıklardan 1.373 MTEP, nükleerden 697 MTEP, hidrolik santrallerden 373 MTEP, rüzgar ve güneş gibi kaynaklardan 354 MTEP enerji elde edilmiştir [3]. Türkiye' de 2021 yılındaki enerji arzına bakıldığında toplamda 158,43 MTEP enerji arzı yapılmıştır. International Energy Agency'nin paylaştığı verilere dayanarak doğalgazdan enerji %31 pay ile 49,11 MTEP, %27,4 pay ile 43,47 MTEP petrolden, %25,3'lük pay ile kömürden 40,14 MTEP, %10,5'lik pay ile rüzgar, güneş ve jeotermal kaynaklarından 16,56 MTEP, %3'lük pay ile hidroelektrik santrallerden 4,78 MTEP, %2,7'lik bir pay ile de biyoyakıt ve atıklardan 4,34 MTEP enerji elde edilmiştir (International Energy Agency, 2020).

Dünya genelinde enerji eldesi tükenebilen enerji kaynaklarından sağlandığı zaman atmosferde mevcut olmayan karbon açığa çıkmaktadır. Karbon temelli olan metan ve karbondioksit gazları, sera gazı olarak adlandırılmaktadır. Bu sera gazları güneş ışınlarının dünyada kalmasını sağlayarak, küresel ısınmaya sebep olmaktadır. Özellikle metan gazı karbona göre 25 kat daha fazla etki etmektedir (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, 2010). Bu sebepten dolayı açığa çıkabilecek metan gazı bertaraf edilmesi gerekmektedir.

Alternatif enerji kaynağı olan biyokütleden, farklı yöntemler kullanılarak elektrik eldesi sağlanabilmektedir. Bu çevrim yöntemleri ile ilgili yapılan araştırmaya göre fiziksel çevrim yöntemi, biyokimyasal çevrim yöntemi, termokimyasal çevrim yöntemi, gazlaştırma ve sıvılaştırma yöntemleri gösterilmiştir (Yılmaz O., 2021).

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan biyokütleden elde edilen enerji ile ilgili çalışma yapılmış. Çalışmaya göre elde dünya genelinde biyokütleden 59,2 Exajoule (EJ) enerji arzı tespit edilmiştir. Biyokütle çeşitlerinden biri de hayvan

gübrelerinden elde edilen biyogazdır. Hayvan gübreleri doğada kaldığı zaman çevreye metan gazı salınımı gerçekleşir. Bu yüzden bu gübrelerin bertaraf edilmesi hem çevredeki insanların sağlığı hem de atmosferdeki metan gazı miktarından dolayı önem arz etmektedir. Bu metan gazı uygun şartlarda kojenerasyon sistemler kurularak bertaraf edilmektedir. Metan gazı alınmış, gerekli işlemler yapılmış gübre, önceki durumuna göre daha verimli hale getirilebilir (Aslantaş A. , 2018)

Hayvan gübresinden elde edilen biyogazın içerisinde, hayvan türüne göre farklı oranlarda metan gazı bulunmaktadır. Tablo 1’de biyogaz içerisinde bulunan gazların hacimsel oranları verilmiştir. Tablo 1’e göre metan oranı %40 ile %75 arasında değişkenlik göstermektedir.

Tablo 1. Biyogaz İçerisindeki Gazların Oranı (Bharathiraja, B. ve diğ., 2018)

| Bileşen Adı                        | Hacimsel Oran | Birim                   |
|------------------------------------|---------------|-------------------------|
| Metan (CH <sub>4</sub> )           | 40-75         | %                       |
| Karbon dioksit (CO <sub>2</sub> )  | 15-60         | %                       |
| Su buharı (H <sub>2</sub> O)       | 1-5           | %                       |
| Azot (N <sub>2</sub> )             | 0-5           | %                       |
| Oksijen (O <sub>2</sub> )          | <2            | %                       |
| Hidrojen (H <sub>2</sub> )         | <1            | %                       |
| Amonyak (NH <sub>2</sub> )         | 0-500         | Ppm (Parts Per Million) |
| Hidrojen Sülfür (H <sub>2</sub> S) | 0-5000        | Ppm                     |

Hayvan gübrelerinin bakteriler aracılığı ile saldığı metan gazından elektrik enerjisi ve ısı enerjisi elde edilebilmektedir. Gübrelerin salınımı süreci, verimli gaz elde edilmesi, biyogaz tesisinin kurulumu ile ilgili Türk-Alman işbirliği ile T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü biyogaz kullanım kılavuzu çıkartmıştır (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, 2010)

Hayvan gübrelerinden elde edilen biyogaz kojenerasyon sistemlerde kullanılmaktadır. Bölgesel olarak biyogazdan elde edilebilecek potansiyel enerji araştırmaları yapılmıştır. Bursa ili özelinde 2015 yılında yapılan çalışmada e 2.788 TJ ısı enerjisi ve 271 GWhe elektrik enerjisi elde edilebileceği gösterilmiştir (Ayhan A., 2015).

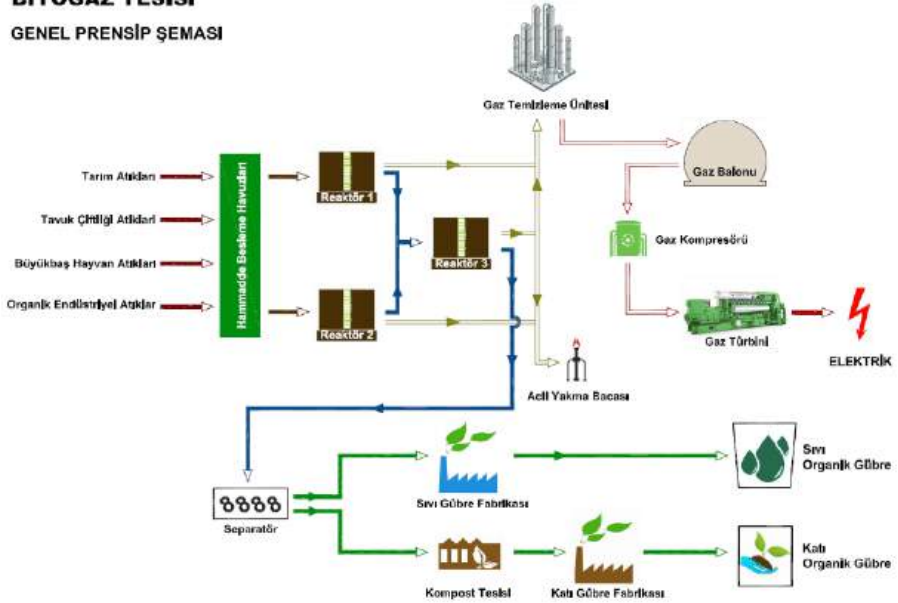
Çanakkale ili özelinde biyogazdan elde edilebilecek potansiyel enerji ile ilgili Sakine Özpınar’ ın çalışmasında elektrik enerjisi potansiyeli 8.33 10<sup>7</sup> kWh/yıl

olarak bulunmuştur. Buradaki hayvan cinsleri ve sayılarına göre araştırma yapılmıştır (Özpınar S., 2018).

Hayvan gübreleri belirli aşamalardan sonra metan gazı salgılamaktadır. Hayvan cinsine göre gübre miktarı, gübrenin içerisindeki bileşenlerin miktarı değişiklik göstermektedir. Metan gazı kojenerasyon sistemlerinde yakılarak elektrik eldesi sağlanır. Elektrik elde edilirken gaz türbinlerinin soğutulması amacıyla kullanılan su da ısıtılmış olmaktadır. Sıcak su hem tesis ihtiyacı hem de farklı alanlarda duyulan ısı enerjisi ihtiyacı için kullanılabilir. Şekil 1’ de de gösterildiği gibi toplanan hayvan gübreleri önce karıştırma ünitelerinden geçer, sonrasında reaktörlere iletilir, reaktörlerdeki gazlar gaz motorlarına gönderilir ve burada elektrik enerjisi üretimi sağlanır. Gazı alınmış olan gübre ise kullanılmak ya da verimi arttırmak üzere farklı bir lokasyona aktarılabilir.

## BIYOGAZ TESİSİ

### GENEL PRENSİP ŞEMASI



Şekil 1. Biyogaz Üretim Prosesi (<https://altacaenerji.com/biyogaz/uretim/>)

Enerji üretimi sırasında yapılan çalışmalara göre her ülkenin kendi karbon salımı mevcuttur. Türkiye’deki 1kWh’lik elektrik enerjisi için doğaya salınan CO<sub>2</sub> miktarı ise 0,58 kg olarak belirtilmiştir (Yağlı H., Koç Y., 2019). Yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisi sayesinde doğaya salınan CO<sub>2</sub> miktarının düşümü de sağlanmış olacaktır.

Bu çalışma kapsamında yapılan literatür çalışmaları doğrultusunda ülkemizin farklı bölgelerinde bulunan üç büyük il için biyokütle enerjisinden elektrik



enerji elde etme potansiyeli değerlendirilmiştir. Yapılan çalışma ile incelenen illerden Ankara'ya bakıldığında 375.497,55 MWhe/ yıl, Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nden enerji eldesi potansiyeli yüksek olan Gaziantep'e bakıldığında biyogazdan 115.452,27 MWhe/ yıl ve Doğu Anadolu Bölgesi'nde bulunan Kars ili incelendiğinde 198.691,40 MWhe' lik elektrik enerjisinin biyogaz tesislerinden elde edilebileceği bulunmuştur.

## 2.Bilimsel Yazın Taraması

İran ülkesi için Noorollahi ve arkadaşları (2015) besi hayvanlarının gübresinden elde edilecek olan biyogaz potansiyeli çalışması yapmıştır. Yapılan çalışmaya göre en yüksek potansiyelin İran'ın Sistan-Baluchestan ve Ilham bölgelerinde olduğu tespit edilmiştir. Bu yüzden yapılacak olan biyogaz üretim tesisinin bu bölgede öncelik olması gerektiğine karar verilmiştir.

Bursa ili özelinde Ayhan A. (2015) tarafından 2008-2014 yılları arasında hayvan gübrelerinden elde edilecek biyogaz potansiyel araştırması yapılmıştır. Bu çalışmadan çıkan sonuca göre elde edilecek olan potansiyel biyogaz %100 enerjiye dönüştürülürse 2014 yılı için 2.788 TJ ısı enerjisi ve 271 GWhe elektrik enerjisi elde edileceği bulunmuştur.

Hayvan gübrelerinden faydalanılarak elde edilecek biyogaz potansiyeli Adana ili özelinde Yağlı, H. (2019) tarafından 2019 yılında çalışma yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda 88.367,417 m<sup>3</sup> -CH<sub>4</sub>/yıl biyogaz üretilebileceği, bu biyogaz kullanılarak senelik 309,286 MWhe elektrik üretimi yapılabileceği bulunmuştur.

Nilüfer Nacar Koçar (2006), Türkiye Hayvancılık Potansiyeli ve Biyogaz Üretimi başlıklı 2006 yılında yaptığı çalışmada, hayvan türlerine göre üretilecek olan metan gazı miktarlarını, metan üretimini etkileyen faktörleri araştırmıştır. Bu araştırma sonunda 12,5 milyon ton organik atık olduğu sonucuna varılmıştır. Sığır, koyun, keçi, tavuk ve hindi gibi hayvanların gübrelerinden elde edilecek olan toplam biyogaz potansiyelini 3.275.098.076 m<sup>3</sup>/yıl olarak bulmuştur.

Çanakkale ili özelinde Özpınar S. (2018) tarafından yapılan çalışmada toplam biyogaz potansiyelinin 1.77x10<sup>7</sup> m<sup>3</sup> olduğu bulunmuştur. Bu biyogazın enerji eşdeğeri 425,3 milyon MJ ve bunun da elektrik enerjisi karşılığı 8,33x10<sup>7</sup> kWh olduğu belirtilmiştir. Afyonkarahisar için Kumaş, K., & Akyüz, A. Ö. (2023) tarafından yapılan çalışmada 208,44 Mm<sup>3</sup> yıllık metan gazı potansiyeli ve metan gazının termal enerji karşılığının 4.503.342 GJ/yıl olarak bulunmuştur. Portekiz'deki gübrelerden elde edilebilecek olan biyogaz ve biyometan üretim potansiyeli incelemesi Fernandes, D. J., Ferreira, A. F., & Fernandes, E. C. (2023) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmaya göre en yüksek gübre potansiyelinin Portekiz'in orta ve güney bölgelerinde olduğu bulunmuştur. Bu bölgelerde kurulabilecek 743 adet tesisin olabileceği bulunmuştur. Portekiz'in toplam biyogaz potansiyeli

3.561.947,05 ton/yıl, biyometan potansiyeli 1.791.402,48 ton/yıl olarak bulunmuştur.

Singh, D., Tembhare, M., Machhirake, N., & Kumar, S. (2023) tarafından gıda atıklarından elde edilen biyogaz potansiyeli ve biyogaz eldesi için sıcaklık şartları incelenmiştir. 90 gün süren çalışmada 35°C ve 73°C arasındaki sıcaklıklarda biyogaz üretimi test edilmiştir. En yüksek verimin 45°C ile 52°C arasında olduğu tespit edilmiştir. Afotey, B., & Sarpong, G. T. (2023) tarafından Gana için biyogaz potansiyel ve önlenen sera gazı miktarı belirlenmesi yapılmıştır. Bu çalışmada 2020 yılında  $6.792 \times 10^9$  m<sup>3</sup> biyogaz potansiyeli olduğu ve bu biyogazdan 7.12  $10 \times 10^9$  kWh/yıl elektrik üretimi yapılabileceği bulunmuştur. Hindistan ülkesi için de Nehra, M., & Jain, S. (2023) yaptığı çalışmada 5464,11 milyon m<sup>3</sup> biyogaz ve bu biyogazdan 9835,4 GWh elektrik enerjisi üretilebileceği tespit edilmiştir. Konya ili özelinde Karaca, C. (2023) tarafından yapılan çalışmada toplamda 105,67 Mm<sup>3</sup> biyogaz potansiyeli olduğu hesaplanmıştır. Biyogazdan elde edilebilecek elektrik 266,53 GWh olarak bulunmuştur.

### 3. Materyal ve Yöntem

Hayvan gübrelerinin toplanması ayrı bir prosestir. Hayvan gübresinden elde edilecek enerjinin potansiyelini hesaplarken gübrelerin toplanabilir olması gerekmektedir. Türkiye geneli düşünüldüğünde toplanma oranı olarak %50 alınmıştır (Yağlı H., Koç Y., 2019).

Biyogaz potansiyeli hesaplanırken hesaplanacak bölge ile ilgili bilinmesi gereken veriler mevcuttur. Bunlar bölgedeki hayvan cinsi ve sayısı, hayvan cinsine göre günlük gübre miktarı, yapılan testlere veya kabullere göre hayvan cinsine göre gübredeki yaş gübre oranı, yaş gübredeki katı madde miktarı ve katı maddedeki uçucu katı madde miktarıdır. Biyogaz miktarını bulduktan sonra bunun gaz türbinlerinde elektriğe çevrildiğinde türbinin verimi de dikkate alınması gerekir. Bu verim türbine göre farklılık gösterirken genel olarak %35-%40 arasında değişiklik göstermektedir.

Yapılan incelemelere göre hesaplamalar için bazı kabuller yapılmıştır. Tablo 2' de hayvan türlerine göre günlük gübre miktarı, toplanabilirliği ve yaş gübredeki katı madde oranı, katı madde içerisindeki uçucu katı madde oranı, metan oranı gösterilmiştir. Hesaplamalar bu verilere dayanarak yapılmıştır (Yağlı H., Koç Y., 2019). Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Tablo 2. Hayvan Gübre Miktarı (Yağlı H., Koç Y., 2019)

| Hayvan Türü                              | Hayvan Başına Ortalama Günlük Yaş Gübre Üretimi (kg/gün-hayvan) | Toplanabilir Faydalı Gübre Oranı (%) | Yaş Gübredeki Katı Madde Oranı (%) | Katı Madde İçerisindeki Uçucu Katı Madde Oranı (UKM) (%) | Metan Üretimi (Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg-UKM) |
|--|---|--------------------------------------|------------------------------------|--|---|
| Kültür ve Melez Süt Sığırları (Yetişkin) | 43,00   | 41,00                                | 17,27                              | 83,36  | 0,108   |
| Kültür ve Melez Et Sığırları (Yetişkin)  | 29,00   | 41,00                                | 12,41                              | 84,65  | 0,22  |
| Yerli Sığır                              | 29,00   | 41,00                                | 17,27                              | 83,36  | 0,22  |
| Genç Yavru (Buzağı)                      | 2,48  | 41,00                                | 3,71                               | 44,23  | 0,22  |
| Koyun                                    | 2,40  | 41,00                                | 23,00                              | 83,63  | 0,20  |
| Keçi                                     | 2,05  | 41,00                                | 23,17                              | 73,06  | 0,20  |
| At-Katır-Eşek                            | 20,40   | 33,00                                | 19,61                              | 66,67  | 0,18  |
| Et Tavuğu                                | 0,19  | 99,00                                | 20,00                              | 77,28  | 0,20  |
| Yumurta Tavuğu                           | 0,13  | 99,00                                | 18,75                              | 75,00  | 0,20  |
| Hindi                                    | 0,38  | 99,00                                | 19,36                              | 75,83  | 0,20  |
| Kaz                                      | 0,33  | 99,00                                | 17,27                              | 61,28  | 0,20  |
| Ördek                                    | 0,33  | 99,00                                | 17,27                              | 61,3   | 0,20  |

Gaz türbini verim oranı olarak %35 kabul edilmiştir. Bu oran ile türbine gelen gazın elektrik enerjisine çevirimi hesaplanmıştır. Hesaplamalar aşağıda yöntemler kullanılarak yapılmıştır. Eşitlik 1-7 işlemlerinde kullanılan parametrelere ait kısaltmalar ve açıklamalar Tablo 3'de verilmiştir

Tablo 3.İşlemlerde Kullanılan Parametreler ve Kısaltmalar

| Hesaplanan Tanım                                | Kısaltması |
|---|------------|
| Yıllık Toplam Hayvan Gübresi                    | YTHG       |
| Hayvan Sayısı                                   | HS         |
| Ortalama Günlük Gübre Miktarı                   | OGGM       |
| Toplanabilir Faydalı Gübre Miktarı              | TFGM       |
| Toplanabilir Faydalı Gübre Oranı                | TFGO       |
| Katı Madde Miktarı                              | KM         |
| Yaş Gübredeki Katı Madde Oranı                  | YGKMO      |
| Uçucu Katı Madde Miktarı                        | UKM        |
| Katı Maddedeki Uçucu Katı Madde Oranı           | KMUKMO     |
| Katı Maddedeki Uçucu Katı Maddedeki Metan Oranı | MO         |
| Metan Miktarı                                   | MM         |
| Metan Enerji Değeri                             | Q          |
| Elektrik Enerjisi                               | E          |
| Motor Verimi                                    | $\eta$     |
| Metan Gazının Elektrik Enerjisi Değeri          | W          |

Hesaplamalar yapılırken öncelikle bulunması gereken değer bizim toplamdaki yaş gübre miktarımızdır. Senelik toplam gübre miktarını bulmak için hesaplanan hayvan türünün sayısı ve ortalama günlük gübre miktarı kullanılmıştır. Eşitlik 1 için yılın 365 gün olduğu bilinerek hesaplama yapılmıştır.

$$YTHG = HS \times OGGM \times 365 \quad (1)$$

Toplam gübre miktarımız bulduktan sonra bu gübrelerin toplanma durumu önem kazanmıştır. Yapılan besiciliğe göre toplanma miktarı hayvanlara göre değişkenlik göstermiş olup toplanan gübrede enerji eldesi olacağı için toplanabilir gübre miktarı Eşitlik 2’de belirtildiği şekilde hesaplanmıştır.

$$TFGM = YTHG \times TFGO \quad (2)$$

Toplanan gübrelerdeki katı madde miktarı ve bu katı maddedeki uçucu katı madde miktarı bizim için önemlidir. Toplanabilir gübre miktarı ile yaş gübre katı madde miktarı çarpımından katı madde miktarı Eşitlik 3’deki gibi hesaplanmıştır.

$$KM = TFGM \times YGKMO \quad (3)$$

Katı madde içerisindeki uçucu katı maddeyi de Eşitlik 4’den yola çıkarak bulma oranı ile hesaplayabiliriz. Biyogaz bu uçucu maddeden elde edilmiştir.

$$UKM = KM \times KMUKMO \quad (4)$$

Katı madde içerisindeki uçucu katı maddeyi bulduktan sonra metan miktarı bulunur. Her gübrenin içerisindeki metan oranı farklılık gösterebilir. Hacimsel olarak metan gazı miktarı, uçucu katı madde miktarının kg birim başına belirli bir oranı mevcuttur. (Eşitlik 5)

$$MM = UKM \times MO \quad (5)$$

Metan miktarı bulunduğundan sonra elde edilebilecek enerji miktarı bulunabilir. Biyogazın içerisindeki metan oranı %100 olduğunda metan gazının enerji değeri 36 MJ/Nm<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. Eşitlik 6 kullanılarak metan gazının ısı değeri 36 MJ/Nm<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır (YAĞLI, Hüseyin. 2019).

$$Q = MM \times 36 \text{ MJ/Nm}^3 \quad (6)$$

Biyogazdan elektrik eldesi için gaz motorları bulunmaktadır. Bu motorlar aracılığı ile biyogaz yakılarak elektrik enerjisi elde edilmektedir. Elektrik enerji miktarını belirleyen parametrelerden biri de kullanılan motorun verimidir. Motor verimleri %35-%40 arasında değişiklik göstermektedir. Hesaplamalarda motor verimi %35 olarak alınmıştır. Metan gazının kWh değeri yaklaşık olarak 10 kWh olarak alınmıştır. Buna göre Eşitlik 7'deki gibi hesaplama yapıldığında elektrik enerjisi değeri E değeri bulunmuştur.

$$E = MM \times \eta \times W \quad (7)$$

#### **4. Ankara, Gaziantep ve Kars İlleri için Biyogaz Potansiyellerinin Belirlenmesi**

Yapılan bu çalışma ile, Bölüm 2'de verilen materyal ve yöntem kısmında detayları verilmiş hesaplamalar kullanılarak ülkemizin farklı bölgelerinden iller seçilerek, bu illerdeki hayvansal atıklardan elde edilebilecek elektrik enerjisi potansiyeli belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında sanayi veya hayvancılığın gelişmiş olduğu iller örnek alınarak seçilmiştir. Bu kapsamda, İç Anadolu Bölgesi'nden Ankara, Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nden Gaziantep ve hayvancılığın yaygın olduğu Doğu Anadolu Bölgesi'nden Kars illeri seçilmiştir. Yapılan bu çalışma neticesinde seçilen iller için biyokütleden elektrik enerjisi potansiyelini belirleyerek bu bölgelere sürdürülebilir teknolojinin kullanımını artıracak yatırımlar yapılabilmesini sağlamaktır.

##### **4.1 Ankara İli Hayvan Gübrelerinden Elde Edilecek Elektrik Enerjisi Potansiyeli**

Ankara ilinde 2021 yılı için nüfus 4.890.893' tür. Bunun içerisinde 2.843.409 erkek, 2.903.916 kadın bulunmaktadır (TÜİK, 2022). Geçim kaynağı olarak sanayi

ve hayvancılık yapılan ilde, Tablo 3' te görüldüğü gibi genelde küçük baş ve kümes hayvanları beslenmektedir. Toplam hayvan sayısına bakıldığında 18.430.040 olarak bulunmuştur (TÜİK, 2022). Kimi hayvanlar çiftliklerde beslenirken kimisi de meralarda otlamaktadır.

TÜİK verilerine göre Ankara ilindeki hayvan gübrelerinin toplanabilirliği dikkate alındığında, elde edilebilecek olan gübre miktarı 4.382.269,78 ton/yıl olarak bulunmuştur. Belirtilen yöntem uygulandığı zaman Tablo 3' te de belirtildiği gibi toplam olarak 774.118,67 ton/yıl katı madde miktarı, 630.994,82 ton/yıl uçucu katı madde miktarı ve 107.285.013,99 m<sup>3</sup>-CH<sub>4</sub> metan gazı potansiyeli tespit edilmiştir. Potansiyel olarak bulunan metan gazı, elektrik üretimi için uygun tesislerde elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir.

Tablo 3. Ankara İlinin Metan Gazı Potansiyeli

| Hayvan Türü                               | Hayvan Sayısı (Adet) | Toplanabilir Faydalı Gübre Miktarı (ton/yıl) | Katı Madde Miktarı (ton/yıl) | Uçucu Katı Madde Miktarı (ton/yıl) | Metan Miktarı (m <sup>3</sup> -C <sub>H4</sub> ) |
|---|----------------------|--|------------------------------|------------------------------------|--|
| Kültür ve Melez Süt Sığırtı (Yetiştirkin) | 246.640              | 1.587.116,07                                 | 274.094,94                   | 228.485,55                         | 24.676.438,98                                    |
| Kültür ve melez Et sığırtı (Yetiştirkin)  | 211.437              | 917.604,86                                   | 113.874,76                   | 96.394,99                          | 21.206.897,24                                    |
| Yerli Sığırtı                             | 14.819               | 64.312,24                                    | 11.106,72                    | 9.258,56                           | 2.036.884,21                                     |
| Genç Yavru (Buzacağı)                     | 139.242              | 51.677,16                                    | 1.917,22                     | 847,99                             | 186.557,27                                       |
| Koyun                                     | 1.940.304            | 696.879,58                                   | 160.282,30                   | 134.044,09                         | 26.808.818,25                                    |
| Keçi                                      | 349.337              | 107.170,48                                   | 24.831,40                    | 18.141,82                          | 3.628.364,14                                     |
| At-Katır-Eşek                             | 3.628                | 8.914,65                                     | 1.748,16                     | 1.165,50                           | 209.790,01                                       |
| Et Tavuğı                                 | 9.867.362            | 677.458,54                                   | 135.491,71                   | 104.705,28                         | 20.941.056,40                                    |
| Yumurta Tavuğı                            | 5.599.003            | 263.015,97                                   | 49.315,49                    | 36.986,62                          | 7.397.324,03                                     |
| Hindi                                     | 18.670               | 2.563,63                                     | 496,32                       | 376,36                             | 75.271,81  |
| Kaz                                       | 22.239               | 2.651,90                                     | 457,98                       | 280,65                             | 56.130,43  |
| Ördek                                     | 24.359               | 2.904,70                                     | 501,64                       | 307,41                             | 61.481,23  |
| TOPLAM                                    | 18.437.040           | 4.382.269,78                                 | 774.118,67                   | 630.994,82                         | 107.285.013,99                                   |

Metan gazının elektrik enerjisine dönüşümü için kullanılan gaz türbinin verimi %35 olarak alındığında Tablo 4' teki veriler elde edilmiştir. Tablo 3' te gösterildiği gibi toplam elektrik enerjisi potansiyeli 375.497,55 MWhe/yıl olarak bulunmuştur. Kurulabilecek olan biyogaz tesislerinin toplam kapasitesi ise 42,87 MW olarak bulunmuştur.

Tablo 4. Ankara İlinin Metan Gazından Elektrik Üretim Potansiyeli

| Hayvan Türü                         | Enerji Değeri (GJ/yıl) | Enerji Değeri (TEP/yıl) | Elektrik Enerjisi (MWhe/yıl) | Kurulu Güç Potansiyeli (MW) |
|-------------------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Kültür ve Melez Süt Sığı (Yetişkin) | 888.351,80             | 21.221,97               | 86.367,54                    | 9,86                        |
| Kültür ve melez Et sığı (Yetişkin)  | 763.448,30             | 18.238,13               | 74.224,14                    | 8,47                        |
| Yerli Sığı                          | 73.327,83              | 1.751,74                | 7.129,09                     | 0,81                        |
| Genç Yavru (Buzığı)                 | 6.716,06               | 160,44                  | 652,95                       | 0,07                        |
| Koyun                               | 965.117,46             | 23.055,84               | 93.830,86                    | 10,71                       |
| Keçi                                | 130.621,11             | 3.120,43                | 12.699,27                    | 1,45                        |
| At-Katır-Eşek                       | 7.552,44               | 180,42                  | 734,27                       | 0,08                        |
| Et Tavuğu                           | 753.878,03             | 18.009,51               | 73.293,70                    | 8,37                        |
| Yumurta Tavuğu                      | 266.303,66             | 6.361,77                | 25.890,63                    | 2,96                        |
| Hindi                               | 2.709,79               | 64,73                   | 263,45                       | 0,03                        |
| Kaz                                 | 2.020,70               | 48,27                   | 196,46                       | 0,02                        |
| Ördek                               | 2.213,32               | 52,87                   | 215,18                       | 0,02                        |
| TOPLAM                              | 3.862.260,50           | 92.266,14               | 375.497,55                   | 42,87                       |

#### 4.2 Gaziantep İli Hayvan Gübrelerinden Elde Edilecek Elektrik Enerjisi Potansiyeli

Gaziantep ili için 2021 yılı için TÜİK 2022 verileri dikkate alındığında 2.130.432 olarak tespit edilmiştir. Nüfusun 1.075.409 kişisi erkek, 1.055.023 kişisi kadındır (TÜİK, 2022). Sanayinin de olduğu Gaziantep ilinde hayvancılık da yapılmaktadır. Tablo 5' teki verilere bakıldığında kümes ve küçükbaş hayvancılığın daha yaygın olduğu görülmektedir. Toplam hayvan sayısı 7.031.749 olarak belirlenmiştir (TÜİK, 2022).

Yapılan hesaplamalar sonrasında Tablo 5' te görüldüğü gibi Gaziantep ilindeki hayvan gübrelerinin toplanabilir miktarı toplamda 1.432.809,72 ton/yıl, katı

madde miktarı 251.623,04 ton/yıl, uçucu katı madde miktarı 203.530,27 ton/yıl ve metan gazı miktarı ise 32.986.363,06 m<sup>3</sup>-CH<sub>4</sub> olarak bulunmuştur.

Tablo 5. Gaziantep İlinin Metan Gazı Potansiyeli

| Hayvan Türü                            | Hayvan Sayısı (Adet) | Toplanabilir Faydalı Gübre Miktarı (ton/yıl) | Katı Madde Miktarı (ton/yıl) | Uçucu Katı Madde Miktarı (ton/yıl) | Metan Miktarı (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> ) |
|--|----------------------|--|------------------------------|------------------------------------|---|
| Kültür ve Melez Süt Sığırtı (Yetişkin) | 96.752               | 622.594,28                                   | 107.522,03                   | 89.630,37                          | 9.680.079,57                                    |
| Kültür ve melez Et sığırtı (Yetişkin)  | 57.482               | 249.463,26                                   | 30.958,39                    | 26.206,28                          | 5.765.381,02                                    |
| Yerli Sığırtı                          | 766                  | 3.324,33                                     | 574,11                       | 478,58                             | 105.287,35                                      |
| Genç Yavru (Buzağı)                    | 45.050               | 16.719,50                                    | 620,29                       | 274,36                             | 60.358,26                                       |
| Koyun                                  | 463.447              | 166.451,62                                   | 38.283,87                    | 32.016,80                          | 6.403.360,70                                    |
| Keçi                                   | 234.871              | 72.054,31                                    | 16.694,98                    | 12.197,36                          | 2.439.471,09                                    |
| At-Katır-Eşek                          | 2.005                | 4.926,65                                     | 966,12                       | 644,11                             | 115.939,63                                      |
| Et Tavuğu                              | 295.000              | 20.253,67                                    | 4.050,73                     | 3.130,33                           | 626.065,17                                      |
| Yumurta Tavuğu                         | 5.803.485            | 272.621,61                                   | 51.116,55                    | 38.337,41                          | 7.667.482,77                                    |
| Hindi                                  | 26.478               | 3.635,77                                     | 703,89                       | 533,76                             | 106.751,32                                      |
| Kaz                                    | 3.041                | 362,63                                       | 62,63                        | 38,38                              | 7.675,37  |
| Ördek                                  | 3.372                | 402,10                                       | 69,44                        | 42,55                              | 8.510,81  |
| TOPLAM                                 | 7.031.749            | 1.432.809,72                                 | 251.623,04                   | 203.530,27                         | 32.986.363,06                                   |

Elde edilebilecek olan metan gazının Tablo 6' da verildiği gibi potansiyel enerjisi 1.187.509,07 GJ/yıl, elektrik enerjisi potansiyeli ise %35'lik verimli bir gaz türbi-



ni kullanılan tesiste 115.452,27 MWhe/yıl olarak bulunmuştur. Biyogaz tesisleri için toplam kapasite 13,18 MW olarak hesaplanmıştır.

Tablo 6. Gaziantep İlinin Metan Gazından Elektrik Üretim Potansiyeli

| Hayvan Türü                               | Enerji Değeri (GJ/yıl) | Enerji Değeri (TEP/yıl) | Elektrik Enerjisi (MWhe/yıl) | Kurulu Güç Potansiyeli (MW) |
|---|------------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Kültür ve Melez Süt Sığırtı (Yetiştirkin) | 348.482,86             | 8.324,96                | 33.880,28                    | 3,87                        |
| Kültür ve Melez Et Sığırtı (Yetiştirkin)  | 207.553,72             | 4.958,28                | 20.178,83                    | 2,30                        |
| Yerli Sığırtı                             | 3.790,34               | 90,55                   | 368,51                       | 0,04                        |
| Genç Yavru (Buzacı)                       | 2172,90                | 51,91                   | 211,25                       | 0,02                        |
| Koyun                                     | 230.520,99             | 5.506,95                | 22.411,76                    | 2,56                        |
| Keçi                                      | 87.820,96              | 2.097,97                | 8.538,15                     | 0,97                        |
| At-Katır-Eşek                             | 4173,83                | 99,71                   | 405,79                       | 0,05                        |
| Et Tavuğu                                 | 22.538,35              | 538,42                  | 2.191,23                     | 0,25                        |
| Yumurta Tavuğu                            | 276.029,38             | 6.594,11                | 26.836,19                    | 3,06                        |
| Hindir                                    | 3.843,05               | 91,81                   | 373,63                       | 0,04                        |
| Kaz                                       | 276,31                 | 6,60                    | 26,86                        | 0,00                        |
| Ördek                                     | 306,39                 | 7,32                    | 29,79                        | 0,00                        |
| TOPLAM                                    | 1.187.509,07           | 28.368,59               | 115.452,27                   | 13,18                       |

#### 4.3 Kars İli Hayvan Gübrelerinden Elde Edilecek Elektrik Enerjisi Potansiyeli

Doğu Anadolu Bölgesi'ndeki Kars ili incelendiğinde TÜİK verilerine göre 2021 yılında nüfus 281.077 olarak gösterilmektedir. Nüfusun 144.396'sı erkeklerden, 136.681'i kadınlardan oluşmaktadır (TÜİK, 2022). Diğer illere göre nüfusun düşük olduğu ilde hayvancılık önemli geçim kaynaklarındandır. Tablo 7' deki verilere bakıldığında kümes hayvanları, küçükbaş ve büyükbaş hayvancılık oransal olarak dağılmıştır. Toplam hayvan sayısı 2.125.962 olarak verilmiştir.

Yapılan hesaplamalar doğrultusunda Tablo 7’de belirtildiği gibi toplanabilir faydalı gübre miktarı 3.047.332,72 ton/yıl, katı madde miktarı 506.601,43 ton/yıl uçucu katı madde miktarı 418.899,40 ton/yıl ve metan gazı miktarı da 56.768.971,15 m<sup>3</sup>-CH<sub>4</sub> olarak bulunmuştur.

Tablo 7. Kars İlinin Metan Gazı Potansiyeli

| Hayvan Türü                           | Hayvan Sayısı (Adet) | Toplanabilir Faydalı Gübre Miktarı (ton/yıl) | Katı Madde Miktarı (ton/yıl) | Uçucu Katı Madde Miktarı (ton/yıl) | Metan Miktarı (m <sup>3</sup> -CH <sub>4</sub> ) |
|---------------------------------------|----------------------|--|------------------------------|------------------------------------|--|
| Kültür ve Melez Süt Sığırı (Yetişkin) | 330.388              | 2.126.030,26                                 | 367.165,43                   | 306.069,10                         | 33.055.462,70                                    |
| Kültür ve melez Et sığır (Yetişkin)   | 116.257              | 504.537,94                                   | 62.613,16                    | 53.002,04                          | 11.660.448,51                                    |
| Yerli Sığır                           | 9.141                | 39.670,57                                    | 6.851,11                     | 5.711,08                           | 1.256.438,26                                     |
| Genç Yavru (Buzağı)                   | 164.937              | 61.213,40                                    | 2.271,02                     | 1.004,47                           | 220.983,59                                       |
| Koyun                                 | 574.530              | 206.348,19                                   | 47.460,08                    | 39.690,87                          | 7.938.173,78                                     |
| Keçi                                  | 30.217               | 9.270,05                                     | 2.147,87                     | 1.569,23                           | 313.846,74                                       |
| At-Katır-Eşek                         | 7.300                | 17.937,41                                    | 3.517,53                     | 2.345,14                           | 422.124,33                                       |
| Et Tavuğu                             | 0                    | 0,00   | 0,00                         | 0,00                               | 0,00   |
| Yumurta Tavuğu                        | 344.911              | 16.202,37                                    | 3.037,94                     | 2.278,46                           | 455.691,56                                       |
| Hindi                                 | 41.095               | 5.642,88                                     | 1.092,46                     | 828,41                             | 165.682,65                                       |
| Kaz                                   | 489.304              | 58.347,30                                    | 10.076,58                    | 6.174,93                           | 1.234.985,49                                     |
| Ördek                                 | 17.882               | 2.132,35                                     | 368,26                       | 225,67                             | 45.133,52  |
| <b>TOPLAM</b>                         | <b>2.125.962</b>     | <b>3.047.332,72</b>                          | <b>506.601,43</b>            | <b>418.899,40</b>                  | <b>56.768.971,15</b>                             |

Hesaplamalar sonucunda çıkan metan gazı potansiyeli biyogaz tesislerinde %35’lik verimli gaz türbinlerinde değerlendirildiğinde üretilecek olan elektrik

enerjisi hesaplanmıştır. Elektrik üretilmeden önceki enerji potansiyeli Tablo 8’ de belirtildiği gibi 2.043.682,96 GJ/yıl bulunmuştur. Gaz türbinlerinden geçirilerek elektrik üretildiğinde 198.691,40 MWhe/yıl’lık elektrik enerjisi potansiyeli hesaplanmıştır. Bu enerji üretimi için biyogaz tesislerinin toplam kapasitesi 22,68 MW olarak bulunmuştur.

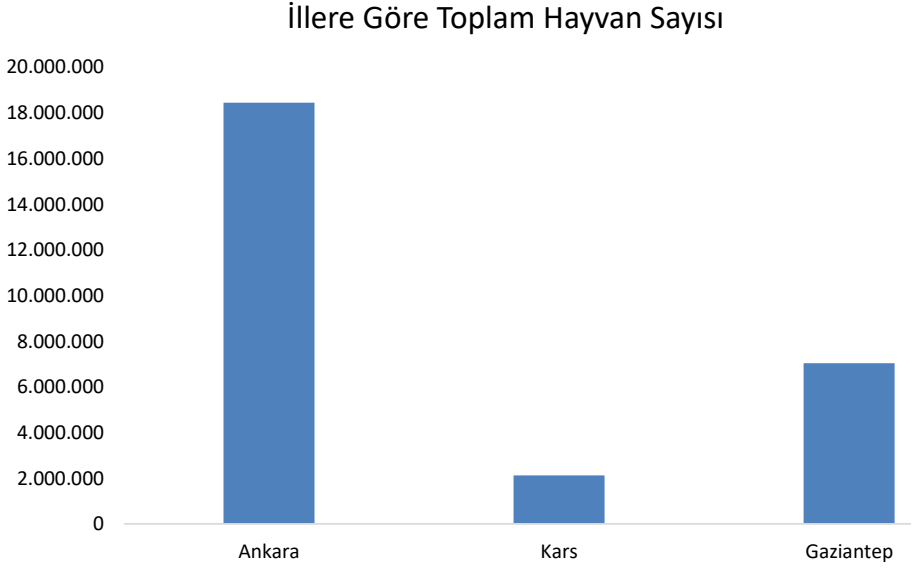
Tablo 8. Kars İlinin Metan Gazından Elektrik Üretim Potansiyeli

| Hayvan Türü                           | Enerji Değeri (GJ/yıl) | Enerji Değeri (TEP/yıl) | Elektrik Enerjisi (MWhe/yıl) | Kurulu Güç Potansiyeli (MW) |
|---------------------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Kültür ve Melez Süt Sığırı (Yetişkin) | 1.189.996,66           | 28.428,01               | 115.694,12                   | 13,21                       |
| Kültür ve Melez Et Sığırı (Yetişkin)  | 419.776,15             | 10.028,10               | 40.811,57                    | 4,66                        |
| Yerli Sığırı                          | 45.231,78              | 1.080,55                | 4.397,53                     | 0,50                        |
| Genç Yavru (Buzağı)                   | 7.955,41               | 190,05                  | 773,44                       | 0,09                        |
| Koyun                                 | 285.774,26             | 6.826,91                | 27.783,61                    | 3,17                        |
| Keçi                                  | 11.298,48              | 269,91                  | 1.098,46                     | 0,13                        |
| At-Katır-Eşek                         | 15.196,48              | 363,03                  | 1.477,44                     | 0,17                        |
| Et Tavuğu                             | 0,00                   | 0,00                    | 0,00                         | 0,00                        |
| Yumurta Tavuğu                        | 16.404,90              | 391,90                  | 1.594,92                     | 0,18                        |
| Hindi                                 | 5.964,58               | 142,49                  | 579,89                       | 0,07                        |
| Kaz                                   | 44.459,48              | 1.062,10                | 4.322,45                     | 0,49                        |
| Ördek                                 | 1.624,81               | 38,82                   | 157,97                       | 0,02                        |
| TOPLAM                                | 2.043.682,96           | 48.821,86               | 198.691,40                   | 22,68                       |

## 5. Sonuç ve Öneriler

Yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi de biyokütle enerjidir. Biyokütle çeşitlerinden olan biyogaz, temelinde metan gazından oluşmaktadır. Metan gazının hayvan gübrelerinden elde edilip elektrik ve sıcak su eldesi için biyogaz tesisleri kurulmaktadır. Bu şekilde sera etkisi oluşturan metan gazı hem bertaraf edil-

miş hem de enerji eldesi sağlanmış olmaktadır. Hayvancılık yapılan bölgelerde gübrelerin toplanması ve enerji elde edilmesiyle o bölgedeki elektrik ve ısınma ihtiyacı karşılanabilir. Analiz yapılan bölgelerde biyogaz tesis kurulumu için öncesinde potansiyel araştırması yapılır. Yüksek potansiyele sahip, ham maddeye olan ulaşılabilirliğin uygunluğu göz önüne alındığında tesis kurulumu için çalışmalar yapılır. Bu çalışma kapsamında incelenen Ankara, Kars ve Gaziantep illeri için toplam hayvan sayısı bilgisi Şekil 2’de gösterilmiştir.



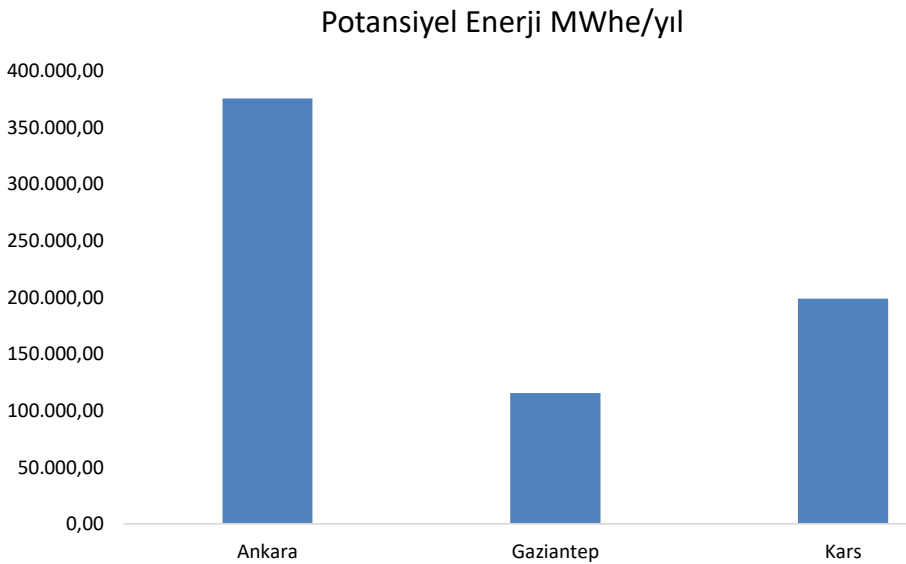
Şekil 2. İllere Göre Toplam Hayvan Sayısı

Farklı lokasyonlardaki iller incelendiğinde sırasıyla biyogazdan elde edilebilecek olan potansiyel elektrik enerjisi Ankara 375.497,55 MWhe/yıl, Gaziantep 115.452,27 MWhe/yıl ve Kars 198.691,40 MWhe/yıl olarak bulunmuştur. Nüfus yoğunluğu ve sanayi kuruluşları fazla olan Ankara’ da potansiyel elektrik enerjisi en fazladır. Hayvan türlerinden en fazla koyun gübresinden elde edilecek biyogaz miktarının olduğu tespit edilmiştir. Ankara’daki 2021 yılı nüfusuna bakıldığında 5.747.325 olduğu görülmüştür. Tedaş verilerine göre 2020 yılında Ankara’daki kişi başı elektrik tüketimi 2.680 kWh’ tir. Yıllık toplam elektrik tüketimi olarak 15.402.831 MWhe’ tir.

Gaziantep iline bakıldığında en çok kültür ve melez sığırının gübresinin potansiyeli olduğu bulunmuştur. 3. Sırada ise kültür ve melez sığırının gübresinin potansiyelinin olmasından dolayı, biyogaz tesisinin kurulum önceliğinin büyükbaş-

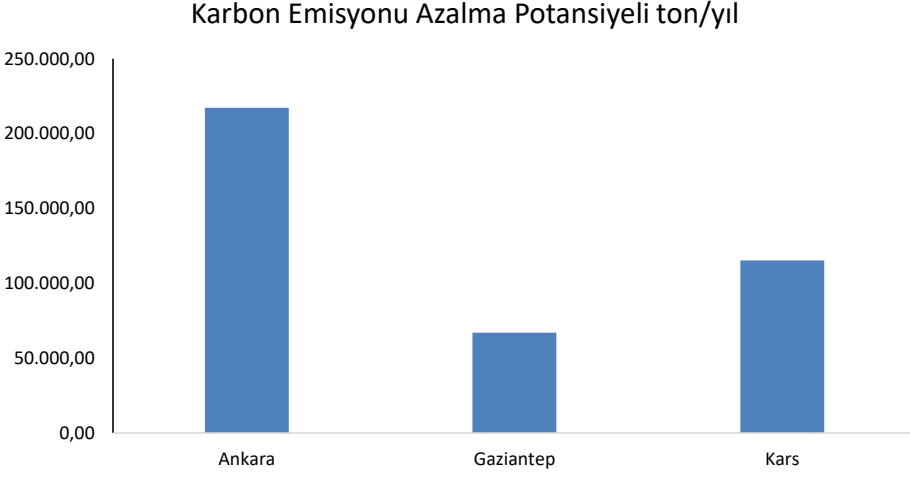
ların olduğu yerlere yakın kurulması daha verimli olacaktır. Gaziantep'teki 2021 yılı nüfusuna bakıldığında 2.130.432 olması ve kişi başı 2020 yılında elektrik tüketimi 4.076 kWh olmasından dolayı yaklaşık olarak yıllık toplam elektrik tüketimi 8.683.640 MWhe olarak bulunmuştur.

En çok büyükbaş hayvanlarının gübrelerinin biyogaz potansiyeli olan Kars ilinde 2021 yılı nüfusu 281.077 olarak görülmektedir. Tedaş'ın 2020 verilerine göre Kars ilinde kişi başı elektrik tüketimi 1.139 kWh' tir. Yaklaşık olarak toplam elektrik enerjisi tüketimi 320.146 MWhe olarak hesaplanmıştır. Şekil 3'te potansiyel enerji ve Şekil 4'te karbon emisyon azalma potansiyelleri gösterilmiştir.



Şekil 3. Ankara, Gaziantep ve Kars İçin Yıllık Potansiyel Enerji Oranı

Sonuç olarak yapılan bu çalışma neticesinde Ankara için kurulacak biyogaz tesisleri ile birlikte buradan elde edilecek elektrik toplam tüketimin %2,5' unu karşılamış olacaktır. Bu yöntem ile üretilen elektrik sayesinde 217.278,57 ton CO<sub>2</sub> salınımının önüne geçileceği öngörülmüştür. Gaziantep İli için Biyogaz tesisleri ile üretilen elektrik enerjisi toplam tüketimin %1,3 ' ünü karşılamaktadır, 115.452,27 MWhe/yıl elektrik enerjisinin biyogaz tesislerinden elde edilmesi ile 66.962,31 ton CO<sub>2</sub> salınımının önüne geçilmiş olacaktır. Kars İli için Biyogaz tesislerinden elde edilecek olan elektrik enerjisi ile toplam tüketimin %62' si karşılayabilmektedir. Yenilenebilir enerji olarak üretilen elektrik enerjisi sayesinde 115.241,01 ton CO<sub>2</sub> salınımının önüne geçileceği hesaplanmıştır.



Şekil 4. Ankara, Gaziantep ve Kars için yıllık Karbon Emisyonu Azalma Miktarı

### Kaynakça

Afotey, B., & Sarpong, G. T. (2023). Estimation of biogas production potential and greenhouse gas emissions reduction for sustainable energy management using intelligent computing technique. *Measurement: Sensors*, 25, 100650. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2022.100650>

Altaca Enerji, <https://altacaenerji.com/biyogaz/uretim>

Aslantaş A. (2018), Dünya’da ve Türkiye’de Biyokütle Enerjisinin Kullanımı ve Potansiyeli, KTO Karatay. <https://dspace.karatay.edu.tr/handle/20.500.12498/455?show=full&locale-attribute=en>

Ayhan A. (2015), Biogas Production Potential from Animal Manure of Bursa Province, *U. Ü. Ziraat Fakültesi Dergisi*, Cilt 29, Sayı 2, 47-53. <https://acikerisim.uludag.edu.tr/server/api/core/bitstreams/e98b6c7c-6d93-4a09-9cc8-7f73b4d78887/content>

Bharathiraja, B., Sudharsana, T., Jayamuthunagai, J., Praveenkumar, R., Chozhavendhan, S., Iyyappan, J., (2018). Biogas Production-A Review on Composition, Fuel Properties, Feed Stock and Principles of Anaerobic Digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 570-582. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.093>

Fernandes, D. J., Ferreira, A. F., & Fernandes, E. C. (2023). Biogas and biomethane production potential via anaerobic digestion of manure: A case study of Portugal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, 188, 113846. [10.1016/j.rser.2023.113846](https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113846)

- Heidenreich, S., Müller, M. & Foscolo P. U. (2016), Advanced Biomass Gasification: New Concepts for Efficiency Increase and Product Flexibility. (*Elsevier Science*, 2016). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804296-0.00006-3>
- International Energy Agency, (2020), Energy Supply of the World at:<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TESbySource>. May 15,2023.
- Karaca, C. (2023). The biogas potential of animal manure and its GHG reduction effect in Konya province, Turkey. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 31(4), 232-239. 10.3846/jeelm.2023.20052
- Karaosmanoğlu, F. (2006), "Biyoyakıt Teknolojisi ve İTÜ Araştırmaları", ENKÜS 2006-İTÜ Enerji Çalıştayı ve Sergisi, Bildiri Kitabı, Sayfa: 110-146, 22-23 Haziran 2006, İstanbul. [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/41/103/41103129.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/41/103/41103129.pdf)
- Koç, E., Kaya, K. (2015). "Enerji Kaynakları-Yenilenebilir Enerji Durumu," *Mühendis ve Makine*, cilt 56, sayı 668, s. 36-47. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1099827>
- Kumaş, K., & Akyüz, A. Ö. (2023). Biogas Potential of Afyonkarahisar, Turkey-based on Animal Manure: Energy Equivalents and its Contribution to Economy and Carbon Emissions. *El-Cezeri*, 10(2), 356-370. <https://doi.org/10.31202/ecjse.1219728>
- Mao C, Feng Y, Wang X, Ren G. (2015), "Review on Research Achievements of Biogas from Anaerobic Digestion". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 540-555. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032>
- Matsumura, Y., Minowa, T. and Yamamoto, H. (2005), "Amount, availability, and potential use of rice straw (agricultural residue) biomass as an energy resource in Japan", *Biomass and Bioenergy* 29, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.06.015>
- Nehra, M., & Jain, S. (2023). Estimation of renewable biogas energy potential from livestock manure: a case study of india. *Bioresource Technology Reports*, 22, 101432. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101432>
- Nilüfer Nacar Koçer, Cengiz Öner, İlker Sugözü (2006). Türkiye'de Hayvancılık Potansiyeli ve Biyogaz Üretimi, *Doğu Anadolu Bölge Araştırmaları*. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/fudad/issue/47077/592012>
- Noorollahi, Y., Kheirrouz, M., Asl, H.F., Yousefi, H., Hajinezhad, A. (2015), Biogas Production Potential from Livestock Manure in Iran. *Renewable and*

*Sustainable Energy Reviews*, 50, 748-754. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.190>

Özpinar S.(2018), An Assessment of Biogas Production Potential from Animal Manures in Çanakkale, *ÇOMU Zir. Fak. Derg. (COMUJ. Agric. Fac. )*, 2018.115-122. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/606578>

Singh, D., Tembhare, M., Machhirake, N., & Kumar, S. (2023). Biogas generation potential of discarded food waste residue from ultra-processing activities at food manufacturing and packaging industry. *Energy*, 263, 126138. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126138>

Taleghani, G., & Kia, A. S. (2005). Technical–economical analysis of the Sa-veh biogas power plant. *Renewable energy*, 30(3), 441-446.<https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.06.004>

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü (2010), Biyogaz kullanım kılavuzu. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/editordosya/biyogaz%20kilavuzu%20pdf.pdf>

TÜİK (2022), Population of Animals:<https://data.tuik.gov.tr/Search/Search?text=hayvan%20say%C4%B1s%C4%B1>

TÜİK (2022), Population:<https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=Nufus-ve-Demografi-109>

Weiland, P. (2010). Biogas Production: Current State and Perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(4), 849-86. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>

Yağlı H., Koç Y. (2019), *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture*, 34(3), pp. 35-48, September 2019, Hatay, [https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/yayin\\_dosyalar/704\\_agustos\\_eylul\\_tamami.pdf](https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/yayin_dosyalar/704_agustos_eylul_tamami.pdf)

Yılmaz O. (2021), Biyokütle Ve Enerji Üretim Yöntemleri, Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sinop Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programı, Konya.





## THE IMPACT OF COVID-19 ON THE TECHNOLOGY SECTOR: THE CASE OF THE TURKISH CONSULTANCY COMPANY

Eda GÖZÜTOK<sup>1</sup>, İlayda ÜLKÜ<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Industrial Engineering Department, Istanbul Kultur University, Istanbul, Turkey  
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-9389-0564>

<sup>2</sup> Industrial Engineering Department, Istanbul Kultur University, Istanbul, Turkey  
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-0464-7007>

### Keywords

COVID-19, machine learning, regression models, KNIME, forecasting

### Abstract

The COVID-19 pandemic has caused unprecedented changes in the global economy and society, with many studies attempting to understand the impact of the virus on different countries and industries. This study focuses on the effects of COVID-19 on a consulting company that specializes in technology services. By analyzing the company's sales data for the five-year period before the pandemic, and using machine learning techniques via the KNIME platform, the study aims to predict the sales data for the COVID-19 period. Three different regression models - linear, gradient boosting, and random forest - were used to make these predictions, and the models were compared based on their coefficient of determination ( $R^2$ ) to determine which model performed best. The chosen model was then used to interpret the impact of COVID-19 on the company. The findings of the study provide insights into how COVID-19 has affected the consulting company. The chosen model showed that the pandemic had a significant negative impact on the company's sales, with a sharp decline in the second quarter of 2020. However, the company was able to recover some of its losses by the fourth quarter of the year. The study also highlights the importance of using machine learning techniques to predict future sales data during unpredictable events such as the COVID-19 pandemic. Overall, this study sheds light on the impact of COVID-19 on a technology consulting company and demonstrates the importance of using data analysis and machine learning techniques to make predictions and interpret the effects of significant events on business operations.

\* [i.karabulut@iku.edu.tr](mailto:i.karabulut@iku.edu.tr)  
doi : 10.46399/muhendismakina.1362765

## COVID-19'UN TEKNOLOJİ SEKTÖRÜNE ETKİSİ: BİR DANIŞMANLIK ŞİRKETİ ÖRNEĞİ

### Anahtar Kelimeler

### Öz

COVID-19, makine öğrenimi, regresyon modelleri, KNIME, tahmin

COVID-19 salgını, dünya genelinde benzeri görülmemiş bir etki yaratmıştır; hem ekonomik hem de sosyal açıdan büyük değişimlere neden olmuştur. Bu salgının farklı ülkeler ve endüstriler üzerindeki etkisini anlamak için birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışma ise, teknoloji hizmetleri alanında uzmanlaşmış bir danışmanlık firmasının COVID-19'un etkilerini analiz etmektedir. Çalışma kapsamında, şirketin pandemi öncesine ait beş yıllık satış verileri incelenmiş ve bu veriler üzerinden KNIME platformu aracılığıyla makine öğrenimi teknikleri kullanılarak COVID-19 dönemine ilişkin satış verilerinin tahmini amaçlanmıştır. Bu tahminler için üç farklı regresyon modeli (doğrusal, gradyan artırma ve random forest) kullanılmış ve bu modellerin performansı, belirleme katsayılarına ( $R^2$ ) göre karşılaştırılmıştır. Seçilen model daha sonra, COVID-19'un şirket üzerindeki etkilerini yorumlamak için kullanılmıştır. Araştırmanın bulguları, COVID-19'un danışmanlık şirketini nasıl etkilediğine dair derinlemesine içgörü sağlamaktadır. Seçilen model, salgının şirketin satışları üzerinde önemli bir olumsuz etki yarattığını ve özellikle 2020 yılının ikinci çeyreğinde sert bir düşüş yaşandığını göstermiştir. Ancak, şirket yılın dördüncü çeyreğine doğru kayıplarının bir kısmını telafi etmeyi başarmıştır. Çalışma ayrıca, COVID-19 salgını gibi öngörülemeyen olaylar sırasında gelecekteki satış verilerini tahmin etmek için makine öğrenimi tekniklerinin önemini vurgulamaktadır. Genel olarak, bu çalışma, bir teknoloji danışmanlık şirketi üzerinde COVID-19'un etkilerine dair önemli bilgiler sunmakta ve iş operasyonları üzerindeki etkileri tahmin etmek ve yorumlamak için veri analizi ve makine öğrenimi tekniklerinin değerini ortaya koymaktadır.

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 19.09.2023

Submission Date : 19.09.2023

Kabul Tarihi : 29.04.2024

Accepted Date : 29.04.2024

## 1. Introduction

The coronavirus pandemic, also known as the COVID-19 pandemic was first shown up in Wuhan, Hubei Province on 31st December 2019. COVID-19 was confirmed as a pandemic on 2020, March 11 by World Health Organization. Before the declaration as a pandemic, it spread to 18 countries from China (WHO 2022). The first case of Turkey's COVID-19 was discovered on March 11, 2020. More than 5 million people were infected after the first incidence, and nearly 100,000 people died until the beginning of May (Anon n.d.).

According to World Health Organization (WHO), more than 520 million people were affected by COVID-19 and also more than 6 million people passed away until May 2022 (WHO, 2022).

The COVID-19 pandemic affects the world socially, physiologically, and also economically. Several papers, studies, and articles were published to explain those effects with different analyses from different angles. Out of 193 countries' economics, 167 economies saw a negative rate in 2020. Almost 79 percent of the world economy accounted for by these 167 economies. China was the worst affected country in the first quarter of 2020 with an economic decrease of 9,7 percent. Iceland and France followed China on the list. India, United Kingdom, and Spain were the most damaged countries during the second quarter of 2020 and the world economy shrunk 32,9 percentages. In the third quarter of 2020, 33,1 percent growth came amid a resurgence in consumer activity. In the last quarter of 2020, the economy maintained growing by 4 percent even with a slight rate compared to the third quarter. Total growth in 2020 was 3,6 percent and only two countries which are China and Turkey saw a positive economic rate at end of the 2020 (Organisation for Economic Co-operation and Development, 2021).

COVID-19 appeared suddenly and changed the expectations of companies. Forecasting is substantial to plan production, efficiently allocate resources and workforces, marketing strategies for companies. Machine learning (ML) is the study of computer algorithms that can learn and develop on their own through experience and data (Mitchell, 1997). Forecasting is one of the applications of machine learning.

This research concentrated to analyze the impacts of COVID-19 in the case of a Turkish consultancy company in technology sector with machine learning. With seven years of sales data collected made forecasting using different regression model from the Konstanz Information Miner (KNIME) platform. The regression models are gradient boosting regression (GBR), linear regression (LR) and random forest regression (RFR).

Section 1 contains general information about COVID-19 and its economic impacts. The remaining parts of this study are as follows. Section 2 discusses the review of previous studies published which provides a summary of similar studies about the economic impacts of COVID-19 in different sectors around the world. Machine learning, forecasting methodologies, and the KNIME tool which is used for modeling information are given in Section 3. Section 4 explains preparing sales data, and forecasting methods step-by-step. Numerical results and comments are given in Section 5. Finally, Section 6 highlighted and presented results and findings in this case.

## 2. Literature Review

After COVID-19 appeared, more than 50.000 papers were published on the Science Direct website. Pandemic affected various sectors like tourism, accommodation, education, aviation, production, automotive, and food. More than one-fifth of papers are related to the economic effect of COVID-19 from different angles (ScienceDirect, n.d.). According to Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), countries' economies affected adversely in the beginning of the pandemic. Recovery started however lower-income economies still needs time (Organisation for Economic Co-operation and Development, 2021). Table 1 summarizes the main studies to understand the effect of COVID-19 worldwide except in the technology sector.

Table 1. Significant Studies about COVID-19 on Sectoral Basis

| Author(s)                              | Country     | Sector                    | Impact   |
|--|-------------|---------------------------|--|
| Blazy et al., 2021                     | Caribbean   | Agriculture               | COVID-19 affected strongly the agricultural system such as a decrease in revenue, production decreasing.         |
| Vall Castelló & Lopez Casasnovas, 2021 | Spain       | Supermarket               | There was stockpiling especially in the first week of lockdown, with fear of pandemic was decreased sales rates. |
| Wen et al., 2021                       | China       | Electric Vehicle Industry | There was a negative effect on sales in the short term.  |
| Wieczorek-Kosmala, 2021                | 4 countries | Hospitality               | There were financial slack holdings during COVID-19.   |

|                            |                        |  |  |
|----------------------------|------------------------|--|--|
| Hayakawa & Mukunoki, 2021  | 34 Different Countries | International Trade                                  | There were negative effects on leather, footwear products, and transport kits especially in the fourth and fifth months of 2020 whereas there were effects positively in industries manufacturing medical products.  |
| Maneenop & Kotcharin, 2020 | 9 Different Countries  | Airline  | Australia, Canada, the United Kingdom, and United State showed the worst reaction to proclamation of COVID-19 as a global pandemic.<br>COVID-19 damaged the productivity of energy companies, and companies could not effort their fixed costs and expenses, as a result, an important damaging effect was found on the development of energy companies. |
| Fu & Shen, 2020            | China                  | Energy Industry                                      | COVID-19 damaged the productivity of energy companies, and companies could not effort their fixed costs and expenses, as a result, an important damaging effect was found on the development of energy companies.  |
| Menhat et al., 2021        | Malaysia               | Marine (Shipping, fisheries, marine tourism, energy) | Marine tourism was the most affected sector in Malaysia because the government considered as a non-essential sector. Shipping was affected lightly compared to other sectors.  |
| He et al., 2020            | China                  | Various sectors                                      | Electric energy, heating, mining, and environmental industry have been impacted negatively during the COVID-19. Even so, some industries showed strong immunity for instance production, information technology, and healthcare in China.  |

|                   |       |           |   |
|-------------------|-------|-----------|---|
| Wang et al., 2020 | China | Insurance | There were negative effects on property and personal insurance, and personal insurance was damaged more than that property insurance from the angle of insurance density and depth. |
|-------------------|-------|-----------|---|

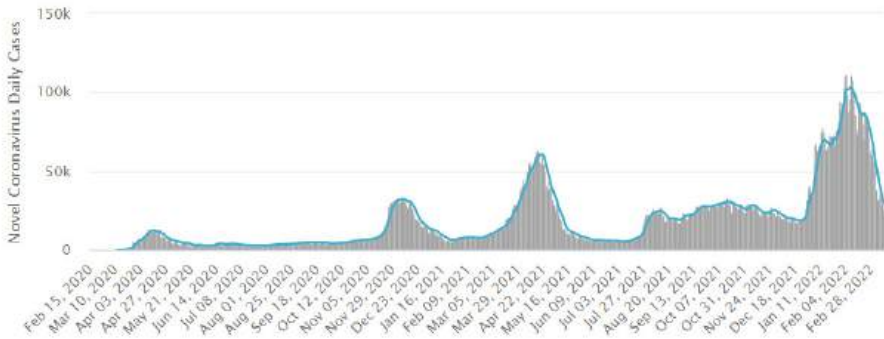


Figure 1. Daily Cases of Turkey

This study will be a research that will focus on analyzing the impacts of COVID-19 on the technology sector in a Turkish company. The first case of COVID-19 appeared on 11<sup>th</sup> March 2020 in Turkey. After the first case, more than 5 million people were infected and almost 100.000 people died until the beginning of the May (Anon n.d.). Figure 1 shows daily cases of Turkey (Worldometers n.d.).

Note. Daily COVID-19 cases in Turkey. From Worldometers, COVID Live - Coronavirus Statistics – by Worldometers, n.d. (Worldometers n.d.).

- Turkey Government took various precautions during this time. Important dates are;
- 1<sup>st</sup> February 2020- All the flights from China were stopped.
- 29<sup>th</sup> February 2020- All flights to South Korea, Italy, and Iraqi were stopped (The Economist, 2020).
- 11<sup>th</sup> March 2020- First COVID-19 case was announced.
- 12<sup>th</sup> March 2020- Schools was closed from 16<sup>th</sup> March (Kandemir, 2020).
- 16<sup>th</sup> March 2020- Indoor activities such as businesses and places of worship were halted (Cantekin, 2020).

- 21<sup>st</sup> March 2020- A total curfew was announced for people who are elder 65 and who have immune system diseases such as asthmatics, cardiovascular problem, high blood pressure (Kandemir, 2020).
- 10<sup>th</sup> April 2020- A curfew was announced to everyone during weekends (Ghosh, 2020).
- 4<sup>th</sup> May 2020- Return to normal life rules explained (Anon n.d.).
- 1<sup>st</sup> June 2020- Public spaces were opened and domestic flights were resumed (The Economist, 2020).
- 26<sup>th</sup> November 2020- A new curfew was announced for people elder than 65 and younger than 20. Also, indoor activities such as businesses and places of worship were halted again (Overseas Security Advisory Council, 2020).
- 14<sup>th</sup> April 2021- A two-week partial closure was declared (Anon n.d.).
- 26<sup>th</sup> April 2021- New full lockdown announced from 29<sup>th</sup> April to 17<sup>th</sup> May (The UN Refugee Agency, 2021).
- 17<sup>th</sup> May 2021- Partial closure was declared until 1<sup>st</sup> July (Anon n.d.).
- 1<sup>st</sup> July 2021- The curfew was completely lifted (Anon n.d.).

In compliance with data from the Presidency of Strategy and Budget, in the second quarter of 2020, most sectors were affected negatively by COVID-19 such as industry, construction, services, export, and import. The most affected sector in Turkey became exporting with a 15,4 percent decrease(T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı n.d.) Exporting became a general problem in the world because of restrictions on air flights and curfews. During the pandemic, electronic microchip demand was increasing around the world. In Turkey, the automotive sector was affected negatively as a consequence of an interruption in production in the second quarter (Sabah, 2020).

The consultancy sector was affected adversely by COVID-19 in the first quarter of 2020. The consultancy sector continues to grow over the last 12 years. In 2019, the value of the sector reached \$160 billion. Source Global Research gathered the opinions of hundreds of consulting organizations from around the world and concluded that the consultant sector could lose \$30 billion in value by 2020. The United States has a major percentage in the consultancy sector and according to the study, 1 percent decrease is expected. Study shows Europe will be the worst affected by COVID-19 (Consultancy n.d.). While business services, healthcare, energy and resources, manufacturing, and the public sector were in the higher risk group, financial services, pharma, retail and, technology and telecoms were in the lower-risk group (Consultancy n.d.).

Information technology (IT) consulting, often known as technology consulting, refers to services that assist clients in determining how to best employ information technology and digital to meet their business objectives. Remote working and curfews affected the demand for information and communication technologies (ICT) demands in a positive way (Taser, Aydin, Torgaloz and Rofcanin 2022). People need to do various things online such as shopping, working, studying and ICT makes them possible. That's why companies investing in digitalization for adopting this period.

A survey about people's grocery shopping choices shows there is a significant passing to online shopping during COVID-19. And it explains people who experienced online shopping are more likely to keep (Shen, Namdarpour, and Lin, 2022). Besides online shopping, the study by Mouratidis and Papagiannakis shows online learning, telework, telehealth, and teleconferencing also increased when compared to before COVID-19. While teleconferencing and e-learning increased by 34 percent, telework has a 31 percent increase (Mouratidis and Papagiannakis, 2021).

Microsoft Teams is a platform that combines teleconference, chat, and notes. Since it was released in November 2016, there was no significant growth like during the pandemic. From March 2020 to April 2020, the number of users increased by 4,5 times. According to a survey of Microsoft Teams users in the United States, 29.71 percent of businesses used Microsoft Teams for remote work during the COVID-19 pandemic in 2020 (Statista, 2022).

During a pandemic, ICT generates solutions to understand the spread of COVID-19. For instance, the Australian Government released an application called CovidSafe to monitor and keep down the spreading of COVID-19 and invest \$5 million for consulting, development, and maintenance (Consultancy n.d.). Also, Turkey Government launched a similar application named "Hayat Eve Sığar" to minimize spreading. The application generates a unique code and people use this code when they went to indoors such as in shopping malls, theaters, cafés and restaurants, and schools.

The National Institute of Standards and Technology (NIST) defines cloud computing as a model that provides ubiquitous, on-demand network access to a common pool of configurable computing resources (e.g., servers, networks, applications, storage, and services) that can be provisioned and released quickly with minimal management effort or service provider interaction (Mell and Grance, 2017). According to a study, cloud computing is helping countries in the fight against COVID 19, economically and commercially in the education and health sectors (Alhomdy, Thabit, Abdulrazzak, Haldorai and Jagtap, 2021).



According to a survey of 263 senior UK banking executives, shows two-thirds are planning operational costs and want to invest in technology and automation. After COVID-19 they realized their potential agility and the necessity of digitalization (Appian, 2020).

Ntasis, Koronios, and Pappas (2021) investigate the impact of COVID-19 on the technology sector for TATA Consultancy Services (TCS). TATA Consultancy Services is a multinational information technology services and consulting company in India. They have 285 offices across 46 countries. They used the business and stock value performance of TCS for their study. According to a study, economic policy uncertainty has a negative effect on the stock price of TCS (Ntasis, Koronios, and Pappas, 2021).

Forecasting future demand is quite important to manage production, plan resources, avoid overstocking, and supply process. There are a number of methodologies that can be used at this point, and most of these methodologies are based on past demand or sales (Rohaani, Topan, and Groothuis-Oudshoorn, 2022). As examples in the energy sector, Ağbulut (2022), Ayvaz et al. (2017), and, Sun and Liu (2016) used ML to forecast energy demand and CO<sub>2</sub> emission in different models. In the health sector, Yang et al. (2022) studied the prediction of lung cancer recurrence and survivability, and Chowdhury et al. (2022) studied the diagnosis of COVID-19 from coughs sounds, Sabeti, and friends (2022) searched for detection of craniosynostosis in newborns with machine learnings. Madhurya et al. (2022), and Şahin et al. (2013) examined the detection of credit card fraud with different machine learnings techniques (Ağbulut, 2022; Ayvaz, Kusakci, and Temur, 2017; Chowdhury, Kabir, Rahman and Islam, 2022; Madhurya, Gururaj, Soundarya, Vidyashree and Rajendra, 2022; Sabeti, Boostani, Moradi and Shakkor, 2022; Sahin, Bulkan, and Duman, 2013; Sun and Liu, 2016; Yang, Xu, Sun, Zhang and Farid, 2022). While Ensafi et al. (2022), used time series forecasting techniques to predict item sales of a retail store, Chen and Ou (2011) used extreme learning machines to forecast sales in the retail industry (Chen and Ou, 2011; Ensafi, Amin, Zhang, Shah, 2022).

### **3. Methodology**

This section explains general information about machine learning and implementation areas, three regression models that we used for prediction, and explains which data were collected and preprocessing of collected data. The study adhered to research and publication ethics standards.

#### **3.1 Machine Learning**

Machine learning (ML) is the study of computer algorithms that can learn and de-

velop on their own through experience and data (Mitchell 1997). It is becoming one of the hottest topics for research. Researchers are used ML in various areas such as health, energy, biology, social science, banking, etc. ML helps to detect some diseases earlier, predict energy consumption, forecast sales in various sectors, identification of fraud or spam e-mail, and recommend products or videos.

There are various platforms to implement machine learning. In this study, Konstanz Information Miner (KNIME) was used for implementation. KNIME is an open-source and free platform based on Java that used data analysis, integration, and reporting. Figure 2 is a summary of input and outputs values used in three regression models. Different models were implemented to sales data and compared with each other. The best prediction was used to explain COVID-19 effects on sales.

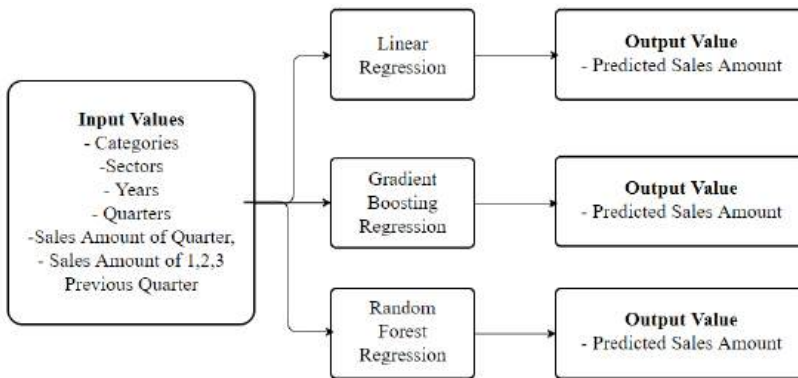


Figure 2. Diagram of Input and Output Value

### 3.2 Data Preparation

In this study, sales data of a technology company was collected between 2015 and 2022 years. At the first, sales data have 3.072 rows that include 8 service categories and 12 sectors. The 3 most known services categories were selected according to sales amount from the 8 services. Since 5 sectors have minor sales amount like 4 percent as total, they were grouped in others. Sales amount was calculated quarterly every year and 1,2, and 3 previous quarter amount was added as new columns to understand sales trends. Every row that has "0" as sales amount was deleted to make more successful forecasting. After preprocessing, sales data have 531 rows. Finally, historical information of COVID-19 was taken from the Republic of Turkey Ministry of Health website (Anon n.d.).

Sales amount normalized with min-max normalization. This method increases consistency of models. The purpose of min-max normalization method is to normalize the smallest value to 0 and the largest value to 1, and spread all other data to this 0-1 range. Its formula is as below. This approach serves to obscure the company's data while also standardizing all parameters onto a consistent positive scale.

$$X' = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \tag{1}$$

X = The value that will normalized

X<sub>min</sub> = The smallest value of variable

X<sub>max</sub> = The biggest value of variable

After normalization, descriptive analysis implemented to sales amount. Normal distribution was controlled and sales amount variables was found non-parametric. Figure 3 shows the distribution of values. The outliers that were seen in figure was checked in sales data. They did not remove from data because any mistake was not found.

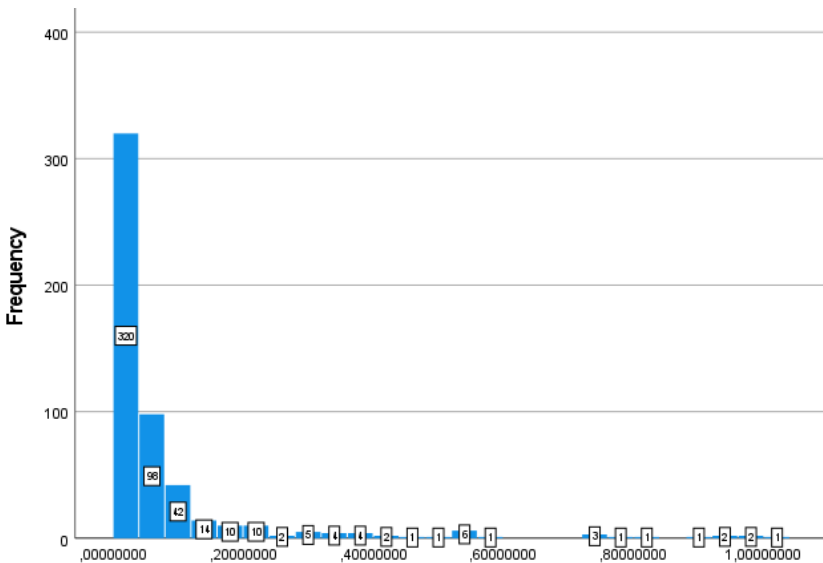


Figure 3. Frequency of Sales Amount

Kruskal Wallis test implemented for category and sector. This method used to test whether the mean of two or more samples shows a significant difference from each other. Table 2 shows the results of test. Significance level is lower 0,001, which means category and sector has significance on sales amount.

Table 2. Results of Kruskal Wallis test for Category and Sector

| Variables | Test                | Significance |
|-----------|---------------------|--------------|
| Category  | Kruskal-Wallis Test | <0,001       |
| Sector    | Kruskal-Wallis Test | <0,001       |

Figure 4 shows the sales amount of three service categories every quarter. 3rd service category has a major sales percentage every quarter. The revenue line has a significant peak in every last quarter of a year until the 2021 year.



Figure 4. Categorical Sales Amount Quarterly

### 3.3 Machine Learning Models

A study by Chicco and friends shows that R2 has more advantages over other statistical rates such as MAE, MSE, RMSE, and MAPE in different analyses. According to the study, only MAPE or MSE, or RMSE is not enough to explain a regression performance quality (Chicco, Warrens, and Jurman, 2021).

#### 3.1.1 Linear Regression

Linear regression is a classical statistical algorithm and a machine learning algorithm. The first type of regression analysis was developed by Adrien Marie Legendre in 1806 (Legendre 1806). The relationship between variables is modeled using linear predictor functions. Simple linear regression is used when there is

just one variable. Multiple linear regression is used when there is more than one variable (Rencher and Christensen, 2012). In linear regression, the main goal is finding the best equation which is nearest to the values.

### 3.3.2 Gradient Boosting Trees Regression

The gradient boosting technique used in classification and regression was suggested by Breiman et al. in 1984 (Breiman, Friedman, Olshen and Stone, 1984). The gradient-boosting algorithm improved weak learners to strong learners (Nie, Roccotelli, Fanti, Ming and Li, 2021). The main goal is to minimize the sum of squared errors. Figure 6 shows the relationship between iterations and error. With every iteration, the error is decreasing and the model becomes more successful.

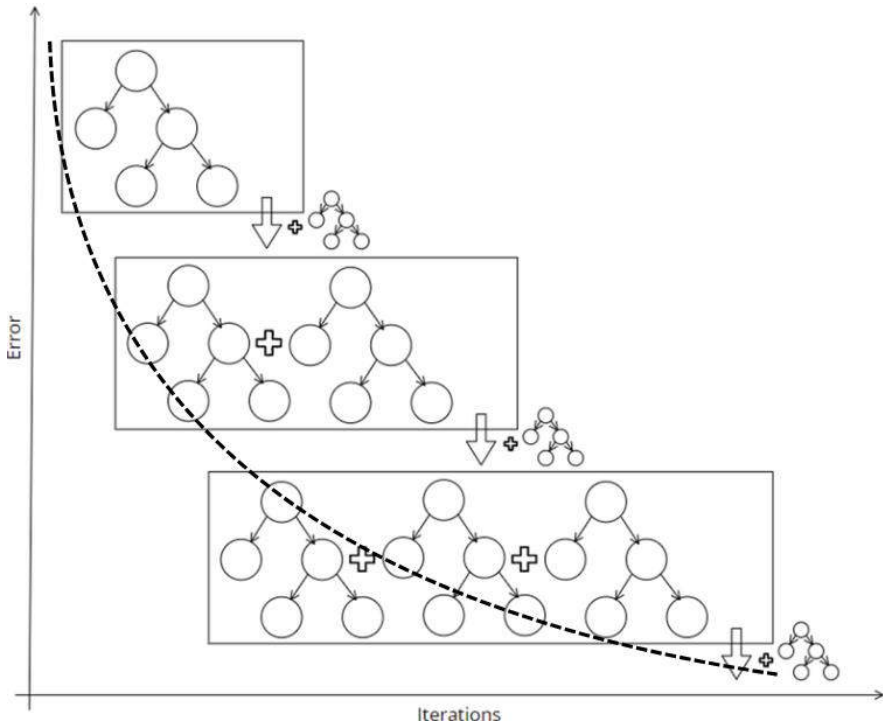


Figure 5. Schematic Representation of Gradient Boosting Regression

### 3.3.3 Random Forest Regression

Like gradient boosting, the random forest technique is used for classification and

regression. Tin Kam Ho created the first algorithm in 1995 (Ho, 1995). The random forest algorithm generates reasonable forecasting with little configuration. In the regression model, the average forecasting of each tree are returned and overfitting of the training set is prevented (Ho, 1998; Minasny, 2009). Figure 7 shows the diagram of random forest regression. This method is very popular to analyze large data sets (Borup, Christensen, Milbach and Nielsen, 2022).

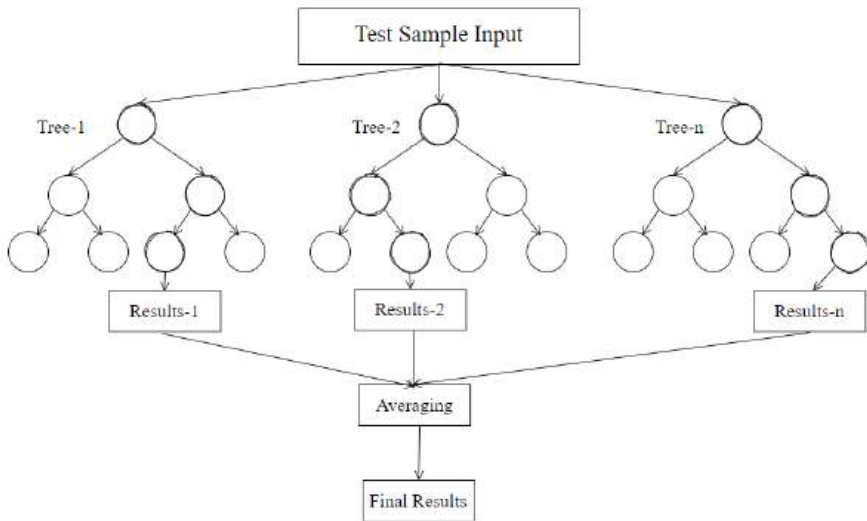


Figure 6. Diagram of Random Forest Regression

#### 4. Implementation

The monthly total sales figures have been calculated on a quarterly basis starting from the first month of the year. The amounts of the 1, 2, and 3 previous quarters were added as new columns to understand sales trends. Three service categories, 7 sectors, years and quarterly knowledge, quarterly revenue amounts, and sales amount of 1, 2, and 3 previous quarters are used as inputs for machine learning. After splitting the sales data into training and test data, three regression models were implemented and the sales figures for the next year were predicted with different year combinations. Models are compared to each other according to the  $R^2$  values.

Three regression models were constructed using KNIME. The inclusion of parameters in the regression model was determined based on their p-values. Parameters with a p-value less than 0.05 were included in the model. Figure 7 shows the construction of the models. Excel reader module is used to import collected sales data. KNIME understands data type automatically but also allows to change ma-

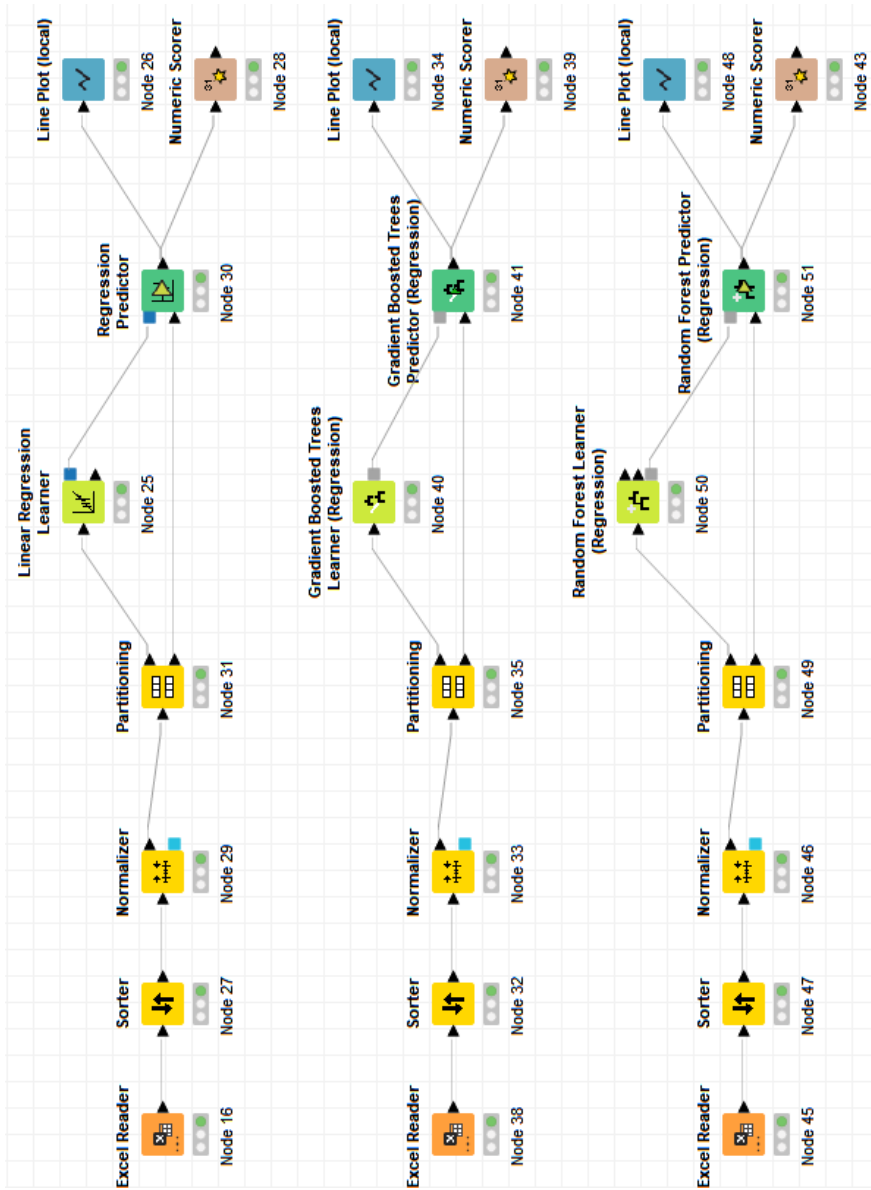


Figure 7. Regression models on KNIME

nually. The imported data were sorted by year and quarter. With the normalizer module, data consistency increased for sales amount. The partitioning module helps to split data as train and test. Partitioning rate change according to the years which belongs to the train or test. Three regression model is added with two modules that are learner and predictor. The learner module teaches machine learning which data are input and which are predicted. The predictor module is configured to predict sales amounts. The numeric scorer calculates the success of models and the line plot shows custom graphics.

## 5. Numerical Results

In this section, three various forecastings were calculated with KNIME. One of them belongs to pre COVID-19 era and the others prediction of the COVID-19 era.

### 5.1 Forecast for 2019 with Data Between 2015 and 2018

From 2015 to 2018 years belong to the pre-COVID-19 era. Data from 2015-2018 were used as training data and data from 2019 were used as test data. The sales data has 270 rows for training and 82 rows are predicted with three models. Figure 9 shows the predicted sales amount with linear regression and the actual sales amount for all sectors in 2019. Even if the quality of prediction looks good, it changed from sector to sector.

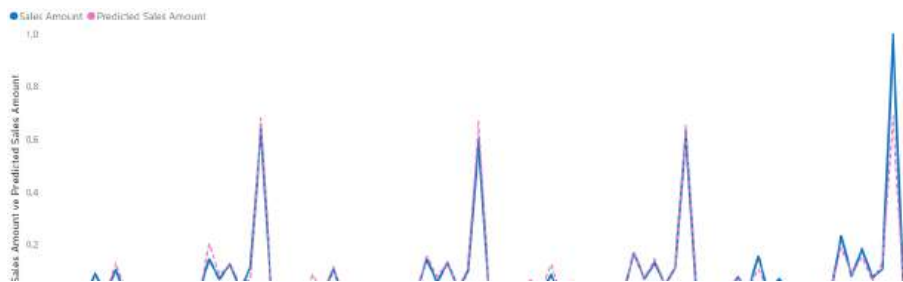


Figure 8. Actual and Predicted Sales Amount of 2019 Year with LR for All Sectors

Figure 9 and 10 details the actual and projected sales amounts for the technology and holding sector. There is a noticeable deviation at the end of the year. There may be delays in the collection of revenues.



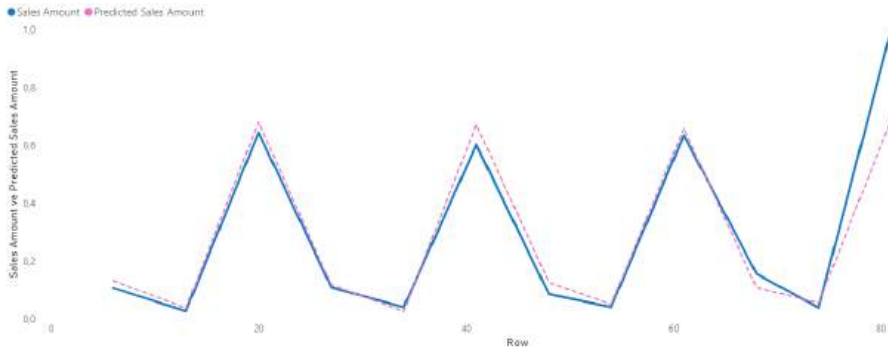


Figure 9. Actual and Predicted Sales Amount of 2019 Year with LR for Technology Sector

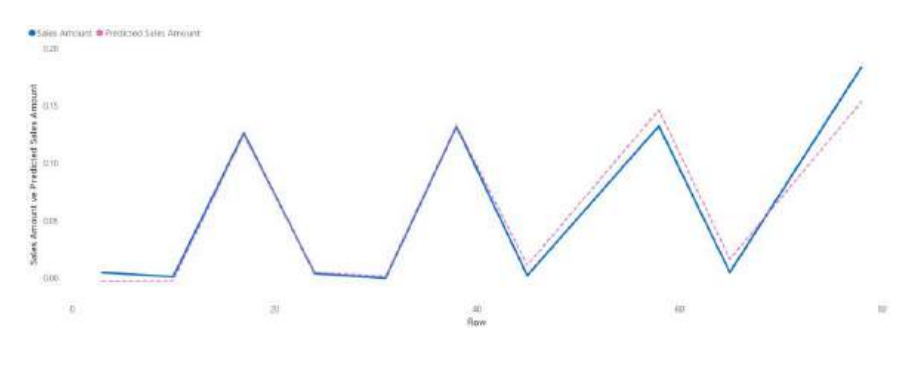


Figure 10. Actual and Predicted Sales Amount of 2019 Year with LR for Holding

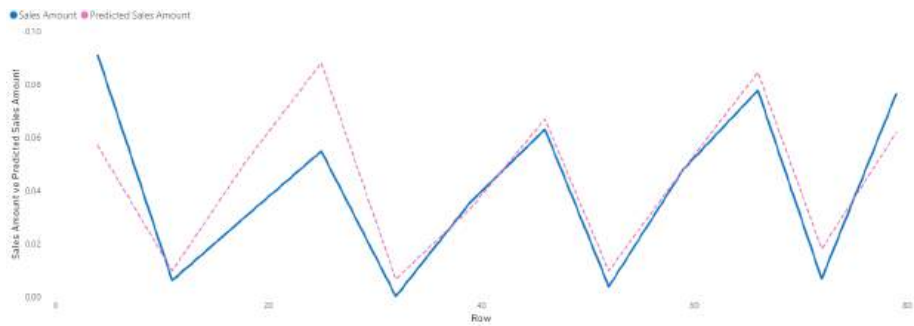


Figure 11. Actual and Predicted Sales Amount of 2019 Year with LR for Automotive Sector

The finance sector had a difference between actual and predicted sales amount almost all year is shown in Figure 12. While predicted sales amount was more than actual in the first quarter, there was not a difference in the second quarter. This means the collection revenue is not associated with this difference.

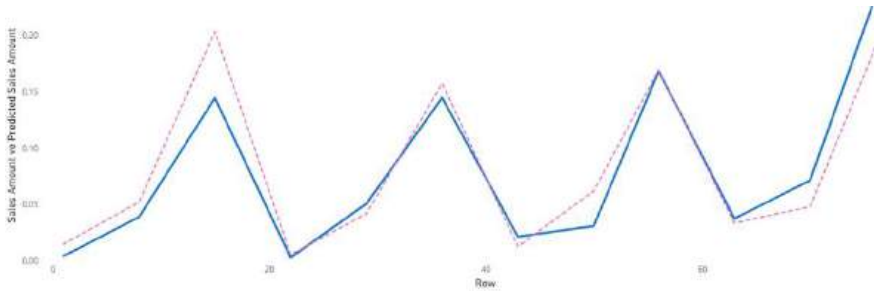


Figure 12. Actual and Predicted Sales Amount of 2019 Year with LR for Finance Sector

Figure 13 explains the values of the retail sector. There is a significant difference in the first quarter of the year like the finance sector. However, in this case, this difference is a positive way.

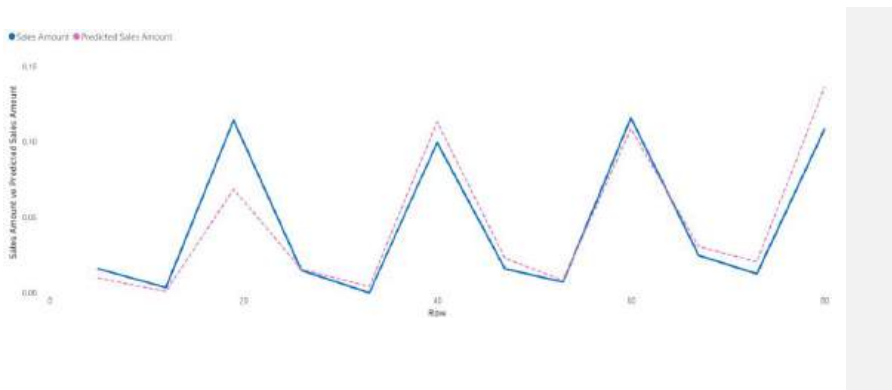


Figure 13. Actual and Predicted Sales Amount of 2019 Year with LR for Retail Sector

Service and others were shown in Figures 14 and 15. Both of them had significant deviations all year. It is hard to explain this difference with a collection of revenue. Because of the irregularity of sales amount, different models can be improved for those sectors.

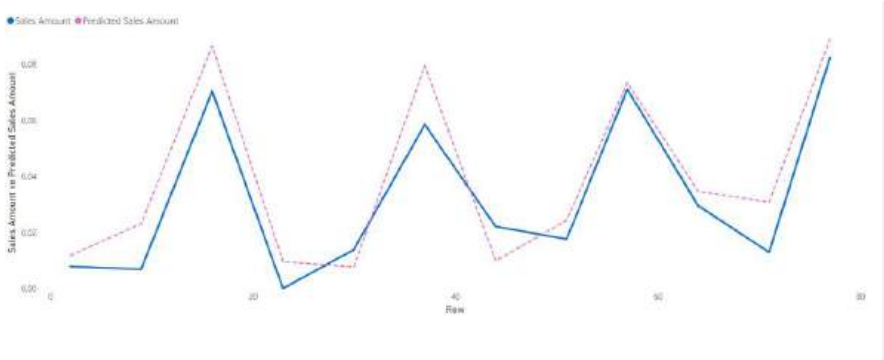


Figure 14. Actual and Predicted Sales Amount of 2019 Year with LR for Service Sector

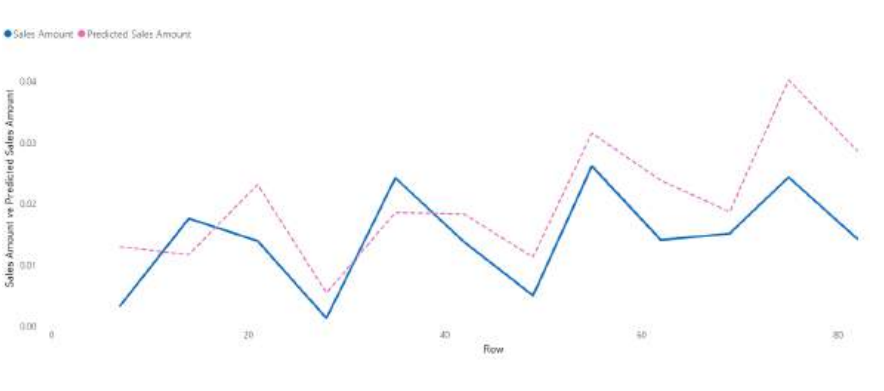


Figure 15. Actual and Predicted Sales Amount of 2019 Year with LR for Others

Table 4 is a summary of the results of three regression models. Results shows, that while linear regression has the biggest  $R^2$  value which means has better goodness of fit, random forest regression is the most ineffective regression model.

Table 4. Result of Three Regression Models for 2019 Forecasting

| Regression Model | Train Data | Test Data | $R^2$ | MAE   | MSE   | RMSE   | MSD   | MAPE  |
|------------------|------------|-----------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
| LR               |            | 2020      | 0,896 | 0,028 | 0,003 | 0,056  | 0,001 | 2,108 |
| GBR              | 2015-2019  | 0,928     | 0,023 | 0,002 | 0,047 | -0,009 | 1,093 |       |
| RFR              |            | 0,894     | 0,026 | 0,003 | 0,057 | -0,013 | 1,757 |       |

### 5.2 Forecast for 2020 with Data Between 2015 and 2019

The First COVID-19 case has announced at the beginning of 2020 in Turkey. We try to forecast the 2020 year that has COVID-19 with data between 2015 and 2019. The construction of regression models is the same as 2019 forecasting which is explained in the implementation section. 352 rows of sales data were used for training and 80 rows were predicted. The actual and predicted sales amount was shown in Figure 16.

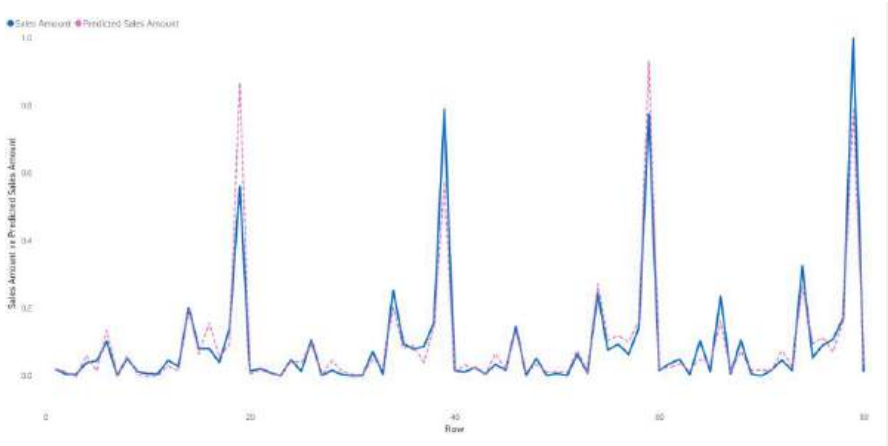


Figure 16. Actual and Predicted Sales Amount of 2020 Year with Linear Regression

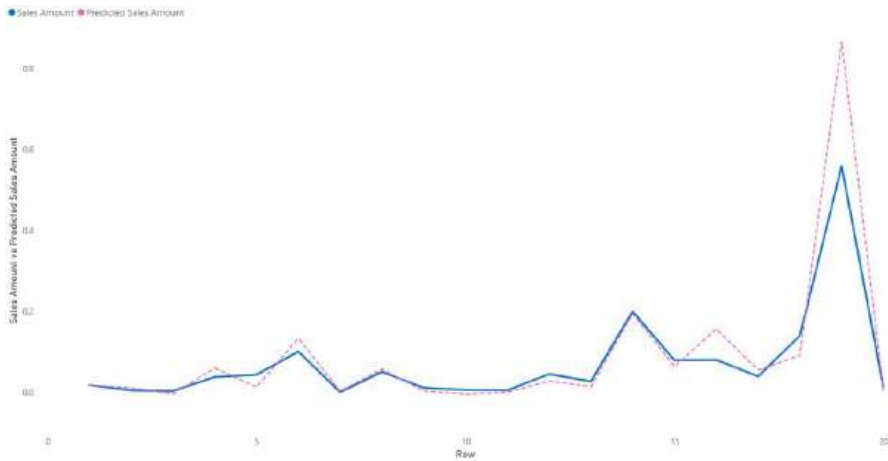


Figure 17. Actual and Predicted Sales Amount of Q1 2020 Year with Linear Regression

It seems that the actual sales amount is lower than the predicted sales amount in the first quarter of 2020. Figure 17 shows the detail of the first quarter. As we understand, there is a notable variation in category 3 that has the biggest sales value. The first quarter revenue is lower than the predicted sales amount.

When on closer inspection of the second quarter in Figure 18, we can see total sales amount is bigger than predicted. The deficit in the first quarter may have been offset here.

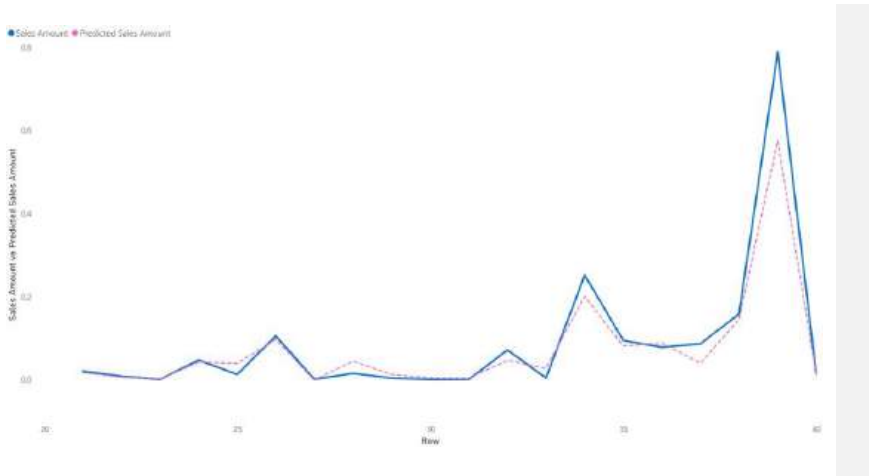


Figure 18. Actual and Predicted Sales Amount of Q2 2020 Year with Linear Regression

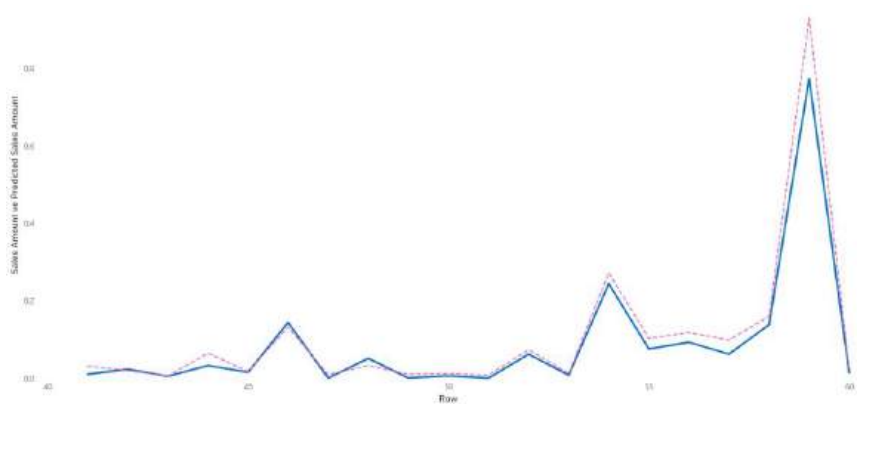


Figure 19. Actual and Predicted Sales Amount of Q3 2020 Year with Linear Regression

The third quarter of the year has better accuracy as we can see in Figure 19 when compared first and second quarters. This adaptation impact is kept in the fourth quarter which is shown in Figure 20.

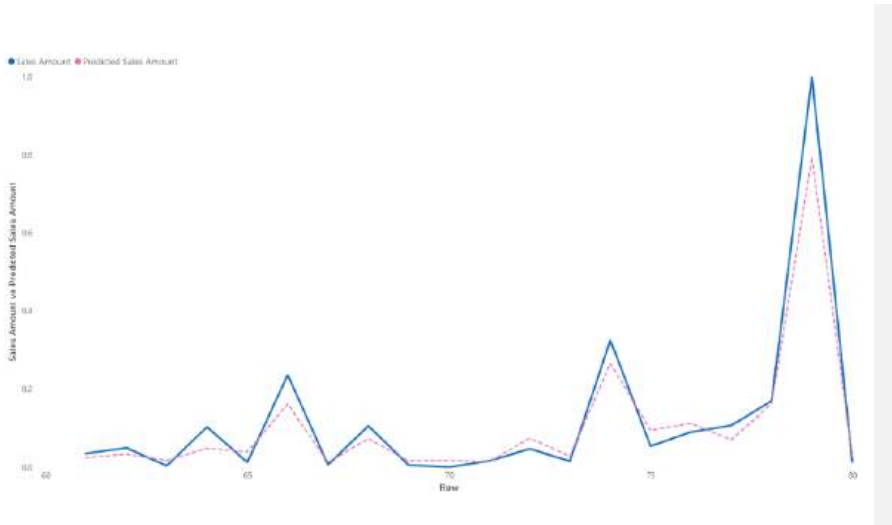


Figure 20. Actual and Predicted Sales Amount of Q4 2020 Year with Linear Regression

Table 5 shows that  $R^2$  has decreased compared to the 2019 prediction. COVID -19 may cause this decrease.

Table 5. Results of Three Regression Models for 2020 Forecasting

| Regression Model | Train Data | Test Data | $R^2$ | MAE   | MSE   | RMSE   | MSD   | MAPE  |
|------------------|------------|-----------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
| LR               | 2015-2019  | 2020      | 0,896 | 0,028 | 0,003 | 0,056  | 0,001 | 2,108 |
| GBR              |            | 0,928     | 0,023 | 0,002 | 0,047 | -0,009 | 1,093 |       |
| RFR              |            | 0,894     | 0,026 | 0,003 | 0,057 | -0,013 | 1,757 |       |

The linear regression model was the best model when we predict the non-COVID-19 era. The linear regression was implemented quarterly for the 2020 year. Results are written in table 6. As we understand, prediction quality gets better towards the end of the year. Especially, the  $R^2$  value of the 1st quarter has a disruptive impact on the year. When  $R^2$  is calculated with the 2nd, 3rd, and

4th quarters, the best value has been obtained. The first case of COVID-19 was appeared end of 2019 and announced as a pandemic in March 2020. In Turkey, the full lockdown was from March to June. This situation explains the lower R2 value in the first and second quarters. Until 21st November, Turkey did not have a lockdown.

Table 6. Results of Linear Regression Quarterly in the 2020 Year

| Regression Model | Train Data | Test Data   | R <sup>2</sup> |
|------------------|------------|---|----------------|
| LR               | 2015-2019  | 1 <sup>st</sup> Quarter                                   | 0,42           |
| LR               |            | 1 <sup>st</sup> ,2 <sup>nd</sup> Quarter                  | 0,778          |
| LR               |            | 1 <sup>st</sup> ,2 <sup>nd</sup> ,3 <sup>rd</sup> Quarter | 0,841          |
| LR               |            | 2 <sup>nd</sup> ,3 <sup>rd</sup> ,4 <sup>th</sup> Quarter | 0,931          |

Forecast for 2020-2021 with Data Between 2015 and 2019The sales data between 2015 and 2019 were used to predict the 2020 and 2021 years which has pandemic. 352 rows of sales data were used for training and 158 rows were predicted. The line graph of actual and predicted sales data is given in Figure 21.

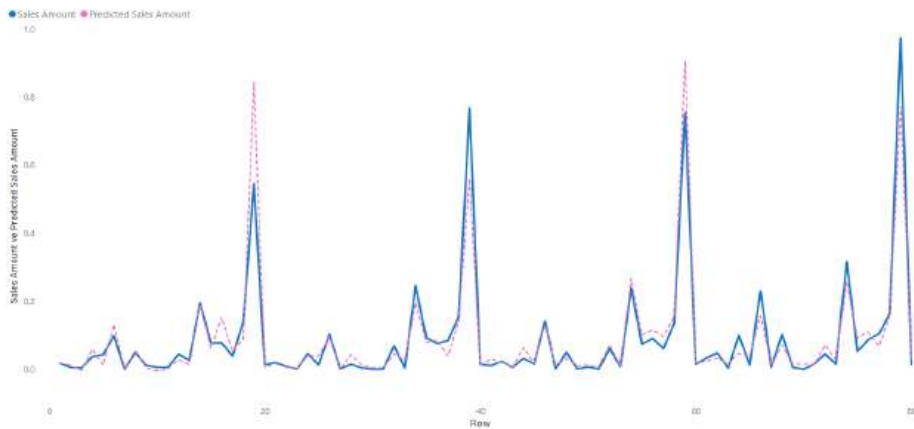


Figure 21. Actual and Predicted Sales Amount of 2021 Year with Linear Regression

Table 7 shows the statistical measures of each regression model. According to the results, linear regression has the best value and is better when compared to forecasting 2020. This improvement can be proof that after the first year of COVID-19 normalization process started.

Table 7. Results of Three Regression Models for 2020-2021 Forecasting

| Regression Model | Train Data | Test Data | R <sup>2</sup> | MAE   | MSE   | RMSE  | MSD    | MAPE  |
|------------------|------------|-----------|----------------|-------|-------|-------|--------|-------|
| LR               | 2015       |           | 0,921          | 0,033 | 0,003 | 0,058 | -0,003 | 1,459 |
| GBR              | -          | 2020-2021 | 0,832          | 0,039 | 0,007 | 0,084 | -0,021 | 0,874 |
| RFR              | 2019       |           | 0,839          | 0,039 | 0,007 | 0,083 | -0,028 | 1,074 |

When the actual and predicted total sales amount in 2020 was compared predicted value is lower than actual. It can be a negative effect of COVID-19 at the beginning of the 2020 year. When collection data examined, the first quarter of 2020 has missing collection. There may have been a problem in collection due to the uncertainty brought by the COVID-19 period. However, in 2020 there is a positive effect on the total sales amount. Table 8 is a summary of the difference between actual and predicted sales amounts.

Table 8. The Difference Between Actual and Predicted Total Sales Amounts

| Year | Quarter | Actual Total Sales Amount | Predicted Total Sales Amount | Difference |
|------|---------|---------------------------|------------------------------|------------|
| 2020 | Q1      | 1,44                      | 1,73                         | -20,48%    |
|      | Q2      | 1,72                      | 1,45                         | 15,74%     |
|      | Q3      | 1,73                      | 2,09                         | -20,69%    |
|      | Q4      | 2,33                      | 2,03                         | 12,87%     |
| 2021 | Q1      | 2,13                      | 2,32                         | -8,99%     |
|      | Q2      | 2,52                      | 2,18                         | 13,64%     |
|      | Q3      | 3,16                      | 2,90                         | 8,21%      |
|      | Q4      | 3,59                      | 3,47                         | 3,45%      |

#### 5.4 Forecast for 2021 with Data Between 2015 and 2020

By using the values between 2015-2020, 2021 values were tried to be predicted. 432 lines belong to train data and 78 lines are predicted as sectoral. Table 9 summarized metrics of three regression models. Linear regression has the best R2 value.



Table 9. Results of Three Regression Models for 2021 Forecasting

| Regression Model | Train Data | Test Data | R <sup>2</sup> | MAE   | MSE   | RMSE  | MSD    | MAPE  |
|------------------|------------|-----------|----------------|-------|-------|-------|--------|-------|
| LR               |            |           | 0,928          | 0,039 | 0,004 | 0,063 | -0,012 | 0,752 |
| GBR              | 2015-2020  | 2021      | 0,912          | 0,041 | 0,005 | 0,069 | -0,023 | 0,596 |
| RFR              |            |           | 0,889          | 0,043 | 0,006 | 0,078 | -0,033 | 0,518 |

2020 year was the most affected from COVID-19. 2021 values predicted with two different train data for understanding that 2020 data has disruptive effect on machine learning whether or. Table 10 shows the R2 value of two different models. The coefficient of determination has better value without 2020 sales data. To ensure that the 2020 sales data will be ignored, the model can be run again by continuing to collect data after the COVID-19.

Table 10. Comparison of 2021 R<sup>2</sup> Values with Different Train Data

| Regression Model | Train Data | Test Data | R <sup>2</sup> |
|------------------|------------|-----------|----------------|
| LR               | 2015-2019  | 2021      | 0,933          |
| LR               | 2015-2020  | 2021      | 0,928          |

## 6. Conclusion

After COVID-19 first appeared in China, various sectors were affected tourism, accommodation, education, aviation, production, automotive, energy, technology, and food. Every country took various cautions like using masks, remote working, and curfews to control this pandemic.

Remote working and curfews affected the demand for information and communication technologies (ICT). People need to do various things online such as shopping, working, studying and ICT makes them possible. That’s why companies investing in digitalization for adopting this period.

This study aims to understand the impact of COVID-19 and explore the popularity of information technologies in the technology sector through various machine learning models, utilizing sales data from pre-COVID-19 periods of a Turkish consulting firm.

Results show COVID-19 has adverse effects, especially in the first quarter of the 2020 year. After the adaptation period, the sales amount normalizes. Even, in 2021 a positive effect was seen on sales amount. Further, it can be investigated whether the machine learning model tested afterward is suitable for predicting future years or whether it is more appropriate to make predictions by ignoring the COVID-19 period. In addition, the inflation impact can be studied during the COVID-19 era, and sales revenue convert as dollars because of changes in currency. With the increasing demand for the technology sector, being a developer is more interesting day by day, and companies seeking good developers in Turkey and also around the world. It can be examined as a new study, impacts of increasing demand for information technologies on developers, and their salary.

### Conflict of Interest

No conflict of interest is declared by the authors.

### References

- Ağbulut, Ümit. 2022. "Forecasting of Transportation-Related Energy Demand and CO<sub>2</sub> Emissions in Turkey with Different Machine Learning Algorithms." *Sustainable Production and Consumption* 29:141–57. doi: <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2021.10.001>.
- Alhomdy, Sharaf, Fursan Thabit, Fua'ad Hasan Abdulrazzak, Anandakumar Hal-dorai, and Sudhir Jagtap. 2021. "The Role of Cloud Computing Technology: A Savior to Fight the Lockdown in COVID 19 Crisis, the Benefits, Characteristics and Applications." *International Journal of Intelligent Networks* 2:166–74. doi: <https://doi.org/10.1016/J.IJIN.2021.08.001>.
- Anon. n.d. "COVID-19 Pandemic in Turkey - Wikipedia." Retrieved May 19, 2022a ([https://en.wikipedia.org/wiki/COVID-19\\_pandemic\\_in\\_Turkey](https://en.wikipedia.org/wiki/COVID-19_pandemic_in_Turkey)).
- Anon. n.d. "Ministry of Health." Retrieved May 19, 2022b (<https://www.saglik.gov.tr/>).
- Appian. 2020. "Innovating in a Crisis: How Covid-19 Changed the Way UK Banks Deliver Core Operations." Retrieved May 19, 2022 (<https://appian.com/resources/resource-center/analyst-reports/how-covid-19-changed-the-way-uk-banks-deliver-core-operations.html>).
- Ayvaz, Berk, Ali Osman Kusakci, and Gül T. Temur. 2017. "Energy-Related CO<sub>2</sub> Emission Forecast for Turkey and Europe and Eurasia: A Discrete Grey Model Approach." *Grey Systems* 7(3):436–52. doi: <https://doi.org/10.1108/GS-08-2017-0031>.
- Borup, Daniel, Bent Jesper Christensen, Nicolaj Nørgaard Mühlbach, and Mikkel

- Slot Nielsen. 2022. "Targeting Predictors in Random Forest Regression." *International Journal of Forecasting*. doi: <https://doi.org/10.1016/J.IJFORECAST.2022.02.010>.
- Breiman, L., J. H. Friedman, R. A. Olshen, and C. J. Stone. 1984. *Classification and Regression Trees*.
- Cantekin, Kayahan. 2020. "Turkey: Provincial Bar Associations Sue Government for Prohibiting Large Public Meetings and Elections Because COVID-19 Fe-fears." *Library of Congress*.
- Chen, F. L., and T. Y. Ou. 2011. "Sales Forecasting System Based on Gray Extreme Learning Machine with Taguchi Method in Retail Industry." *Expert Systems with Applications* 38(3):1336–45. doi: <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2010.07.014>.
- Chicco, Davide, Matthijs J. Warrens, and Giuseppe Jurman. 2021. "The Coefficient of Determination R-Squared Is More Informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in Regression Analysis Evaluation." doi: <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623>.
- Nihad Karim Chowdhury, Muhammad Ashad Kabir, Md Muhtadir Rahman, and Sheikh Mohammed Shariful Islam. 2022. "Machine Learning for Detecting COVID-19 from Cough Sounds: An Ensemble-Based MCDM Method." *Computers in Biology and Medicine* 145:105405. doi: <https://doi.org/10.1016/J.COMPBIOMED.2022.105405>.
- Consultancy. n.d. "The Impact of the Coronavirus on the Global Consulting Industry." 2020. Retrieved May 19, 2022 (<https://www.consultancy.org/news/162/the-impact-of-the-coronavirus-on-the-global-consulting-industry>).
- Ensafi, Yasaman, Saman Hassanzadeh Amin, Guoqing Zhang, and Bharat Shah. 2022. "Time-Series Forecasting of Seasonal Items Sales Using Machine Learning – A Comparative Analysis." *International Journal of Information Management Data Insights* 2(1):100058. doi: <https://doi.org/10.1016/J.IJIMEI.2022.100058>.
- Ghosh, Bobby. 2020. "Turkey's Late Response to Coronavirus Overshadows Ramadan." *BloombergQuint*.
- Ho, Tin Kam. 1995. "Random Decision Forests." Pp. 278–82 vol.1 in *Proceedings of 3rd International Conference on Document Analysis and Recognition*. Vol. 1.
- Ho, Tin Kam. 1998. "The Random Subspace Method for Constructing Decision Forests." *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 20(8):832–44. doi: <https://doi.org/10.1109/34.709601>.

- Kandemir, Aslı. 2020. "Turkey Imposing Curfew for People Over Age 65." *Bloomberg*.
- Legendre, Adrien Marie. 1806. *Nouvelles Méthodes Pour La Détermination Des Orbites Des Comète*.
- Madhurya, M. J., H. L. Gururaj, B. C. Soundarya, K. P. Vidyashree, and A. B. Rajendra. 2022. "Exploratory Analysis of Credit Card Fraud Detection Using Machine Learning Techniques." *Global Transitions Proceedings*. doi: 10.1016/J.GLTP.2022.04.006.
- Mell, Peter, and Tim Grance. 2017. "The NIST Definition of Cloud Computing." *Cloud Computing and Government: Background, Benefits, Risks* 267–69. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804018-8.15003-X>.
- Minasny, Budiman. 2009. "The Elements of Statistical Learning, Trevor Hastie, Robert Tibshirani, Jerome Friedman, Second Edition (2009), Springer Series in Statistics, ISBN 0172-7397, 745 Pp." *Geoderma* 153(1–2):291. doi: 10.1016/J.GEODERMA.2009.08.001.
- Mitchell, Tom. 1997. *Machine Learning*.
- Mouratidis, Kostas, and Apostolos Papagiannakis. 2021. "COVID-19, Internet, and Mobility: The Rise of Telework, Telehealth, e-Learning, and e-Shopping." *Sustainable Cities and Society* 74:103182. doi: <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2021.103182>.
- Nie, Peng, Michele Roccotelli, Maria Pia Fanti, Zhengfeng Ming, and Zhiwu Li. 2021. "Prediction of Home Energy Consumption Based on Gradient Boosting Regression Tree." *Energy Reports* 7:1246–55. doi: <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2021.02.006>.
- Ntasis, Lazaros, Konstantinos Koronios, and Theodoros Pappas. 2021. "The Impact of COVID-19 on the Technology Sector: The Case of TATA Consultancy Services." *Strategic Change* 30(2):137–44. doi: <https://doi.org/10.1002/jsc.2397>.
- Organisation for Economic Co-operation and Development. 2021. "OECD | Building a Resilient Recovery: How We Can Emerge Stronger from the COVID-19 Pandemic." 2022. Retrieved May 19, 2022 (<https://www.oecd.org/coronavirus/en/>).
- Overseas Security Advisory Council. 2020. "Health Alert: Turkey, New COVID-Related Measures In Effect Starting November 20." Retrieved May 19, 2022 (<https://www.osac.gov/Country/Turkey/Content/Detail/Report/9bc0839f-2e83-446a-860f-1a2d5567cf7a>).

- Rencher, A. C., and W. F. Christensen. 2012. *Methods of Multivariate Analysis, Wiley Series in Probability and Statistics*. 19th ed.
- Rohaam, D., E. Topan, and C. G. M. Groothuis-Oudshoorn. 2022. "Using Supervised Machine Learning for B2B Sales Forecasting: A Case Study of Spare Parts Sales Forecasting at an after-Sales Service Provider." *Expert Systems with Applications* 188:115925. doi: <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2021.115925>.
- Sabah. 2020. "Otomotiv Devi Corona Virüs Yüzüne Üretimi Durdurdu! COVID-19 Nedeniyle Üretimleri Durduran Markalar." 2020. Retrieved May 19, 2022 (<https://www.sabah.com.tr/galeri/otomobil/otomotiv-devi-corona-virus-yuzune-uretimi-durdurdu-covid-19-nedeniyle-uretimleri-durduran-markalar>).
- Sabeti, Malihe, Reza Boostani, Ehsan Moradi, and Mohammad Hossein Shakoor. 2022. "Machine Learning-Based Identification of Craniosynostosis in Newborns." *Machine Learning with Applications* 8:100292. doi: 10.1016/J.MLWA.2022.100292.
- Sahin, Yusuf, Serol Bulkan, and Ekrem Duman. 2013. "A Cost-Sensitive Decision Tree Approach for Fraud Detection." *Expert Systems with Applications* 40(15):5916–23. doi: <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2013.05.021>.
- ScienceDirect. n.d. "ScienceDirect.Com | Science, Health and Medical Journals, Full Text Articles and Books." Retrieved May 21, 2022 (<https://www.sciencedirect.com/>).
- Shen, Hui, Farnoosh Namdarpour, and Jane Lin. 2022. "Investigation of Online Grocery Shopping and Delivery Preference before, during, and after COVID-19." *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives* 14:100580. doi: <https://doi.org/10.1016/J.TRIP.2022.100580>.
- Statista. 2022. "What Software or Tools Does Your Firm Use for Remote Work?" Retrieved May 19, 2022 (<https://www.statista.com/statistics/892994/staffing-industry-types-of-text-messaging-software-used-in-the-united-states/>).
- Sun, Wei, and Mohan Liu. 2016. "Prediction and Analysis of the Three Major Industries and Residential Consumption CO<sub>2</sub> Emissions Based on Least Squares Support Vector Machine in China." *Journal of Cleaner Production* 122:144–53. doi: <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.02.053>.
- T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. n.d. "Presidential Strategy and Budget Department of Turkish Republic." Retrieved May 21, 2022 (<https://www.sbb.gov.tr/>).
- Taser, Didem, Esra Aydin, Alev Ozer Torgaloz, and Yasin Rofcanin. 2022. "An Exa-

mination of Remote E-Working and Flow Experience: The Role of Technostress and Loneliness." *Computers in Human Behavior* 127:107020. doi: <https://doi.org/10.1016/J.CHB.2021.107020>.

The Economist. 2020. "What Turkey Got Right about the Pandemic." *The Economist*.

The UN Refugee Agency. 2021. "Announcements - UNHCR Turkey." Retrieved May 19, 2022 (<https://help.unhcr.org/turkey/coronavirus/announcements/>).

WHO. 2022. "WHO Coronavirus (COVID-19) Dashboard | WHO Coronavirus (COVID-19) Dashboard With Vaccination Data." 2022. Retrieved May 19, 2022 (<https://covid19.who.int/>).

Worldometers. n.d. "Turkey COVID - Coronavirus Statistics - Worldometer." Retrieved May 19, 2022 (<https://www.worldometers.info/coronavirus/country/turkey>).

Yang, Yang, Li Xu, Liangdong Sun, Peng Zhang, and Suzanne S. Farid. 2022. "Machine Learning Application in Personalised Lung Cancer Recurrence and Survivability Prediction." *Computational and Structural Biotechnology Journal*. doi: <https://doi.org/10.1016/J.CSBJ.2022.03.035>.



## TİCARİ BİYOKÜTLE YAKMA SİSTEMLERİNDE KÜL KAYNAKLI PROBLEMLER ÜZERİNE BİR DEĞERLENDİRME

Anıl BADEM<sup>\*1</sup>, Prof. Dr. Hayati OLGUN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ege Üniversitesi, Güneş Enerjisi Enstitüsü, Enerji Teknolojisi, İzmir  
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-9492-9819>

<sup>2</sup> Ege Üniversitesi, Güneş Enerjisi Enstitüsü, İzmir  
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-1777-2010>

### Anahtar Kelimeler

### Öz

*Biyokütle, katı biyoyakıtlar, yakıt kalitesi, eriyebilirlik, cürufanma, kirlenme, korozyon*

*Biyokütle enerji uygulamalarında kullanılan ticari teknolojilerin başında biyokütle yakma sistemleri gelmektedir. Orman kökenli biyokütlelerin ticari yakma sistemlerinde yakılması bilinen ve kanıtlanmış bir teknoloji olmakla birlikte tarımsal atıklarının yakılması orman kökenli yakıtlara göre çok daha sorunlu olabilmektedir. Bu sorunlar; yakma sistemlerinin tasarımından, işletme koşullarına ve burada yakılacak biyokütlelerin türüne, fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak değişiklikler gösterebilmektedir. Bu sorunların başında, sistemin düzenli ve sürekli çalışmasını etkileyerek plansız duruşlara neden olan sinterleşme, aglomerasyon, cürufanma, korozyon gelmektedir. Bu çalışmada, bu sorunları önceden analiz etmek üzere literatürde yaygın olarak kullanılan kömür küllerinin indislerinin biyokütle külü üzerindeki uygulanabilirliği incelenmiştir. Açık alanda depolanan 5 farklı biyokütle hammaddesi (saz kamışı, mısır sapı, çam kapağı, kavak kapağı, ağaç kökü) silolarından iki farklı zaman diliminde alınan numunelerde kül mineral içeriği, klor içeriği, kükürt içeriği ve kül ergime sıcaklığı analizleri yapılarak indis hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Böylece biyokütle yakıtlarından kaynaklı sorunların depolama koşullarına bağlı değişimleri de incelenmiş olacaktır. Yapılan analizler ve hesaplamalar sonucunda biyokütle külünün kömürden önemli ölçüde farklı olması ve biyokütle hammaddelerinin heterojen yapısı nedeniyle kömüre özgü literatürde verilen indisler arasında herhangi bir ilişki veya öngörü net olarak ortaya konulamamıştır. Elde edilen çelişkili sonuçlar, bu indislerin oluşturulması veya doğrulanması için gerçek koşullar altında daha fazla araştırma ve deneysel testlerin gerekliliğini göstermektedir. Biyokütle yakıtlarının heterojen yapısı ve fizikokimyasal karakterizasyonu dikkate alınarak gerçek yanma deneyimlerine dayalı daha çok deneysel sonuçların birlikte değerlendirilmesine ihtiyaç duyulacağı görüşüne varılmıştır.*

\* anilbadem@gmail.com  
doi : 10.46399/muhendismakina.1388609

---

## AN ASSESSMENT ON ASH-RELATED ISSUES IN COMMERCIAL BIOMASS COMBUSTION SYSTEMS

---

### Keywords

*Biomass, solid biofuels, fuel quality, fusibility, slagging, fouling, corrosion*

### Abstract

*One of the prominent technologies in biomass energy applications is commercial biomass combustion systems. While burning forest-derived biomass is a well-established and proven technology, the combustion of agricultural residues poses more challenges compared to forest-derived fuels. These challenges vary depending on factors such as the design of the combustion system, operational conditions, and the type, physical, and chemical properties of the biomass to be burned. Sintering, agglomeration, slagging, and corrosion are among the major issues that affect the regular and continuous operation of the combustion system, leading to unplanned shutdowns. This study investigates the applicability of common coal ash indices, widely used in the literature to predict these problems, to biomass ash for pre-analysis. Five different biomass feedstocks (reed canary grass, corn stalk, pine, poplar, and tree root) stored in open silos were sampled at two different time periods. Analyses of ash mineral content, chlorine content, sulfur content, and ash fusion temperatures were conducted, and various indices were calculated. Thus, changes in the problems related to biomass fuels depending on storage conditions will also be examined. As a result of the analyses and calculations, no significant relationship or prediction could be demonstrated among the existing indices due to the considerable differences between biomass ash and coal ash, as well as the heterogeneous nature of biomass feedstocks. The contradictory results highlight the necessity for further research and experimental tests under real conditions to establish or verify these indices. It is concluded that a more comprehensive evaluation, taking into account the heterogeneous structure and physicochemical characterization of solid biomass fuels, will be required based on actual combustion experiences.*

---

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 22.11.2023

Kabul Tarihi : 02.05.2024

Research Article

Submission Date : 22.11.2023

Accepted Date : 02.05.2024

---



## Extended Abstract

### Introduction and Objectives

Population growth, urbanization, and modernization continuously increase the demand for energy. In our country, 58% of the electricity produced is met by burning fossil fuels [ETKB, 2023]. The use of fossil fuels in thermal power plants for energy production increases carbon dioxide emissions released into the atmosphere from flue gases, contributing to global climate change. To reduce dependence on fossil fuels and increase energy diversity, our country, along with many others, has shown great interest in renewable energy sources. Among these sources, biomass energy has become a significant alternative. Compared to fossil fuels, energy derived from biomass is carbon-neutral.

In this study, samples were taken from five different types of biomass (reed canary grass, corn stalk, pine, poplar, and tree root) stored in the open at two different times. The samples were analyzed for ash content, melting temperatures, and Cl, S contents in an accredited laboratory. Mathematical indices commonly used for coal in the literature to predict biomass ash slagging and fouling tendencies were employed to estimate biomass ash slagging and fouling tendencies. The ultimate goal is to determine whether these indices provide insights into slagging and fouling tendencies when applied to biomass ash components and melting temperatures.

### Methodology and Analysis

In this study, samples were taken from five different biomass types (reed canary grass, corn stalk, pine, poplar, and tree root) stored in open-air silos at two different times (April 2020, April 2021). Standard procedures were applied for the sampling method. Subsequently, biomass samples were analyzed in an accredited laboratory for oxide-form ash content ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ , Sd, and Cl), melting temperatures, IDT (Initial Deformation Temperature), ST (Softening Temperature), HT (Hemispherical Temperature), and FT (Fusion Temperature). The analysis values were classified based on the time period and product type in which the samples were analyzed. The obtained results were interpreted by comparing them with literature data to confirm the reliability of the analyses.

### Results and Discussions

This study demonstrates that there is no general formula that can clearly correlate ash deposition and fouling tendencies of five different agricultural and forestry biomasses (corn stalk, reed canary grass, root, pine, poplar) analyzed by taking samples at different time intervals under open-air conditions. Coefficients traditionally used to predict coal ash deposits yield mixed results when applied to biomass fuels. As a result, research findings predicting the fouling and fouling tendencies of biomass fuels based on some of these indices need to be questioned. The creation of new indices should be based on realistic results obtained from actual combustion experiences, taking into account not only the influence of combustion technology and conditions but also the heterogeneity and physicochemical characterizations of solid biomass fuels. In conclusion, there is a need for further research based on real combustion data, considering the properties of the raw materials used to create and validate indices in the context of different combustion technologies and operating conditions.

## 1. Giriş

Nüfus artışı, şehirleşme ve modernleşme ile enerjiye olan talep sürekli artış göstermektedir. Ülkemizde üretilen elektriğin %58'i fosil yakıtların yakılmasından karşılanmaktadır (ETKB, 2023).

Fosil yakıtların enerji üretiminde ve taşıtlarda kullanımı, atmosferde hava kirliliğine neden olan bir durumdur (Behcet, R., & Yakın, A. 2020). Bu kirlilik, coğrafi sınırlara bağlı olmadığından, çevresel etkileri sadece belli bir ülkeyi değil, küresel düzeyde tüm dünya nüfusunu etkilemektedir. Fosil yakıtların kullanımıyla artan emisyonlar, küresel iklim değişikliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu durum, çevresel sürdürülebilirlik ve küresel ısınma gibi evrensel endişeleri gündeme getirmektedir (Yakın, A., & Behcet, R. 2019). Fosil yakıt bağımlılığını azaltmak ve enerji çeşitliliğini artırmak için birçok ülke ile birlikte ülkemiz de yenilenebilir enerji kaynaklarına büyük ilgi göstermektedir. Bu kaynaklar arasında biyokütle enerjisi önemli bir alternatif olmuştur. Fosil yakıtlarla mukayese edildiğinde, biyokütleden elde edilen enerji karbon nötr bir kaynaktır. Biyokütle enerji proseslerinde ortaya çıkan CO<sub>2</sub>, fotosentez yoluyla organik maddelerin büyümesi ve gelişmesi sırasında atmosferden alınan karbondioksit eşdeğer olduğundan biyokütle enerjisi karbon nötrdür. Bu yüzden biyokütle enerjisinin CO<sub>2</sub> salınımının azaltılmasında ve dolayısıyla küresel ısınma ile mücadelede çok önemli bir rolü vardır. Bunun yanı sıra kullanılabilirlik ve çok iyi bilinen dönüşüm teknolojileriyle biyokütle, enerji talebini ve enerji arz güvenliğini sağlamada önemli bir alternatif olmaktadır (Badem, A. & Olgun, H. 2023).

Biyokütle yakma, bilinen en yaygın biyokütle enerji dönüşümü yöntemidir. Biyokütle yakmada en çok akışkan yataklı kazan ve ızgaralı kazan kullanılmaktadır. Biyokütle yakma sistemlerine özgü problemler büyük ölçüde proses sonucu oluşan külün bileşiminden kaynaklanmaktadır. Ciddi işletme sorunlarına yol açması nedeniyle biyokütle külü kaynaklı problemlerin çözümü üzerine araştırmalar yapılmaktadır (Garcia-Maraver, Mata-Schancez, Carpio & Perez-Jimenez, 2017). Cürufişma (slagging) ve kirlenme (fouling), ısı transfer yüzeylerinde kül birikimini ifade etmek için kullanılan terimlerdir. Daha açık bir ifade ile cürufişma, uçucu külün ısı radyasyonuna maruz kalan yüzeylerde birikmesi olayı, ısı geri kazanım bölümü yüzeylerinde toplanan tortular ise kirlenmeyi oluşturmaktadır [Munir, 2010]. Kül miktarı ve özellikleri, kullanılan biyokütlenin sadece miktarına bağlı değildir. Aynı zamanda kullanılan biyokütlenin cinsine (tarımsal, ormansal, hayvansal ve endüstriyel biyokütle) ve kimyasal özelliklerine de bağlıdır (Tortosa Masia vd., 2007). Biyokütle türlerinin geniş çeşitliliği, kül bileşimini özellikle organik ve inorganik bileşenleri açısından oldukça değişken hale getirmektedir (Jenkins vd.,1998;Demirbas 2005;Obernberger vd.,1997). Yakma sistemlerinde kül kaynaklı problemlerin araştırılmasında ilgilenilen ana bileşenler olarak; si-

lisyum, potasyum, klor, kükürt, demir, fosfor, magnezyum, kalsiyum, titanyum, karbon, hidrojen ve oksijen başta gelmektedir (Baxter vd., 1998).

Yakma sistemi tasarımı ve sorunsuz işletilme koşullarının belirlenmesinde, kullanılacak yakıtların ve bu yakıtlara ait küllerin bileşimi önem arz etmektedir. Örneğin, biyokütle küllerinin düşük erime sıcaklıkları ve yüksek mineral oksit içerikleri yakma sisteminde ve ısı transfer ekipmanlarında erimiş kül birikintilerine neden olmaktadır (Werther vd., 2000; Bryers 1996; Pronobis 2005). Birçok biyokütle tesisi cüruf ve sinterlenmiş kül birikintilerinden dolayı ciddi ekonomik kayıplar yaşamaktadır. Tarımsal ve kentsel atıklar yakıldığında bu risk çok daha fazlayken, orman atıklarında risk oranı daha düşüktür. Orman atıklarının cüruf oluşturma eğilimleri kimyasal içerikleri nedeniyle düşük olmasına rağmen, yakıt ile gelen diğer kirlenici toprak malzemeleri nedeniyle yakma sistemlerinde sorun yaşanabilmektedir. Aşırı kül birikimi yanma dengesini bozar, ısı transferini geciktirir, yüksek sıcaklık korozyonuna ve kızdırıcı patlamalarına hatta mekanik arızalar nedeniyle plansız duruşlara sebep olabilir (Aho ve Silvennoinen, 2004; Szemmelveisz vd., 2009; Jensen ve Dam-Johansen 2004). Çok farklı özellikte biyokütle yakılmasından kaynaklanacak sinterleşme ve cüruf oluşumunun önceden tahmin edilmesi; işletme kaynaklı bakım ve onarım maliyetlerinin düşürülmesine katkı sağlayacaktır. Yakma sistemlerinde yakıt alternatiflerinin değerlendirilmesi ve açıklanan etkilerin en aza indirilmesi için çeşitli metotlar ortaya konmuştur (Fernandez Llorente ve Carrasco García 2005). Bir kazanın cüruf oluşturma eğilimi, yalnızca yakıt özellikleri açısından tahmin edilemez (Miles vd. 1996). Külün erime noktası ile yakıt bileşimi arasında güçlü bir ilişki olduğu bilinmektedir. (Yu vd. 2014). Kömür külünün sinterleme ve cüruf eğilimi ile ilgili bilimsel yayınlara dayalı olarak risk tahmini için bir dizi yöntem geliştirilmiştir (García vd., 2015; Teixeira vd., 2012). Biyokütlenin ise kömürden önemli ölçüde farklılık gösterdiği bilinmektedir (Cuiping , Chuangzhi, & Haitao, 2004; Mohan vd., 2006; Nordin 1994; Wigley vd., 2007). Kömür için geliştirilen ampirik formüllerin biyokütle için de geçerliliği üzerine çok fazla bir çalışma yoktur. Biyokütle yakıtları kendi içerisinde çok çeşitlidir ve her bir türü farklı fiziksel ve kimyasal özellikler göstermektedir. Farklı bölgelerden alınan aynı biyokütle türlerinin kül analiz sonuçlarında bile farklılıkların olduğu, elemental ve oksit formda kül içeriklerinin ve kül ergime sıcaklıklarının aynı olmadığı görülmektedir.

Biyokütle organik içerikli bir yakıt olduğu için özellikleri de havaya, iklime, yetiştirme startlarına ve toprak özelliklerine son derece bağlıdır. Bu heterojen yapısı nedeniyle katı biyokütlenin uygun bir şekilde depolanması ve efektif yakılması, fosil yakıtlarla mukayese edildiğinde çok daha zor ve sorunlu olabilmektedir. Bu çalışmada, açık alanda depolanan 5 farklı biyokütle türünden (saz kamışı, mısır sapı, çam kapak, kavak kapak, ağaç kökü) 2 farklı zamanda numuneler alınarak akredite laboratuvarında kül içeriği, ergime sıcaklıkları ve Cl, S içerikleri analiz edilmiştir.

Biyokütle cüruf ve kirlenme eğilimlerinin tahmini için literatürde yaygın olarak kömür için kullanılan matematiksel indisler kullanılarak bir sonuca varılmaya çalışılmıştır. Nihai amaç, bu indislerin biyokütle kül bileşenleri ve erime sıcaklıkları üzerinde kullanıldığında cüruf ve kirlenme eğilimlerinde fikir verip veremeyeceğini belirlemektir. Çalışmanın bulguları, biyokütle yakıtlarının depolanması sırasında oluşan kuru madde kayıplarının mekanizmalarının daha iyi anlaşılmasına, biyokütle yakıtlarının depolanması ve işlenmesi için daha verimli ve sürdürülebilir yöntemlerin geliştirilmesine ve doğru yakıt reçeteleri hazırlanarak biyokütle enerjisinin daha yaygın ve etkin kullanımına katkıda bulunacaktır.

## 2. Materyal ve Metod

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

### 2.1 Kullanılan Analiz Yöntemi ve Deneysel Veriler

Biyokütle hammaddelerinin kül minerali içeriği (Si, Ca, K, P, Al, Mg, Fe, Na ve Ti) "Standard Test Method for Major and Trace Elements in Coal and Coke Ash by X-Ray Fluorescence" olarak adlandırılan XRF ASTM 4326 standardı kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu standart, yakıt külündeki ana ve iz elementlerin analizini yapmak için X-ışını floresans spektrometrisi (XRF) yöntemini tanımlamaktadır. XRF, bir numunenin X-ışınlarına maruz bırakılmasıyla çalışan bir analiz tekniğidir. Numunenin atomik yapısı X-ışınları tarafından etkilenir ve bu etkileşim sonucunda numunenin karakteristik floresans ışınları yayılır. XRF cihazı, bu floresans ışınlarını algılayarak numunedeki elementlerin tespitini ve miktarlarının belirlenmesini sağlar. Bu standart, kalite kontrol amaçlarıyla, çevresel analizlerde ve araştırmalarda kullanılan bir referans noktasıdır. XRF analizi, yanma ürünlerinin bileşimini ve kalitesini belirleme, emisyon kontrolü, enerji üretimi ve diğer uygulamalar için önemli bir araçtır. ASTM 4326, bu analizin standardizasyonunu sağlayarak sonuçların karşılaştırılabilir ve güvenilir olmasını temin eder.

Biyokütle hammaddelerinin kül ergime sıcaklıkları (IDT, ST, HT, FT) ASTM D1857 veya D1857M-18, "Standard Test Method for Fusibility of Coal and Coke Ash" olarak adlandırılan bir ASTM standardı kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu standart, kömür ve kok kömürü külünün erime özelliklerini değerlendirmek için oluşturulan bir yöntemdir. ASTM D1857, kömür veya kok kömürü külünün belirli sıcaklık aralığında erime davranışını belirlemek için kullanılan bir test yöntemi-dir. Bu test, numunenin yüksek sıcaklıkta ısıtılmasını ve oluşan külün erime davranışını değerlendirir. Bu test yönetimi, yakıtın yanma sürecinde oluşan külünün davranışını anlamak ve değerlendirmek için önemlidir.

Külün erime özellikleri, yakıtın yanma verimliliği, kazan performansı ve yanma sonrası atıkların yönetimi açısından önemli bir faktördür. ASTM D1857, bu özel-

likleri belirlemek ve farklı yakıt türleri arasında karşılaştırma yapmak için standartlaştırılmış bir yöntem sağlar.

Biyokütle hammaddelerinde bulunan klor içeriği yüzdesi (Cl) (%), EPA 5050 İyon Kromatografisi ile belirlenmiştir. EPA 5050, Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından yayınlanan bir yöntemdir. Bu yöntem, biyokütle numunelerindeki çeşitli iyonları analiz etmek için kullanılır. İyon kromatografisi, bir numunedeki iyonların ayrıştırılması ve tespiti için kullanılan bir analiz tekniğidir. Biyokütle numunesi iyon kromatografisi cihazına verilir ve klor iyonları ayrıştırılır. Bu sayede klor miktarı tespit edilir ve yüzde olarak ifade edilir.

Biyokütle hammaddelerinin kuru yakıttaki kükürt yüzdesi (Sd) (%), ASTM D4239 standardı ile analiz edilmiştir. ASTM D4239 standardında yer alan "Standard Test Method for Sulphur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using High-Temperature Tube Furnace Combustion" tarafından kuru yakıttaki kükürt yüzdesini ifade etmektedir. ASTM D4239, kuru yakıtlardaki kükürt içeriğini belirlemek için bir deney yöntemini tanımlar. Bu yöntem, yüksek sıcaklıkta tüp fırını yanma kullanılarak numunelerdeki kükürtün oksidasyonunu gerçekleştirir. Oluşan kükürt dioksit (SO<sub>2</sub>) gazı, uygun bir dedektör aracılığıyla tespit edilir ve kükürt miktarı gaz analizi ile belirlenir.

Bu çalışmada, açık alanda depolanan 5 farklı biyokütle (saz kamışı, mısır sapı, çam kapağı, kavak kapağı ve ağaç kökü) açık hava silolarından 2 farklı zamanda (Nisan 2020, Nisan 2021) numuneler alınarak akredite laboratuvarında kül içeriği, ergime sıcaklıkları ve Cl, S içerikleri analiz edilmiştir. Numune alma yöntemi için standart prosedürler uygulanmıştır [Badem A., Olgun H., 2023]. Analiz değerleri, numunelerin analiz edildiği zaman dilimi ve ürün cinsine göre sınıflandırılarak Tablo 1'de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar, analizlerin güvenilirliğini teyit etmek adına literatürden alınan verilerle karşılaştırıldı.

Tablo 1'de, beş farklı biyokütlenin iki farklı zaman diliminde alınan örneklerinin oksit formdaki kül içerikleri görülmektedir. Bu tablo, her bir biyokütle için SiO<sub>2</sub>, CaO, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, Sd ve Cl içeriklerini ayrıntılı bir şekilde listelemektedir. Her bir özellik, Nisan 2020 ve Nisan 2021 dönemlerindeki değerlerini içermektedir. Tablo 1'den de görüleceği üzere küllerin oksit bileşenleri yakıt tipine ve numune alma tarihine göre farklılıklar göstermektedir. Bu durum da uzun süreli depolamalarda kül kaynaklı problemlerde de bir farklılık olabileceğini göstermektedir.

Tablo 2'de ise, aynı biyokütle örneklerinin kül ergime sıcaklıkları bulunmaktadır. Bu sıcaklıklar IDT (İlk Deformasyon Sıcaklığı), ST (Yumuşama Sıcaklığı), HT (Yarıküre Sıcaklığı) ve FT (Erime Sıcaklığı) olarak dört farklı kritik noktada verilmiştir. Nisan 2020 ve Nisan 2021 dönemlerinde elde edilen değerler karşılaştırılmıştır.

Tablo 1. Beş Farklı Biyokütlenin İki Farklı Zaman Dilinde Alınan Örneklerinde Oksit Formda Kül İçerikleri

| İçerik (%)                     | Kök    |        | Çam kapağı |        | Kavak kapağı |        | Mısır sapı |        | Saz kamışı |        |
|--------------------------------|--------|--------|------------|--------|--------------|--------|------------|--------|------------|--------|
|                                | Nis.20 | Nis.21 | Nis.20     | Nis.21 | Nis.20       | Nis.21 | Nis.20     | Nis.21 | Nis.20     | Nis.21 |
| Dönem                          |        |        |            |        |              |        |            |        |            |        |
| SiO <sub>2</sub>               | 22,90  | 19,40  | 43,00      | 16     | 6,41         | 33,8   | 43,30      | 52,7   | 83,10      | 74,4   |
| CaO                            | 36,90  | 31,20  | 13,20      | 47,7   | 50,00        | 25,7   | 13,20      | 16,6   | 1,84       | 5,77   |
| K <sub>2</sub> O               | 7,64   | 7,53   | 16,20      | 3,9    | 9,92         | 6,46   | 15,90      | 5,58   | 2,89       | 2,24   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 4,06   | 3,00   | 0,93       | 1,55   | 5,41         | 3,36   | 0,92       | 0,737  | 0,62       | 0,908  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 6,27   | 6,89   | 5,41       | 5,94   | 2,00         | 11,4   | 5,43       | 8,12   | 0,54       | 2,24   |
| MgO                            | 4,14   | 6,89   | 5,35       | 7,15   | 12,60        | 4,73   | 5,37       | 4,12   | 1,32       | 1,4    |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4,35   | 3,97   | 2,69       | 3,41   | 1,70         | 5,52   | 2,70       | 4,13   | 0,32       | 1,25   |
| SO <sub>3</sub>                | 1,02   | 3,84   | 1,12       | 2,92   | 1,05         | 0,823  | 1,11       | 0,46   | 2,04       | 0,286  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,88   | 0,91   | 0,26       | 0,536  | 0,23         | 0,731  | 0,27       | 0,491  | 3,13       | 1,19   |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,55   | 0,49   | 0,33       | 0,434  | 0,17         | 0,696  | 0,33       | 0,48   | 0,03       | 0,141  |
| Sd                             | 0,08   | 0,08   | 0,08       | 0,12   | 0,09         | 0,11   | 0,09       | 0,13   | 0,12       | 0,14   |
| Cl                             | 0,02   | 0,01   | 0,02       | 0,013  | 0,02         | 0,0075 | 0,26       | 0,06   | 0,25       | 0,157  |

Tablo 2. Beş Farklı Biyokütlenin İki Farklı Zaman Dilinde Alınan Örneklerinde KÜİ Ergime Sıcaklıkları

| °C    | Kök    |        | Çam kapağı |        | Kavak kapağı |        | Mısır sapı |        | Saz kamışı |        |
|-------|--------|--------|------------|--------|--------------|--------|------------|--------|------------|--------|
|       | Nis.20 | Nis.21 | Nis.20     | Nis.21 | Nis.20       | Nis.21 | Nis.20     | Nis.21 | Nis.20     | Nis.21 |
| Dönem |        |        |            |        |              |        |            |        |            |        |
| IDT   | 1245   | 1168   | 1391       | 1307   | 1487         | 1186   | 1169       | 1195   | 1281       | 1390   |
| ST    | 1253   | 1200   | 1494       | 1319   | 1500         | 1209   | 1182       | 1207   | 1492       | 1458   |
| HT    | 1261   | 1205   | 1496       | 1332   | 1500         | 1217   | 1235       | 1278   | 1500       | 1500   |
| FT    | 1324   | 1215   | >1500      | 1434   | >1500        | 1271   | 1310       | 1361   | >1500      | >1500  |

IDT: İlk Deformasyon sıcaklığı (°C)

ST: Yumuşama sıcaklığı (°C)

HT: Yarıküre sıcaklığı (°C)

FT: Erime sıcaklığı (°C)

Tablo 3 ve Tablo 4'te ise beş farklı biyokütle türü olan kök, çam kapağı, kavak kapağı, mısır sapı ve saz kamışının oksit formda kül içerikleri (  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ , Sd ve Cl) ve kül ergime sıcaklıkları (IDT, ST, HT, FT) literatürden alınan veriler ile özetlenmiştir.

Tablo 3. Beş Farklı Biyokütlenin Oksit Formda Kül İçerikleri

| İçerik (%)              | Kök  | Çam kapağı                                    | Kavak kapağı                       | Mısır sapı                                    | Saz kamışı                           |
|-------------------------|--|---|------------------------------------|---|--------------------------------------|
| Referans                | [Zevenhoven-Onderwater vd., 2000; Miles vd., 1996] | [Tortosa Masia vd., 2007; Vassilev vd., 2014] | [Vassilev vd., 2014; Bryers, 1996] | [Tortosa Masia vd., 2007; Vassilev vd., 2014] | [Vassilev vd., 2014; Moilanen, 2006] |
| $\text{SiO}_2$          | 20,62  | 68,18   | 1,86                               | 49,95   | 84,92                                |
| $\text{CaO}$            | 47,55  | 7,89  | 77,31                              | 14,73   | 3,31                                 |
| $\text{K}_2\text{O}$    | 10,23  | 4,51  | 8,93                               | 18,53   | 2,93                                 |
| $\text{P}_2\text{O}_5$  | 5,05   | 1,56  | 2,48                               | 2,42  | 3,88                                 |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 2,99   | 7,04  | 0,62                               | 5,06  | 1,32                                 |
| $\text{MgO}$            | 7,2  | 2,43  | 2,36                               | 4,49  | 1,42                                 |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 1,42   | 5,45  | 0,74                               | 2,53  | 1,04                                 |
| $\text{SO}_3$           | 2,91   | 1,19  | 0,74                               | 1,84  | 1,04                                 |
| $\text{Na}_2\text{O}$   | 1,6  | 1,2   | 4,84                               | 0,16  | 0,09                                 |
| $\text{TiO}_2$          | 0,4  | 0,55  | 0,12                               | 0,29  | 0,05                                 |
| Sd                      | 0,1  | 0,09  | 0,1                                | 0,08  | 0,15                                 |
| Cl                      | 0,03   | 0,06  | -                                  | 0,64  | 0,06                                 |



Tablo 4. Beş Farklı Biyokütlenin Kül Ergime Sıcaklığı Değerleri

| °C       | Kök               | Çam kapağı                                    | Kavak kapağı                       | Mısır sapı                                    | Saz Kamışı                           |
|----------|-------------------|---|------------------------------------|---|--------------------------------------|
| Referans | (Wilén vd., 1996) | (Tortosa Masia vd., 2007; Vassilev vd., 2014) | (Vassilev vd., 2014; Bryers, 1996) | (Tortosa Masia vd., 2007; Vassilev vd., 2014) | (Vassilev vd., 2014; Moilanen, 2006) |
| IDT      | 1175              | 1256  | 1329                               | 1126  | 1256                                 |
| ST       | 1205              | -   | -                                  | -   | -                                    |
| HT       | 1230              | 1402  | 1447                               | 1214  | 1402                                 |
| FT       | 1250              | 1430  | 1458                               | 1221  | 1430                                 |

Analiz sonuçları literatür verileriyle genel olarak uyumludur.  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ve  $\text{SO}_3$  gibi ana bileşenlerde benzer eğilimler görülürken, kök, çam kapağı ve kavak kapağındaki  $\text{Na}_2\text{O}$  değerleri öne çıkan farklılıklardır. Ayrıca,  $\text{Cl}$  içeriği özellikle mısır sapı ve saz kamışında önemli ölçüde değişmektedir. Açık havada depolama neticesinde yağışlar nedeniyle yıkama etkisi ile oluşan farklılıklar ve taşıma esnasında numunelerde oluşabilecek yabancı madde ve toprak kaynaklı olabilir. Kül ergime sıcaklıkları analizinde ise, genelde IDT, ST, HT ve FT değerleri benzerlik göstermektedir. Tablo 2'den de görüleceği üzere en düşük kül ergime sıcaklıkları mısır sapı için bulunmuştur. Kül ergime sıcaklığı, biyokütle yakıtlarının termal özelliklerini belirleyen kritik bir parametre olarak öne çıkar. Bu parametre, yakıtın yanması sırasında oluşan külün termal davranışını belirler ve dolayısıyla kazan performansını etkiler. Düşük kül ergime sıcaklığı, külün kazan içinde daha az yapışkan bir tabaka oluşturmasını sağlayarak temizlik işlemlerini kolaylaştırabilir. Ancak, bu durum aynı zamanda külün yapışmasına ve kazan performansını olumsuz etkileyebilecek sertleşmesine de neden olabilir. Yüksek kül ergime sıcaklığı ise külün daha stabil bir tabaka oluşturmasına yardımcı olabilir ve dolayısıyla kazan performansını artırabilir. Ancak, aşırı yüksek kül ergime sıcaklığı da külün yapışmasına ve temizlik işlemlerinin zorlaşmasına neden olabilir. Bu nedenle, kül ergime sıcaklığının yakıtın performansı, verimliliği ve bakım gereksinimleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmektedir. Bu durum, biyokütle yakıtlarının seçimi ve işlenmesi sürecinde dikkatle ele alınmalı ve kazan tasarımında göz önünde bulundurulmalıdır. Bu veriler literatür verileri ile de oldukça uyumlu çıkmıştır. Elde edilen kül içeriği ve kül ergime sıcaklığı sonuçları, literatürdeki bulgularla genel bir uyumluluk göstermektedir.  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ve  $\text{SO}_3$  gibi ana bileşenlerin oranlarında ben-

zer eğilimler gözlemlenmiştir. Fakat kök, çam kapağı ve kavak kapağındaki  $\text{Na}_2\text{O}$  değerleri, literatürden farklılık göstermektedir. Ayrıca Cl içeriği, özellikle mısır sapı ve saz kamışında önemli ölçüde değişiklik göstermektedir. Bu farklılıklar, açık havada depolama sırasında yağışların neden olduğu yıkama etkisi ve taşıma esnasında numunelere bulaşan yabancı madde ve toprak kaynaklı olabilir. Kül ergime sıcaklığı analizlerinde de IDT, ST, HT ve FT değerleri literatürle benzerlik göstermektedir. Tablo 2'den de görülebileceği üzere en düşük kül ergime sıcaklıkları mısır sapı için bulunmuştur. Bu bulgu da literatürdeki verilerle uyumludur. Sonuç olarak, bu çalışma farklı biyokütle türlerinin kül içeriği ve ergime özellikleri arasındaki varyasyonları anlamak için değerli bir referans kaynağı sunmaktadır. Elde edilen veriler, biyokütleden enerji üretim süreçlerinin optimizasyonuna katkı sağlayabilir.

## 2.2 Cüruflaşma ve Kirlenme İndeksleri

Sıcak yüzeylerde kül birikmesi olayı cüruflaşma (slagging) ve kirlenme (fouling) olarak tanımlanmıştır. Cüruflaşma, kazanın fırın duvarlarında veya radyant ısıya maruz kalan konveksiyon yüzeylerinde erimiş veya kısmen erimiş birikintilerin oluşumu olarak tanımlanır.

Kirlenme (fouling) ise kızdırıcı ve ara ısıtıcılar gibi konveksiyon ısı yüzeylerinde birikinti oluşumu olarak tanımlanır. Cüruflanma, enerji üretimi sırasında veya diğer termal işlemlerde yanma sonucu oluşan cürufun yüzeylerde birikmesi veya yapışması olayıdır. Yanan yakıtın içerisinde bulunan mineral maddeler, yanma süreci sırasında çeşitli bileşikler halinde serbest kalır. Bu bileşikler, havada taşınarak yüzeylere çarparak veya akışkanlarla birleşerek birikintilere dönüşebilir. Cüruflaşma; kazanlar, fırınlar, bacalar, ısı eşanjörleri gibi ekipmanların iç yüzeylerinde birikime neden olurlar. Enerji transferini engelleyebilir, akışkanların akış direncini artırabilir ve ekipmanlarda hasara yol açabilirler. Kirlenme, endüstriyel süreçlerde akışkanların temas ettiği yüzeylerde biriken tortu, kir veya birikintilerin oluşumu anlamına gelir. Akışkanlar içinde bulunan katı partiküllerin, çökelme, kristalleşme, kimyasal reaksiyonlar veya biyolojik etkileşimler sonucu yüzeylere yapışması ve birikmesiyle meydana gelir. Kirlenme, boru hatları, ısı eşanjörleri, reaktörler, soğutma sistemleri ve diğer ekipmanlarda akış direncini artırabilir, termal verimi düşürebilir ve işletme maliyetlerini artırabilirler. Her iki problem de endüstriyel süreçlerde önemli sorunlar oluşturur ve düzenli bakım ve temizlik gerektirirler. Cüruflanma ve kirlenme, ekipmanların performansını olumsuz etkiler, enerji verimliliğini azaltır ve işletme maliyetlerini artırır. Bu nedenle, düzenli temizlik, bakım ve uygun işletme yöntemleri ile bu sorunlar minimize edilmeye çalışılmaktadır. Bu çalışmada dikkate alınan cüruflaşma ve kirlenme indeksleri, kül bileşimi ve/veya eriyebilirlik sıcaklıkları korelasyonlarına dayanmaktadır. Literatürde daha çok kömür yakıtları için kullanılan bu endeksler aşağıda kısaca açıklanmıştır.

### **Silika İçeriği (SiO<sub>2</sub>)**

Yakıtta bulunan silika miktarının yüzdesel olarak ifadesidir. Silika, kül oluşumunda belirleyici bir faktör olup, yüksek silika içeriği cüruflaşma ve kirlenme riskini artırabilir. Biyokütle külünün silika içeriğinin cüruf oluşumunda etkili olduğu bilinmektedir. Bu neden ile biyokütle külünün silika içeriği cüruf göstergesi olarak kullanılmaktadır [Ohman vd., 2004]. Literatürde verilen bilgilerde kritik Si içeriğinin (SiO<sub>2</sub> olarak verilir) yakıt külündeki değişiminin cüruflaşma üzerindeki etkisi Tablo 5’de verilmiştir. Bu değer %20’nin altında olması durumunda cüruf oluşumunu en az olmaktadır [Gilbe vd., 2008].

### **Klor İçeriği (Cl)**

Yakıtta bulunan klor miktarını yüzdesel olarak ifade eder. Klor, yüksek sıcaklıklarda agresif bir bileşik haline gelerek korozyon ve cüruflaşma reaksiyonlarını tetikleyebilir. Klor, potasyum ve silika arasındaki reaksiyonları kolaylaştırıcı bir rol oynayarak, tipik kazan çalışma sıcaklığı olan 800–900 °C’de erimiş cam benzeri tortu ve cürufaların oluşumuna neden olmaktadır. (Jenkins vd., 1996; Llorente vd., 2006). Kül içeriğinde yakıttaki klor içeriği için farklı aralıklar, biyokütle yakıtlarının cüruf eğilimi ile ilişkilendirilmiştir (Tortosa Masia vd., 2007; Pronobis, 2005). Bu değer Tablo 5’den de görüldüğü gibi en düşük risk için %0.2’nin altı olarak verilmiştir.

### **Bazik/Asit Oranı (B/A)**

Kül bileşenlerinin bazik ve asidik karakteristiklerinin oransal bir göstergesidir. Düşük B/A oranları asidik karakterli kül oluşumunu, yüksek oranlar ise bazik karakterli kül oluşumunu işaret edebilir. Küldeki bazik bileşikler (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + CaO + MgO + Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) kül erime sıcaklığını düşürür (Munir, 2010). Bu bileşenler, B grubu olarak sınıflandırılır çünkü P2O5 fraksiyonu, uçucu küldeki erime sıcaklığını düşürebilen düşük erime noktalı fazların gelişimini artırabilir. Bu nedenle, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> içeriği de B grubuna dahil edilir. Asidik bileşenler, erime sıcaklığı daha yüksek olan (SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + TiO<sub>2</sub>) gibi bileşenlerdir, A grubu olarak adlandırılır. Bazik bileşiklerin asidik bileşiklere oranı Tablo 5’de verilen aralıklara göre kül biriktirisi davranışını tahmin etmek için bir indeks olarak kabul edilmiştir (Tortosa Masia vd., 2007; Pronobis, 2005; Vamvuka ve Zografos, 2004). B/A’nın 0,5’den küçük olması istenir.

$$B/A = \frac{(Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O + P_2O_5)}{(SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2)} \quad (1)$$

### **Yatak Aglomerasyon İndeksi (BAI)**

Yakıtın yanması sırasında yatağın içinde oluşabilecek aglomerasyon riskini belirlemek için kullanılır. Yüksek BAI değerleri, aglomerasyon ve tıkanma problemlerinin olasılığını artırabilir. Akışkan yataklarda biyokütlenin yanması sırasında en büyük sorun yatak aglomerasyonudur (Werther vd., 2000). Bu nedenle, akışkan

yataklı reaktörlerde kül bileşimini aglomerasyonlarla ilişkilendiren bir yatak aglomerasyonu indeksi geliştirilmiştir (Vamvuka ve Zografos, 2004). BAI'nin <0.15 olması yüksek risk olarak tanımlanmıştır.

$$BAI = (Fe_2O_3)/(Na_2O+K_2O) \quad (2)$$

### **Babcock endeksi (Rs)**

Küldeki silika ve alümina oranlarının oranını belirler. Yüksek Rs değerleri, küldeki silika içeriğinin arttığını ve dolayısıyla cüruflaşma riskinin yüksek olduğunu gösterebilir. Rs indeksi B/A oranına ve küldeki kükürt oranına dayalıdır (Pronobis, 2005). Biyokütle yakıtlarında kükürt yüzdesi çok düşük olduğu için biyokütle yakıtları için ihmal edilebilir (Miles vd., 1996). Farklı risk aralıkları Tablo 5'de gösterilmiştir.

$$Rs = (B/A) \cdot S^d \quad (3)$$

### **Kül eriyebilirlik indeksi (AFI)**

Külün belirli bir sıcaklıkta erime eğilimini ifade eder. Düşük AFI değerleri, külün yüksek erime direncine sahip olduğunu gösterir. Kül eriyebilirlik indeksi kül erime sıcaklığı değerlerinden IDT ve HT'ye dayanmaktadır (Gray ve Moore, 1974). İndeks, denklem (4) ile belirlenmiş ve aralık değerleri Tablo 5'te gösterilmiştir.

$$AFI = (4 \cdot IDT + HT)/5 \quad (4)$$

### **Kirlenme indeksi (Fu)**

Kazan yüzeylerinde oluşabilecek kirlenme riskini belirlemek için kullanılır. Yüksek Fu değerleri, kirlenme ve tıkanma riskinin arttığını gösterebilir. Kirlenme indeksi, B/A oranını ve alkali ( $Na_2O + K_2O$ ) içeriğini dikkate almaktadır (Pronobis, 2005). Daha yüksek Fu değerleri, daha yüksek kirlenme eğilimlerine karşılık gelmektedir (Tablo 5).

$$Fu = (B/A) \cdot (Na_2O + K_2O) \quad (5)$$

### **Cüruf viskozite indeksi (Sr)**

Cürufun akışkanlık özelliklerini belirler. Yüksek Sr değerleri, cüruflaşma eğiliminin arttığını ve bu durumun kazan performansını olumsuz etkileyebileceğini gösterebilir. Bu indeks, alkali bileşikler dışında, küldeki bazik bileşiklerin silis yüzdesini hesaplar. Yüksek Sr değerleri, yüksek viskoziteyi ve bu nedenle düşük cüruf oluşum eğilimini ifade eder (Pronobis, 2005).

$$Sr = \text{SiO}_2 \cdot 100 / (\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO}). \quad (6)$$

### **Yumuşama sıcaklığı (ST)**

Külün termal deformasyon veya erimeye başladığı sıcaklık noktasını belirler. Düşük ST değerleri, külün düşük termal stabiliteye sahip olduğunu gösterebilir. Cüruf tahmini modelleri, biyokütle yakıtlarının yumuşama sıcaklığını Tablo 5'teki sınırlara göre değerlendirmektedir (Yu vd., 2014).

### **İlk deformasyon sıcaklığı (IDT)**

Külün yapısındaki ilk deformasyonun başladığı sıcaklık noktasını belirler. IDT, külün termal stabilitesi ve dayanıklılığı hakkında bilgi sağlar. Biyokütle, yanma esnasında organik formda ayrışarak düşük erime sıcaklıklarına sahip bileşikler oluşturan potasyumu içermektedir (Miles vd., 1996). Bu nokta dikkate alındığında, IDT (sinterlemenin başladığı yer) ile K<sub>2</sub>O içerikleri arasında bir ilişki bulunmuştur (Werther vd., 2000; Gupta vd., 1998). Bu korelasyona karşılık gelen, IDT değerlerine bağlı olarak sinterleme eğilimleri için farklı aralıklar Tablo 5'de özetlenmiştir (Ohman vd., 2004).

Tablo 5. Cüruflaşma ve Kirlenme İndisleri

| İndeks               | Aralık Değer | Cüruflaşma ve Kirlenme Eğilimi | Referans                                  |
|----------------------|--------------|--------------------------------|---|
| SiO <sub>2</sub> (%) | < 20         | Düşük                          | (Ohman vd., 2004)                         |
|                      | 20-25        | Orta                           |   |
|                      | > 25         | Yüksek                         |   |
| Cl (%)               | < 0,2        | Düşük                          | (Tortosa Masia vd., 2007; Pronobis, 2005) |
|                      | 0,2-0,3      | Orta                           |   |
|                      | 0,3-0,5      | Yüksek                         |   |
|                      | > 0,5        | Çok Yüksek                     |   |
| B/A                  | < 0,5        | Düşük                          | (Munir, 2010)                             |
|                      | 0,5 - 1      | Orta                           |   |
|                      | 1 - 1,75     | Yüksek                         |   |
|                      | > 1,75       | Çok Yüksek                     |   |
|                      | < 0,15       | Yüksek                         |   |
| B<br>Rs              | A            | I                              | (Garcia-Maraver vd., 2017)                |
|                      | < 0,6        | Düşük                          |   |
|                      | 0,6-2        | Orta                           |   |
|                      | 2-2,6        | Yüksek                         |   |
|                      | > 2,6        | Çok Yüksek                     |   |
|                      | > 1342       | Düşük                          |   |
| AFI                  | 1232-1342    | Orta                           | (Dunnu, Maier & Scheffknecht, 2010)       |
|                      | 1052-1232    | Yüksek                         |   |
|                      | < 1052       | Çok Yüksek                     |   |
| Fu                   | < 0,6        | Düşük                          | (Garcia-Maraver vd., 2017)                |
|                      | 0,6 - 40     | Orta                           |   |
|                      | > 40         | Yüksek                         |   |
| Sr                   | > 72         | Düşük                          | (Pronobis, 2005)                          |
|                      | 65-72        | Orta                           |   |
|                      | < 65         | Yüksek                         |   |
| ST (°C)              | > 1390       | Düşük                          | (Yu vd., 2014)                            |
|                      | 1250 -1390   | Orta                           |   |
|                      | < 1250       | Yüksek                         |   |
| IDT (°C)             | > 1100       | Düşük                          | (Ohman vd., 2004)                         |
|                      | 900-1100     | Orta                           |   |
|                      | < 900        | Yüksek                         |   |

### 3. Sonuçlar ve Tartışma

Tablo 1 ve 2’de verilen analiz sonuçlarına göre cüruflaşma ve kirlenme indeksleri, Tablo 5’de verilen aralık değerler üzerinden hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar beş farklı biyokütle için iki farklı zaman diliminde Tablo 6’da gösterilmiştir.

Tablo 6. Cüruflanma ve Kirlenme İndekslerinin Değerleri

| Cüruflanma ve kirlenme indeks değerleri - NİSAN 2020 |                  |       |      |      |      |        |       |       |      |      |
|--|------------------|-------|------|------|------|--------|-------|-------|------|------|
| Biyokütle Çeşidi                                     | SiO <sub>2</sub> | Cl    | B/A  | BAI  | Rs   | AFI    | Fu    | Sr    | ST   | IDT  |
| KÖK  | 22,9             | 0,022 | 1,95 | 0,51 | 0,16 | 1248,2 | 16,61 | 33,53 | 1253 | 1245 |
| ÇAM KAPAK  | 43               | 0,015 | 0,79 | 0,16 | 0,06 | 1412   | 13,05 | 66,94 | 1494 | 1391 |
| KAVAK KAPAK  | 6,41             | 0,02  | 9,31 | 0,17 | 0,84 | 1489,6 | 94,50 | 9,07  | 1500 | 1487 |
| MISIR SAPI   | 43,3             | 0,264 | 0,78 | 0,17 | 0,07 | 1182,2 | 12,64 | 67,06 | 1182 | 1169 |
| SAZ KA-MIŞI  | 83,1             | 0,249 | 0,12 | 0,05 | 0,01 | 1324,8 | 0,73  | 95,98 | 1492 | 1281 |

| Cüruflanma ve kirlenme indeks değerleri - NİSAN 2021 |                  |       |      |      |      |        |       |       |      |      |
|--|------------------|-------|------|------|------|--------|-------|-------|------|------|
| Biyokütle Çeşidi                                     | SiO <sub>2</sub> | Cl    | B/A  | BAI  | Rs   | AFI    | Fu    | Sr    | ST   | IDT  |
| KÖK  | 19,4             | 0,012 | 2,00 | 0,47 | 0,16 | 1175,4 | 16,87 | 31,57 | 1200 | 1168 |
| ÇAM KAPAK  | 16               | 0,013 | 2,87 | 0,77 | 0,34 | 1312   | 12,74 | 21,55 | 1319 | 1307 |
| KAVAK KAPAK  | 33,8             | 0,008 | 1,01 | 0,77 | 0,11 | 1192,2 | 7,29  | 48,46 | 1209 | 1186 |
| MISIR SAPI   | 52,7             | 0,06  | 0,52 | 0,68 | 0,07 | 1211,6 | 3,14  | 67,96 | 1207 | 1195 |
| SAZ KA-MIŞI  | 74,4             | 0,157 | 0,17 | 0,36 | 0,02 | 1412   | 0,57  | 89,83 | 1458 | 1390 |

Renklerin Lejantı

|       |      |        |            |
|-------|------|--------|------------|
| DÜŞÜK | ORTA | YÜKSEK | ÇOK YÜKSEK |
|-------|------|--------|------------|

Genel olarak, farklı dönemlerde farklı biyokütle yakıtlarına uygulandığında mevcut indisler arasında bir ilişki olmadığı sonucuna varılabilir. Hatta sonuçlar kendi içerisinde çelişki barındırmaktadır. Örneğin, Nisan 2021 döneminde kök ve çam kapak analiz değerlerine indis hesaplamaları uygulandığında, kül birikin-

tileri üretme hususunda B/A indeksine göre çok yüksek, Sr indeksine göre ise yüksek risk eğilimine sahip olduğu öngörülmektedir. Fakat aynı dönemde kök ve çam kapak için hesaplanan  $\text{SiO}_2$ , Cl, Rs, IDT indislerine göre düşük seviye cüruf ve kirlenme eğilimi, Fu indisine göre ise orta derece cüruf ve kirlenme eğilimi göstermektedir. Bu çelişkili tahminler Tablo 6'da gösterilen farklı dönemlerde alınan hemen hemen tüm biyokütelerde bulunmaktadır. Silolardan alınan farklı zaman dilimlerine ilişkin biyokütle numuneleri ayrı ayrı ve birlikte incelenmiştir. Fakat indis hesaplamaları arasında oluşan çelişkili sonuçlar nedeniyle herhangi bir korelasyon oluşturulamamıştır.

### **Silika İçeriği ( $\text{SiO}_2$ )**

Silika içeriği için  $\text{SiO}_2 > \%25$  değeri yüksek risk olarak tanımlanmıştır. En yüksek silika yüzdesi hem Nisan 2020 hem de Nisan 2021 değerlerinde bu kritik değer için çok üzerinde çıkmıştır. Biyokütle yakıtlarındaki yüksek silika seviyeleri, yakıtın depolama koşullarında toprak veya kumla karışımından kaynaklanma ihtimali mevcuttur.  $\text{SiO}_2$  içeriğine ilişkin indis, mısır sapı ve saz kamışı biyokütlerinde kül birikintileri üretme eğilimi göstermiştir. Bu  $\text{SiO}_2$  değerleri, bu tür biyokütlerdeki  $\text{SiO}_2$  içeriğini bitkinin sağlığına veya sertliğine katkısıyla ilişkilendiren diğer çalışmalarda elde edilen verilerle uyumludur. Nisan 2020 döneminde alınan numunelerde kavak kapak  $\text{SiO}_2$  içeriği bakımından 6,41 olarak hesaplanmıştır. Nisan 2021 döneminde yapılan analizlerde ise kavak kapak için bu değer 33,8'e yükseldiği, cüruf ve kirlenme risk eğiliminin Nisan 2020'de düşük seviyede iken, Nisan 2021'de yüksek risk grubunda olduğu Tablo 6'da görülmektedir. Bu durumun temel nedeni, biyokütelerin silika içeriğinin taşıma, yükleme, açık havada depolama vb. dış etmenler ile biyokütle yüzeyinde biriken topraktan kaynaklanan kirlenme nedeniyle artmasıdır.

### **Klor içeriği (Cl)**

Tarımsal biyoküteler, mısır sapı ve saz kamışı Nisan 2020 döneminde orta seviyede bir kül biriktirme riski barındırırken, odunsu biyoküteler daha düşük risk eğilimi göstermiştir. Nisan 2021 döneminde alınan numunelerde ise tüm biyoküteler düşük risk grubu içerisinde yer almıştır. Tarımsal biyokütelerde klor yüzdesinin düşümüne açıkta depolama esnasında meydana gelen yağışların (yıkama etkisi nedeni ile) etki edebileceği öngörülmektedir.

### **Bazik asit bileşik oranı (B/A)**

B/A oranı göz önüne alındığında, çalışmamızda yer alan biyokütlenin hemen hemen tümünün, daha düşük B/A değerleri sunduğu, bazı dönemlerde ise saz kamışı dışında, diğer yakıtların cüruflaşmaya neden olan orta, yüksek ila aşırı yüksek bir eğilim gösterdiği görülmüştür (Tablo 6). Dolayısıyla saz kamışının cüruf veya kirlenmeye neden olma şansı daha düşüktür. Bu sonuçlar, saz kamışının daha yüksek  $\text{SiO}_2$  içeriğiyle ilişkilendirilebilir. Bu durum, asidik bileşiklerin artmasına ve dolayısıyla daha yüksek kül füzyon sıcaklığına işaret etmektedir (Niu



vd., 2014). Özetle, bu indeks için elde edilen bulgular, SiO<sub>2</sub> içeriğinin cüruf oluşumundan sorumlu ana bileşen olarak değerlendirilmesiyle çelişmektedir. Saz kamışı Nisan 2020 ve Nisan 2021 dönemlerinde en yüksek SiO<sub>2</sub> içeriğine sahipken, B/A indis hesaplamalarında en düşük cüruf ve kirlenme eğilimi göstermiştir.

### **Yatak aglomerasyon indeksi (BAI)**

Bazı araştırmalar, 760°C–900 °C sıcaklıklardaki akışkan yataklı yakıcılardaki yatak aglomerasyonlarının, özellikle silikanın etkisi altında olduğunu vurgulamaktadır (Miles vd., 1996; Teixeira vd., 2012; Skrifvars vd., 1999). Bununla birlikte, BAI indeksi, kül biriktirme ve cüruf oluşumunu tahmin etmede bu unsuru dikkate almaz. Tablo 6'da BAI indeksine göre yapılan farklı dönemlerde alınan biyokütle numunelerinin risk parametreleri birbirleri ile çelişki göstermektedir.

### **Babcock indeksi (Rs)**

Kükürt, alkali ve toprak alkali (K, Ca) içeren yakıtlarla birlikte yanıldığında sülfat oluşabilir, ancak bu elementler silikatlarla bağlandıklarında bu durum gerçekleşmez (Tortosa Masia vd., 2007). Bu nedenle SiO<sub>2</sub>'nin eklenmesi, biyokütle kül füzyon sıcaklığını artıran önemli miktarda K ve Ca silikat oluşumuna neden olabilir. Tekrar belirtmek gerekirse, SiO<sub>2</sub>'nin mevcudiyeti, 900 °C gibi tipik yanma sıcaklıklarında kararsız olan K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve CaSO<sub>4</sub> gibi sülfür açısından zengin birikintilerin oluşumunu engellemeye yardımcı olabilir. (Garcia-Maraver vd., 2017). SiO<sub>2</sub>'yi bir biyokütle yakıtının cüruf eğilimini azaltabilen bir bileşen olarak ele alan bu açıklama, B/A indeksini bir tahmin modeli olarak desteklemektedir. Ancak, B/A indeksi, S içeriği ile tamamlandığında ve Rs indeksi ile birleştirildiğinde, sonuçlar önemli ölçüde değişmektedir (Tablo 6). Bu indeksin sonuçlarına göre, çok düşük SiO<sub>2</sub> içeriğine sahip istisnai biyokütlenin, diğerlerine kıyasla daha yüksek cüruf oluşturma eğilimleri gösterdiği görülmektedir.

### **Kül eriyebilirlik indeksi (AFI)**

AFI indeksi, kül bileşikleri arasındaki olası sinerjileri göz ardı ederek, yakıtların gerçek kül eritme davranışına yakın bir karşılık gelen, biyokütle için en umut verici indekslerden biri olarak kabul edilir. Ancak, daha önce yapılan çalışmalar, kül eriyebilirlik testi sırasında kullanılan çalışma koşullarının değişmesi durumunda farklı erime sıcaklıklarının elde edilebileceğini göstermiştir. Önceki çalışmalar, tarımsal biyokütlede olduğu gibi, yüksek silis içeriğine sahip biyokütle için özel sorunların ortaya çıkabileceğini göstermiştir (Garcia-Maraver vd., 2017). Tablo 6'da sonuçlar incelendiğinde mısır sapı biyokütlesinin her 2 dönemde de yüksek risk teşkil ettiği öngörülürken diğer biyokütlelerde çelişkili sonuçlar ortaya çıkmıştır.

### **Kirlenme indeksi (Fu)**

Klorun bulunmadığı veya düşük seviyede olduğu durumlarda, alkali, tortu oluşumunda kritik bir rol oynar. Potasyum ve sodyum, biyokütlede organik formda bulunur, ancak yanma sürecinde bu elementler buharlaşarak ayrışır, sonuç olarak

çok düşük erime sıcaklıklarına sahip ötektik bileşikleri oluştururlar. Bu durum, cüruflaşma ve kirlenme eğilimlerini artırır (Tortosa Masia vd., (2007); Miles vd., 1996)). B/A indeksinin  $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $\text{K}_2\text{O}$  toplamı ile tamamlanmasının nedeni budur. Ancak bu indeks için Tablo 6'da elde edilen sonuçlar, genel olarak tarımsal biyokütlelerin odunsu biyokütlelere göre cüruf veya kirlenmeye daha duyarlı olduğunu gösteren önceki sonuçlar ve deneyimlerle tutarsızdır (Bryers, 1996).

### **Cüruf viskozite indeksi (Sr)**

Sr indeksi, Denklem 6'da belirtildiği üzere, silikayı kül birikiminden en az sorumlu bileşenlerden biri olarak kabul eder. Tarımsal biyokütleler, odunsu biyokütlere nazaran daha düşük bir cüruf eğilimi gösterir. Tablo 6'da verilen sonuçlar, dikkate alınan diğer bazı indislerin ve deneysel sonuçların tamamen tersidir. Örneğin; Nisan 2021 döneminde  $\text{SiO}_2$  içeriği en yüksek olan saz kamışı ve mısır sapı  $\text{SiO}_2$  indisine göre yüksek cüruf ve kirlenme risk eğilimi gösterirken aynı dönemde aynı biyokütle türleri Sr indisine göre düşük ve orta seviye risk eğilimi göstermektedir.

### **Yumuşama sıcaklığı (ST)**

Biyokütle küllerinin eriyebilirliğine özellikle yumuşama sıcaklığı (ST)'ye ilişkin çalışmalar literatürde azdır. Önceki çalışmalar,  $\text{SiO}_2$  ilavesinin, ST'yi düşüren ve dolayısıyla biyokütle kül füzyon sıcaklığını düşüren önemli miktarda K-silikat oluşumuna yol açtığını belirtmektedir (Niu vd. 2014). Tablo 6'da biyokütlere ilişkin verilen sonuçlar değerlendirildiğinde ise  $\text{SiO}_2$  içeriği ile ST değeri arasında doğrudan bir ilişki çıkarılamaz.

### **İlk deformasyon sıcaklığı (IDT)**

IDT, silikat erimesiyle indüklenen cüruf için bir değerlendirme indisi olarak hizmet edebilir, çünkü daha yüksek IDT, silikat erimesiyle indüklenen cüruf oluşumunun oluşma potansiyelini azaltır (Niu vd., 2014). Tablo 6'da gösterilen Nisan 2020 ve Nisan 2021 döneminde analiz edilen numune sonuçlardan anlaşılacağı üzere, saz kamışı ve mısır sapı gibi genellikle daha yüksek  $\text{SiO}_2$  içeriğine sahip biyokütleler, daha düşük IDT değerlerine sahip olanlar olacaktır. Diğer taraftan farklı dönemlerde yapılan analiz sonuçları üzerinden yapılan değerlendirmede çelişkili sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Çelişkili sonuçlar, aynı biyokütle türlerinin farklı dönemlerdeki analizlerinde değişen değerlerin ortaya çıkmasıyla ilgilidir. Örneğin, Tablo 6'da gösterilen Nisan 2020 ve Nisan 2021 dönemlerinde analiz edilen numuneler arasında farklı  $\text{SiO}_2$  içeriği ve cüruflaşma indeksi değerleri görülmektedir. Aynı biyokütlenin farklı dönemlerde farklı analiz sonuçlarına sahip olması, muhtemelen numune alımı sırasında yaşanan değişiklikler veya analiz yöntemlerindeki farklılıklardan kaynaklanabilir. Bu tür çelişkiler, analiz sürecindeki standartlaşma eksikliği veya dış etkenlerin etkisi gibi faktörlerden kaynaklanabilir ve sonuçların doğruluğunu etkileyebilir. Bu nedenle, benzer analizlerin farklı dönemlerde tekrarlanması ve sonuçların karşılaştırılması önemlidir.

ST ile IDT arasındaki sıcaklık farkları, biyokütle cürufunun hareketliliğini etkiler. Bu farkın daha geniş olması, daha yavaş bir kirlenme oranına işaret eder. (Vamvuka ve Zografos, 2004). Bu nedenle, erime sıcaklıkları arasındaki farklar dikkate alındığında cüruf davranışı hakkında daha fazla bilgi elde edilebilir. Tablo 6'dan da görülebileceği üzere, ST ve IDT arasındaki sıcaklık farkları genellikle 100°C'nin altındadır. Bu durum, çoğu biyokütle cürufunun hızla katılışp, hava akışı nedeniyle ısıtma yüzeylerinde kolayca bir cüruf tabakası oluşturabileceği anlamına gelmektedir.(Li vd., 2013).

## Sonuçlar

Katı biyokütle yakıtlarının kullanımını kısıtlayan başlıca zorluklardan biri, kül yönetimidir. Kazanlarda hasarları azaltmak için yakıtların kalitesi analiz edilmektedir. Ancak temsili numunelerin toplanmasının zorluğu nedeniyle kalite kontrolü kritik bir öneme sahiptir. Örneğin 1 gram numune, 1000 tonluk bir yakıt dağılımını analiz etmek için kullanılabilir. Bu nedenle genellikle analiz değerlerinde oluşabilecek hataların %80'e kadar numune alımına, %15'i numune işlemeye %5'e kadar olan kısmı ise analize bağlı değişkenlik göstermektedir (Strömberg & Herstad Svard, 2012).

IDT şndeks değerleri açısından incelendiğinde tüm biyoküteller 1168-1390 değeri arasında (>1100) düşük risk eğilimi gösteren grupta yer almaktadır. Cl indeksi incelendiğinde Nisan 2020 döneminde mısır sapı ve saz kamışı 0,264 ve 0,249 değerle orta derecede bir risk eğilimi barındırırken, Nisan 2021 döneminde 0,06 ve 0,157 değer ile düşük risk grubunda yer almıştır. SiO<sub>2</sub> indeksi içeriği incelendiğinde ise saz kamışı 74,4 ile en yüksek, mısır sapı 52,7, kavak kapak ise 33,8 ile yüksek SiO<sub>2</sub> içeriği yüksek cüruf ve kirlenme eğilimi riski barındırmaktadır. Fakat SiO<sub>2</sub> içeriğinin her indekste risk parametresini artırıcı bir faktör olduğu söylenemez. Örneğin Nisan 2021 döneminde yüksek risk eğilimi gösteren ve SiO<sub>2</sub> içeriği yüksek saz kamışı, mısır sapı ve kavak kapak, Cl, B/A, BAI, Fu, Sr ve IDT indekslerinde düşük ve orta risk grubunda yer almaktadır.

Bu çalışma, açık hava koşullarında depolanan, farklı zaman dilimlerinde numuneler alınarak analiz edilen 5 farklı tarımsal ve ormansal biyokütlenin (mısır sapı, saz kamışı, kök, çam kapağı, kavak kapağı) cüruf oluşturma ve kirlenme eğilimlerini net bir şekilde ilişkilendirebilecek genel bir formülün olmadığını göstermektedir. Kömür külü birikintilerini tahmin etmek için geleneksel olarak kullanılan katsayılar, biyokütle yakıtlarına uygulandığında karışık sonuçlar verir. Sonuç olarak, bu indislerden bazılarını dayanarak biyokütle yakıtlarının cüruflaşma ve kirlenme eğilimlerini tahmin eden araştırma bulgularının sorgulanması gerekmektedir. Yeni indislerin oluşturulması, yalnızca yakma teknolojisi ve koşullarının etkisi değil, aynı zamanda katı biyokütle yakıtlarının heterojenliği ve fizikokimyasal karakterizasyonları da dikkate alınarak, gerçek yanma deneyimlerinden elde edilen gerçekçi sonuçlara dayanmalıdır. Sonuç olarak, farklı yakma

teknolojileri ve çalışma koşulları bağlamında indisler oluşturmak ve doğrulamak için kullanılan hammaddelerin özelliklerini de dikkate alarak, gerçek yanma verileri ile daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

### Kaynakça

- Aho, M., Silvennoinen, J. (2004). Preventing chlorine deposition on heat transfer surfaces with aluminum-silicon rich biomass residue and additive. *Fuel*, 83(9), 1299-1305. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.01.011>.
- Badem, A. & Olgun, H. (2023). Saha Koşullarında Depolanan Biyokütle Yakıtlarında Oluşan Kuru Madde Kayıplarının İncelenmesi. *Mühendis ve Makina*, 64 (712), 549-575. doi: <https://doi.org/10.46399/muhendismakina.1241446>
- Baxter, L. L., Miles, T. R., Jenkins, B. M., Milne, T., Dayton, D., Bryers, R. W., et al. (1998). The behavior of inorganic material in biomass-fired power boilers: field and laboratory experiences. *Fuel Processing Technology*, 54(1), 47-78. doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(97\)00060-X](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(97)00060-X).
- Behcet, R., & Yakın, A. (2020). Malatya İli Trafik Kaynaklı Hava Kirleticilerinin Emisyon Envanteri. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 10(4), 2783-2790. doi: <https://doi.org/10.21597/jist.704308>
- Bryers, R. W. (1996). Fireside slagging, fouling, and high-temperature corrosion of heat-transfer surface due to impurities in steam-raising fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 22(1), 29-120. doi: [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(95\)00012-7](https://doi.org/10.1016/0360-1285(95)00012-7).
- Cuiping, L., Chuangzhi, W., & Haitao, H. (2004). Chemical elemental characteristics of biomass fuels in China. *Biomass and Bioenergy*, 27(2), 119-130. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.01.002>.
- Demirbas, A. (2005). Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Progress in Energy and Combustion Science*, 31(2), 171-192. doi: <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2005.02.002>.
- Dunnu, G., Maier, J., & Scheffknecht, G. (2010). Ash fusibility and compositional data of solid recovered fuels. 17th International Symposium on Alcohol Fuels, 89, 1534-1540. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.09.008>.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2023). Erişim tarihi: [16.10.2023]. Erişim Adresi: [<https://enerji.gov.tr>].
- Fernandez Llorente, M.J., & Carrasco García, J.E. (2005). Comparing methods for predicting the sintering of biomass ash in combustion. *Fuel*, 84(12), 1893-1900. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.04.010>.

- Garcia-Maraver, A., Mata-Schancez, J., Carpio, M., & Perez-Jimenez, J. A. (2017). Critical review of predictive coefficients for biomass ash deposition tendency. *Journal of the Energy Institute*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.02.002>.
- García, R., Pizarro, C., Alvarez, A., & Lavín, A.G. (2015). Study of biomass combustion wastes. *Fuel*, 148 (15), 152-159. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.01.079>.
- Gilbe, C., Ohman, M., Lindström, E., Boström, D., Backman, R., & Samuelsson, R. (2008). Slagging characteristics during residential combustion of biomass pellets. *Energy & Fuels*, 22(4), 3536-3543. doi: <https://doi.org/10.1021/ef800087x>.
- Gray, R.J., & Moore, G.F. (1974). Burning the sub-bituminous coals of Montana and Wyoming in large utility boilers. ASME Paper, 74eWA/FUe1
- Gupta, S.K., Gupta, R.P., Bryant, G.W., & Wall, T.F. (1998). The effect of potassium on the fusibility of coal ashes with high silica and alumina levels. *Fuel*, 77(11), 1195-1201. doi: [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(98\)00016-7](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(98)00016-7).
- Jenkins, B. M., Baxter, L. L., Miles, T. R. Jr., & Miles, T. R. (1998). Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology*, 54(1), 17-46. doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(97\)00059-3](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(97)00059-3).
- Jenkins, B.M., Bakker, R.R., & Wei, J.B. (1996). On the properties of washed straw. *Biomass and Bioenergy*, 10(3-4), 177-200. doi: [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(95\)00058-5](https://doi.org/10.1016/0961-9534(95)00058-5).
- Knudsen, J. N., Jensen, P. A., Dam-Johansen, K. (2004). Transformation and release to the gas phase of Cl, K, and S during combustion of annual biomass. *Energy & Fuels*, 18(5), 1385-1399. doi: <https://doi.org/10.1021/ef049944q>.
- Li, Q.H., Zhang, Y.G., Meng, A.H., Li, L., & Li, G.X. (2013). Study on ash fusion temperature using original and simulated biomass ashes. *Fuel Processing Technology*, 107, 107-112. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.08.012>.
- Llorente, M., Laplaza, J., Cuadrado, R., & Garcia, J. (2006). Ash behaviour of lignocellulosic biomass in bubbling fluidised bed combustion. *Fuel*, 85(9), 1157-1165. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.11.019>.
- Miles, T.R., Baxter, L.L., Bryers, R.W., Jenkins, B.M., & Oden, L.L. (1996). Boiler deposits from firing biomass fuels. *Biomass and Bioenergy*, 10(3-4), 125-138. doi: [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(95\)00067-4](https://doi.org/10.1016/0961-9534(95)00067-4).
- Mohan, D., Pittman, C.U., & Steele, P.H. (2006). Pyrolysis of Wood/Biomass for bio-oil: a critical review. *Energy & Fuels*, 20(20), 848-889. doi: <https://doi.org/10.1021/ef0502397>.

- Moilanen, A. (2006). Thermogravimetric Characterisations of Biomass and Waste for Gasification Processes. VTT Technical Research Centre of Finland. Publications No 607.
- Munir, S. (2010). Potential slagging and fouling problems associated with biomass-coal blends in coal-fired boilers. *Journal of the Pakistan Institute of Chemical Engineers*, 38(1), 1-11.
- Niu, Y., Zhu, Y., Tan, H., Wang, X., Hui, S., & Du, W. (2014). Experimental study on the coexistent dual slagging in biomass-fired furnaces: alkali- and silicate melt-induced slagging. *Proceedings of the Combustion Institute*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2014.06.120>.
- Nordin, A. (1994). Chemical elemental characteristics of biomass fuels. *Biomass and Bioenergy*, 6(6), 339-347. doi: [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(94\)E0031-M](https://doi.org/10.1016/0961-9534(94)E0031-M).
- Obernberger, I., Biedermann, F., Widmann, W., & Riedl, R. (1997). Concentrations of inorganic elements in biomass fuels and recovery in the different ash fractions. *Biomass and Bioenergy*, 12(3), 211-224. doi: [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(96\)00051-7](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(96)00051-7).
- Ohman, M., Boman, C., Hedman, H., Nordin, A., & Boström, D. (2004). Slagging tendencies of wood pellet ash during combustion in residential pellet burners. *Biomass and Bioenergy*, 27(6), 585-596. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.08.016>.
- Pronobis, M. (2005). Evaluation of the influence of biomass co-combustion on boiler furnace slagging by means of fusibility correlations. *Biomass and Bioenergy*, 28(4), 375-383. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.11.003>.
- Skrifvars, B.-J., Ohman, M., Nordin, A., & Hupa, M. (1999). Predicting bed agglomeration tendencies for biomass fuels fired in FBC boilers: a comparison of three different prediction methods. *Energy & Fuels*, 13(2), 359-363. doi: <https://doi.org/10.1021/ef980045p>.
- Strömberg, B. ve Herstad Svard, S. (2012). Branslehandboken. Varmeforsk, Stockholm.
- Szermelveisz, K., Szucs, I., Palotas, A. B., Winkler, L., & Eddings, E. G. (2009). Examination of the combustion conditions of herbaceous biomass. *Fuel Processing Technology*, 90(7-8), 839-847. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.03.001>.
- Teixeira, P., Lopes, H., Gulyurtlu, I., Lapa, N., & Abelha, P. (2012). Evaluation of slagging and fouling tendency during biomass co-firing with coal in a flu-

- idized bed. *Biomass and Bioenergy*, 39(39), 192-203. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.01.010>.
- Tortosa Masia, A. A. A., Buhre, B. J. P. J. P., Gupta, R. P. P., & Wall, T. F. F. (2007). Characterising ash of biomass and waste, Impacts on Fuel Quality and Power Production. *Fuel Processing Technology*, 88(11-12), 1071-1081. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.06.011>.
- Vamvuka, D., & Zografos, D. (2004). Predicting the behavior of ash from agricultural wastes during combustion. In *East Meets West Heavy Oil Technology Symposium (Vol. 83, pp. 2051-2057)*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.04.012>.
- Vassilev, S. V., Baxter, D., & Vassileva, C. G. (2014). An overview of the behaviour of biomass during combustion: part II. Ash fusion and ash formation mechanisms of biomass types. *Fuel*, 117, 152-183. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.09.024>
- Werther, J., Saenger, M., Hartge, E.-U., Ogada, T., & Siagi, Z. (2000). Combustion of agricultural residues. *Progress in Energy and Combustion Science*, 26(1), 1-27. doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(99\)00005-2](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(99)00005-2).
- Wigley, F., Williamson, J., Malmgren, A., & Riley, G. (2007). Ash deposition at higher levels of coal replacement by biomass. *Fuel Processing Technology*, 88(7), 1148-1154. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.06.015>.
- Wilén, C., Moilanen, A., & Kurkula, E. (1996). Biomass feedstock analyses. VTT Publications, 282, Espoo.
- Yakın, A., & Behçet, R. (2019). Van İli Trafik Kaynaklı Hava Kirleticilerinin Emisyon Envanteri. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 9(3), 1567-1573. Doi: <https://doi.org/10.21597/jist.548606>
- Yu, L.Y., Wang, L.W., & Li, P.S. (2014). Study on prediction models of biomass ash softening temperature based on ash composition. *Journal of the Energy Institute*, 87(4), 215-219. doi: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2014.03.011>.
- Zevenhoven-Onderwater, M., Blomquist, J.-P., Skrifvars, B.-J., Backman, R., & Hupa, M. (2000). The prediction of behaviour of ashes from five different solid fuels in fluidised bed combustion. *Fuel*, 79, 1353-1361. Doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-2361\(99\)00280-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-2361(99)00280-X).



## MATRİS MALZEMESİ OLARAK ALÜMİNAYA TİTANYUM VE GRAFEN İLAVELERİNİN ETKİLERİNİN BELİRLENMESİ

Samet YAVUZ<sup>1\*</sup>, Mevlüt GÜRBÜZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ondokuzmayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,  
Samsun ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-6912-279X>

<sup>2</sup> Ondokuzmayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,  
Samsun ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-2365-5918>

### Anahtar Kelimeler

### Öz

$Al_2O_3$ , Ti, grafen,  
sinterleme, mekanik  
özellikler

*Bu derlemede, matris malzemesi olarak alüminaya titanyum ve grafen ilaveleri ile yapılan kompozit çalışmaları özetlenmiştir. Son yıllarda yapılan çalışmaların ışığında grafen takviyesinin önemi ve aynı zamanda titanyum takviyelerinin de seramik matrisli kompozitlerin özelliklerine etkileri belirtilmiştir. Seramik matrisli kompozitlerden en yaygın kullanım alanı bulan alümina matrisli kompozitler düşük yoğunluk, yüksek sertlik ve kimyasal kararlılık gibi özelliklerinden dolayı geçmişten günümüze dek endüstride kullanılmaktadır. Ancak alüminanın düşük kırılma tokluğu ( $3,5 \text{ MPa.m}^{1/2}$ ) kullanım alanını kısıtlamakta bu sebeple ikinci faz ilaveleri ile mevcut olan mekanik özellikler iyileştirilmekte, bununla birlikte yapılan takviyelerle daha yüksek sertlik ve kırılma tokluğu elde edilmektedir. İncelenen çalışmalarda, alümina matrise titanyum takviyesinin genel olarak sertlik, kırılma tokluğu ve eğme dayanımlarında monolitik alüminaya kıyasla düşük sonuçlar elde edildiği ve titanyum takviyesinin kırılma tokluğu düşük olan alüminanın özelliklerinin geliştirilmesi açısından önemli bir aşama olduğu ifade edilse de yapılan bazı çalışmalarda titanyum ilavesinin kırılma tokluğu ( $4,32 \text{ MPa.m}^{1/2}$ ) ve eğme dayanımını artırdığı bildirilmiştir. Yapılan çalışmalar titanyumun alümina matrise takviyesi ile elde edilen mekanik özelliklerin geliştirilmesi amacıyla  $Al_2O_3$ -Ti kompozitine ikinci takviye malzemesinin ilave edildiğini göstermiştir. Grafenin,  $Al_2O_3$ -Ti yapısına ilavesi konusunda yapılan literatür çalışmaların kısıtlı olduğu görülmüştür. Sınırlı çalışmada grafen takviyesi ile monolitik alümina ve diğer takviyelere göre porozitenin azaldığı, iletkenlik, aşınma dayanımı, sertlik ve kırılma tokluğu arttırdığı ( $8,7 \text{ MPa.m}^{1/2}$ ) yönde sonuçlar elde edilmiştir. Bu veriler de grafen takviyelerinin kullanımının artarak devam edeceğini göstermektedir. Yapılan bu derleme ile alümina matrise titanyum ve grafen tozlarının ilavesi, toz metalurjisi metoduyla üretim yöntemleri, yapılan takviyelerin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkileri incelenmiştir.*

\* [smyvz4894@gmail.com](mailto:smyvz4894@gmail.com)

doi : 10.46399/muhendismakina.1421015



---

## DETERMINATION OF THE EFFECTS OF TITANIUM AND GRAPHENE ADDITIONS TO ALUMINA AS A MATRIX MATERIAL

---

### Keywords

*Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ti, graphene, sintering, mechanical, properties*

### Abstract

*In this review, composite studies using titanium and graphene additions to alumina as matrix materials are summarized. In the light of studies conducted in recent years, the importance of graphene reinforcement and the effects of titanium reinforcement on the properties of ceramic matrix composites have been stated. Alumina matrix composites, which are the most widely used ceramic matrix composites, have been used in the industry from past to present due to their properties such as low density, high hardness and chemical stability. However, the low fracture toughness of alumina (3.5 MPa.m<sup>1/2</sup>) limits its usage area, therefore, the existing mechanical properties are improved with second phase additions, and higher hardness and fracture toughness are obtained with the reinforcements. Although it has been stated in the reviewed studies that titanium reinforcement into alumina matrix generally results in lower hardness, fracture toughness and bending strength compared to monolithic alumina and that titanium reinforcement is an important step in improving the properties of alumina with low fracture toughness, some studies have shown that titanium addition has increased fracture toughness (4,32 MPa.m<sup>1/2</sup>) and has been reported to increase bending strength. Studies have shown that a second reinforcement material is added to the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti composite in order to improve the mechanical properties obtained by reinforcing titanium into alumina matrix. It has been observed that literature studies on the addition of graphene to the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti structure are limited. In a limited study, results were obtained that graphene reinforcement reduced porosity and increased conductivity, wear resistance, hardness and fracture toughness (8.7 MPa.m<sup>1/2</sup>) compared to monolithic alumina and other reinforcements. These data show that the use of graphene supplements will continue to increase. In this review, the addition of titanium and graphene powders to the alumina matrix, production methods by powder metallurgy method, and the effects of the reinforcements on microstructure and mechanical properties were examined.*

---

Derleme Makalesi

Review Article

Başvuru Tarihi : 16.01.2024

Submission Date : 16.01.2024

Kabul Tarihi : 02.05.2024

Accepted Date : 02.05.2024

---

## Extended Abstract

### Introduction

In this review, composite studies using titanium and graphene additions to alumina as matrix materials are summarized. In the light of studies conducted in recent years, the importance of graphene reinforcement and the effects of titanium reinforcements on the properties of ceramic matrix composites are stated. In this study, the reinforcement materials applied to alumina matrix composites and the importance of titanium and graphene reinforcements as reinforcement materials are mentioned. In this context, by examining the publications made in recent years, the production methods and sintering processes of alumina matrix composites, and the post-production mechanical properties of Ti and Graphene reinforced alumina composites have been extensively examined.

### Objectives/ Research Purpose

Alumina is more widely used than other oxide ceramics in advanced engineering studies due to its high mechanical and physical properties. Alumina is used in the production of cutting edges, automotive, defense, space industries and medical parts due to its high hardness, wear and corrosion resistance. Although alumina can replace metals and alloys due to its superior properties such as density, thermal expansion coefficient and hardness, its disadvantages such as low fracture toughness and thermal shock resistance come to the fore. In order to benefit from the superior properties of alumina, efforts to improve this fragile structure with second phase additions are continuing rapidly, as it is known that the addition of the second phase particle to the ceramic matrix will provide improvement in mechanical properties. It is seen in the literature studies that the composites obtained by reinforcements to the alumina matrix will be obtained through appropriate processes in order to improve the existing properties. With this study, the effects of Ti and Graphene reinforcements will be examined in order to benefit from the superior properties of alumina and will contribute to the literature.

### Results/Findings

In this study, a comprehensive literature review was conducted on the effects of Ti and Graphene reinforcements on mechanical properties of  $Al_2O_3$  matrix composite materials and their production methods. As a result of literature research, the use of  $Al_2O_3$  matrix composite materials has been increasing for many years. Due to the brittle structure of  $Al_2O_3$ , samples were obtained with many reinforcing elements in different ratios, different sintering methods and parameters, and the physical and mechanical properties of these samples were tried to be determined in the studies. In the TM method used in the production of  $Al_2O_3$  matrix composites, high density and low porosity structures are obtained. has been detected. It has been determined that choosing the appropriate compression pressure for the sintering method to be applied in conjunction with the pressing and sintering processes in the production of  $Al_2O_3$  matrix composites significantly affects the strength values to be obtained after sintering. Although Ti addition to the  $Al_2O_3$  matrix is an important step in improving the properties of alumina with low fracture toughness, and although it has been reported in some studies that Ti addition increases fracture toughness and bending strength, it has been determined that Ti additions generally yield lower results in hardness, fracture toughness and bending strength compared to monolithic alumina. Considering that graphene is a new reinforcement material compared to others, it has been observed that the number of studies on graphene reinforcement into the  $Al_2O_3$  matrix is limited. In studies on the subject, it has been determined that the porosity of composites with graphene reinforcement decreases and the conductivity, wear resistance, hardness, fracture toughness and bending strength increase compared to monolithic alumina and other reinforced samples. Additionally, it has been determined that mechanical properties are negatively affected by increasing graphene amounts above the optimal level.

## 1. Giriş

Günümüz mühendislik çalışmalarında enerji tasarrufu, yüksek dayanım ve hafiflik gibi malzeme özelliklerinin bir arada tutularak yeni malzemelerin geliştirilmesi ihtiyacı uzay, savunma ve otomotiv gibi endüstrinin temel alanlarında geliştirme çalışmalarının hız kazanmasını sağlamıştır. Bu geliştirme çalışmaları mevcut mühendislik malzemelerinin yerini almakta olan kompozit malzemelerin üretiminin de hız kazanmasını sağlamıştır. Kompozitler farklı malzemelerin birleştirilmesi ile oluşturulan ve bileşimde kullanılan fazların tekil olarak gösteremeyeceği daha yüksek özelliklerin elde edildiği yeni bir malzeme olarak tanımlanmaktadır. Kompozit malzemeler matris fazına kazandırılmak istenilen özelliklere sahip ikinci fazların ilaveleri ile elde edilen malzemelerdir. Bu sebeple daha çok olan yapı matris fazı olarak adlandırılır ve genel olarak matrisin özelliklerinin iyileştirildiği kabul edilmektedir. Matris malzemesine ilavesiyle özellikleri iyileştiren ikinci malzemeler ise takviye faz olarak adlandırılmaktadır. Birçok uygulamada takviye fazı matristen daha sert ve dayanıklıdır. Matrise ilave edilen faz yapısı farklı geometrilerde olabilmekte ve bu da ilave fazın etkisini üzerindeki ana parametre olarak belirtilmektedir. Takviye fazları partikül yapılı, kısa fiber (visker), tabakalı yapı ve sürekli fiber olarak farklı şekillerde olabilmektedir. Şekil 1’de takviye çeşidine göre kompozit malzemeler sematik olarak verilmiştir. Matris yapısının farklı bir işlevsel özelliği de ilave edilen fazları yük altında bir arada tutmak ve yükün homojen dağılımını sağlamaktır. Kompozitler matris malzemesine göre polimer matrisli, metal matrisli ve seramik matrisli olarak ana gruplarda sınıflandırılmışlardır (Ayaş, 2003; Gürbüz ve Mutuk, 2019).



Şekil 1. Takviye Çeşidine Göre Kompozit Malzemeler (Yontar, 2021)

Seramik, üretimi ve kullanımı eski çağlara dayandığı arkeolojik çalışmalarla tespit edilmiş malzeme olup, günümüze gelinceye kadar geliştirilerek teknik, ileri teknoloji seramikler adını alarak savunma, otomotiv, biyomedikal, kesici takım sanayisi gibi geniş bir üretim yelpazesinde kullanımı devam etmektedir (Rende ve Hanyaloğlu, 2012). Yüksek sıcaklık dayanımları, düşük özgül ağırlık, korozyon direnci, yüksek sertlik ve aşınma dayanımı gibi yüksek özellikleri endüstrinin ilgisini çekmiş bir malzeme grubu olmasına rağmen eğilme dayanımı ve kırılma tokluğunun zayıf yapıda olması özellikle yüksek sıcaklık ve ağır yüklemelerde güvenilirliğini düşürmektedir (Yin, Yuan, Huang, ve diğ., 2016). Kırılma yapıdaki

seramiklerin özelliklerini iyileştirmenin bir yolu ikinci takviye fazının ilavesidir. Elde edilen yapı seramik matrisli kompozit malzeme (SMK) olarak adlandırılmakla birlikte 1980'li yıllarda üretilmeye başlanarak günümüze kadar yaygın olarak kullanılarak gelmiştir. SMK üretiminde kullanılan ilave fazlar yoğunlaşma aşamasını güçlendirmekte, imalat sürecindeki proseslerin daha karmaşık hale gelmesine yol açmaktadır (Ayaş, 2003).

Son yıllarda mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmakta olan alümina ( $Al_2O_3$ ) seramikleri, yirminci yüzyılda talaşlı imalat yöntemlerinde kesici uç üretimi için geliştirilmeye başlanmıştır. Alümina, mekanik özellikleri sayesinde çeşitli uygulamalarda yaygın kullanımı sebebiyle endüstride geleneksel olarak kullanılmakta olan metal ve alaşımlarının yerini almıştır. Yüksek sertlik ve aşınma dayanımı ile özgül ağırlığının düşük olması ve korozyon dayanımı gibi avantaj sağlayan özelliklerinin yanı sıra kırılma tokluğunun ve çekme dayanımının oldukça düşük olması alüminanın dezavantajları olarak belirtilmektedir (Ayaş, 2003; Özdemir, 2006; Rende ve Hanyaloğlu, 2012; You ve diğ., 2005).

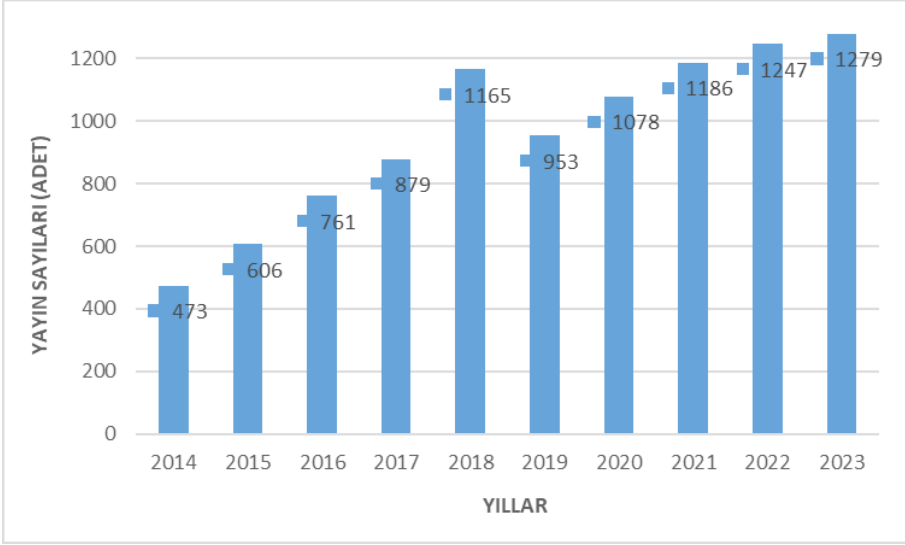
Alümina yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren, özgül ağırlığın düşük olması istenilen ve aşınma dayanımının yüksek olmasını gerektiren birçok özel mühendislik çalışmalarında kullanılmaktadır. Ancak kırılma tokluğunun düşük olması alüminanın kullanımında dezavantaj sağlamaktadır. Bu durum incelendiğinde sinterleme sonrası yüksek oranda kapalı porozite içermesi ve sinterleme ile oluşan tane büyümesinin önüne geçilememiş olması mekanik özelliklerini zayıflatmakta ve kırılma tokluğunu düşürmektedir (Ayaş, 2003; Özdemir, 2006; You ve diğ., 2005). Bu amaçla alüminanın gevrek ve kırılğan olan yapısının daha sünek hale getirilmesi ve kırılma tokluğunun artırılması için uzun süredir araştırmalar devam etmektedir. Yapılan çalışmalarda faz dönüşümü ile mekanik özelliklerin iyileştirilmesi ve sünek yapılı ikinci metal fazların alümina matrisine ilave edilmesi gibi yöntemler uygulanarak gevrek ve kırılğan yapısının iyileştirildiği ve kırılma tokluğunun daha yüksek olduğu alümina matrisli kompozitler üretilmiştir (Yin ve diğ., 2013; Yin, Yuan, Huang, ve diğ., 2016; You ve diğ., 2005). Bu çalışmalarda alüminaya mekanik özelliklerini geliştirmek ve kırılma tokluğunu artırmak için TiC (Cheng ve diğ., 2017), Ti (Meir, Kalabukhov, Frage ve Hayun, 2015), Ni (Lu ve diğ., 2020), Grafen (Gutierrez-Gonzalez ve diğ., 2015) olmak üzere birçok ikinci takviye malzemesi ile çalışmalar yapılmıştır. Alümina matrisine yapılan bu takviyeler ile sertlik, yoğunluk, kırılma tokluğu, aşınma dayanımı gibi özelliklerde uygun takviye oranları ile artış sağlandığı belirtilmiştir (Cheng ve diğ., 2017; Gutierrez-Gonzalez ve diğ., 2015; Yin ve diğ., 2013; Yin, Yuan, Huang, ve diğ., 2016; You ve diğ., 2005).

Kompozit malzeme üretiminde takviye fazlarının seçimi, elde edilecek kompozit malzemeden istenilen özelliklere göre uygun imalat yöntemi ve oluşacak

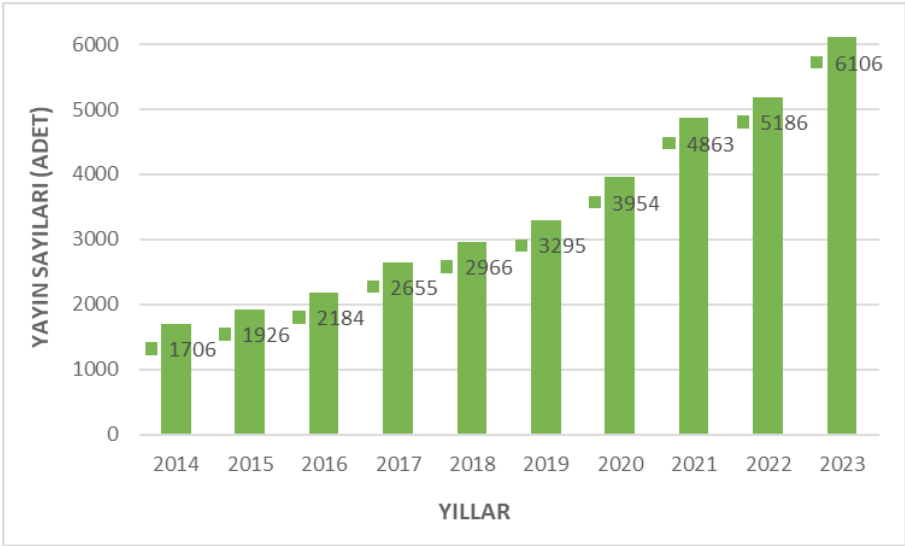
maliyetler hesaplanarak değişkenlik gösterebilmektedir. Titanyum malzemeler düşük özgül ağırlık, korozyon direnci ve diğer metallere kıyasla mukavemetinin yüksek olması sebebiyle medikal, savunma ve uzay endüstrisinde alüminyum alaşımlarının yerine kullanılmaya başlamıştır. Ancak titanyumun maliyet kriterlerine göre yüksek olması ve temas halinde çalışma esnasında çabuk aşınmaya uğraması dezavantaj olarak öne çıkmaktadır. Yüksek mekanik özellikleri sebebiyle son yıllarda alümina matrisli kompozitlerde gevrek ve kırılğan yapıya sünek yapıli metal takviyeleri çalışmalarında titanyum ilavesi araştırmaları hız kazanmıştır. Yapılan araştırmalarda alümina matrise Ti ilavesinin sertliği artırdığı ve kırılma tokluğunu iyileştirdiği ve bunun yanı sıra Ti'nin yanında ikinci bir faz takviyesi ile de daha yüksek mekanik özelliklerin elde edilebileceği bildirilmiştir (Bahraminasab, Ghaffari ve Eslami-Shahed, 2017; Meir ve diğ., 2015; S. Shi, Cho, Goto, Kusunose ve Sekino, 2018; S. Shi, Sekino, Cho ve Goto, 2020).

Yapılan çalışmalarda karbon esaslı takviye fazı seçimlerinde grafit ve karbon nanotüp seçilirken yapılan son ar-ge çalışmaları ile birlikte grafen daha çok kullanılmaya başlanmıştır. Grafeni oluşturan kuvvetli karbon bağları sebebiyle mukavemet açısından en iyi malzemeler grubuna girmiştir. Grafen takviye elemanı olarak kullanıldığında sahip olduğu yağlayıcılık özelliği sayesinde kompozitlere düşük sürtünme ve yüksek aşınma dayanımı özellikleri sağlamaktadır. Grafenin düşük özgül ağırlığı, çok ince yapısı ve mukavemetinin yüksek olması özellikle son yıllarda bilimsel çalışmalarda önemi giderek artmaktadır (Gürbüz ve Mutuk, 2019). Bu bakımdan grafenin takviye elemanı olarak alümina matrisli kompozitlerde kullanımı ile alümina matrisli kompozitlerin kırılma mukavemeti ve iletkenlik gibi özelliklerinin iyileştirdiği görülmekte fakat yapılan literatür çalışmalarının yetersiz olduğu bu sebeple literatürün bu açığını geliştirmek Grafenin sağlayacağı üstün özelliklerden faydalanmak adına önem arz etmektedir.

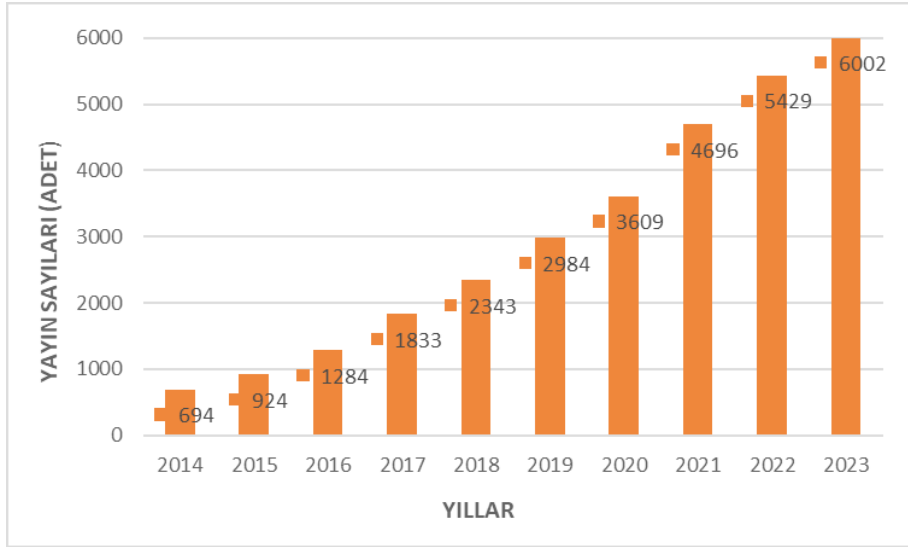
Alümina matrisli kompozitler konusunda son 2014-2023 yıllarının literatür taraması yapıldığında Science Direct veri tabanında günümüze kadar 9627 çalışma yapılmış olup, bu çalışmaların 5743 adedi son 5 yıl içerisinde yapıldığı görülmüştür. Bu literatür çalışmalarının son yıllarda yoğunluğunun artması alümina matrisli kompozitlerin kullanımının arttığı ve yapılacak yeni çalışmalar ile literatüre katkının devam edeceğini göstermektedir. Şekil 2'de alümina matrisli kompozitler, Şekil 3'de Ti takviyeli kompozitler ve Şekil 4'de Grafen takviyeli kompozitler hakkında yapılan literatür çalışmalarının yıllara göre dağılımları verilmiştir. Hem matris malzemesi hem de takviye malzemelerinin giderek artan sayılarda literatür çalışmaları konunun dünya genelinde önemini göstermekle birlikte literatür açığının kapanmasına katkı sağlamak, ülkemiz endüstrinin gelişimine katkı sağlayacak yeni nesil malzeme üretimini konusunda faydalı olacaktır.



Şekil 2. Alümina Matrisli Kompozitler Konusunda 2014-2023 Yılları Arasında Yapılan Yayınlar



Şekil 3. Ti Takviyeli Kompozitler Konusunda 2014-2023 Yılları Arasında Yapılan Yayınlar



Şekil 4. Grafen Takviyeli Kompozitler Konusunda 2014-2023 Yılları Arasında Yapılan Yayınlar

Şekil 3’de verilen Ti takviyeli kompozitler incelendiğinde son on yılda 34.841 çalışma yapılmış olup çalışmaların her yıl arttığı ve son 5 yıl içerisinde 23.404 çalışmanın yapıldığı görülmektedir. Şekil 4’te verilen Grafen takviyeli kompozit çalışmaları incelendiğinde son on yılda 29.798 çalışmanın yapıldığı ve her yıl çalışma sayısının arttığı ve bununla birlikte son 5 yılda 22.720 çalışmanın yapıldığı görülmektedir.

Yapılan bu çalışmada alümina matrisli kompozitlere titanyum-grafen takviyelerinin önemine değinilmiştir. Önceki çalışmalar incelendiğinde alümina matrise yapılan takviyelerde mekanik özelliklerde artış sağlandığı belirtilmiş ancak Ti takviyeleri ile elde edilen mekanik özelliklerin geliştirilmesi açısından yapılan çalışmalarda Ti’nin yanında ikincil faz ilavelerinde grafen takviyesi çalışmalarının oldukça yetersiz olduğu belirlenmiştir. Bu amaçla yapılan bu çalışmanın literatürde az sayıda değinilmiş bir konu olan ve grafenin  $Al_2O_3$ -Ti kompozitlerine ilavesi ile elde edilecek mekanik özelliklerin mühendislik uygulamalarına sağlayacağı avantajlar, bu çalışmanın özgünlüğünü ortaya koymaktadır. Bu kapsamda son yıllarda yapılan yayınlar incelenerek alümina matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri ve sinterleme işlemleri, Ti ve Grafen takviyeli alümina kompozitlerin üretim sonrası mekanik özellikleri geniş kapsamda değerlendirilmiştir.

## 2. Matris Malzemesi Olarak $Al_2O_3$ ve Özellikleri

Alümina, 1887 yılında Bayer’in çalışmaları ve 1892 yılında boksitlerden NaOH çözeltilisinde yüksek sıcaklık ve basınç ile alüminanın ayrıştırılması ile günümüze

gelinceye kadar üretimin %95'i bu proses ile yapılmaktadır. Yaygın olarak kullanılmakta olan bu proses bir takım kimyasal reaksiyonlar içermektedir ve proses kısaca boksitin 80 veya 100 meshe öğütülmesi sonrasında özel tanklarda 3,5-5 atm basınç altında 160-170°C NaOH ile reaksiyona sokulması şeklinde özetlenebilir. Bu işlemlerin ardından %99,55 saflıkta  $Al_2O_3$  elde edilmektedir. Ergime derecesi yaklaşık 2000 °C olan alümina yüksek sıcaklıklarda korozyona ve uygulanan yüklere karşı dayanımı en yüksek olan malzemeler arasında yer almaktadır. Saf alümina nispeten düşük sıcaklıklarda farklı formlarda olurken, tane boyutu ve atmosfer şartlarına göre 750-1200 °C aralıklarında  $\alpha$ -alümina yapısına dönüşmekte, ayrıca 1600 °C üzerindeki sıcaklarda bu dönüşüm işlemi daha hızlı olmakta ve oluşan bu fazın dönüşümü tersinir formda değildir (Çerezci, 2008; Öztürk, 2007).

Alümina yüksek mekanik ve fiziksel özellikleri sebebiyle ileri mühendislik çalışmalarında diğer oksit seramiklerden daha yaygın olarak kullanım alanı bulmaktadır. Malzemenin yüksek sertlik, aşınma ve korozyon direncine sahip olması kesici uç, otomotiv, savunma, uzay endüstrileri ve medikal parçalarının üretiminde yaygın olarak kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Birçok uygulamada kullanılan alüminanın farklı saflık derecelerindeki özellikleri Tablo 1'de karşılaştırılmıştır.

Tablo 1. Farklı Saflık Oranlarındaki Alüminanın Özellikleri (Çerezci, 2008)

| Alümina İçeriği %                 | 85              | 95              | 99,7               |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| Yoğunluk ( $g/cm^3$ )             | 3,5             | 3,7             | 3,9                |
| Bağıl dielektrik sabiti           | 8,5             | 9,2             | 9-10,1             |
| Dielektrik mukavemeti (kV/mm)     | 28              | -               | 10-35              |
| Özdirenç, $\Omega cm$ (600 °C'de) | $4 \times 10^6$ | $5 \times 10^9$ | $4 \times 10^{10}$ |
| Termal iletkenlik (W/m °C)        | 15              | 20              | 28-35              |
| Termal genleşme katsayısı         | 7               | 7,6             | 8                  |
| Maksimum kullanım sıcaklığı (°C)  | 1300            | 1500            | 1700               |
| Eğme mukavemeti (MPa)             | 300             | 350             | 350                |
| Basma mukavemeti (MPa)            | 1800            | 2000            | 2200-2600          |
| Elastik modül (GPa)               | 260-330         | 340-375         | 380-410            |
| Poisson oranı                     | 0,22-0,25       | 0,23-0,26       | 0,24-0,27          |
| Sertlik ( $HV_1$ )                | 800-1000        | 1200-1600       | 1500-2000          |

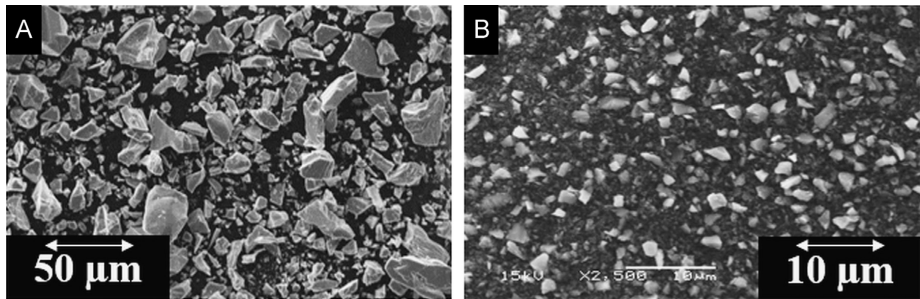
Tablo 1'de alüminanın yoğunluk, termal genleşme katsayısı, sertlik gibi üstün özelliklerinin sağladığı avantajları sebebiyle metal ve alaşımlarının yerini almasını sağlasa da alüminanın düşük kırılma tokluğu ve termal şok direncinin zayıf



olması dezavantajları ön plana çıkmaktadır. Alüminanın üstün özelliklerinden faydalanmak adına kırılğan olan bu yapının, ikinci faz partikülünün seramik matrise ilavesinin mekanik özelliklerde sağlayacağı gelişme bilindiğinden, ikinci faz ilaveleri ile geliştirilme çalışmaları hızla devam etmektedir (You ve diğ., 2005). Alümina matrise yapılan takviyeler ile elde edilen kompozitlerin mevcut özelliklerin geliştirilmesinin uygun proseslerle gerçekleştirildiği yapılan literatür çalışmalarında görülmektedir.

### 3. Ti Takviyeli Kompozitler

Ti esaslı malzemeler düşük yoğunluk, yüksek mekaniksel dayanım, yüksek korozyon direnci ve biyouyumluluk gibi birçok avantaja sahiptirler. Ancak kendi veya başka malzemelerle temas halinde çalıştıklarında çabuk aşınmaya maruz kalmaktadırlar.  $Al_2O_3$  gibi seramikler yüksek sertlik, düşük sürtünme katsayısı ve düşük aşınma oranı gibi özelliklere sahipken kırılma toklukları ve çekme dayanımları oldukça düşüktür. Bu sebeple gevrek olan  $Al_2O_3$  matrise daha sünek ilave malzemelerin takviye edilmesi konusunda birçok çalışma yapılmış olup, Ti ilavesi konusunda yapılan çalışmalarda son yıllarda hız kazanmış olmakla beraber oldukça yetersiz aşamadır (Bahraminasab ve diğ., 2017; Meir ve diğ., 2015; S. Shi, Sekino, ve diğ., 2020).  $Al_2O_3$  seramik ve Ti metalinin sinterlenmesi ile elde edilecek olan kompozit umut vaat eden bir malzeme olarak adlandırılmakta olup, alümina matrise Ti ilavesiyle kırılma tokluğu, sertlik gibi mekaniksel özelliklerde artış görüldüğü bildirilmektedir (S. Shi ve diğ., 2018; S. Shi, Sekino, ve diğ., 2020). Şekil 5’de Ti tozu ve karıştırma işlemi sonrası  $Al_2O_3$  ve Ti tozlarının SEM görüntüleri verilmiştir. Tablo 2’de yüksek saflıkta (%99,9) Ti’nin özellikleri verilmiştir.



Şekil 5. SEM Görüntüsü A) Ti Tozu, B) Karıştırma Sonrası  $Al_2O_3$ -Ti Tozları (Meir ve diğ., 2015)

Tablo 2. Titanyumun Özellikleri (Manes ve Giglio, 2018)

|                                     |        |                         |
|-------------------------------------|--------|-------------------------|
| Yoğunluk                            | p      | 4,52 kg/dm <sup>3</sup> |
| Elastisite modülü                   | E      | 122000 Mpa              |
| Poisson's oranı                     | v      | 0,32                    |
| Statik akma gerilimi                | A      | 236 MPa                 |
| Sertleşme modulu                    | B      | 245 Mpa                 |
| Sertleştirme katsayısı              | n      | 0,539                   |
| Gerilme oranı katsayısı             | C      | 0,0125                  |
| Kopmada efektif plastik deformasyon | PSFAIL | 1,2483                  |

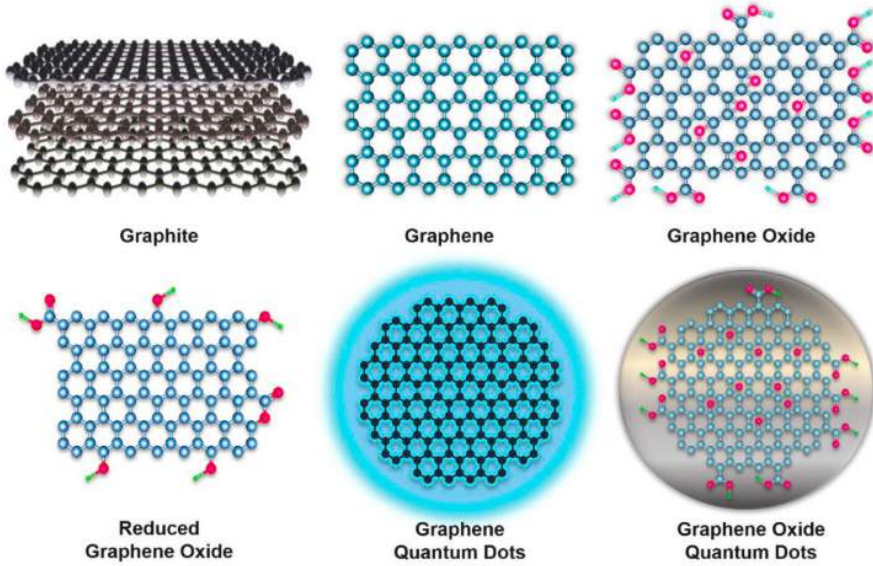
Takviye malzemesi olarak Ti kullanımı özellikle alümina gibi kırılma tokluğu düşük olan seramik yapıların daha sünek ikinci bir faz takviyesi ile iyileştirilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda Ti takviyelerinin genel olarak monolitik alüminaya kıyasla kırılma tokluğunu iyileştirdiği ancak yüksek oranlarda Ti takviyelerinin mekanik özellikleri düşürdüğü belirtilmiştir. Bunun sebebi olarak çatlak ilerlemelerinin alümina fazında taneler arası, Ti fazında tane içi kırılma olması, alümina-titanyum arayüzlerinin kuvvetli olmamasına neden olacağından yüksek oranlı Ti ilavelerinin mekanik özellikleri düşürdüğü bildirilmiştir (Meir ve diğ., 2015).

#### 4. Grafen Takviyeli Kompozitler

Grafen ilk kez 2004 yılında Novoselov'in yaptığı çalışmalarla sentezlenmiş olup, 2010 yılından itibaren üzerinde yapılan çalışmalar artarak kompozit malzemelerde takviye malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır (Bedeloğlu ve Taş, 2016; Dörtoğul, 2018; Santra, Bose, Mitra ve Adalder, 2024; Şenel, Gürbüz ve Koç, 2015, 2017). Grafen karbon atomlarının hegzagonal şekilde bal peteği şeklinde dizilimi ile oluşan iki boyutlu nano yapı bir malzemedir. Dijital teknoloji endüstrisinde iletkenliğinin yüksek olmasından kaynaklı yaygın olarak kullanılmasının yanı sıra, sahip olduğu mekanik özellikler sayesinde de otomotiv, uçak ve savunma sanayilerinde de kullanımı artmaya başlamıştır (Dörtoğul, 2018; Santra ve diğ., 2024; Şenel ve diğ., 2015, 2017). Grafenin matrise ilavesiyle mekanik özelliklerinin arttığına anlaşılması üzerine Al matrise Grafen takviyesi yapılarak çekme dayanımının incelendiği çalışmada, ikinci faz olarak %3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ilavesinin çekme dayanımını %249 artırarak 464 MPa ulaştığı belirtilmiştir (Wan ve diğ., 2023). Tablo 3'de Grafene ait mekanik özellikler verilmiştir. Şekil 6'da ise karbon esaslı malzemelerin şematik gösterimi verilmiştir.

Tablo 3. Grafene Ait Mekanik Özellikler (Koruyucu ve Soy, 2019)

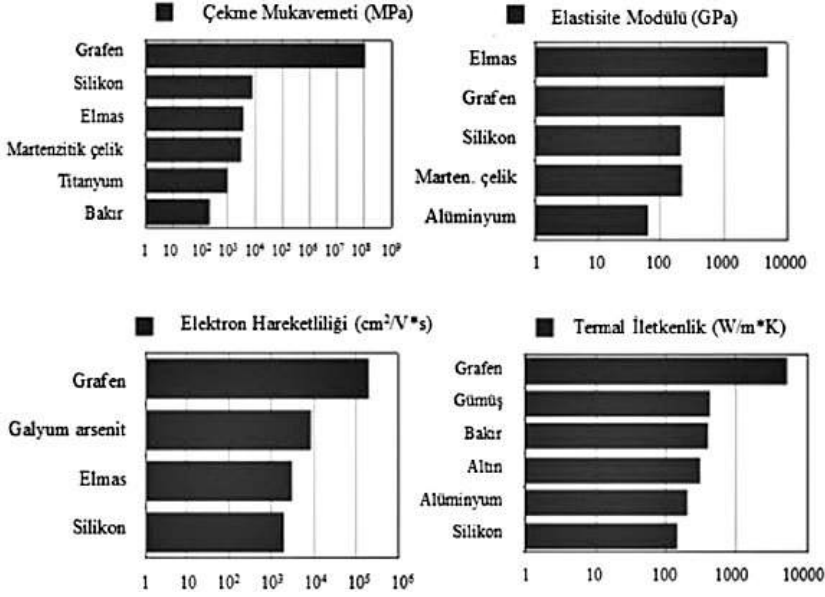
| Grafen | Kristal Yapısı              | Çekme Dayanımı MPa | Yoğunluk g/cm <sup>3</sup> | Elastisite Modülü GPa | Ergime Sıcaklığı °C |
|--------|-----------------------------|--------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------|
|        | sp <sup>2</sup> -Hegzagonal | 130500             | 2,25                       | 1000                  | 5503,85             |



Şekil 6. Karbon Esaslı Malzemelerin Şematik Gösterimi (Santra ve diğ., 2024)

Grafenin bilinen en önemli özelliği olan elektriksel iletkenliğinin yanında Şekil 7'de diğer malzemelerle karşılaştırılması yapılarak değerlendirilen çekme mukavemeti, elastisite modülü termal iletkenlik, elektron hareketliliği gibi özelliklerinin de endüstride çok geniş kullanım alanı olan alüminyum, çelik gibi malzemelerden yüksek olması kullanımını ve gelişimini artırmakta (Şenel ve diğ., 2015) ve bu özelliklerinden faydalanmak adına mekanik özelliklerin geliştirilmesi için alüminyaya takviye fazı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> seramiklerin düşük olan kırılma tokluğu ve elektriksel iletkenliğinin grafen takviyesi ile artırıldığı yapılan çalışmalarda bildirilmektedir (Stolyarov, Frolova ve Sudzhanskaya, 2020) the ceramic materials were studied over a wide temperature range, 23–530 °C and over a frequency range of 10–1 – 106 Hz. More than a half decrease in the porosity of the sintered composite with an increase in the graphene content was observed. Raman spectroscopy indicated the absence of graphene degrada-

tion during the SPS. The range of frequencies (100–103 Hz. Ancak grafenin kompozitlere ilave miktarının diğer malzemelerden daha az olduğu bu sebeple grafen takviyesinden elde edilmesi beklenen yüksek mekanik özelliklerin grafenin homojen dağılımı ile elde edileceği göz önünde tutulmalıdır (Şenel ve diğ., 2015).



Şekil 7. Grafenin Özelliklerinin Diğer Malzemelerle Karşılaştırılması (Gürbüz ve Mutuk, 2019)

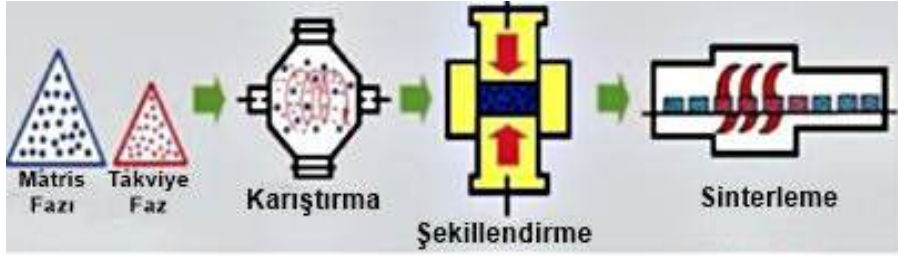
Al matrisine Grafen/TiO<sub>2</sub> ilavesinin mekanik özelliklere etkilerinin incelendiği çalışmada, takviyelerin aynı oranlarda %1,2,3 yapıldığı, en yüksek mekanik özelliklerin %2 takviye oranında elde edildiği belirtilmiştir. Bu çalışmada 137 HV sertlik ve 334 MPa çekme dayanımına ulaşıldığı, aşınma oranının ise %65 azaldığı bildirilmiştir (Ghazanlou ve diğ., 2023).

## 5. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Esaslı Ti ve Grafen Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Metoduyla Üretim Yöntemleri

### 5.1 Toz Metalurjisi

Toz metalürjisi (TM), metal ve alaşım tozlarının farklı oranlarda, basınç altında kalıp içerisinde belirli bir şekil ve istenilen formun sağlanması amacıyla tüm bileşen tozların atmosfer kontrollü ortamda ısıtılması işlemi olarak tanımlanabilir. Diğer bir açıdan metal ve alaşım tozlarının uygun işlem basamaklarından geç-

rek mühendislik parçalarına dönüştürülmesidir. TM işlemi genel olarak, uygun tozların üretimi, tozların karıştırılması, tozların basınç altında şekillendirilmesi ve sinterleme olmak üzere dört ana aşamadan meydana gelmektedir (Çivi, 2016; Koruyucu ve Soy, 2019). Şekil 8’de TM’nin aşamaları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 8. TM'nin İşlem Adımlarının Şematik Gösterimi (Koruyucu ve Soy, 2019)

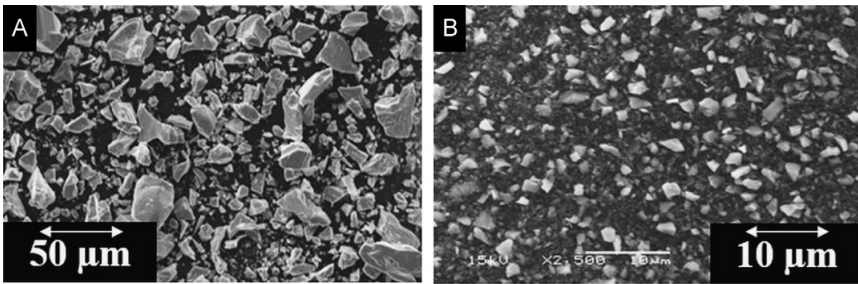
Tozların üretimi ve karıştırılması homojen dağılım sağlanması ve istenilen yapıda kompozitlerin elde edilmesini sağlamak açısından oldukça önemli bir işlem basamağıdır (Çivi, 2016; Koruyucu ve Soy, 2019). Bu konuda detaylı literatür incelemesi yapılmıştır. Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

### 5.1.1 Tozların Üretimi ve Karıştırılması

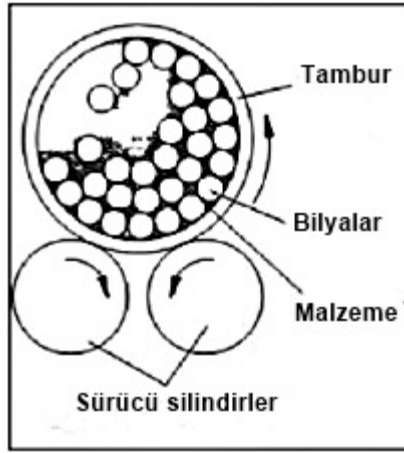
Tüm malzemeler toz haline getirilebilir fakat tozların nasıl üretildiğinin bilinmesi başlangıçta tozların şekil ve yapıları hakkında bilgi sahibi olmamızı sağlamaktadır (Çivi, 2016). TM’de tozların üretilmesi ve topaklanmaların önlenmesi için öğütme olarak da adlandırılan işlem, bilyalı değirmenler içerisinde kaba olarak işlenmiş tozların dönen veya titreşen bilyalar arasında daha küçük boyutlu tozların elde edilmesi veya karıştırılması şeklinde gerçekleşmektedir. Eğer tozlar gevrek yapıda ise ince taneli tozlar elde edilirken, sünek yapılu tozlarda ise yassılaştır ve gevrek yapıya dönerek ince toza dönüşeceklerinden işlem süreleri daha uzun olmaktadır. Bu sebeple su, alkol gibi sıvı kullanılarak hem işlem hızlandırılır hem de ince taneli tozlar elde edilmiş olur (Çivi, 2016; Şenel, Gürbüz ve Koç, 2018). Karıştırma işleminin amacı ise tozların homojen dağılımını sağlayarak tozların presleme ve sinterlemeye hazır hale getirilmesini sağlamaktır. İyi bir karışım işlemi homojen dağılımlı kompozitlerin üretilmesini sağlamaktır (Çivi, 2016). Şekil 9’de öğütme işleminin şematik gösterimi verilmiştir.

Alümina matrisli kompozitlerin üretiminde tozların üretim ve karıştırılması konusunda yapılan çalışmalarda;  $Al_2O_3$  matrise TiC ilaveli kompozit üretimi konusunda yapılan bir çalışmada, %56  $Al_2O_3$  (0,5  $\mu m$ ), %6 TiC nano boyutlu parçacıkları (40nm), %35 TiC nano boyutlu parçacıkları (0,5  $\mu m$ ) ve %2 Co (2  $\mu m$ ) karışım oranlarında ve toz boyutları ile üretim yapıldığı belirtilmiştir (Yin, Yuan, Huang, ve diğ., 2016).  $Al_2O_3$ -TiC seramik kompozitlerinde tane boyutunun incelendiği

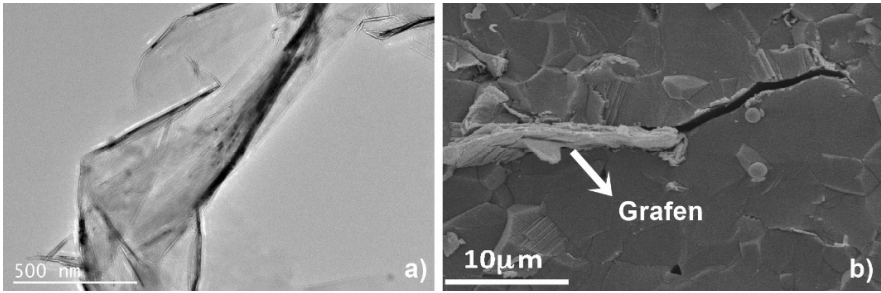
çalışmada, %70Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-%30TiC karışım oranında, 0,24, 3,12 µm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozu, 0,32-1,36 µm TiC tozu kullanıldığını, öğütme ve karıştırma işlemleri için 1, 2 ve 24 saat sürelerinin uygulandığı bildirilmiştir (You ve diğ., 2005). Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti kompoziti üretiminin yapıldığı farklı bir çalışmada Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> matrise %20,40,60,80,100 oranlarında Ti ilavesi yapıldığı, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,5 µm) tozu ve Ti (325 mesh) tozunun hazır satın alındığı ve karıştırma işleminin etanol ilavesi yapılarak 72 saat işlem parametresinde gerçekleştirildiği bildirilmiştir (Meir ve diğ., 2015). Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti kompoziti üretimi konusunda yapılan diğer bir çalışmada Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> matrise %25,50,75,100 oranlarında Ti ilavesi yapıldığı, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,1-3 µm) tozu ve Ti (325 mesh) tozunun hazır satın alındığı, tozlarının karıştırmasının 100 d/dk, 1 saat işlem parametresinde gerçekleştirildiği bildirilmiştir (Bahraminasab ve diğ., 2017). Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Grafen kompoziti üretimi çalışmasında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> matrise %0,5, 1 ve 2 oranlarında Grafen ilavesi yapıldığı, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozlarının 36 nm ve Grafen tozlarının ise 3 nm ile 2-3 µm boyutlarında pullar şeklinde olduğu ve tozların karışım oranlarında birleştirilerek öğütüldüklerini bildirmişlerdir (Stolyarov ve diğ., 2020). Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti (C,N) matrislere Grafen takviyesinin incelendiği çalışmada % 0,2, 0,5, 0,7, 1 oranlarında Grafen takviyesi yapıldığı, grafen tozunun ise 4-5 µm kalınlık ve 12 nm tane boyutlarında olduğu ve karıştırma işleminin izopropil alkol ile 8 saat süresince yapıldığı bildirilmiştir (Petrus ve diğ., 2019). Santrifüjlü döküm yöntemiyle üretilmiş Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti-Ni kompozitlerinde farklı oranlarda karışımlardan hazırlanan numuneler içerisinde en yüksek sertliğin homojenliği en iyi sağlanan mikroyapıda elde edildiği belirtilmiştir (Zygmuntowicz ve diğ., 2022). Şekil 10'da ham madde olarak kullanılan TiH<sub>2</sub> tozu ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiH<sub>2</sub> tozlarının karışımının SEM görüntüsü verilmiştir. Karıştırma işlemi öncesi toz boyutlarının karıştırma işlemi ile küçüldüğü ve keskin köşeli geometrik yapıların giderildiği görülmektedir. Bu işlem ile tozlar arasında boşlukların azaltılması sağlanmakta, sinterleme sonrası yüksek yoğunluk ve düşük porozite elde edilmektedir (Meir ve diğ., 2015). Şekil 11'de Grafenin SEM görüntüsü ve karışım sonrası alümina matris içerisinde tane sınırlarındaki SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 10. a) TiH<sub>2</sub> tozu, b) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- TiH<sub>2</sub> karışımı SEM Görüntüleri (Meir ve diğ., 2015)



Şekil 9. Tozların Öğütme İşlemi (Çivi, 2016)



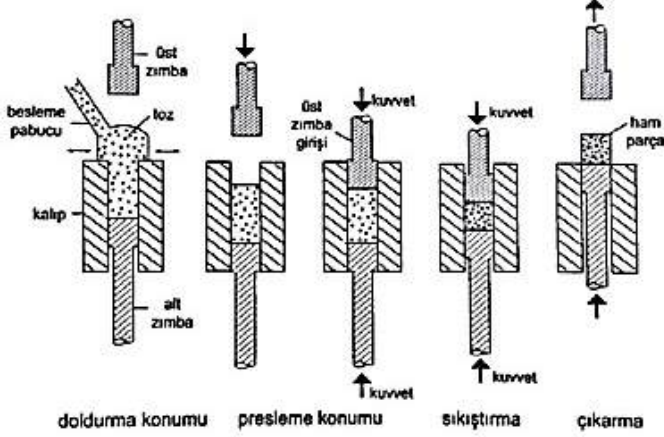
Şekil 11. a) Grafenin SEM Görüntüsü, b) Grafenin tane sınırındaki Görüntüsü (Cui ve diğ., 2018; Yazdani, Xia, Ahmad ve Zhu, 2015)

Matris malzemesi olan  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  tozu ortalama tane büyüklüğü yaklaşık  $0,5 \mu\text{m}$  ve %99,9 saflıkta, Ti tozu %98 saflıkta ve tane büyüklüğü  $< 45 \mu\text{m}$  (325 mesh), Grafen ise  $3\text{-}4 \mu\text{m}$  kalınlık ve  $3\text{-}12 \text{nm}$  tane boyutlu taneler şeklinde yüksek saflıkta hazır olarak satın alınmakta oldukları ve alınan bu tozların genellikle alkol eklenmesiyle ortalama 1 saat ile 72 saat arasında öğütülme ve karıştırma işlemlerinden geçirdikleri görülmektedir. Bu işlemden sonra bir sonraki adım olan tozların sıkıştırılması işlemine geçilmektedir.

## 5.2 Presleme / Sıkıştırma İşlemi

Toz metalürjisinde önemli bir işlem adımı olan sıkıştırma, genel anlamıyla tozların kalıba konularak basınç altında istenilen şekil ve formun elde edilmesi işlemidir (Çivi, 2016; Koruyucu ve Soy, 2019; Kurt, 2004). Bu işlem ile sinterleme öncesi parçanın taşınmasında gerekli olan dayanımı sağlamaktadır. Tozların bu presleme işlemi ile mukavemeti ve yoğunluğu artırılrsa da asıl mukavemet artı-

şı ve ideal yoğunluğa ulaşması sinterleme işlemi sonrasında elde edilmektedir (Çivi, 2016; Kurt, 2004; Yavaş, 2014). Tozların kalıpta sıkıştırma işleminin şematik gösterimi Şekil 12' deki gibi gerçekleşmektedir.



Şekil 12. Tozların Presleme İle Şekillendirme İşlemi (Çivi, 2016)

Alümina matrisli kompozitlerin üretiminde tozların sıkıştırılması konusunda yapılan çalışmalarda;  $Al_2O_3$  matrise  $Y_2O_3/Ti$  ilavesi ile kompozit üretimi yapılan çalışmada uygulama basıncı olarak 30 MPa parametresi kullanıldığı belirtilmiştir (S. Shi ve diğ., 2018).  $Al_2O_3-Ti$  kompozitine Grafen takviyesinin etkilerinin incelendiği çalışmada presleme işleminde 32 MPa uygulama basıncı kullanıldığı bildirilmiştir (Cui, Zhao ve Wang, 2019).  $Al_2O_3-Ti$  kompozitine Ni-Ti ilavesinin etkilerinin incelendiği çalışmada uygulama basıncı 32 MPa parametresinin kullanıldığı belirtilmiştir (Xiu ve diğ., 2008).  $Al_2O_3$  matrise Ti ilavesinin incelendiği çalışmada, karıştırma işleminden sonra presleme işleminde 200 MPa basınç uygulandığı bildirilmiştir (Yin, Yuan, Wang, ve diğ., 2016).  $Al_2O_3$  matrise Ti ve TiC ilaveleri ile kompozit üretimi gerçekleştirilen çalışmada, kompozitlerin preslenmesinde 30 MPa uygulama basıncı kullandığı bildirilmiştir (S. Shi, Sekino, ve diğ., 2020).  $Al_2O_3/(W, Ti)C$  kompozitine Grafen ilavesinin etkilerinin incelendiği çalışmada, kompozitlerin üretiminde 32 MPa uygulama basıncı kullanıldığı bildirilmiştir (Cui ve diğ., 2018).  $Al_2O_3/TiC$  kompozitine Grafen takviyelerinin etkilerinin incelendiği çalışmada, kompozitlerin üretiminde 200 MPa uygulama basıncı kullanıldığı belirtilmiştir (Cheng ve diğ., 2017). Alüminyum matrise grafen takviyesi ile kompozit üretiminde sinterleme süresi ve sıcaklığının etkilerinin incelendiği çalışmada, tozların 600 MPa uygulama basıncı ile şekillendirildiği bildirilmiştir (Gürbüz, Şenel ve Koç, 2018).

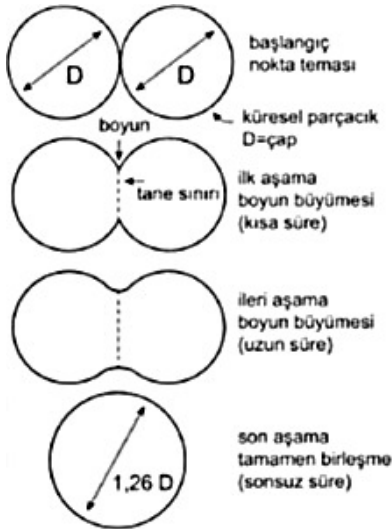
Sıkıştırma-şekillendirme işleminde uygulanan basınç kullanılan sinterleme



yöntemlerine değişiklik göstermekte olup, 30 ila 600 MPa arasında uygulama basınçlarının kullanıldığı görülmüştür. Sinterleme işleminde istenilen yoğunluğun ve mukavemetin elde edilmesi için oldukça önemli olan sıkıştırma işleminde seçilecek olan basıncın uygulanacak olan sinterleme yöntemine uygun olarak seçilmesinin oldukça önemli olduğu tespit edilmiştir.

### 5.3 Sinterleme ve Sinterleme Mekanizmaları

Sinterleme prosesi matris fazı ve/veya ilave fazların tozlarından oluşturulan gözenekli yapının ergime derecesinin ( $T_e$ )  $T_e/2$  veya  $T_e/3/4$  sıcaklığına ısıtılması olarak tanımlanabilir (Ayaş, 2003; Meir, Kalabukhov ve Hayun, 2014). Benzer şekilde sinterlemenin diğer bir tanımlanması da poroz yapının porozitesiz ve yoğunluğu daha yüksek bir yapıya dönüştürülmesi için uygulanan ısıl işlemdir (Kurt, 2004). Sinterleme esnasında birbirleri ile temas halindeki toz taneleri arasında gerçekleşen atom difüzyonu ile taneler arası boşluk küçülür ve sinterleme öncesine kıyasla boyutunda küçülme ve daha yüksek yoğunluğa sahip malzemeler üretilmektedir (Ayaş, 2003). Sinterleme süreci üç aşamalıdır; ilk aşamada temas halindeki taneler arasında boyun oluştururlar. İkinci adımda sinterlenen malzeme yoğunluğu teorik yoğunluğun %90-95'i seviyelerine erişir ve bu süreçte tane büyümesi oluşmuyorsa taneler arası boşlukların azalması zamanla devam etmektedir. Son aşamada taneler arasında kalan porozitenin tane sınırlarından difüzyonla yapıdan atılması gerçekleşmektedir. Bu süreç oldukça yavaş ilerlediğinden tam olarak %100 teorik yoğunluğa erişmek güçleşmektedir (Ayaş, 2003; Kurt, 2004; Meir ve diğ., 2014; Yavaş, 2014). Şekil 13'de sinterleme işleminin aşamalarının iki küre modeli ile şematik gösterimi verilmiştir.



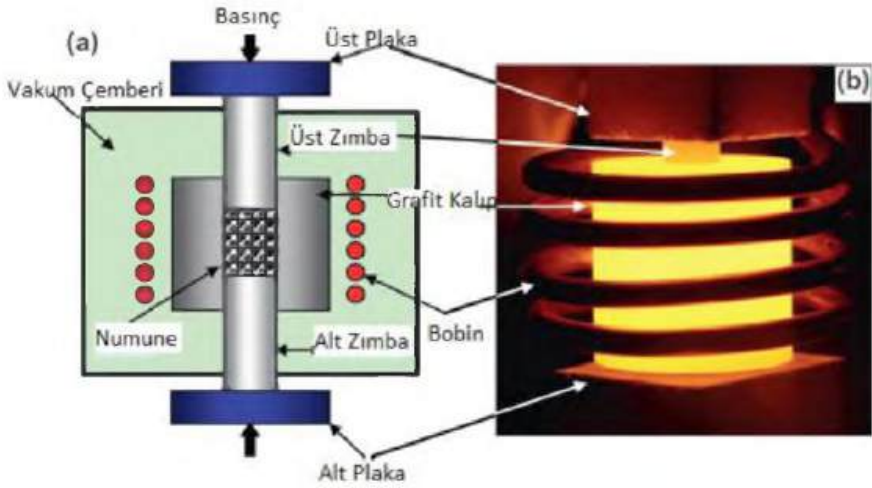
Şekil 13. Sinterleme Prosesi Aşamaları Şematik Gösterimi (Yavaş, 2014)

Sinterleme türleri gaz fazı, katı faz, sıvı faz ve reaktif sıvı olmak üzere dört ana gruptur. Tablo 4’de her bir fazın taşınım mekanizması ve sinterleme için belirtilen itici güçleri verilmiştir (Yavaş, 2014).

Tablo 4. Sinterleme Türleri (Yavaş, 2014)

| <b>Sinterleme Türü</b> | <b>Taşınım Mekanizması</b>   | <b>Sinterleme İtici Gücü</b>                           |
|------------------------|------------------------------|--|
| Gaz faz                | Buharlaştırma-yoğunlaşma     | Buhar basıncı farklılığı                               |
| Katı hal               | Difüzyon                     | Serbest enerji ve/veya kimyasal potansiyeldeki değişim |
| Sıvı faz               | Vizkoz akış, difüzyon        | Kapiler basınç, yüzey gerilimi                         |
| Reaktif sıvı           | Vizkoz akış, çözelti-çökelti | Kapiler basınç, yüzey gerilimi                         |

Sinterleme işlemleri, reaksiyon, termal plazma, mikro dalga, atmosferik sinterleme gibi prosesler ile basınçsız, sıcak pres (HP), indüksiyonla sinterleme, spark plazma (SPS), sıcak izostatik pres (HIP) gibi prosesler ile basınçlı olmak üzere iki ana grupta gerçekleştirilmektedir (Ayaş, 2003; Çivi, 2016; Koruyucu ve Soy, 2019; Kurt, 2004; Yavaş, 2014). Bu işlemleri birbirinden ayıran özellikler işlem sırasında kullanılan atmosfer, ısıtma yöntemi, işlem sıcaklıkları, süresi ve sinterleme sonrası elde edilen yoğunluk farkları olarak belirtilebilir. Ayrıca hangi sinterleme işleminin uygulanacağı konusunda işlemlerin maliyetlerinin farklılık göstermesinin yanı sıra kullanılan tozların yalıtkanlık veya iletkenlik özellikleri de oldukça önem arz etmektedir (Çivi, 2016; Yavaş, 2014). Şekil 14’de indüksiyonla sinterleme işleminin şematik gösterimi ve indüksiyonla sinterleme düzeneğinde gerçekleşen sinterleme işleminin görüntüleri verilmiştir (Çivi, 2016).



Şekil 14. a) İndüksiyonla Sinterleme İşleminin Şematik Gösterimi, b) İndüksiyonla Sinterleme İşlemi (Çivi, 2016)

Sinterleme işleminin değerlendirilmesi amacıyla önceki çalışmalar incelendiğinde;  $Al_2O_3$  matrise %20 artış oranıyla Ti ilavesi yapılan çalışmada SPS yöntemiyle sinterleme işleminin gerçekleştirildiği, sinterleme parametrelerin  $1300\text{ }^\circ C$  sıcaklık, 30 dk bekleme süresi olarak belirlendiği, sinterleme sonrası homojen dağılımlı mikro yapı elde edildiği, sertlik ve Young's modülünde artış görülürken, kırılma tokluğunda monolitik alüminadan daha düşük sonuçlar elde edildiği belirtilmiştir (Meir ve diğ., 2015).  $Al_2O_3$  matrise Grafen takviyesinin tribolojik ve mekanik özelliklere etkilerinin incelendiği çalışmada, SPS yöntemiyle sinterleme işleminin gerçekleştirildiği, sinterleme parametrelerinin  $1300\text{ }^\circ C$  ve  $1500\text{ }^\circ C$  sıcaklık ve 1 saat bekleme süresi olarak uygulandığı bildirilmiştir. Elde edilen sonuçlarda monolitik alüminanın  $1300\text{ }^\circ C$ 'de sinterlenmesinde daha yüksek sertlik ve eğme dayanımı,  $Al_2O_3$ /Grafen kompozitinin ise  $1500\text{ }^\circ C$ 'de yapılan sinterlemede daha yüksek sertlik ve eğme dayanımı elde edildiği ve grafen takviyesinin aşınma dayanımını %50 artırdığı belirtilmiştir (Gutierrez-Gonzalez ve diğ., 2015).  $Al_2O_3$  matrise Ti ilavesinin mekanik özelliklere etkisinin incelendiği çalışmada SPS sinterleme yönteminin uygulandığı, sinterleme işleminde  $1350\text{ }^\circ C$  sıcaklık ve işlem süresi olarak kompozitlerde 3 dk, saf alümina ve Ti' de 30 dk sinterleme süresi parametrelerinin uygulandığı bildirilmiştir. Elde edilen sonuçlarda monolitik alüminaya kıyasla artan Ti ilave miktarıyla sertlik ve eğilme dayanımında düşüş olduğu belirtilmiştir (Bahraminasab ve diğ., 2017).  $Al_2O_3$  matrise Grafen takviyesinin elektriksel iletkenliğe etkisinin incelendiği çalışmada sinterleme yöntemi olarak SPS'i, parametre olarak  $1550\text{ }^\circ C$  sıcaklık ve 10 dk işlem süresi kullanıldığı bildirilmiştir. Yapılan bu çalışmada artan grafen oranıyla porozitenin arttığı, yo-

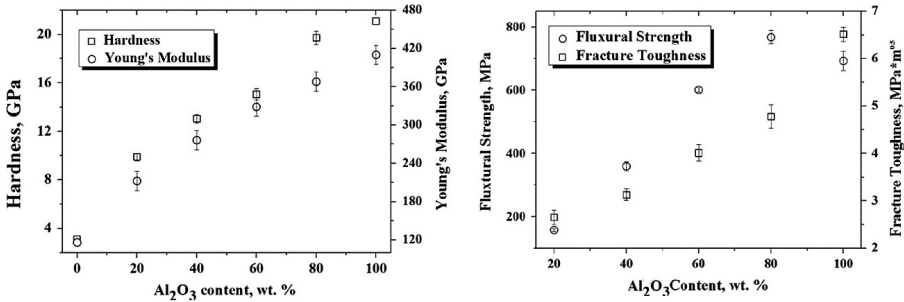
ğunluğun azaldığı, %0,5 grafen ilavesinde en yüksek sertliğin elde edildiği bildirilmiştir (Stolyarov ve diğ., 2020).  $Al_2O_3-ZrO_2$  ve  $Al_2O_3-Ti(C,N)$  kompozitlerine Grafen ilavelerinin tribolojik ve mekanik özelliklerine etkilerinin incelendiği çalışmada sinterlemenin SPS yöntemiyle 1550 °C sıcaklık ve 4 dk işlem süresi parametrelerinde gerçekleştirildiği bildirilmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda grafen takviyelerinin sertlik ve aşınma direncini artırdığını fakat kırılma tokluğunda artışın gözlemlenmediği belirtilmiştir (Petrus ve diğ., 2019).  $Al_2O_3$  matrise Ti ve  $Y_2O_3$  ilavelerinin etkilerinin incelendiği çalışmada sinterlemenin HP yöntemiyle 1500 °C sıcaklık ve 1 saat parametrelerinde gerçekleştirildiği bildirilmiştir. Elde edilen sonuçlarda Ti ilavesinin sertliği düşürdüğü fakat kırılma tokluğunu artırdığı,  $Y_2O_3$  ilavesinin hem sertlik hem de kırılma tokluğunu artırdığı, en yüksek kırılma tokluğunun  $Al_2O_3$ -%20 Ti-%2  $Y_2O_3$  numunesinden elde edildiği bildirilmiştir (S. Shi ve diğ., 2018).  $Al_2O_3-Ti(C,N)$  matrise Grafen ilavesinin etkilerinin incelendiği çalışmada, HP sinterleme yöntemiyle, 1200 °C sıcaklık ve 10 dk parametrelerinde ön sinterleme, 1700 °C ve 10 dk parametrelerinde, vakum ortamında sinterlemenin gerçekleştirildiği bildirilmiştir. Elde edilen sonuçlarda grafen takviyesinin seramik yapının kırılma tokluğu, sertlik ve eğilme dayanımı artırdığı ve en iyi sonucun %0,4 grafen takviyesinden elde edildiği bildirilmiştir (Cui ve diğ., 2019).  $Al_2O_3-Ti(C,N)$  seramik kompozitin üretimi ve karakterizasyonunun incelendiği çalışmada, sinterleme sıcaklığının mekanik özellikler üzerinde etkileri incelemiştir. Bu çalışmada mikro dalga sinterleme işlemi ile 50 °C/dk ısıtma oranı, 10 dk işlem süresi ve 1500 - 1650 °C sıcaklıklarda sinterlemenin gerçekleştirildiği bildirilmiştir. Elde edilen sonuçların analizinden 1550 °C ve 10 dk parametrelerinde en yüksek sertlik, kırılma tokluğu ve yoğunluğun elde edildiği belirtilmiştir (Yin, Yuan, Wang, ve diğ., 2016). Alüminyum matrise farklı oranlarda Grafen takviyesi yapılarak sinterleme süresi ve sıcaklığının etkilerinin incelendiği çalışmada, 550, 600, 630°C sıcaklıkları ve 60,120,180 ve 300 dk işlem sürelerini kullanıldığı bildirilmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda en yüksek yoğunluk ve mekanik özelliklerin Al-%0,1Grafen kompozitinde 630°C - 180 dk parametrelerinde elde edildiği belirtilmiştir. 180 dk işlem süresinin altında poroz mikroyapı, üzerindeki sıcaklıklarda ise tane büyümesi ve yüksek porozite gözlemlendiği rapor edilmiştir (Gürbüz ve diğ., 2018).

$Al_2O_3$ matrisli kompozitlerin üretiminde SPS ve HP sinterleme işlemlerinin yaygın olarak kullanıldığı bununla birlikte gelişen teknoloji ile SPS işleminin nispeten daha düşük sıcaklık ve sürelerde sinterlemeyi sağlaması sebebiyle kullanımının arttığı gözlemlenmiştir.  $Al_2O_3$  matrisli kompozitlerin üretiminde ortalama sinterleme sıcaklığı 1500-1550 °C, işlem süresinin ise ortalama 10-30 dk arasında olduğu tespit edilmiştir. Sinterleme işlemi elde edilecek parçanın nihai işlemi olduğundan bu işlemin parametreleri nihai ürünün mekanik ve mikroyapı özelliklerini doğrudan etkilediğinden oldukça önemlidir. Ayrıca işlem parametrelerinin,

ilave fazların ergime dereceleri, yalıtkanlıkları, tane büyüklükleri göz önüne alınarak belirlenmesi gerektiği tespit edilmiştir.

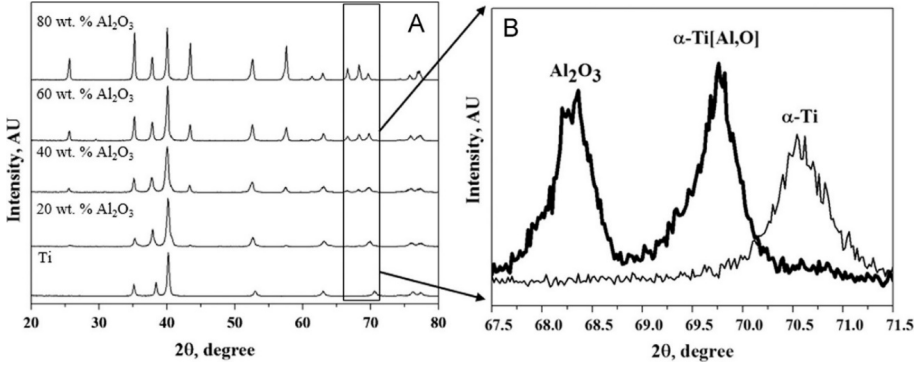
#### 5.4 Ti Takviyeli Alümina Esaslı Kompozitler Üzerine Çalışmalar

$Al_2O_3$  matrisli Ti takviyeli kompozitlerin üretimi konusunda literatürde yapılan çalışmalar incelenmiş ve konu hakkında yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar şu şekildedir:  $Al_2O_3$  matrisine %0,20,40,60,80,100 Ti ilavelerinin yapıldığı çalışmada, mikroyapı analizinde alümina ve titanyumun homojen dağılım gösterdiği ve Ti ilavelerinin sertlik ve Young's modülünün arttığı fakat kırılma tokluğunun azaldığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, kompozitlerin ince taneli mikroyapısı soğutma sırasında oluşan mikro çatlak oluşumlarını önlemekte olduğu bildirilmiştir. En yüksek eğilme mukavemetlerinin %80  $Al_2O_3$  kompozitinde 767,23 MPa olarak ölçüldüğü belirtilmiştir. Şekil 15'te  $Al_2O_3$ -Ti kompozitinin sinterleme sonrası sertlik, Young's Modülü, eğilme dayanımı ve kırılma tokluğu değerlerinin takviye oranına göre değişimleri verilmiştir. En yüksek sertlik, Young's modülü ve kırılma tokluğunun monolitik alüminada elde edildiği, Ti takviye oranı arttıkça mekanik özelliklerin önemli ölçüde azaldığı görülmektedir (Meir ve diğ., 2015)



Şekil 15.  $Al_2O_3$ -Ti Kompozitlerinde Mekanik Özelliklerin Takviye Oranına Göre Değişimi

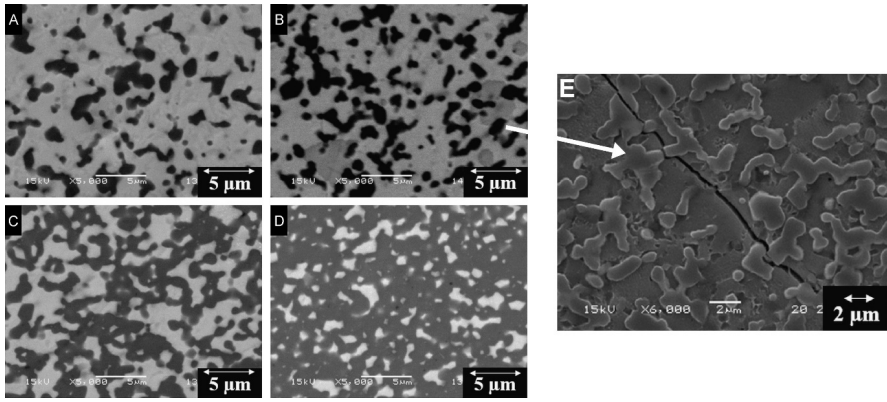
Şekil 16'da  $Al_2O_3$ -Ti kompozitlerinin EDS analiz sonuçları verilmiştir. Şekilde detay görüntüsünde belirtilen, %100 Ti fazında oluşmayan piklerin,  $Al_2O_3$  miktarına bağlı olarak oluşmaya başlayarak en yüksek alümina miktarında maksimum düzeye çıktığı görülmektedir. Ek olarak  $Al_2O_3$ 'ün ayrıştığı ve Al ve O nun çözünerek  $\alpha$ -Ti( $Al_2O_3$ ) oluştuğu, sinterleme kusuruna sebep olacak TiH<sub>2</sub> fazının oluşmadığı görülmektedir (Meir ve diğ., 2015).



Şekil 16.  $Al_2O_3$  -Ti Kompozitlerinin EDS Analizi (Meir ve diğ., 2015)

$Al_2O_3$  matrise %0,25,50,100 Ti ilavelerinin yapıldığı çalışmada, artan Ti oranlarıyla yoğunluğun arttığı, sertlik ve eğilme dayanımının azaldığı belirtilmiştir. %100  $Al_2O_3$  numunesinde 19,76 GPa sertlik, 294,55 MPa eğme dayanımı ölçülürken, %25 Ti ilavesinde 11,47 GPa sertlik, 172,97 MPa eğme dayanımı değerleri elde edildiği bildirilmiştir (Bahraminasab ve diğ., 2017).  $Al_2O_3$  matrise %20 Ti ve %2  $Y_2O_3$  ilavelerinin etkilerinin incelendiği çalışmada, Ti ilavesinin yoğunluğu ve kırılma tokluğunu artırdığı, Young's modülü ve sertliği düşürdüğü, monolitik alümina numunesinde 17,1 GPa sertlik, 3,58 MPa.m<sup>1/2</sup> kırılma tokluğu değerleri ölçülürken, %20 Ti ilaveli kompozitte 14,5 GPa sertlik ve 4,32 MPa m<sup>1/2</sup> değerleri ölçüldüğü bildirilmiştir (S. Shi ve diğ., 2018).  $Al_2O_3$ -Ti (C,N) kompozitinde sinterleme parametrelerinin etkilerinin incelendiği çalışmada, %60  $Al_2O_3$ -%31 Ti karışım oranı kullanıldığı, yapılan deneylerde 18,42 GPa sertlik, 6,72 MPa m<sup>1/2</sup> kırılma tokluğu değerlerinin elde edildiği bildirilmiştir (Yin, Yuan, Wang, ve diğ., 2016).  $Al_2O_3$  matrise Ti ve TiC ilavelerinin incelendiği çalışmada, %90  $Al_2O_3$ -%10 Ti karışımı oranı kullanıldığı, Ti ilavesiyle yoğunluk, eğme dayanımı, sertlik değerlerinin azaldığı, kırılma tokluğunun arttığı bildirilmiştir. %100  $Al_2O_3$ 'de 17,1 GPa sertlik ve 3,5 MPa m<sup>1/2</sup> kırılma tokluğu değeri, %90  $Al_2O_3$ 'de 15,7 GPa sertlik ve 3,9 MPa m<sup>1/2</sup> kırılma tokluğu değerleri elde edildiği bildirilmiştir (S. Shi, Sekino, ve diğ., 2020). Katmanlı yapıli Ti/  $Al_2O_3$  kompozitinde çatlak oluşumu ve yayılmasının incelendiği çalışmada, sinterleme sonrası Ti ve  $Al_2O_3$  arasında oluşan ara yüzeyin çatlakların sapmalarını ve yön değiştirmelerini sağladığı ve bu sebeple monolitik duruma göre daha yüksek kırılma dayanımı gösterdikleri bildirilmiştir (Wu, Li ve Wang, 2016).  $Al_2O_3$ -Ti kompozitine TiC takviyesinin mekanik özellikler ve elektriksel iletkenliğe etkilerinin incelendiği çalışmada, %2 TiC takviyesi ile en yüksek sertlik değerine 16,5 GPa, %0,5 TiC takviyesi ile en yüksek Young's modülüne 381 GPa, %1 TiC takviyesi ile en yüksek kırılma tokluğu 5,29 MPa.m<sup>1/2</sup> değerinin elde edildiği belirtilmiştir (S. Shi, Cho, Goto ve Sekino, 2020a).  $Al_2O_3$  matrise Ti ilavesinin elektriksel iletkenliğe etkisinin

incelendiği çalışmada, %5,10,15,20 Ti takviyesi ile numuneler 1600 °C,1650 °C ve 1700 °C sıcaklıklarda sinterlenmiştir. Elde edilen sonuçlarda hem Ti takviyesinin artışı hem de sıcaklığın artışının elektriksel iletkenliği artırdığı, bunun sebebinin taneler arası boşlukların azalması olduğunu belirtmişlerdir (Sabuan, Asmelash, Azhari, Mulubrhan ve Alemu, 2021). Şekil 17' de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti kompozitinin %20,40,60,80 oranlarında sinterleme sonrası SEM görüntüleri verilmiştir. Şekilde beyaz bölgeler titanyum fazını göstermekte ve dağılımın homojen olduğu anlaşılmaktadır. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti kompozitinde çatlak ilerlemesi Ti fazında tane içi, alümina fazında taneler arası şeklinde olmaktadır. Şekilde fazlar arasında çatlak ilerleyişinin SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 17. SEM Görüntüsü Alümina-Titanyum Kompozit, a) %20 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, b) %40 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, c) %60 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, d) %20 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, e) %40 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> İçeren Kompozitte Çatlak İlerlemesi, Beyaz Renkler Titanyumu Göstermektedir (Meir ve diğ., 2015)

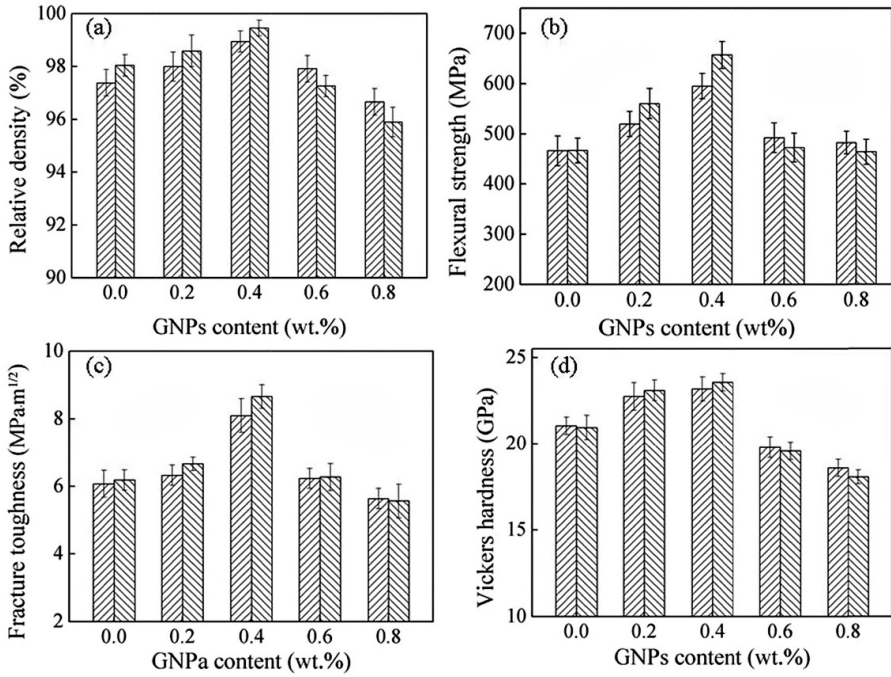
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub>/CeO<sub>2</sub> matrise Ni ve Ti ilavelerinin mekanik özelliklere ve mikro yapıya etkilerinin incelendiği bir çalışmada tüm numunelerin aynı şartlarda 1650 °C'de konvansiyonel sinterleme işlemi ile hazırlandığı ve bu işlemlerde %3 Ti ve %3 Ni ilavelerinin yapıldığı bildirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda sertlik ve kırılma tokluğunda en düşük değerlerin monolitik alüminada olduğu görülürken, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-%3 Ni ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-%3 Ti numunelerinin sertlik ve kırılma tokluklarının monolitik alümina yüksek olduğu fakat diğer numunelerden düşük olduğu tespit edilmiştir. En yüksek sertlik değeri 14,95 GPa olarak Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40ZrO<sub>2</sub> numunesinde, en yüksek kırılma tokluğu değerinin 4,9 MPa.m<sup>1/2</sup> olarak Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40ZrO<sub>2</sub>-3Ni numunesinde elde edildiği bildirilmiştir (Verma ve Kumar, 2017). Literatürde yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde alümina matrise titanyum ilaveli ser-met kompozitlerin üretimi gevrek ve kırılmalı yapıya sahip olan alüminanın geliştirilmesi açısından önemli bir aşama olarak kaydedilmiş olup, çalışmalar incelendiğinde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> matrise Ti ilavesinin kırılma tokluğu, sertlik ve yoğunluğu artırdığı fakat

Ti'nin yanı sıra ikinci ilave malzemeleri katkısı ile daha yüksek sertlik, yoğunluk ve kırılma tokluğu değerlerine ulaşıldığı ve  $Al_2O_3$ -Ti kompozitine yapılan ikinci takviyelerin  $Ta_2O_5$  (Xu, Zhang, Wang, Wu ve Yang, 2017),  $Y_2O_3$  (Liu ve diğ., 2015; G. Shi, Wang, Liu ve Wang, 2015),  $CeO_2$  (S. Shi, Cho, Goto ve Sekino, 2020b; Wu ve diğ., 2014),  $Pr_6O_{11}$  (Xu ve diğ., 2016), Grafen (Cui ve diğ., 2019; Petrus ve diğ., 2019) şeklinde bilimsel çalışmaların devam ettiği görülmüştür.

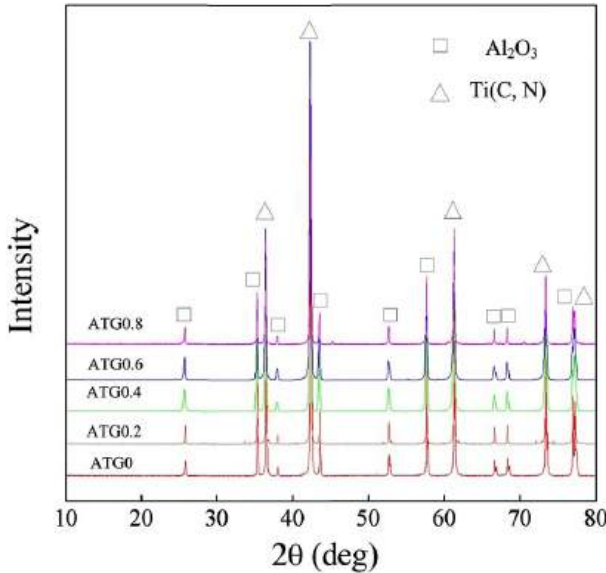
### 5.5 Grafen Takviyeli Alümina Esaslı Kompozitler Üzerine Çalışmalar

$Al_2O_3$  matrise Grafen ilaveli kompozitlerin üretimi konusunda literatürde yapılan çalışmalar incelenmiş ve konu hakkında yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar şu şekildedir;  $Al_2O_3$  matrise %0,22 Grafen takviyesinin tribolojik ve mekaniksel özelliklere etkilerinin incelendiği çalışmada, Grafen takviyesinin aşınma oranını %50 oranında azalttığı, ayrıca eğme dayanımını %80 oranında artırdığı bildirilmiştir (Gutierrez-Gonzalez ve diğ., 2015).  $Al_2O_3$  matrise %0,0,5,1,2 Grafen takviyenin elektriksel iletkenlik üzerine etsinin incelendiği çalışmada numunelerin mekanik özellikleri incelendiğinde, %1 grafen takviyesi ile 22,7 GPa sertlik ve %0 porozite gözlemlenirken, monolitik alüminada 22,4 GPa sertlik ve %5 porozitenin olduğu bildirilmiştir (Stolyarov ve diğ., 2020)the ceramic materials were studied over a wide temperature range, 23–530 °C and over a frequency range of 10–1 – 106 Hz. More than a half decrease in the porosity of the sintered composite with an increase in the graphene content was observed. Raman spectroscopy indicated the absence of graphene degradation during the SPS. The range of frequencies (100–103 Hz.  $Al_2O_3$ -Ti(C, N) seramik kompozite %0,2,0,4,0,6,0,8 Grafen takviyelerinin mekanik özelliklere etkilerinin incelendiği çalışmada, seramik kompozitin %0,4 Grafen ilavesi ile en yüksek sonuçların elde edildiği, artan grafen takviyesiyle mekanik özelliklerin azaldığı, grafen takviyesi yapılmayan numuneye kıyasla %0,4 Grafen takviyeli numunede eğilme dayanımında %40,13, kırılma tokluğunda %40,78 artış sağlandığı belirtilmiştir. Şekil 18'de  $Al_2O_3$ -Ti(C, N) kompozitine Grafen takviye miktarının mekanik özelliklere etkileri verilmiştir. Yapılan çalışmada yoğunluk, eğilme dayanımı, kırılma tokluğu ve sertlik değerleri karşılaştırılmış ve en yüksek değer %0,4 Grafen takviyesi ile elde edildiği görülmektedir. Bu değer in altında ve üstünde yapılan takviye oranlarında mekanik özelliklerin azaldığı görülmektedir. Şekil 19'da yine aynı çalışmada Grafen takviye miktarın EDS analizi verilmiştir. Yapılan EDS analizinde Grafen takviyesiz numunenin analiz sonucu ile Grafen takviyeli numunelerin analizlerinin benzer olduğu ve kusur oluşturacak fazların oluşmadığı bildirilmiştir (Cui ve diğ., 2019).





Şekil 18. Grafen Takviye Miktarının Mekanik Özelliklere Etkileri (Cui ve diğ., 2019)



Şekil 19. Grafen Takviye Oranının EDS Analizi (Cui ve diğ., 2019)

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-(W, Ti)C-Grafen kompozitinin mikro yapı ve tokluk mekanizmasının incelendiği çalışmada, %0,2,0,4,0,6,0,8 oranlarında Grafen takviyesi yapıldığı, %0,2 Grafen takviyesi yapılan numunede Grafen takviyesi yapılmamış numuneye oranla eğilme dayanımında %49, kırılma tokluğunda %35,3 ve sertlikte %5 artış sağlandığı tespit edilmiştir. Fazla miktarda Grafenin topaklanmaya sebep olarak mikro yapıda kusurlara sebep olarak mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilediği bildirilmiştir (Cui ve diğ., 2018). Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>TiC kompozitine Grafen takviyesinin mekanik özellikler ve tokluk mekanizmasına etkilerinin incelendiği çalışmada, %0,1,0,2,0,4,0,6,0,8 Grafen takviyelerinin etkileri incelenmiş olup, %0,2 Grafen takviyesi yapılan numunede optimum mekanik özelliklerin elde edildiği ve 18,5 GPa sertlik, 8,7 MPa.m<sup>1/2</sup> kırılma tokluğu değerlerinin ölçüldüğü bildirilmiştir. Yapılan bu çalışmada %0,2 grafen takviyesi ile sertlikte %12,7 azalma olmasına karşın, kırılma tokluğunda takviyesiz numuneye oranla %67,13 'lük iyileşme sağlandığı belirtilmiştir (Cheng ve diğ., 2017). Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> matrisine Grafen takviyesinin mikroyapı, kırılma davranışları, mekanik özellikler ve elektriksel iletkenliğe etkilerinin incelendiği çalışmada, %0,1,0,6,1 oranlarında Grafen takviyesi uygulanmış olup, mekanik deneyler sonucunda %0,6 Grafen takviyeli numunede en yüksek kırılma tokluğu değerlerin elde edildiği, takviyesiz alümina numunesinde 21,9 GPa sertlik, 2,8 MPa.m<sup>1/2</sup> kırılma tokluğu değerleri ölçülürken, %0,6 Grafen takviyeli numunede 21,3 GPa sertlik ve 3,6 MPa m<sup>1/2</sup> kırılma tokluğu değerine ulaştığı belirtilmiştir. Elektriksel iletkenliğin ise artan grafen oranı ile arttığı %1 Grafen takviyesi olan numunede en yüksek değer elde edildiği bildirilmiştir (Hrubovčáková ve diğ., 2020). Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-WC-TiC kompozitine Grafen takviyesinin mikroyapı, mekanik özellikler ve kırılma tokluğuna etkilerinin incelendiği çalışmada, %0,25,0,5,0,75,1,1,5,2 oranlarında Grafen ilavesi uygulanmış olup, en yüksek değerlerin %0,5 Grafen takviyeli numunede elde edildiği bildirilmiştir. %0,5 grafen takviyeli numunede eğilme dayanımı 646,31 MPa, sertlik 24,64 GPa ve kırılma tokluğu 9,42 MPa m<sup>1/2</sup> olarak ölçülürken, grafen takviyesiz kompozitte eğilme dayanımı 550,92 MPa, sertlik 23,54 GPa, kırılma tokluğu 8,76 MPa m<sup>1/2</sup> olarak ölçüldüğü rapor edilmiştir. Bununla birlikte seramik kompozitlerde artan Grafen oranlarında mekanik özelliklerin hızlıca düştüğü bildirilmektedir (Wang ve diğ., 2019). Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti(C,N) kompozitinin kırılma tokluğunun geliştirilmesi için Grafen takviyesinin incelendiği çalışmada, seramik matrisine %0,1,0,2,0,3,0,4,0,5 oranlarında Grafen ilavesi yapıldığı, %0,4 Grafen takviyesi ile en yüksek kırılma tokluğu 8,43 MPa.m<sup>1/2</sup> değerinin elde edildiği bildirilmiştir (Cui, Zhao, Wang ve Sun, 2022). Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-WC-TiC kompozit yapıları kesici uçların kesme performansının iyileştirilmesi için %0,5 Grafen takviyesi ile üretilen uçların mekanik özelliklerinin ve kesme parametrelerinin değerlendirildiği çalışmada, Grafen takviyesiz duruma kıyasla %0,5 grafen takviyesi ile sertlik, eğilme dayanımı ve kırılma tokluğunda artış sağlandığı ve sırasıyla 22,41 GPa, 856,92 MPa, 8,97 MPa.m<sup>1/2</sup> de-

ğerlerinin elde edildiği, ayrıca Grafen ilavesinin kesici takım performansını ve ömrünü artırdığı belirtilmiştir (Wang ve diğ., 2022).

Grafen takviye elamanı olarak alümina matrisli seramik, ser-met yapıli kompozitlerde daha önceden elde edilmiş olan mekanik özelliklerin gelişiminin daha iyi seviyelere gelmesini sağlamaktadır. Grafen takviyelerinde ağırlıkça takviye oranı düşük miktarlardadır ve istenilen mikro yapı, kırılma tokluğunun elde edilmesi açısından homojen karışımların elde edilmesi oldukça önemlidir. Grafen yapılan literatür araştırmalarında optimal seviyede takviye edildiği kompozitlerin yoğunluk, sertlik, kırılma tokluğu ve iletkenlik özelliklerini artırmaktadır. Alümina matrisin bilinen gevrek ve kırılğan yapısının Ti ilavesi ile iyileştirme çalışmaları gelişen Grafen teknolojisi ile daha da yüksek noktaya geleceği görülmektedir. Fakat yapılan literatür araştırmalarında alümina matrise Grafen takviyeli çalışmaların sayısı oldukça az olduğu, literatürün bu açığının Grafen 'in sağlayacağı üstün özelliklerden faydalanmak adına geliştirmek önem arz etmektedir.

## 6. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada  $Al_2O_3$  matrise Ti ve Grafen takviyelerinin üretim yöntemleri ve mekanik özelliklere etkilerinin literatür taraması yapılmıştır. Yapılan çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda sıralanmıştır,

1. Yapılan literatür araştırmalı sonucunda  $Al_2O_3$  matrisli kompozit malzemele-  
rin kullanımı uzun yıllardır artarak devam etmektedir.  $Al_2O_3$ 'ün düşük olan kırılma tokluğunun iyileştirilmesi amacıyla birçok takviye elamanı ile farklı ilave oranlarında, farklı sinterleme yöntemleri ve parametrelerinde numuneler elde edilmiş ve yapılan çalışmalarda bu numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri tespit edilmeye çalışılmıştır.
2.  $Al_2O_3$  matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılan TM yönteminde, yüksek yoğunluk ve düşük poroziteli yapıların elde edildiği tespit edilmiştir. TM yönteminde öğütme, karıştırma işlemlerinin ince taneli ve homojen dağılım sergileyen mikro yapının elde edilmesi açısından önemli olduğu, işlem parametrelerinin 1 ile 72 saat arasında seçildiği, ince taneli yapıların elde edilmesi amacıyla alkol eklentisinin yapıldığı tespit edilmiştir.
3.  $Al_2O_3$  matrisli kompozitlerin üretiminde presleme ve sinterleme işlemlerinin birbiri ile bağlantılı olarak uygulanacak sinterleme yöntemine uygun sıkıştırma basıncı seçilmesinin sinterleme sonrası elde edilecek mukavemet değerlerini önemli derecede etkilediği belirlenmiş, sıkıştırma basıncı olarak 30-600MPa arasında parametrelerinin uygulandığı görülmüştür. Sinterleme işleminde 1500-1550 °C sıcaklık, 10-30 dk bekleme süresi parametrelerinin seçildiği, bu işlemin nihai işlem olduğu göz önüne alınarak takviye fazların ergime dereceleri, tane büyüklükleri ve elektriksel iletkenlik gibi özellikleri-

nin de işlem metodu seçimi ve uygulanmasında oldukça önemli olduğu tespit edilmiştir.

4.  $Al_2O_3$  matrisine Ti takviyesinin, alüminanın düşük kırılma tokluğunun geliştirilmesi açısından önemli bir aşama olduğu ve yapılan bazı çalışmalarda Ti ilavesinin kırılma tokluğu ve eğme dayanımını artırdığı bildirilse de genel olarak Ti ilavelerinde sertlik, kırılma tokluğu ve eğme dayanımlarında monolitik alüminaya kıyasla düşük sonuçların elde edildiği tespit edilmiştir. Bu sebeple son zamanlarda yapılan çalışmalarda alümina matrise Ti takviyesinden elde edilecek mekanik özelliklerin iyileştirilmesi adına ikinci bir takviye malzemesinin yapıya ilave edildiği tespit edilmiştir.
5.  $Al_2O_3$  matrisine Grafen takviyesinde Grafen'nin diğerlerine nazaran yeni takviye malzemesi olduğu göz önünde bulundurularak yapılan çalışmaların kısıtlı sayıda olduğu görülmüştür. Konu ile ilgili yapılan çalışmalarda Grafen takviyesinin poroziteyi azalttığı, iletkenlik, aşınma dayanımı, sertlik, kırılma tokluğu ve eğme dayanımını artırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca optimal seviyenin üzerinde artan grafen miktarlarında mekanik özelliklerin olumsuz yönde etkilendiği tespit edilmiştir.
6.  $Al_2O_3$  matrisli kompozitlerde Grafen takviye miktarının oldukça düşük olduğu, bu sebeple homojen dağılımın sağlanması, mikro yapının istenilen özelliklere sahip olması açısından karıştırma işleminin oldukça önemli olduğu belirlenmiştir.
7. Ti ve Grafen takviyelerinin  $Al_2O_3$  matrisli kompozitlerin mekanik ve fiziksel özelliklerini önemli derecede iyileştirdiği görülmektedir. Fakat alümina matrise Ti ve Grafen takviyelerinin etkilerinin belirlenmesi amacıyla yapılan literatür çalışmaların az sayıda olduğu belirlenmiştir.  $Al_2O_3$  matrise Ti ve Grafen takviyelerinin araştırılması hem metal ve alaşımlarının yerini almakta olan kompozitlerin üstün özelliklerinden daha fazla yararlanmak hem de ülkemiz kompozit malzeme üretimi bilgi birikimine katkı sağlamak adına faydalı olacaktır.

### **Çıkar Çatışması**

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

### **Kaynakça**

- Ayaş, E. (2003).  *$Al_2O_3$ -TiC/TiCN Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri*. Anadolu Üniversitesi.
- Bahraminasab, M., Ghaffari, S. ve Eslami-Shahed, H. (2017).  $Al_2O_3$ -Ti functionally graded material prepared by spark plasma sintering for orthopaedic appli-

- cations. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 72 (February), 82–89. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2017.04.024>
- Bedeloğlu, A. ve Taş, M. (2016). Graphene And Its Production Methods. *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, 16 (3), 544–554. doi: <https://doi.org/10.5578/fmbd.32173>
- Çerezci, T. (2008). *Nikel Partikül Takviyeli Alumina Seramik Kompozitlerin Sentezi ve Karakterizasyonu*. Sakarya Üniversitesi.
- Cheng, M., Liu, H., Zhao, B., Huang, C., Yao, P. ve Wang, B. (2017). Mechanical properties of two types of  $Al_2O_3/TiC$  ceramic cutting tool material at room and elevated temperatures. *Ceramics International*, 43 (16), 13869–13874. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.07.110>
- Çivi, C. (2016). *Toz Metal Parçaların Orta ve Düşük Frekanslı İndüksiyon ile Sinterlenmesinde Sinterleme Parametrelerinin Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi*. Celal Bayar Üniversitesi.
- Cui, E., Zhao, J. ve Wang, X. (2019). Determination of microstructure and mechanical properties of graphene reinforced  $Al_2O_3-Ti(C, N)$  ceramic composites. *Ceramics International*, 45(16), 20593–20599. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.07.041>
- Cui, E., Zhao, J., Wang, X., Sun, J., Huang, X. ve Wang, C. (2018). Microstructure and toughening mechanisms of  $Al_2O_3/(W, Ti)C$ /graphene composite ceramic tool material. *Ceramics International*, 44(12), 13538–13543. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.04.185>
- Cui, E., Zhao, J., Wang, X. ve Sun, Z. (2022). Improved fracture resistance and toughening mechanisms of GNPs reinforced ceramic composites. *Ceramics International*, 48(17), 24687–24694. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.05.115>
- Dörtoğul, C. (2018). *Grafen Oksitin Sentezlenmesi ve Karakterizasyonu*. Selçuk Üniversitesi.
- Ghazanlou, S. I., Ghazanlou, S. I., Ghazanlou, S. I., Hosseinpour, S., Liao, Y. ve Javidani, M. (2023). Improving the properties of an Al matrix composite fabricated by laser powder bed fusion using graphene-TiO<sub>2</sub> nanohybrid. *Journal of Alloys and Compounds*, 938, 168596. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168596>
- Gürbüz, M. ve Mutuk, T. (2019). Karbon Esaslı Malzeme Takviyeli Titanyum Kompozitler ve Grafen Üzerine Yeni Eğilimler. *Mühendis ve Makina*, 60(695), 101–118.
- Gürbüz, M., Şenel, M. C. ve Koç, E. (2018). The effect of sintering time, temperature, 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>
- Gutierrez-Gonzalez, C. F., Smirnov, A., Centeno, A., Fernández, A., Alonso, B., Rocha, V. G., ... Bartolome, J. F. (2015). Wear behavior of graphene/alumina composite. *Ceramics International*, 41(6), 7434–7438. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.02.061>
- Hrubovčáková, M., Múdra, E., Bureš, R., Kovalčíková, A., Sedlák, R., Girman, V. ve Hvizdoš, P. (2020). Microstructure, fracture behaviour and mechanical properties of conductive alumina based composites manufactured by SPS from graphenated  $Al_2O_3$  powders. *Journal of the European Ceramic Society*, 40(14), 4818–4824. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.03.072>
- Koruyucu, S. ve Soy, G. (2019). Alüminyum Matrisli Kompozitlerde Tungsten Karbür ve Grafen Takviyelerinin Mekanik Özelliklere Etkileri Üzerine Bir Araştırma. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(3), 1466–1487. doi: <https://doi.org/10.29130/dubited.536359>
- Kurt, A. O. (2004). *Toz Üretim Yöntemleri ve Sinterleme*. Sakarya.
- Liu, M., Wang, Z., Li, Q., Shi, G., Wu, C. ve Li, Y. (2015). Effects of  $Y_2O_3$  on the mechanical properties of Ti/ $Al_2O_3$  composites of hot pressing sintering. *Materials Science and Engineering: A*, 624(1), 181–185. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.11.058>
- Lu, Y., Zhu, M., Zhang, Q., Hu, T., Wang, J. ve Zheng, K. (2020). Microstructure evolution and bonding strength of the  $Al_2O_3/Al_2O_3$  interface brazed via Ni-Ti intermetallic phases. *Journal of the European Ceramic Society*, 40(4), 1496–1504. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.11.066>
- Manes, A. ve Giglio, M. (2018). Microstructural numerical modeling of  $Al_2O_3/Ti$  composite. *Procedia Structural Integrity*, 8(2018), 24–32. doi: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.12.004>
- Meir, S., Kalabukhov, S., Frage, N. ve Hayun, S. (2015). Mechanical properties of  $Al_2O_3/Ti$  composites fabricated by spark plasma sintering. *Ceramics International*, 41(3), 4637–4643. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.12.008>
- Meir, S., Kalabukhov, S. ve Hayun, S. (2014). Low temperature spark plasma sintering of  $Al_2O_3-TiC$  composites. *Ceramics International*, 40, 12187–12192. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.04.059>
- Özdemir, A. (2006). *Seramik Malzemelerin Kırılma Tokluğu Değerlerinin Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Teorik Olarak Belirlenmesi*. Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Öztürk, M. (2007). *SiC İlaveli Alüminum Seramik Kompozitler*. Sakarya Üniversitesi.

- Petrus, M., Wozniak, J., Cygan, T., Kostecki, M., Cygan, S., Jaworska, L., ... Olszyna, A. (2019). Comprehensive study on graphene-based reinforcements in  $Al_2O_3-ZrO_2$  and  $Al_2O_3-Ti(C,N)$  systems and their effect on mechanical and tribological properties. *Ceramics International*, 45(17), 21742–21750. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.07.175>
- Rende, H. ve Hanyaloğlu, C. (2012). Rulmanlarda ve Kaymalı Yataklarda Seramiklerin Kullanımı. *TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi*, 53(633), 28–35. Erişim Adresi: [http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya\\_ekler/f998a325e36f5e7\\_ek.pdf](http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/f998a325e36f5e7_ek.pdf)
- Sabuan, N. A., Asmelash, M., Azhari, A., Mulubrhan, F. ve Alemu, T. (2021). Investigation on the electrical conductivity of  $Al_2O_3-Ti$  ceramic composites using a pressureless sintering process. *Materials Today: Proceedings*, 46, 1718–1723. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.520>
- Santra, S., Bose, A., Mitra, K. ve Adalder, A. (2024). Exploring two decades of graphene: The jack of all trades. *Applied Materials Today*, 36(January). doi: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2024.102066>
- Şenel, M. C., Gürbüz, M. ve Koç, E. (2015). Grafen Takviyeli Alüminyum Matrisli Yeni Nesil Kompozitler. *Mühendis ve Makina*, 56(669), 36–47.
- Şenel, M. C., Gürbüz, M. ve Koç, E. (2017). Grafen Takviyeli Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 23(8), 974–978. doi: <https://doi.org/10.5505/pajes.2017.65902>
- Şenel, M. C., Gürbüz, M. ve Koç, E. (2018). Toz Metalürjisi Metoduyla Üretilen  $Al-Si_3N_4$  Metal Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Mühendis ve Makina*, 59(693), 33–46.
- Shi, G., Wang, Z., Liu, L. ve Wang, C. (2015). Influence of  $Y_2O_3$  addition on the  $Ti/Al_2O_3$  cermets by hot pressing sintering. *Journal of Alloys and Compounds*, 628(6), 413–415. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.12.014>
- Shi, S., Cho, S., Goto, T., Kusunose, T. ve Sekino, T. (2018). Combinative effects of  $Y_2O_3$  and Ti on  $Al_2O_3$  ceramics for optimizing mechanical and electrical properties. *Ceramics International*, 44(15), 18382–18388. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.07.054>
- Shi, S., Cho, S., Goto, T. ve Sekino, T. (2020a). CNT-induced TiC toughened  $Al_2O_3/Ti$  composites: Mechanical, electrical, and room-temperature crack-healing behaviors. *Journal of the American Ceramic Society*, 103(8), 4573–4585. doi: <https://doi.org/10.1111/jace.17152>
- Shi, S., Cho, S., Goto, T. ve Sekino, T. (2020b). Role of CeAl11O18 in reinforcing  $Al_2O_3/Ti$  composites by adding CeO2. *International Journal of Applied Cera-*

- mic Technology*, 18(1), 170–181. doi: <https://doi.org/10.1111/ijac.13629>
- Shi, S., Sekino, T., Cho, S. ve Goto, T. (2020). Ti and TiC co-toughened Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites by in-situ synthesis from reaction of Ti and MWCNT. *Materials Science and Engineering A*, 777(January), 139066. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139066>
- Stolyarov, V. V., Frolova, V. ve Sudzhanskaya, I. V. (2020). Dielectric properties of nanocomposite ceramics Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/graphene processed by spark plasma sintering. *Ceramics International*, 46(5), 6920–6925. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.11.188>
- Verma, V. ve Kumar, M. B. V. (2017). Synthesis, Microstructure and Mechanical Properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub>/CeO<sub>2</sub> Composites with Addition of Nickel and Titania Processed by Conventional Sintering. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 3062–3071. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.189>
- Wan, J., Yang, J., Zhou, X., Chen, B., Shen, J., Kondoh, K. ve Li, J. (2023). Superior tensile properties of graphene/Al composites assisted by in-situ alumina nanoparticles. *Carbon*, 204(January), 447–455. doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.12.088>
- Wang, X., Zhao, J., Cui, E., Song, S., Liu, H. ve Song, W. (2019). Microstructure, mechanical properties and toughening mechanisms of graphene reinforced Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-WC-TiC composite ceramic tool material. *Ceramics International*, 45(8), 10321–10329. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.02.087>
- Wang, X., Zhao, J., Gan, Y., Tang, X., Gai, S. ve Sun, X. (2022). Cutting performance and wear mechanisms of the graphene-reinforced Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-WC-TiC composite ceramic tool in turning hardened 40Cr steel. *Ceramics International*, 48(10), 13695–13705. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.01.251>
- Wu, C., Li, Y. ve Wang, Z. (2016). Evolution and mechanism of crack propagation method of interface in laminated Ti/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite. *Journal of Alloys and Compounds*, 665, 37–41. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.01.041>
- Wu, C., Wang, Z., Li, Q., Shi, G., Liu, M. ve Li, Y. (2014). Mechanical properties and microstructure evolution of Ti/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> cermet composite with CeO<sub>2</sub> addition. *Journal of Alloys and Compounds*, 617, 729–733. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.08.007>
- Xiu, Z., Laeng, J., Sun, X., Li, Q., Hur, S. K. ve Liu, Y. (2008). Phase formation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti(C,N)-NiTi composite. *Journal of Alloys and Compounds*, 458(1–2), 398–404. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.03.116>
- Xu, H., Wang, Z., Wu, J., Li, Q., Liu, M. ve Li, Y. (2016). Mechanical properties and microstructure of Ti/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites with Pr6O11 addition by hot pressing



- sintering. *Materials and Design*, 101, 1–6. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.127>
- Xu, H., Zhang, L., Wang, Z., Wu, J. ve Yang, F. (2017). Effects of Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> on mechanical properties and elements diffusion of Ti/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites prepared via hot pressing sintering. *Ceramics International*, 43(10), 7935–7941. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.03.003>
- Yavaş, B. (2014). *Monolitik ve Takviyeli Bor Karbür Seramiklerin Spark Plazma Sinterleme (SPS) Yöntemi ile Üretimi ve Karakterizasyonu*. İstanbul Teknik Üniversitesi. Erişim Adresi: <https://ej.e.bioscientifica.com/view/journals/eje/171/6/727.xml>
- Yazdani, B., Xia, Y., Ahmad, I. ve Zhu, Y. (2015). Graphene and carbon nanotube (GNT)-reinforced alumina nanocomposites. *Journal of the European Ceramic Society*, 35(1), 179–186. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceram-soc.2014.08.043>
- Yin, Z., Huang, C., Zou, B., Liu, H., Zhu, H. ve Wang, J. (2013). Preparation and characterization of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiC micro-nano-composite ceramic tool materials. *Ceramics International*, 39(4), 4253–4262. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.10.277>
- Yin, Z., Yuan, J., Huang, C., Wang, Z., Huang, L. ve Cheng, Y. (2016). Friction and wear behaviors of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiC micro-nano-composite ceramic sliding against metals and hard materials. *Ceramics International*, 42(1), 1982–1989. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.10.001>
- Yin, Z., Yuan, J., Wang, Z., Hu, H., Cheng, Y. ve Hu, X. (2016). Preparation and properties of an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti(C,N) micro-nano-composite ceramic tool material by microwave sintering. *Ceramics International*, 42(3), 4099–4106. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.11.082>
- Yontar, O. (2021). *Grafe-Silisyum Nitrür Partikül Takviyeli Kalsiyum Fosfat Matrisli Hibrit Kompozitlerin Üretimi ve Mekanik Davranışlarının İncelenmesi*. Ondokuz Mayıs Üniversitesi.
- You, X. Q., Si, T. Z., Liu, N., Ren, P. P., Xu, Y. D. ve Feng, J. P. (2005). Effect of grain size on thermal shock resistance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC ceramics. *Ceramics International*, 31(1), 33–38. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2004.02.009>
- Zygmuntowicz, J., Tomaszewska, J., Wiczorek, M., Żurowski, R., Piotrkiewicz, P., Wachowski, M. ve Wiciński, P. (2022). Properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti/Ni composites fabricated via centrifugal slip casting under environmentally assessed conditions as a step toward climate-neutral society. *Ceramics International*, 48(15), 21920–21933. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.04.174>



## ELECTRICITY GENERATION METHODS FROM SOLAR ENERGY

Berire ŞEN AYVAZ<sup>\*1</sup>, Alper BAYRAK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Eteration Bilişim Çözümleri A.Ş / iOS Developer, İstanbul  
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-1414-705X>

<sup>2</sup> Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Bolu  
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-1851-8951>

### Keywords

*Solar power, fotovoltaic systems, concentrating solar power*

### Abstract

*In this study, photovoltaic cells that directly convert solar energy into electrical energy and concentrated solar energy technologies that indirectly generate electrical energy from superheated steam by concentrating solar energy were examined in detail, classified among themselves, and compared technically. Examinations on electricity production methods and technologies from solar energy were carried out in three stages. In the first stage, a comprehensive scheme was created by examining the methods of electricity production from solar energy in general. In the second stage, the structures and types of photovoltaic cells were examined. In the third stage, concentrated solar energy systems were examined. Finally, electricity production systems from solar energy are compared and the results are presented.*

\* senberire@gmail.com  
doi : 10.46399/muhendismakina.1398947

## GÜNEŞ ENERJİSİNDEN ELEKTRİK ÜRETİM YÖNTEMLERİ

### Anahtar Kelimeler

### Öz

Güneş enerjisi,  
fotovoltaik sistemler,  
konsantre güneş  
sistemleri

*Bu çalışmada, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren fotovoltaik hücreler ve dolaylı yoldan güneş enerjisini yoğunlaştırarak kızgın buhardan elektrik enerjisi üreten konsantre güneş enerjisi teknolojileri detaylı olarak incelenmiş, kendi aralarında sınıflandırılmış ve teknik olarak karşılaştırılmıştır. Güneş enerjisinden elektrik üretim yöntemi ve teknolojileri üzerine yapılan incelemeler üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, güneş enerjisinden elektrik üretim yöntemleri genel olarak incelenerek kapsamlı bir şema oluşturulmuştur. İkinci aşamada fotovoltaik hücrelerin yapıları ve çeşitleri incelenmiştir. Üçüncü aşamada ise konsantre güneş enerji sistemleri incelenmiştir. Son olarak güneş enerjisinden elektrik üretim sistemleri karşılaştırılmış ve sonuçlar sunulmuştur.*

Derleme Makalesi

Review Article

Başvuru Tarihi : 01.12.2023

Submission Date : 01.12.2023

Kabul Tarihi : 04.06.2024

Accepted Date : 04.06.2024

### 1. Introduction

Energy serves as the foundational input of civilization and stands as one of the most significant indicators for gauging a civilization’s levels of production, consumption, and development. Moreover, it constitutes a fundamental driver for social and economic progress. Particularly with the proliferation of technological devices, there is a noticeable escalation in per capita energy consumption. It is an undeniable reality that alongside this escalating energy demand, fossil fuel-based energy reservoirs are swiftly depleting. The environmental harm resulting from the surge in CO<sub>2</sub> emissions attributed to the utilization of fossil fuel-based energy resources incentivizes global efforts to explore alternative energy sources.

According to the 2022 report by the Organization of Petroleum Exporting Countries (OPEC), solar, wind, and geothermal energy resources are expected to grow at an average annual rate of 7.1% until 2045. The increase in the use of renewable energy resources will be slightly lower than the growth of gas and oil. Renewable energy sources accounted for 2.6% of global energy in 2021, and this rate is expected to increase to just below 11% by 2045 (OPEC, 2022). In 2022, solar power plants accounted for 68.2% of the total renewable energy production worldwide (IEA, 2023).

The sun is composed of hydrogen (H) and helium (He). These atoms are ionized as H<sup>+</sup> and He<sub>2</sub><sup>+</sup>. The Sun continuously acts as a reactor, releasing fusion energy in its core, and these fusion reactions are the source of solar energy. The energy sent by the Sun to the Earth in 1 hour is equivalent to the energy provided by approximately 13 billion tons of hard coal (D. R. Mills, 2001).

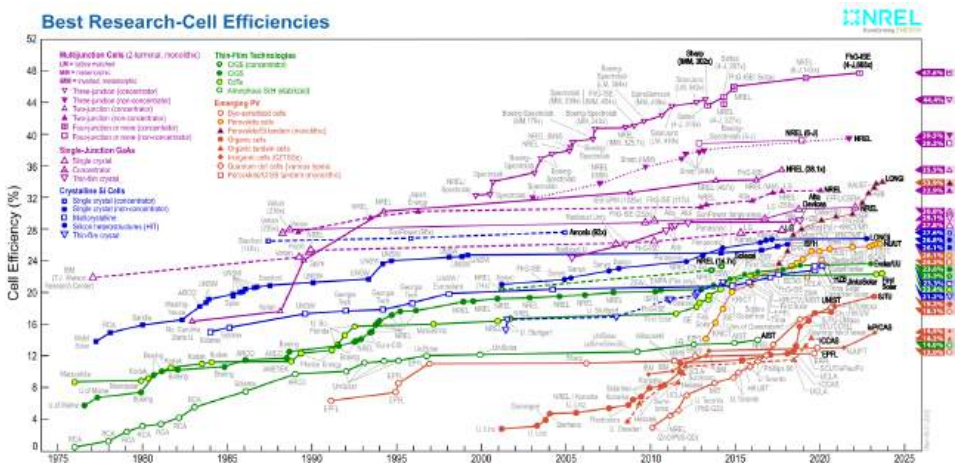


Figure 1. Cell efficiency change graph over the years (NREL, 2023a).

Significant advances have been made in the efficiency of photovoltaic cells used in both space and terrestrial applications to harness the large amounts of energy coming from the sun. These advances in the efficiency values of different photovoltaic cell structures from 1976 to the present are summarized in the graph in Figure 1 by the National Renewable Energy Laboratory (NREL) in the United States (NREL, 2023a). Although the efficiency achieved in the 47-year period was quite high, many of the photovoltaic cell structures could not be commercialized due to cost and were not suitable for mass production.

The history of photovoltaic cells dates back to the 1800s. Alexander Edmond Becquerel discovered the first photovoltaic effect in 1839, during his scientific studies on platinum layers. Becquerel's research gained momentum with the discovery of photoconductivity, which is based on the generation of current by immersing two platinum electrodes in a solution containing a metal halide salt (Prevenslik, 2003). In 1873, Willoughby Smith discovered photoconductivity in Selenium (Se), creating the first simple photovoltaic mechanism (William Grylls Adams, 1875). In 1877, it was proven that solid materials could also produce photovoltaic effects, with GW Adams and R.E. Day observing the photovoltaic effect in Selenium crystals (Jagdeo, Sharon, and White, 2021). In 1883, Charles Fritts developed the first functional 1.1% efficient photovoltaic cell by coating Selenium with a very thin layer of gold (Fraas and O'Neill, 2023). The most comprehensive theoretical study on the photovoltaic effect was carried out by Albert Einstein in 1905. This theoretical work was tested by Robert Millikan in 1916, and in 1932 it was announced that the photovoltaic effect was observed in the Cd-Se structure (Petrova-Koch, Hezel, and Goetzberger, 2008). Russell Ohl patented the modern PV (photovoltaic) cell in 1946 (Patent No. US2443542A, 1948). Silicon PV technology was born in 1954 at Bell Laboratories with the development of the first silicon photovoltaic with 6% efficiency by Daryl Chapin, Calvin Fuller, and Gerald Pearson. (Goetzberger, Luther, and Willeke, 2002). In 1957, Hoffman Electronics developed Silicon PV cells with 8% efficiency, and in 1958 with 9% efficiency (Orton, 2008). The first technical application of electricity generation from silicon photovoltaic cells was carried out on the American Vanguard satellite in 1958. These cells produced 0.1W power per 100 cm<sup>2</sup>. The use of photovoltaic cell technology in space studies enabled the rapid development of this technology and its efficiency reached 15% in the early 1960s (Messenger and Abtahi, 2018). In 1970, Zhores Alferov developed GaAs-doped (Gallium Arsenide) heterojunction photovoltaic cells (Alferov et al., 1971; Olgun Konur, 2016). With the onset of the oil crisis in the late 1970s, the search for alternative energy sources began. This increased the interest in PV cells, and R&D and production of PV cells accelerated. PV cells have been produced from different materials such as Amorphous Silicon (a-Si), which was defined as thin film PV cells in 1976, GaAs,

Copper Sulphide (CuS) and Cadmium Sulphide (CdS), Cadmium Telluride (CdTe) in the 1980s (Keskinel, 2015). In 1985, 20% efficient Silicon photovoltaic cells were produced at the University of New South Wales. After the 1980s, the efficiency of two-joint GaAs-doped solar cells, which is a new method, reached 22%, and the efficiency of three-joint tandem solar cells reached 24% (Ishibashi et al., 1986). The first organic solar cell was produced at Kodak by Tang et al (Tang, 1986). Three-junction photovoltaic cells were developed with 20% efficiency in 2000, 26% efficiency in 2002, and 28% efficiency in 2005 (Sarver, Al-Qaraghuli, and Kazmerski, 2013). In 2006, 40% efficient three-junction photovoltaic cells were developed at Spectrolab and polysilicon was used in photovoltaics (Ermer et al., 2012; R R King et al., 2007). Fraas et al have developed a 33% efficient Dual Focus HCPV Module in 2006 (Fraas and O'Neill, 2023). In 2007, the University of Delaware announced a new world record in Solar Cell Technology with an efficiency of 42.8% (University of Delaware, 2007). In 2008, NREL broke the world record at the time by developing a 40.8% efficient three-junction photovoltaic cell (NREL, 2008). In 2009, Spectrolab broke NREL's record by developing a 41.6% efficient triple-junction photovoltaic cell (R Richard King et al., 2009). In 2013, cumulative solar PV installations worldwide exceeded 100 GW (Kapluhan, 2015). In 2016, engineers at the University of New South Wales set a new world record for converting unfocused sunlight into electricity, with an efficiency of 34.5% (Eric Mack, 2016). In 2016, it was announced that 22.1 percent of the energy in sunlight was converted into electricity using Cadmium Telluride. This technology covers approximately 5% of the world solar market, today (Richard Martinarchive page, 2016). In 2018, Alta Devices Company in the USA achieved 29.1% solar cell conversion efficiency according to Germany's Fraunhofer ISE Callab certification. (John Fitzgerald Weaver, 2018). In 2019, NREL in the USA achieved 47.1% solar cell efficiency, a world record, using multi-junction concentrator solar cells (NREL, 2020). Important research and development activities continue in photovoltaic technology, such as how to increase the efficiency of and benefit from solar cells, with different designs (Bi et al., 2022; Chander and Tripathi, 2023; Liu, Jin, Li, Zhao, and Badiei, 2022; Saeed et al., 2022; Salhi, 2022; Shakibi, Afzal, Shokri, and Sobhani, 2022; Sharaf, Huzayyin, and Yousef, 2022; J. Wang et al., 2022; Z. Wang et al., 2023; Zhang et al., 2022).

Another way to convert solar energy into electrical energy is concentrated solar energy systems. In these systems, solar energy is focused on a region and converted first into heat energy and then into electrical energy.

Focusing the sun's rays was first used to light fire. It is said that in 250 BC, Archimedes burned the wooden ships surrounding Syracuse by concentrating the sun's rays with mirrors (Doraiswamy, 2002). With the discovery of the lens in 1600, studies in this field accelerated. In 1860, Mouchot focused sunlight on a

specific surface with parabolic mirrors and invented a small steam engine. These machines were the forerunners of today's modern parabolic dish collectors. In 1907, Maier and Remshardt patented the Parabolic Trough Collector (PTC), which they designed for direct steam production (Kılıç Abdurrahman and Öztürk Aksel, 1983). The solar collector roughly reached its present design in 1908, when William J. Bailey invented a collector with an insulated box and copper coils (Gong and Sumathy, 2016). In 1913, Shuman and Boys designed a steam engine using parabolic mirrors. In this way, they were able to draw water from the Nile river with a water pump (Ackermann, 1915; Mohanad Abdulzееz Abdurraheem Al-fellag, 2014). Baum et al. developed the principle of the Linear Fresnel Collector (LFC), followed by Italian Mathematician Giorgio Francia in 1961, who designed Fresnel reflectors that performed both linear and two-axis tracking (Baum, Aparasi, and Garf, 1957). A kinematic Stirling engine called the solar-powered steam Stirling 4-95 was developed in the late 1970s and early 1980s by several companies, including United Stirling AB, Advanco Corporation, McDonnell Douglas Aerospace Corporation (MDA), and NASA (Baharoon, Rahman, Omar, and Fadhl, 2015). Lorin and Hull conducted optical system research to achieve maximum power in heliostat field arrangement in central receiver solar towers (Vant-Hull, 1977). In 1979, Gaul and Rabl examined the optical efficiency of parabolic trough type solar concentrators by recording the efficiency change with solar radiation at all hours of the day. (Gaul and Rabl, 1980). Gee examined linear focusing solar concentrators and solar tracking systems. He compared solar tracking systems and conducted experimental studies (Gee and Institute, 1980). Collares-Pereira et al. have studied parabolic trough systems. They found the formulation required for the highest concentration (Collares-Pereira et al., 1979). McDonnell Douglas Aerospace Corporation (MDA) produced 8 prototype dish engines to commercialize parabolic dish technology in the mid-1980s, but due to the state of the energy market, the company ceased all its energy-related activities. Prototypes of MDA were sold to Southern California Edison (SCE) (T. R. Mancini, 1997). The commercial United Stirling 4-95 was operated by SCE from 1986 to 1988. It converted solar energy into electricity with a net efficiency of approximately 30% and recorded an annual efficiency of approximately 12% in its last year of operation (Stine and Diver, 1994).

Hession and Bonwick worked on the system that monitors concentrators of different sizes (Hession and Bonwick, 1984). Jeter worked on the distribution of concentrated rays on parabolic trough systems and the calculation of optical efficiency (Jeter, 1986). Collares-Pereira et al. have studied the reduction of heat losses in parabolic corrugated concentrators (Collares-Pereira, Gordon, Rabl, and Winston, 1991). In 1993, a linear Fresnel collector was developed at the University of Sydney, a prototype was designed and named Compact Linear Fresnel Col-

lector (CLFC). The system includes two receiver towers to collect reflected solar rays from diffusing mirrors (D. Mills, 2004; D. R. Mills and Morrison, 2000). In the early 1990s, Cummins Engine Company tried to commercially produce bowl/Stirling systems using a free-piston engine instead of a kinematic engine to reduce maintenance and cost (T. R. Mancini, 1997). In 1991, in a development program called the Dish/Stirling Joint Venture Program (DSJVP), development of a 5–10 kW Stirling system for remote power applications began, but in 1996, Cummins Engine Company ceased all activities in the development phase due to major unresolved technical problems and decided to cancel the project (John R Bean and Diver, 1995; J R Bean and Diver, 1992). A program called the Utility Scale Joint Venture Program (USJVP) was initiated by Science Applications International Corporation (SAIC) and Stirling and Thermal Motors (STM) to develop a 25-kW dish/Stirling engine system in late 1993. They have been successful in demonstrating a 20 kW Stirling engine (Phase 1) in Golden, Colorado (Gallup, Mancini, Christensen, and Beninga, 1994). Kalogirou et al. have worked on modeling steam production systems in parabolic trough-type condensers (Kalogirou, Lloyd, and Ward, 1997). Genç has developed a single-axis solar tracking system (Asim Genç, 1998). Siala and Elayeb tried to design heliostats using the graphical method in solar towers with central receivers. They expressed their designs in graphical data using mathematical formulas (Siala and Elayeb, 2001). Zarza et al. have worked on the development of new types of solar power plants that provide direct steam production in the absorber tube of parabolic trough-type solar concentrators (Zarza et al., 2002). Çolak worked on modeling the parts required for optics and heat used in parabolic trough concentrators (Levent Çolak, 2003). Chen et al. made two different heliostat designs in solar towers with central receivers and evaluated their performances (Chen et al., 2004). Kribus et al. were interested in receiver designs in solar towers with central receivers and conducted research on how power changes with temperature (Kribus, Vishnevetsky, Yogeve, and Rubinov, 2004).

Bakos worked on two-axis solar tracking for parabolic trough concentrators (Bakos, 2006). Riffelmann et al. have studied the optical efficiency of parabolic trough concentrator solar power plants (Riffelmann, Neumann, and Ulmer, 2006). Garcia-Valladares and Velazquez have simulated the heat and flow behavior of single- and double-pass parabolic trough-type solar concentrators (Garcia-Valladares and Velázquez, 2009). Wu et al. studied the parabolic dish solar thermal power system and evaluated the average heat-electricity conversion performance of the system. They found the average efficiency of the system to be 20.6% (Wu, Xiao, Cao, and Li, 2010). A three-dimensional numerical study of heat transfer in a longitudinally finned parabolic slotted receiver using different types of nanofluids was carried out by Fernández-García et al (Fernández-García, Zarza, Valenzuela, and Pérez, 2010). Today, research on photovoltaic systems and concentrator solar energy systems continues intensively. Important research and development activities continue in concentrated solar system technology, such



as how to increase the efficiency of and benefit from those systems, with different designs (Arias, Cardemil, Zarza, Valenzuela, and Escobar, 2022; Khan, Asfand, and Al-Ghamdi, 2022; Merchán, Santos, Medina, and Hernández, 2022; A. Sharma, Shukla, Singh, and Sharma, 2022; Sheikholeslami, 2022; Xu et al., 2022).

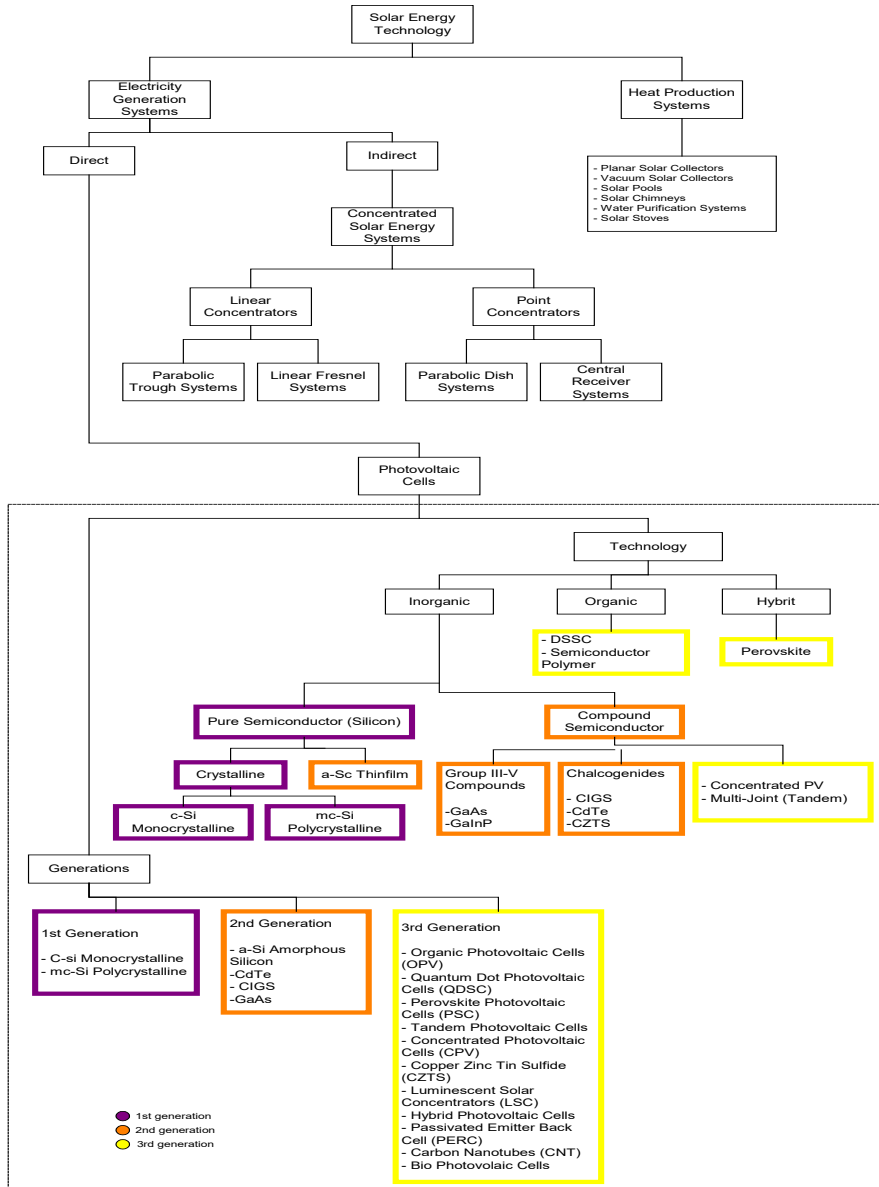


Figure 2. Solar Energy Technologies.

Within renewable energy systems, there are hybrid structures that utilize multiple conversion systems together, such as solar, wind, and bio-energy. Hybrid systems are not within the scope of this study. However, researchers can refer to the following sources for hybrid systems: (Abdolmaleki and Berardi, 2024; Ahmed, Das, Das, Hossain, and Kibria, 2024; Falope, Lao, Hanak, and Huo, 2024; Güven and Mete, 2021; Güven and Samy, 2022; Güven, Yörükeren, and Mengi, 2024; Güven, Yörükeren, and Samy, 2022; Güven and Yücel, 2023; Padmanabhan and Anbazhagan, 2024).

In this study, photovoltaic cells that directly convert solar energy into electrical energy and concentrated solar energy technologies that indirectly produce electrical energy from superheated steam by concentrating solar energy were examined in detail, classified among themselves, and compared technically.

## 2. Method

In this study, methods for generating electricity from solar energy in the literature have been researched. The research was not limited to academic literature; reports from official organizations working on energy were also included in the study. First, an in-depth literature review was conducted to identify the studies conducted so far on generating electricity from solar energy. Then, the current state of PV and CSP solar energy technologies was investigated. Based on the information obtained, a detailed graphical tree representation of solar energy technologies was created. Finally, PV and CSP technologies were compared in terms of their advantages and disadvantages. Overall workflow of the review methodology is depicted in Figure 3. In this study, adherence to research and publication ethics has been ensured.



Figure 3. An overall workflow of the review methodology.

## 3. Solar Energy Technology

2.2 billion units of the energy emitted by the Sun reaches the Earth and constitutes our main energy source. The energy falling from the Sun on the total landmass for 270 minutes is equal to the energy consumed by the whole world in one year (International Energy Agency, 2011). This energy has been used for many years.

The main purpose of preferring solar energy is to mitigate the damage fossil-based energy sources cause to the environment and the limited nature of these

energy sources. Solar energy can be converted to another type of energy by a suitable method depending on the area of use. The most needed types of energy today are heat and electrical energy. As shown in Figure 2, solar energy can be converted into heat energy and electrical energy using different technologies. This conversion occurs by using PV cells, which directly convert solar energy into electrical energy, or indirectly by using concentrated solar power (CSP) technology, which produces electrical energy from steam by concentrating solar energy.

Two types of classification can be made in electricity generation using PV cells: i) according to their generation and ii) according to the technology used.

In the classification of PV cells according to their generation, the first generation includes crystalline silicon (c-Si) wafer-based cells as monocrystalline (single crystalline silicon: mono c-Si) and polycrystalline (polycrystalline silicon: m-Si, poly c-Si). The raw material of these cells is high purity silicon crystals. The production process requires advanced technology.

The second generation is based on thin film technology. This includes Si-based tandem solar cell technologies such as Amorphous Silicon (a-Si), Cadmium Telluride (CdTe), Copper Indium Gallium Selenide (CIGS)/Copper Indium Selenide (CIS) and single crystal thin film technology such as Gallium Arsenide (GaAs). These cells are mostly manufactured for roof applications.

Third generation PV cells include organic materials as well as multijunction cell technologies, innovative non-silicon-based technologies, namely organic/semi-organic PV cells (OPV), dye-sensitized solar cells (DSSC), quantum dot (QD) solar cells, Perovskite solar cells (It covers many new concept devices such as PSC), Tandem solar cells, CZTS, Luminescent solar cells.

The efficiency and performance of these types vary since different types of semiconductors are used. While the first- and second-generation PV modules are commercially more efficient and available for large-scale production, some of the third generations are still in the R&D (Research & Development) stage.

According to the technology used, classification is made in three parts: inorganic, organic and hybrid. Traditional Silicon-based solar cells (c-Si, mc-Si) and compound polymers (CIGS, CdTe, GaAs, GaInP, CZTS, CPV, Tandem) are in the inorganic class. Although the production cost of inorganic materials is high, they are preferred due to their high efficiency. Conductive polymers, dyes, pigments and liquid crystals can be used to make organic-based solar cells. DSSC and Semiconductor Polymer based organic cells are included in this group. Hybrid cells have been developed to combine the advantages of organic and inorganic-based cells. Perovskite photovoltaic cells are included in this group.

Two types of classification can be made in electricity production using CSP

systems. The first type includes Parabolic Trough Concentrators and Planar Fresnel concentrators, which perform linear condensation. The second type includes the Central Receiver and Parabolic Dish concentrators, which follow the sun in two axes, concentrate the sun rays by point focusing and thus reach very high temperatures.

The methods and classifications given so far are examined in detail under subheadings in the following sections.

### 3.1 Photovoltaic Cells

The word photovoltaic (PV) consists of the Greek words; photos, meaning light, and volt. The term photovoltaic means the production of electricity from light. In this section, photovoltaic cell structure and various photovoltaic technologies will be discussed.

#### 3.1.1 Structure and Working Principle of Photovoltaic Cells

The photovoltaic system uses the concept of the photovoltaic effect, first observed by Alexandre Edmond Becquerel in 1839 (Prevenslik, 2003). The PV effect can be defined as the formation of a voltage difference when light falls on a system between two electrodes connected to each other, whether solid or liquid.

A Photovoltaic cell (solar cell) is a simple semiconductor device that, in principle, converts sunlight into electrical energy. In other words, when solar radiation (photon energy) hits the semiconductor material and is absorbed by this material, an electron is broken off from the atomic bond in that material and the electrons broken off from the atoms they are bonded to begin to circulate freely within the material. Thus, electron current occurs. The electron current creates voltage in the potential field of the cell, resulting in electric current as shown in Figure 4-a. Depending on the current and voltage, power output is obtained between the photovoltaic cell contacts (Ayşe Özge Küpeli, 2005).

There are three basic elements in the structure of the photovoltaic cell to create photocurrent (Fortunato et al., 2016; Tushar K. Ghosh and Mark A. Prelas, 2011):

1. A photosensitive material (absorber material) in which photons can form charge carriers
2. Separation of load carriers (PN Junction),
3. An external circuit (metal grid) to collect photon-generated charge carriers.

The absorber material transfers the energy of the incident photons to the valence electrons. PN junction is the combination of N-type (emitter) and P-type (base)

region that creates an electric field. The metal grid ensures current flow and captures electrons. The design of the metal grating can be optimized to minimize drag and ghosting. In addition, the photovoltaic cell structure is basically similar to the structure and operation of the diode.

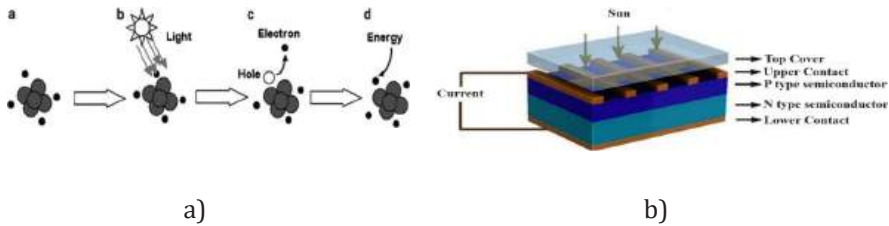


Figure 4. a) Mechanism of generating energy from solar radiation (photon) in semiconductor material (Tushar K. Ghosh and Mark A. Prelas, 2011) b) Photovoltaic Cell Structure (Özgün, ÖZDEMİR, and ÖZMEN, 2022).

The photon affecting the junction region is absorbed by the semiconductor material. The photon provides energy to the electron to move it from the valence band to the conduction band. So, an electron-hole pair is formed. During this formation, the electron-hole pair is separated from each other by the effect of the electric field in this region, and the electrons move towards the N region and the holes move towards the P region. The separated excitons create voltage at the ends of the photovoltaic cell. These processes continue as long as the photons fall on the battery surface. Photons coming from the sun that are not converted into electrical energy increase the temperature of the photovoltaic cell (Clean Energy Institute, 2014; Tushar K. Ghosh and Mark A. Prelas, 2011).

The main material of the photovoltaic cell structure consists of PN semiconductors in the middle layer, as seen in Figure 4-b. The top part of the photovoltaic cell is covered with transparent glass and plastic materials to protect it from external influences. The bottom layer has an anti-reflective coating to absorb sunlight as much as possible and prevent reflection. If there is no anti-reflective coating, nearly one-third of the sunlight falling on the battery surface will be reflected and cannot be used. Under the anti-reflective coating, there is a front negative contact (front contact surface, upper connection contact, negative pole grid), whose material is usually Copper (Cu), which allows the electric current to be collected and transmitted to the network. Under this layer, there is a structure where electric current occurs. This structure consists of two different layers. The first is the N-layer, which is the layer with the addition of Phosphorus atoms to Silicon and forms the negative side of the PV cell. The second P-layer is the layer that forms the positive side of the battery, consisting of Silicon with added Boron atoms. The

area where positive and negative charges meet, called the PN junction, is between these two layers. The back contact (layer), where electrons enter and acts as a positive contact, is on the back surface of the PV cell. This layer provides support to the cell and ensures that the circuit in which electrons enter is completed (Özgün et al., 2022; Tushar K. Ghosh and Mark A. Prelas, 2011).

### 3.1.2 Power Efficiencies and Usage Areas of Photovoltaic Cells

Photovoltaic battery is measured by its efficiency, and the most important parameter that determines the efficiency is the percentage of the generated energy that can be converted into usable electricity. Additionally, efficiency can be defined as the ratio of the photon energy falling on the photovoltaic cell surface to the resulting voltage. A beam of light corresponding to a wavelength above a certain energy level is sufficient to provide the required energy. The majority of the remaining light beam is either absorbed or reflected by the structural material in the cell. However, the efficiency of the solar cell depends on factors such as the area of the PV module, the terrain, the manufacturing and assembly method, etc. Efficiencies ranging from 10% to 40% are observed for various materials used in PV cells (Geisz et al., 2018; Green et al., 2018).

PV technologies are widely used in the direct conversion of radiant energy to electricity. PV technology is suitable for regions with low and high solar radiation.

Solar PV systems can be used for large-scale electricity generation. PV technology is also sustainable, especially for small-scale applications. PV systems can be used both connected to the grid and independently of the grid.

Some of their notable features are that they operate silently, do not cause any pollution, and can operate in harsh (arid/semi-arid) climate conditions with few people for operation and maintenance (Ma, Yang, and Lu, 2014).

Another important feature is that maintenance and operating costs after installation are lower than other energy production systems. Since the panel efficiency is around 20-30% in the first use and the efficiency decreases over the years, the payback period for its costs is quite long. For this reason, in order to benefit from photovoltaic panels effectively, it is extremely important to choose a system suitable for the purpose of use and the area to be installed.

A lot of research has been done to achieve the most efficient and cost-effective material for PV cells. The following requirements are sought for ideal solar cell material. (Goetzberger et al., 2002):

- The material used to produce solar cells must have a band gap of 1.1 to 1.7 eV.
- The material must have a direct band structure

- The material should be easily available and non-toxic.
- The material must be suitable for large-scale production and can be easily reproduced,
- The material must have a long-term stability factor and good PV conversion efficiency.

Some major disadvantages associated with PV solar cell technologies are:

- In the solar cell production process, nano-sized semiconductor materials, hazardous chemicals, etc. is dealt with. If not used and disposed of appropriately, these materials can affect the environment and health (Kazmerski, 2012; Mitigation, 2011).

For large-scale electricity generation applications, it requires large land due to the low power density of the photovoltaic module (Cucchiella, D'Adamo, Gastaldi, and Koh, 2010).

### 3.1.3 Classification of Photovoltaic Cells

In this section, the classification of photovoltaic cells according to their generation is presented under subheadings.

#### First Generation Photovoltaic Cells

Cells that use high purity Silicon crystals as raw materials are called first generation cells. Monocrystalline or polycrystalline silicon can be utilized with large grain sizes. It is the most dominant PV cell type on the market. Since silicon has no reserve shortage, its efficiency has improved considerably since its first production. Silicon is the most widely used material in solar cell production due to its excellent electronic, chemical and mechanical properties, durable crystal structure and non-toxic properties. Silicon's crystal structure, which does not deteriorate easily, ensures its optical and electrical properties are permanent. Solar energy technologies based on this semiconductor are considered the most advanced.

In general, the advantages of first-generation can be given as more efficient at lower temperatures and need less space for a given unit of power. Additionally, due to the development of strip silicon technology, it is anticipated that the production cost of this generation will decrease further.

#### Second Generation Photovoltaic Cells

Second-generation technology was introduced in the 1970s to avoid the high economic and environmental cost (in terms of materials and energy) of crystalline silicon-based cells. This generation uses less semiconductor material while maintaining the appropriate efficiency of the cell. Thin film cells are considered

second generation PV cells. Solar cells produced with this technology are very thin. Thin film solar cell technology uses a 1-10 $\mu\text{m}$  thick photoactive layer (Botchich et al., 2012).

Since less silicon material is used in the production process, their costs are lower than the first-generation cells and the production process is shorter; However, they still have a small share of the market due to their lower efficiency than c-Si. The thickness of the film layers varies from a few nanometers (nm) to tens of micrometers ( $\mu\text{m}$ ). Therefore, they can be placed on flexible materials, connected to modules in the manufacturing process via laser cutting, and stacked vertically to form third-generation tandem (multi-joint) cells (NREL, 2023b).

Thin film modules shows better performance under low irradiance conditions. Aesthetically, they are flexible and lightweight.

### Third Generation Photovoltaic Cells

The relatively high cost and complex manufacturing of first- and second-generation silicon cells have encouraged researchers to develop new PV technologies, namely third generation PV cells. Third generation photovoltaic cells are the development of first-generation and second-generation PV cells for higher efficiency and environmental friendliness.

Third generation photovoltaic cells include many innovative technologies, and many are still in the R&D phase. These cells generate electricity using new technology processes based on organic, semi-organic or inorganic materials, hybrid systems, nanometer and molecular scale components. In most cases, they are made with thin-film-based cells in most cases (Blieske et al., 2019).

The notable features of these cells include low material and production costs and simplicity of the production process. Although silicon-based solar cells are more power efficient, third-generation PV cells are better in aspect of sustainability. Lots of effort is being devoted to improving the efficiency of these solar cells. According to the relevant research, the efficiency of third-generation PV cells is comparable to silicon solar cells. (Malinowski, Leon, and Abu-Rub, 2017).

Although they are currently mainly in the laboratory stage, they are quite promising for future applications and will soon take their place in the market.

## 3.2 Concentrated Solar Energy Systems (CSP)

With today's technology, generating electricity from steam using steam turbines has become widespread. High temperatures are required to produce electricity with steam turbines. Concentrating systems have been developed to reach these levels. Solar capacitor systems focuses the rays from the sun on a narrow area.



Thermal CSP technology does not have a mechanism that is made of crystalline silicon and uses solar energy directly, as in PV cells. CSP is a clean energy source that works according to the principles of traditional thermal power plants. In other words, concentrator systems are used in order to produce electricity from the sun for the longest time and in high volume (Fernández-Garcia et al., 2010; Zarza E, 2010). Concentrator systems are technology based on the concentrated heat system concept, which is to condense direct normal solar radiation for producing steam or hot air, first turning it into heat (superheated steam) and producing electricity using the appropriate thermodynamic cycle and the traditional power cycle. Briefly, CSP technology has two main logics; collecting sunlight and converting it into heat and converting the heat energy into electric energy or another kind of useful energy through secondary mechanisms. Figure 5 shows the simplified operating diagram of the CSP system.

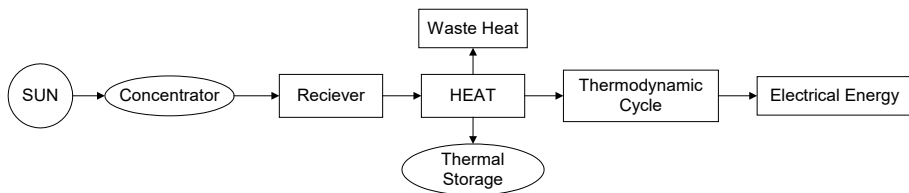


Figure 5. CSP working diagram.

The amount of sunlight falling on the ground varies depending on location on earth, seasons and time of day. While the position of the sun's rays is more perpendicular to the earth on summer days, it is more inclined on winter days. On a clear day, high solar irradiation (DNI ) represents 80-90% of the total solar energy, while on a cloudy day, the DNI rate is close to zero. In this context, it is not possible to obtain electricity from solar energy with the same efficiency. While the most electricity can be produced between the hours of 11-15, when the radiation is most intense, it is quite low in the morning and afternoon hours (Şen H, 2009).

The biggest advantage of these systems compared to other solar energy technologies is that the heat can be stored in a short time and thus can produce electricity even during cloudy or evening hours, that is, when there is no sun. This possibility can be realized by integrating energy storage systems to save thermal energy from daylight for use during periods of no sunlight.

The advantages and disadvantages of CSP technology are given below.

*Advantages :*

- It can be installed in hot, dry, harsh climatic conditions and operate without human intervention.

- It includes readily available components such as mirrors, tubes, and electrical generators.
- It can be hybridized with fuel systems (hybridization, combination) and heat can be stored. Hybridization ensures continuity by increasing electricity production from the power plant to 24 hours a day, 330 days a week. Heat storage, on the other hand, can keep the heat stored during the day in molten salt tanks, producing electricity for another 5-7 hours after sunset and responding to the rising consumption in the evening hours. The biggest advantage of concentrating systems is that they can store heat and quickly convert it into electrical energy when necessary. The ability to provide energy when needed, regardless of time difference, during busy periods makes CSP systems attractive.
- In addition to electricity generation, CSP technologies can also meet industrial heat and desalination (a process that removes mineral components from salt water) needs.

*Disadvantages:*

- These systems are highly dependent on daylight and affect the efficiency of the system in bad weather conditions.
- CSP needs direct sunlight. For this reason, CSP's installation areas are limited.
- CSP technology has many advantages for large-scale electricity generation, but requires quite large space to install the plant.
- CSP technologies are not suitable for small-scale electricity generation as they require high production costs. Although it is possible to produce small volumes of electricity in CSP systems, as in PV systems, it is not economically advantageous. In Europe, the economic size is determined as 50 MW.

Although all concentrated solar energy systems basically work on the same principle, they differ in terms of collectors, which are the methods of focusing solar energy. One of the most important parameters for collectors that concentrate sunlight is the concentration factor. Concentration factor is the ratio of area of sunlight collected and area of the solar receiver. The concentration ratio is about 300 in two-dimensional concentrators (parabolic trough) and about 40000 in three-dimensional concentrators (parabolic bowl). In such collectors, sunlight can be concentrated linearly or pointwise using reflective or beam-breaking surfaces (Tabak et al., 2009).

Solar concentration technologies can be given under two headings:

- Linear condensers; Parabolic Trough Concentrators and Linear Fresnel Concentrators;

- Point concentrators; Central Receiver Concentrators and Parabolic Dish Concentrators.

### 3.2.1 Parabolic Trough Concentrators

Parabolic trough concentrators are the most proven, most advanced, most economical and commercially creditable CSP technology among the technologies available today. Parabolic trough concentrator systems are equipped with a solar tracking mechanism that monitors the sun throughout the day to receive maximum solar radiation as shown in Figure 6-a.

Power plants with parabolic trough concentrators mainly consist of the following components: Parabolic trough reflector, heat transfer system, Rankine steam turbine/generator cycle, thermal storage system (optional).

Parabolic trough collectors are placed on the solar field in series and parallel rows and solar energy is collected at the power center and converted into electricity.

The collector consists of a parabolic mirror in which the reflective surfaces inside concentrate the rays on the absorbent receiver tube extending along the focal axis. Parabolic trough reflectors are generally 100m long, 6m aperture, and are positioned on the north-south axis. The mirror placed on the north-south axis focuses the sun along the axis on the receiver tube during daylight hours (Gülay İşler, 2018). The receiver pipe is a stainless-steel pipe coated to maximize the absorbance in the solar spectrum wavelength, with a surface absorbency of approximately 97%, consisting of glass-metal connectors, and containing the working fluid, placed slightly above the middle part of the parabolic mirror. This steel tube is placed inside the glass tube to minimize heat loss.

A vacuum condition is created between the tube and the pipe. Vacuum has a key role in receiver insulation, and lack of vacuum can result in four times more heat loss. Borosilicate glass tube is heat resistant, has an antireflective structure and high transmittance to minimize radiation losses. Solar radiation focuses on the receiver pipe located at the focal point of the parabolic slotted reflector. The concentrated radiation from the sun passes through the glass tube and hits the absorbing coating. It heats the working fluid (molten salt or synthetic oil) in the pipe to a temperature of 150-400°C, making the heated working fluid hot enough to produce steam used to drive a conventional steam turbine that produces power. The oil heated by the condensation process transfers heat energy to the water, causing the water to evaporate. If water is used as the heat transfer fluid, water vapor can be obtained directly. The resulting water vapor rotates the turbine and electricity is produced (Gülay İşler, 2018).

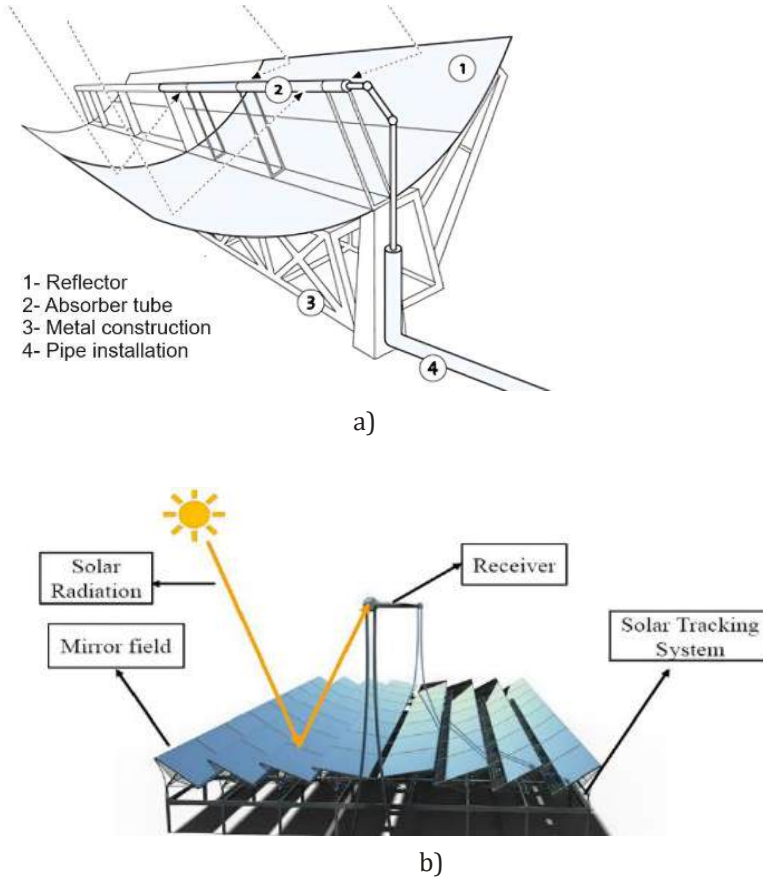


Figure 6. Parabolic and Linear Fresnel power plant schemes a) Parabolic Trough Power Plant Diagram (Eddine Boukelia and Mecibah, 2013) , b) Linear Fresnel concentrator power plant scheme (Patricia Scalco, Jacqueline Biancon Copetti, and Mario Henrique Macagnan, 2021).

PTCs are categorized by their operating temperatures. Generally, PTCs operate in the temperature range between 350 and 550 °C and are used mainly for electricity generation, while those operating in the 100-250 °C range are used for heating purposes (NREL, 2003).

### 3.2.2 Linear Fresnel Concentrators

This type of collector was first produced in Genoa in 1960 as linear and two-axis tracking, and its development continues (Nelson, Evans, and Bansal, 1975). In 1993, the first linear Fresnel concentrators (LFR) were developed at the University of Sydney and patented in 1995 (Üçgül and Ergün, 2014).

LFR are systems that focus and concentrate direct solar radiation coming at different angles onto a raised linear receiver with planar strip mirrors arranged on both sides of the receiver and transfer the heat to heat transfer fluid (HTF). The receiver, as in Figure 6-b, is a long tube coated with absorbing material known as a black chrome solar absorber. In this way, the air in the absorber is heated and this heat is transferred to the pipe inside the absorber and the fluid in the pipe. The resulting steam can be used directly if desired, or it can transfer this thermal energy to the traditional electricity generation system and be converted into electrical energy through a turbine (Engin Ergün, 2011). The most visible difference against the parabolic trough concentrators is the use of planar mirrors as reflecting surfaces in these systems.

Some components of the reflector are not used due to obstruction and inter-row shading. The energy cost of LFR increases due to a couple of reasons like heat losses, tube absorptivity and reflectivity of surfaces. LFR has thermal storage capacity as the operating temperature can reach up to 565°C with molten nitrate as HTF (Morin, Karl, Mertins, and Selig, 2015; V. Sharma, Nayak, and Kedare, 2015).

Linear Fresnel systems have several advantages that have attracted the attention of researchers. The notable ones are listed as follows:

- Linear Fresnel concentrators provide very high temperature for a variety of thermal energy applications.
- It is not necessary to use HTF or heat exchanger in DSG type power plants using linear Fresnel condenser.
- Since flat or elastic reflectors are used in its structure, it is much lower cost than parabolic trough reflectors.
- Due to its location close to the ground, less space is needed.
- High operating temperature and thermal efficiency, reduced investment costs and shortened payback period are other advantages of these systems.
- This technology can be used to produce hydrogen.

Being an innovative technology that has made great progress, the disadvantages associated with LFR are mostly technical and commercial as follows:

- Linear Fresnel concentrators are less efficient than other concentrators due to heat losses resulting from the single-axis solar tracking mechanism and linear focusing (Ong, Campbell, Denholm, Margolis, and Heath, 2013).
- Improved materials are needed to prevent ultraviolet degradation.
- To prevent dust from remaining in the gutters, they must be cleaned constantly.
- It requires excessive cost and maintenance due to the necessity of a monito-

ring system that increases its efficiency.

- To perform well, HTF such as molten salt is required as the operating temperature of the system is relatively high.
- It requires high solar radiation.

### 3.2.3 Central Receiver System (Solar Tower)

Central receiver tower technology is a type of solar thermal electricity generation system that performs point focusing. Central receiver systems (Solar tower) basically consist of two units: a tower carrying the receiver and mirrors (heliostat) placed around the tower to reflect the sun's rays to the receiver.

The rays coming from the sun are concentrated on the fixed receiver in the tower by mirrors with dual-axis solar tracking mechanism spread over a wide area, as shown in Figure 7-a. Distributed mirrors called heliostats follow the sun throughout the day. Each heliostat moves independently of each other and is constantly controlled by the computer, ensuring that the receiver always receives sunlight. The fixed receiver absorbs the radiation concentrated by the heliostats and obtains concentrated high heat energy. It transfers this heat to the heat transfer fluid (HTF). The molten salt (liquid salt melt) passing through the receiver is sent to the storage tank by increasing the temperature of a working fluid such as hot gas or water up to  $565^{\circ}\text{C}$ , and then the HTF produces steam by transferring the heat to the water (Tushar K. Ghosh and Mark A. Prelas, 2011). The produced steam is sent to the turbine to produce electrical energy. The efficiency of a typical solar tower is 15% to 25%. These facilities are the most suitable for applications between 30-400 MW.

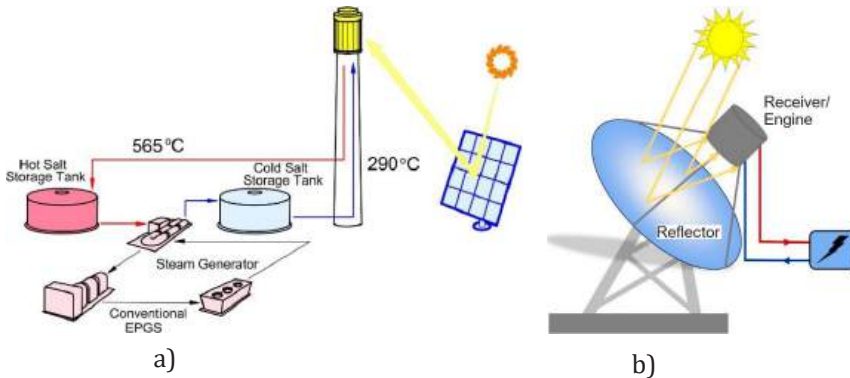


Figure 7. Central receiver and parabolic dish systems: a) Power plant scheme with central receiver system (Avila-Marin, Fernandez-Reche, and Tellez, 2013) b) Parabolic dish collector (Soomro et al., 2019).

Heat storage systems have been developed to enable central receiver systems to operate even when there is no sun. Thus, the continuity of the system is ensured. It is not commercially common like parabolic trough systems due to its high costs.

### 3.2.4 Parabolic Dish Concentrators

Parabolic dish concentrators can be defined as point focusing devices consisting of a concave (dish) concentrator, as in Figure 7-b, a solar tracking system, a heat absorber (receiver) placed at the focal point of the dish, a power conversion unit and a system control unit. It consists of many small flat mirrors placed to provide the shape of the parabolic dish collector or a single reflector in the form of a parabolic dish.

The bowl-shaped surface is concentrated (3000-4000 times) by focusing sunlight (about 92%) onto the receiving surface. The concentrated solar radiation collected by the receiver can be used in two ways: it is converted into thermal energy and used as direct heat energy, or it is transferred to the working fluid in the Stirling engine connected to the receiver and converted into electrical energy (T. Mancini et al., 2003).

Parabolic dish concentrators, consisting of one or more reflective surfaces, follow the sun on a dual axis and have high focusing rates. Independently these dishes can produce 5–50kW of electricity and their capacity can be increased by using them in series (J R Bean and Diver, 1993; Tushar K. Ghosh and Mark A. Prelas, 2011). The temperature range for Parabolic Dish Concentrators ranges from 400°C to 750°C with a condensation ratio of over 3000 and a thermal efficiency of 23%.

Stirling engine, which has good performance at temperatures lower than 950°C, is generally preferred for electricity generation in parabolic bowl concentrators. However, Brayton, Rankine or Rankine/Brayton engine systems can also be used. At higher temperatures, gas turbines used in combined cycles perform better (Barlev, Vidu, and Stroeve, 2011). Since there is no water cycle in parabolic dish systems with point concentration, they are very suitable for arid and desert environments.

Parabolic dish technology is suitable for small-scale power generation. Parabolic dish technology is also part of distributed solar power generation and can play an important role to reduce the load on central power plants.

Parabolic bowl concentrators are very advantageous in terms of heat concentration rate and total system efficiency. However, they are technologically more complex and costly systems. Since energy storage is not possible, a hybrid structure design is recommended.

#### 4. Comparison of Photovoltaic and Concentrated Systems

PV technology uses sunlight that causes the movement of electrons to produce electric current through the photovoltaic effect. CSP, on the other hand, uses sunlight to heat a liquid substance that will be used to power an electrical generator. CSP produces alternating current (AC). PV produces direct current (DC). Once the direct electric current is generated, it is converted to AC, usually using inverters, thus being distributed to the power grid.

While CSP systems can be applied in projects larger than 25 MW, PV systems also cover residential areas and the energy sector with their simple and small-scale installation.

Since PV systems produce electricity directly from sunlight instead of the sun's heat, they cannot store thermal energy. Therefore, it is clear that in terms of energy storage and efficiency, thermal energy storage technologies are better. This fact makes CSP systems a more attractive option for large-scale energy production.

Although the overall efficiency of PV plants is lower compared to CSP plants, PV systems require smaller installation area. In the same area, PV plants produce more electricity than CSP plants. The economy and efficiency of the PV cell mainly depend on its material.

PV systems can be installed more easily, at lower cost and in a much shorter time than CSP power plants, but they require more space for large-scale applications.

Installation of PV systems has a greater environmental impact compared to CSP plants. In the PV cell production process, various hazardous materials are used for semiconductor surface cleaning; Therefore, there is a risk of inhaling silicone dust for workers involved in manufacturing.

Today, PV panel prices have dropped significantly by 30-40%, and this rate is expected to increase further. Due to abundant module capacity, BNEF expects the price to drop to around \$0.19 per Watt for standard modules based on 166 mm wafers. The cost per unit of CSP is higher than that of PV.

Today, CSP plants are typically combined with thermal energy storage because it reduces the cost of electricity and provides production flexibility. The biggest advantage of CSP is that it can store energy using Thermal Energy Storage technologies and quickly convert it into electrical energy when necessary. The ability to provide optionally distributed power with long-term storage during peak times and regardless of day or night makes CSP systems preferred over PV.

While CSP requires DNI, PV systems can produce electricity by emitting sunlight. For this reason, the installation areas of CSP are more limited than PV.



The solar to electricity conversion efficiency for CSP systems varies between 15-40%. Compared with CSP technologies among themselves, the efficiency of the parabolic dish collector is the highest.

According to reports published by NREL, GHG (Greenhouse gas, greenhouse gas) emissions of central receiver tower and parabolic trough-based CSP systems range between 22-23g CO<sub>2</sub> eq/kWh, while for c-Si and thin film PV-based systems it is 50g CO<sub>2</sub> eq/ kWh. It is below kWh (NREL, 2012b, 2012a). Therefore, considering the GHG emissions of both solar power plants, CSP technologies are environmentally more favorable than PV systems.

Technical comparison of PV and CSP technologies is given in Table 9. As can be seen from the table, CSP systems are more efficient than PV systems. But this does not mean that CSP systems are the best option. Among the two technologies, PV is cheaper, leading energy investors to prefer it over CSP. In other words, despite its advantages, CSP is not a preferred technology.

Table 1. Comparison of PV and CSP Systems

| Method               | Technology        | Best Yield | Advantages  | Disadvantages   |
|----------------------|-------------------|------------|---|---|
| PV<br>1st Generation | monocrystalline   | 16-25%     | Silicon is considered the most advanced among solar cell production technologies due to its excellent electronic, chemical and mechanical properties, durable crystal structure and non-toxic properties. They are more efficient at low temperatures.  | Obtaining pure Si is a complex and costly process. The production process is complex. A lot of Si is wasted in its production. The energy of the incoming photons is greater than the band gap, so excess energy is lost as heat. |
|                      | polycrystalline   | 14-20%     |   |   |
| PV<br>2nd Generation | Amorphous Silicon | 9-14%      | This generation uses less semiconductor material while maintaining the appropriate efficiency of the cell. For this reason, its cost is lower than c-Si. They are very thin, flexible and light. It has a high absorption coefficient. Although it is cheaper than the first generation, its efficiency is lower. | The efficiency of thin film solar cells is lower than silicon solar cells. The toxicity of the material used in the construction is high. It causes environmental pollution during the fabrication process.                       |
|                      | CIGS              | 23.2%      |   |   |
|                      | CdTe              | 22.1%      |   |   |

|                              |   |                                |  |   |
|------------------------------|---|--------------------------------|--|---|
| PV<br>3rd<br>Genera-<br>tion | Organic                                     | 11-<br>18.22%                  | It has low material and production costs and simplicity of production process. It uses low-cost semiconductor materials with tunable band gap for optimum performance.   | Many have not yet proven themselves commercially.   |
|                              | DSSC  | 11.9±0.4%                      |  |   |
|                              | QDSC  | 1.46-<br>16.6%                 |  |   |
|                              | perovskite                                  | 29.15%                         |  |   |
|                              | GaAs  | 28.8%                          |  |   |
|                              |   | %11th,                         |  |   |
|                              | CZTS  | CZTSSe<br>12.6%                |  |   |
|                              | Group III-V<br>compo-<br>unds (Tan-<br>dem) | 20-20.8%                       |  |   |
| CSV                          | Parabolic<br>Trough                         | 24-26%<br>(15-16%<br>annually) | In addition to electricity generation, it can also meet industrial heat and desalination needs. It can be installed in hot, dry, harsh climatic conditions and operate without human intervention. Its components are simple. They can be hybridized with fuel-fired systems and store heat. | It is not suitable for small-scale electricity production as it requires high production costs. It is highly dependent on daylight and affects the efficiency of the system in bad weather conditions. A solar tracker and cooling system are required and these systems are quite expensive. |
|                              | Linear<br>Fresnel                           | 13% (9-<br>13% an-<br>nually)  |  |   |
|                              | With Cen-<br>tral Rece-<br>iver             | 14-20%<br>(17-18%<br>annually) |  |   |
|                              | Parabolic<br>Dish                           | 30-34%                         |  |   |

## 5. Conclusion

Energy is a fundamental input of civilization and one of the most valid symbols used to determine the production, consumption, and development levels of civilizations. It is also a key factor driving social and economic development. With the increase in technological devices, per capita energy consumption is rising day by day. To meet the growing energy demand, water resources, along with fossil and nuclear fuels, are predominantly used. However, the construction costs, construction and commissioning times, and operating costs and durations required for the use of these resources make it challenging for production facilities to keep up with demand. Additionally, the negative environmental impacts and CO<sub>2</sub> emissions of these production facilities pose a threat to current and future generations. This situation encourages the world to seek renewable energy sources.

Although renewable energy sources are not a new topic, studies in this field have

accelerated, especially due to the limited availability of fossil fuel resources and the visible environmental damages they cause. These studies, particularly focusing on solar and wind energy, fundamentally aim to increase efficiency and reduce costs. As a result of these studies, the share of renewable energy sources (excluding hydro) in global energy production was 2.1% as of 2021, and this is projected to increase to approximately 11% by 2045. As of 2022, the share of solar energy in total global energy production is 68.2%.

In this study, the methods used to generate electrical energy from solar energy have been investigated. In the literature, the methods used to obtain electricity from solar energy are divided into direct conversion and indirect conversion. For direct conversion, the photovoltaic effect is utilized. The PV effect can be defined as the voltage difference generated when light falls on a system consisting of two electrodes connected to each other, either in solid or liquid form. PV systems can be analyzed according to their technologies and generations. In indirect conversion, concentrated solar power technology, which generates electrical energy from steam by concentrating solar energy, is used. CSP systems can be categorized into linear concentrators and point concentrators. Due to their need for large installation areas, they are generally preferred in regions far from residential areas and in production stations with capacities over 25 MW.

This study aims to serve as a resource for researchers working on generating electrical energy from solar energy. To this end, the methods used to generate electrical energy from solar energy to date have been examined from a historical perspective. Both conversion systems have been thoroughly investigated, and the studies in the literature have been reviewed. The technological level, application areas, advantages, and disadvantages of the systems are presented comparatively. In future work, it is planned to publish review studies on other renewable energy sources.

## References

- Abdolmaleki, L., and Berardi, U. (2024). Hybrid solar energy systems with hydrogen and electrical energy storage for a single house and a midrise apartment in North America. *International Journal of Hydrogen Energy*, 52, 1381–1394. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319923059682>
- Ackermann, A. S. E. (1915). *The Utilisation of Solar Energy*. *Journal of the Royal Society of Arts*, 63 (3258), 538–565. Retrieved from <https://www.jstor.org/stable/41346462>
- Ahmed, M. M., Das, B. K., Das, P., Hossain, M. S., and Kibria, M. G. (2024). Energy management and sizing of a stand-alone hybrid renewable energy

system for community electricity, fresh water, and cooking gas demands of a remote island. *Energy Conversion and Management*, 299, 117865. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890423012116>

- Alferov, Z. I., Andreev, V. M., Garbuzov, D. Z., Zhilyaev, Y. V., Morozov, E. P., Portnoi, E. L., and Trofim, V. G. (1971). Investigation of the influence of the AlAs-GaAs heterostructure parameters on the laser threshold current and the realization of continuous emission at room temperature. *Sov. Phys. Semicond*, 4(9), 1573–1575. Retrieved from <http://62.44.99.18/photronics/Lasers/Beginning-of-the-Laser-Era-in-the-USSR.pdf#page=132>
- Arias, I., Cardemil, J., Zarza, E., Valenzuela, L., and Escobar, R. (2022). Latest developments, assessments and research trends for next generation of concentrated solar power plants using liquid heat transfer fluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 168, 112844. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112844>
- Asım Genç. (1998). *Performance Tests of Parabolic Through Type Solar Concentrator Tracking Sun on One Axis* (MSc). Gazi University, Ankara.
- Avila-Marin, A. L., Fernandez-Reche, J., and Tellez, F. M. (2013). Evaluation of the potential of central receiver solar power plants: configuration, optimization and trends. *Applied Energy*, 112, 274–288. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.05.049>
- Ayşe Özge Küpeli. (2005). *Solar cells and their efficiencies* (MSc). Eskişehir Osmaniye University, Eskişehir.
- Baharoon, D. A., Rahman, H. A., Omar, W. Z. W., and Fadhl, S. O. (2015). Historical development of concentrating solar power technologies to generate clean electricity efficiently – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 996–1027. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.008>
- Bakos, G. C. (2006). Design and construction of a two-axis Sun tracking system for parabolic trough collector (PTC) efficiency improvement. *Renewable Energy*, 31(15), 2411–2421. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.11.008>
- Barlev, D., Vidu, R., and Stroeve, P. (2011, October 1). Innovation in concentrated solar power. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 95, pp. 2703–2725. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.05.020>
- Baum, V. A., Aparasi, R. R., and Garf, B. A. (1957). High-power solar installations. *Solar Energy*, 1(1), 6–12. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(57\)90049-X](https://doi.org/10.1016/0038-092X(57)90049-X)
- Bean, John R, and Diver, R. B. (1995). *Technical status of the dish/stirling joint venture program*. Retrieved from <https://www.osti.gov/biblio/79749>

- Bean, J R, and Diver, R. B. (1992). *The CPG 5-kWe dish-Stirling development program*. Retrieved from <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/929181/>
- Bean, J R, and Diver, R. B. (1993). *Performance of the CPG 7. 5-kW [sub e] Dish-Stirling system*. Retrieved from <https://www.osti.gov/biblio/6158070>
- Bi, P., Ren, J., Zhang, S., Wang, J., Chen, Z., Gao, M., ... others. (2022). Low-cost and high-performance poly (thienylene vinylene) derivative donor for efficient versatile organic photovoltaic cells. *Nano Energy*, 100, 107463. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107463>
- Blieske, U., Müller-Ost, J., Meisenzahl, K., Grommes, E.-M., Gecke, R., Schneble, N., ... Volk, M. (2019). Current and future trends in photovoltaic technology. *2019 International Energy and Sustainability Conference (IESC)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/IESC47067.2019.8976871>
- Boutchich, M., Alvarez, J., Diouf, D., i Cabarrocas, P. R., Liao, M., Masataka, I., ... Kleider, J.-P. (2012). Amorphous silicon diamond based heterojunctions with high rectification ratio. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 358(17), 2110–2113. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2011.12.067>
- Chander, S., and Tripathi, S. K. (2023). Advancement in CdMnTe-based photovoltaic cells: Grain growth, deep states and device efficiency assessment with chlorine treatment. *Solar Energy*, 250, 91–96. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.12.033>
- Chen, Y. T., Kribus, A., Lim, B. H., Lim, C. S., Chong, K. K., Karni, J., ... Bligh, T. P. (2004). Comparison of two sun tracking methods in the application of a heliostat field. *J. Sol. Energy Eng.*, 126(1), 638–644. <https://doi.org/10.1115/1.1634583>
- Clean Energy Institute. (2014). Copper indium selenide(CIS) solar cell. Retrieved July 8, 2021, from <https://www.cei.washington.edu/wp-content/uploads/2014/04/PVcelldisplaycards.pdf>
- Collares-Pereira, M., Gordon, J. M., Rabl, A., and Winston, R. (1991). High concentration two-stage optics for parabolic trough solar collectors with tubular absorber and large rim angle. *Solar Energy*, 47(6), 457–466. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(91\)90114-C](https://doi.org/10.1016/0038-092X(91)90114-C)
- Collares-Pereira, M., Ogallagher, J., Rabl, A., Winston, R., Cole, R., Gorski, A., ... Schertz, W. (1979). Applications of CPC's in solar energy-An overview. Sun II, 1, 542–546. Retrieved from <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1979sun2.conf..542C/abstract>
- Cucchiella, F., D'Adamo, I., Gastaldi, M., and Koh, S. C. L. (2010). A photovoltaic system in a residential building: Environmental and economic optimization

analysis. *2010 8th International Conference on Supply Chain Management and Information*, 1–9. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5681782>

Doraiswamy, D. (2002). The origins of rheology: a short historical excursion. *Rheology Bulletin*, 71(1), 1–9. Retrieved from [http://www0.rheology.org/sor/publications/rheology\\_b/Jan02/Origin\\_of\\_Rheology.pdf](http://www0.rheology.org/sor/publications/rheology_b/Jan02/Origin_of_Rheology.pdf)

D. R. Mills. (2001). Solar Thermal Electricity. In J. Gordon (Ed.), *Solar Energy: The State of the Art : ISES Position Papers*. James & James.

Eddine Boukelia, T., and Mecibah, M.-S. (2013). Parabolic trough solar thermal power plant: Potential, and projects development in Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 288–297. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.074>

Engin Ergün. (2011). Usage of linear Fresnel solar power systems at textile companies to supply energy (MSc). *Süleyman Demirel University*, Isparta.

Eric Mack. (2016, May 17). New world record set for converting sunlight to electricity. Retrieved December 5, 2023, from Newatlas website: <https://newatlas.com/solar-cell-electricity-efficiency-world-record-unsw/43384/>

Ermer, J. H., Jones, R. K., Hebert, P., Pien, P., King, R. R., Bhusari, D., ... others. (2012). Status of C3MJ+ and C4MJ production concentrator solar cells at spectrolab. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2(2), 209–213. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2011.2180893>

Falope, T., Lao, L., Hanak, D., and Huo, D. (2024). Hybrid energy system integration and management for solar energy: A review. *Energy Conversion and Management: X*, 100527. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590174524000059>

Fernández-García, A., Zarza, E., Valenzuela, L., and Pérez, M. (2010). Parabolic-trough solar collectors and their applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 1695–1721. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.012>

Fortunato, E., Gaspar, D., Duarte, P., Pereira, L., Águas, H., Vicente, A., ... Martins, R. (2016). Optoelectronic devices from bacterial nanocellulose. In *Bacterial Nanocellulose* (pp. 179–197). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63458-0.00011-1>

Fraas, L. M., and O'Neill, M. J. (2023). History of solar cell development. In *Low-cost solar electric power* (pp. 1–12). Springer.

Gallup, D., Mancini, T., Christensen, J., and Beninga, K. (1994). The utility-scale joint-venture program. *Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*

rence, 3941. <https://doi.org/10.2514/6.1994-3941>

- Garcia-Valladares, O., and Velázquez, N. (2009). Numerical simulation of parabolic trough solar collector: Improvement using counter flow concentric circular heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(3-4), 597-609. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.08.004>
- Gaul, H., and Rabl, A. (1980). *Incidence-angle modifier and average optical efficiency of parabolic trough collectors*. <https://doi.org/10.1115/1.3266115>
- Gee, R., and Institute, S. E. R. (1980). Line-focus Sun Trackers. *Solar Energy Research Institute*. Retrieved from <https://books.google.com.tr/books?id=Hy-twwEACAAJ>
- Geisz, J. F., Steiner, M. A., Jain, N., Schulte, K. L., France, R. M., McMahon, W. E., ... Friedman, D. J. (2018). Building a Six-Junction Inverted Metamorphic Concentrator Solar Cell. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 8(2), 626-632. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2017.2778567>
- Goetzberger, A., Luther, J., and Willeke, G. (2002). Solar cells: past, present, future. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 74(1-4), 1-11. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(02\)00042-9](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(02)00042-9)
- Gong, J., and Sumathy, K. (2016). Active solar water heating systems. In *Advances in Solar Heating and Cooling* (pp. 203-224). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100301-5.00009-6>
- Green, M. A., Hishikawa, Y., Dunlop, E. D., Levi, D. H., Hohl-Ebinger, J., and Ho-Baillie, A. W. Y. (2018). Solar cell efficiency tables (version 52). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 26(7), 427-436. <https://doi.org/10.1002/pip.3040>
- Gülay İşler. (2018). *Energy production analysis and applications of parabolic trough collector and solar power tower* (MSc). Bilecik Şeyh Edebali University, Bilecik.
- Güven, A. F., and Mete, M. K. (2021). Balkesir'in Erdek ilçesi için şebeke bağlantılı hibrit enerji sistemi fizibilite çalışması ve ekonomik analizi. *Mühendis ve Makina*, 63(706), 138-158. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1935109>
- Güven, A. F., and Samy, M. M. (2022). Performance analysis of autonomous green energy system based on multi and hybrid metaheuristic optimization approaches. *Energy Conversion and Management*, 269, 116058. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890422008469>
- Güven, A. F., Yörükeren, N., and Mengi, O. Ö. (2024). Multi-objective optimization

- and sustainable design: a performance comparison of metaheuristic algorithms used for on-grid and off-grid hybrid energy systems. *Neural Computing and Applications*, 36(13), 7559–7594. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s00521-024-09585-2>
- Güven, A. F., Yörükeren, N., and Samy, M. M. (2022). Design optimization of a stand-alone green energy system of university campus based on Jaya-Harmony Search and Ant Colony Optimization algorithms approaches. *Energy*, 253, 124089. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544222009926>
- Güven, A. F., and Yücel, E. (2023). Application of HOMER in assessing and controlling renewable energy-based hybrid EV charging stations across major Turkish cities. *International Journal of Energy Studies*, 8(4), 747–780. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/3250495>
- Hession, P. J., and Bonwick, W. J. (1984). Experience with a sun tracker system. *Solar Energy*, 32(1), 3–11. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(84\)90042-2](https://doi.org/10.1016/0038-092X(84)90042-2)
- IEA. (2023). *Renewables 2023 Analysis and forecast to 2028*. Retrieved from [https://iea.blob.core.windows.net/assets/96d66a8b-d502-476b-ba94-54ffda84cf72/Renewables\\_2023.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/96d66a8b-d502-476b-ba94-54ffda84cf72/Renewables_2023.pdf)
- International Energy Agency. (2011). *Solar Energy Perspectives*. Retrieved from <https://iea.blob.core.windows.net/assets/2b3c53f4-1c8f-478c-a4fa-a98597cde27b/SolarEnergyPerspectives.pdf>
- Ishibashi, A., Itabashi, M., Mori, Y., Kaneko, K., Kawado, S., and Watanabe, N. (1986). Raman scattering from (AlAs)<sub>m</sub>(GaAs)<sub>n</sub> ultrathin-layer superlattices. *Physical Review B*, 33(4), 2887. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.33.2887>
- Jagdeo, K., Sharon, M., and White, S. (2021). Carbon Nanofiber and Photovoltaic Solar Cell. *Carbon Nanofibers: Fundamentals and Applications*, 313. <https://doi.org/10.1002/9781119769149.ch12>
- Jeter, S. M. (1986). Calculation of the concentrated flux density distribution in parabolic trough collectors by a semifinite formulation. *Solar Energy*, 37(5), 335–345. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(86\)90130-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(86)90130-1)
- John Fitzgerald Weaver. (2018, December 17). Efficiency record isn't the biggest change for Alta Devices' GaAs solar technology. *PV Magazine*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3039457>
- Kalogirou, S., Lloyd, S., and Ward, J. (1997). Modelling, optimisation and performance evaluation of a parabolic trough solar collector steam generation system. *Solar Energy*, 60(1), 49–59. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(96\)00131-4](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(96)00131-4)



- Kapluhan, E. (2015). A Research In The Field Of Energy Geography: Usage Of Solar Energy In The World And Turkey. *Coğrafya Dergisi*, (29), 70–98. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/231256>
- Kazmerski, L. (2012). Best research cell efficiencies chart. In *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*. Retrieved from <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- Keskinel, S. (2015). Applied analysis of photovoltaic power systems in buildings within the scope of energy efficiency (MSc). İstanbul Technical University, İstanbul.
- Khan, M. I., Asfand, F., and Al-Ghamdi, S. G. (2022). Progress in research and technological advancements of thermal energy storage systems for concentrated solar power. *Journal of Energy Storage*, 55, 105860. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105860>
- Kılıç Abdurrahman, and Öztürk Aksel. (1983). Güneş Enerjisi. Kipaş Dağıtımçılık.
- King, R Richard, Boca, A., Hong, W., Liu, X. Q., Bhusari, D., Larrabee, D., ... others. (2009). Band-gap-engineered architectures for high-efficiency multijunction concentrator solar cells. *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany, 21*, 55. Retrieved from [https://www.researchgate.net/profile/Chris-Fetzer/publication/267409590\\_Band-Gap-Engineered\\_Architectures\\_for\\_High-Efficiency\\_Multijunction\\_Concentrator\\_Solar\\_Cells/links/54590d030cf26d5090acff56/Band-Gap-Engineered-Architectures-for-High-Efficiency-Multijunction-Concentrator-Solar-Cells.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Chris-Fetzer/publication/267409590_Band-Gap-Engineered_Architectures_for_High-Efficiency_Multijunction_Concentrator_Solar_Cells/links/54590d030cf26d5090acff56/Band-Gap-Engineered-Architectures-for-High-Efficiency-Multijunction-Concentrator-Solar-Cells.pdf)
- King, R R, Law, a\_DC, Edmondson, K. M., Fetzer, C. M., Kinsey, G. S., Yoon, H., ... Karam, N. H. (2007). 40% efficient metamorphic GaInP/ GaInAs/ Ge multijunction solar cells. *Applied Physics Letters*, 90(18). <https://doi.org/10.1063/1.2734507>
- Kribus, A., Vishnevetsky, I., Yogev, A., and Rubinov, T. (2004). Closed loop control of heliostats. *Energy*, 29(5–6), 905–913. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(03\)00195-6](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(03)00195-6)
- Levent Çolak. (2003). *Mathematical modelling design and technical optimization of sun tracking parabolic trough solar collectors* (MSc). Gazi University, Ankara.
- Liu, Z., Jin, Z., Li, G., Zhao, X., and Badiei, A. (2022). Study on the performance of a novel photovoltaic/thermal system combining photocatalytic and organic photovoltaic cells. *Energy Conversion and Management*, 251, 114967. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114967>
- Malinowski, M., Leon, J. I., and Abu-Rub, H. (2017). Solar photovoltaic and thermal

- energy systems: Current technology and future trends. *Proceedings of the IEEE*, 105(11), 2132–2146. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2017.2690343>
- Mancini, T., Heller, P., Butler, B., Osborn, B., Schiel, W., Goldberg, V., ... Moreno, J. (2003). Dish-stirling systems: An overview of development and status. *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, 125(2), 135–151. <https://doi.org/10.1115/1.1562634>
- Mancini, T. R. (1997). *Solar-electric dish Stirling system development*. Retrieved from <https://www.osti.gov/servlets/purl/622476>
- Ma, T., Yang, H., and Lu, L. (2014). Solar photovoltaic system modeling and performance prediction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 304–315. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.057>
- Merchán, R. P., Santos, M. J., Medina, A., and Hernández, A. C. (2022). High temperature central tower plants for concentrated solar power: 2021 overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 155, 111828. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111828>
- Messenger, R. A., and Abtahi, A. (2018). *Photovoltaic systems engineering*. CRC press.
- Mills, D. (2004). Advances in solar thermal electricity technology. *Solar Energy*, 76(1–3), 19–31. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(03\)00102-6](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(03)00102-6)
- Mills, D. R., and Morrison, G. L. (2000). Compact linear Fresnel reflector solar thermal powerplants. *Solar Energy*, 68(3), 263–283. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(99\)00068-7](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(99)00068-7)
- Mitigation, C. C. (2011). IPCC special report on renewable energy sources and climate change mitigation. In *Renewable Energy* (Vol. 20). Retrieved from <https://www.unclearn.org/wp-content/uploads/library/ipcc15.pdf>
- Mohanad Abdulazeez Abdulaheem Alfellag. (2014). *Modeling And Experimental Investigation Of Parabolic Trough Solar Collector* (MSc). Embry-Riddle Aeronautical University.
- Morin, G., Karl, M., Mertins, M., and Selig, M. (2015). Molten salt as a heat transfer fluid in a linear Fresnel collector–commercial application backed by demonstration. *Energy Procedia*, 69, 689–698. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.079>
- Nelson, D. T., Evans, D. L., and Bansal, R. K. (1975). Linear Fresnel lens concentrators. *Solar Energy*, 17(5), 285–289. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(75\)90045-6](https://doi.org/10.1016/0038-092X(75)90045-6)
- NREL. (2003). *Assessment of Parabolic Trough and Power Tower Solar Technology*

- Cost and Performance Forecasts*. Retrieved from <https://www.nrel.gov/docs/fy04osti/34440.pdf>
- NREL. (2008). *NREL Solar Cell Sets World Efficiency Record at 40.8 Percent*. Retrieved from <https://phys.org/news/2008-08-nrel-solar-cell-world-efficiency.html>
- NREL. (2012a). *Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Concentrating Solar Power*. Retrieved from <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/56416.pdf>
- NREL. (2012b). *Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Solar Photovoltaics*. Retrieved from <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/56487.pdf>
- NREL. (2020, April 13). News Release: NREL Six-Junction Solar Cell Sets Two World Records for Efficiency. Retrieved November 25, 2023, from National Renewable Energy Laboratory website: <https://www.nrel.gov/news/press/2020/nrel-six-junction-solar-cell-sets-two-world-records-for-efficiency.html>
- NREL. (2023a). *Best Research-Cell Efficiency Chart*. Retrieved from <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies.pdf>
- NREL. (2023b). *Champion Photovoltaic Module Efficiency Chart*. Retrieved from <https://www.nrel.gov/pv/module-efficiency.html>
- Olgun Konur. (2016). *Energy efficiency improvement techniques on solar powered boats* (MSc). Dokuz Eylül University, İzmir.
- Ong, S., Campbell, C., Denholm, P., Margolis, R., and Heath, G. (2013). *Land-use requirements for solar power plants in the United States*. Retrieved from <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/56290.pdf>
- OPEC. (2022). *2022 OPEC's World Oil Outlook 2045*. Retrieved from [https://www.opec.org/opec\\_web/static\\_files\\_project/media/downloads/WOO\\_2022.pdf](https://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/WOO_2022.pdf)
- Orton, J. W. (2008). *The story of semiconductors*. OUP Oxford.
- Özgün, U. Z., ÖZDEMİR, T., and ÖZMEN, Ö. T. (2022). Associating Photovoltaic Energy Production with Meteorological Conditions: The Example of İzmir Bakırçay University. *The Journal of Graduate School of Natural and Applied Sciences of Mehmet Akif Ersoy University*, 13(1), 49–62. <https://doi.org/10.29048/makufebed.1053282>
- Padmanabhan, J. B., and Anbazhagan, G. (2024). A comprehensive review of hybrid renewable energy charging system to optimally drive permanent magnet synchronous motors in electric vehicle. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 46(1), 3499–3521. Retrieved

from <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15567036.2024.2319347>

- Patricia Scalco, Jacqueline Biancon Copetti, and Mario Henrique Macagnan. (2021). Linear Fresnel Solar Collector Concentrator – A Review. *26th ABCM Int. Cong. of Mechanical Engineering*. Florianopolis. Retrieved from [https://www.researchgate.net/profile/Patricia-Scalco-2/publication/357067050\\_Linear\\_Fresnel\\_Solar\\_Collector\\_Concentrator\\_-\\_A\\_Review/links/61d2ed42da5d105e5517a269/Linear-Fresnel-Solar-Collector-Concentrator-A-Review.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Patricia-Scalco-2/publication/357067050_Linear_Fresnel_Solar_Collector_Concentrator_-_A_Review/links/61d2ed42da5d105e5517a269/Linear-Fresnel-Solar-Collector-Concentrator-A-Review.pdf)
- Petrova-Koch, V., Hezel, R., and Goetzberger, A. (2008). *High-efficient low-cost photovoltaics*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-22864-4>
- Prevenslik, T. V. (2003). *Cavitation induced Becquerel effect*. *Ultrasonics*, 41(4), 323–327. [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(03\)00083-0](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(03)00083-0)
- Richard Martinarchive page. (2016, March 3). First Solar’s Cells Break Efficiency Record. Retrieved December 5, 2023, from technologyreview website: <https://www.technologyreview.com/2016/03/03/161753/first-solars-cells-break-efficiency-record/>
- Riffelmann, K.-J., Neumann, A., and Ulmer, S. (2006). Performance enhancement of parabolic trough collectors by solar flux measurement in the focal region. *Solar Energy*, 80(10), 1303–1313. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.09.001>
- Russell S Ohl. (1948). *Patent No. US2443542A. USA*. Retrieved from <https://patentimages.storage.googleapis.com/21/a3/d9/a1e314a0faba89/US2443542.pdf>
- Saeed, M. A., Shahzad, A., Rasool, K., Mateen, F., Oh, J.-M., and Shim, J. W. (2022). 2D MXene: a potential candidate for photovoltaic cells? A critical review. *Advanced Science*, 9(10), 2104743. <https://doi.org/10.1002/advs.202104743>
- Salhi, B. (2022). *The photovoltaic cell based on CIGS: principles and technologies*. *Materials*, 15(5), 1908. <https://doi.org/10.3390/ma15051908>
- Sarver, T., Al-Qaraghuli, A., and Kazmerski, L. L. (2013). A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 698–733. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.065>
- Şen H. (2009). Temiz Dünya Rehberi: Güneş Enerjisi. *Doğa Yayınları*.
- Shakibi, H., Afzal, S., Shokri, A., and Sobhani, B. (2022). Utilization of a phase change material with metal foam for the performance improvement of

- the photovoltaic cells. *Journal of Energy Storage*, 51, 104466. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104466>
- Sharaf, M., Huzayyin, A. S., and Yousef, M. S. (2022). Performance enhancement of photovoltaic cells using phase change material (PCM) in winter. *Alexandria Engineering Journal*, 61(6), 4229–4239. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.09.044>
- Sharma, A., Shukla, A. K., Singh, O., and Sharma, M. (2022). Recent advances in gas/steam power cycles for concentrating solar power. *International Journal of Ambient Energy*, 43(1), 4716–4727. <https://doi.org/10.1080/01430750.2021.1919552>
- Sharma, V., Nayak, J. K., and Kedare, S. B. (2015). Effects of shading and blocking in linear Fresnel reflector field. *Solar Energy*, 113, 114–138. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.12.026>
- Sheikholeslami, M. (2022). Numerical investigation of solar system equipped with innovative turbulator and hybrid nanofluid. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 243, 111786. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111786>
- Siala, F. M. F., and Elayeb, M. E. (2001). Mathematical formulation of a graphical method for a no-blocking heliostat field layout. *Renewable Energy*, 23(1), 77–92. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(00\)00159-2](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(00)00159-2)
- Soomro, M. I., Mengal, A., Memon, Y. A., Khan, M. W. A., Shafiq, Q. N., and Mirjat, N. H. (2019). Performance and economic analysis of concentrated solar power generation for Pakistan. *Processes*, 7(9), 575. <https://doi.org/10.3390/pr7090575>
- Stine, W. B., and Diver, R. B. (1994). *A compendium of solar dish/Stirling technology*. Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States). Retrieved from Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States) website: <https://www.osti.gov/biblio/10130410>
- Tabak, C., Dinçer, H., Karayaz, K., Arslan, E., Yıldız, M. H., and Karayaz, S. (2009). Yoğunlaştırıcı Güneş Enerjisi Sistemleri ile Elektrik Enerjisi Üretimi. III. *Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*. Retrieved from [https://www.emo.org.tr/ekler/d787c069b9f2868\\_ek.pdf](https://www.emo.org.tr/ekler/d787c069b9f2868_ek.pdf)
- Tang, C. W. (1986). Two-layer organic photovoltaic cell. *Applied Physics Letters*, 48(2), 183–185. <https://doi.org/10.1063/1.96937>
- Tushar K. Ghosh, and Mark A. Prelas. (2011). *Energy Resources and Systems: Renewable Resources* (Vol. 2). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-1402-1>
- Üçgül, I., and Ergün, E. (2014). Linear Fresnel Solar Power Systems. *Yekarum*, 1(3).

- Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/204143>
- University of Delaware. (2007, July 30). *University Of Delaware-led Team Sets Solar Cell Record*. Retrieved December 5, 2023, from ScienceDaily website: <https://www.sciencedaily.com/releases/2007/07/070726210931.htm>
- Vant-Hull, L. L. (1977). An educated ray trace approach to solar tower optics. *Optical Engineering*, 16(5), 497–504. <https://doi.org/10.1117/12.7972123>
- Wang, J., Cui, Y., Xu, Y., Xian, K., Bi, P., Chen, Z., ... others. (2022). A new polymer donor enables binary all-polymer organic photovoltaic cells with 18% efficiency and excellent mechanical robustness. *Advanced Materials*, 34(35), 2205009. <https://doi.org/10.1002/adma.202205009>
- Wang, Z., Tang, A., Wang, H., Guo, Q., Guo, Q., Sun, X., ... Zhou, E. (2023). Organic photovoltaic cells offer ultrahigh VOC of~ 1.2 V under AM 1.5 G light and a high efficiency of 21.2% under indoor light. *Chemical Engineering Journal*, 451, 139080. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139080>
- William Grylls Adams. (1875). *The action of light on selenium*. Retrieved from <https://www.amazon.co.uk/action-light-selenium-William-Grylls/dp/B0008ATF26>
- Wu, S.-Y., Xiao, L., Cao, Y., and Li, Y.-R. (2010). Convection heat loss from cavity receiver in parabolic dish solar thermal power system: A review. *Solar Energy*, 84(8), 1342–1355. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.04.008>
- Xu, Y., Lu, B., Luo, C., Wu, F., Li, X., and Zhang, L. (2022). Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> promoted CaO-based heat carrier for thermochemical energy storage in concentrated solar power plants. *Chemical Engineering Journal*, 435, 134852. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.134852>
- Zarza E. (2010). The Technologies for Concentrating Solar Radiation: Current State-of-the-Art and Potential for Improvement. *TUBITAKMAM Energy Inst. Gebze Kocaeli Turkey*.
- Zarza, E., Valenzuela, L., Leo, J., Weyers, H.-D., Eickhoff, M., Eck, M., and Hennecke, K. (2002). The DISS project: direct steam generation in parabolic trough systems. Operation and maintenance experience and update on project status. *J. Sol. Energy Eng.*, 124(2), 126–133. <https://doi.org/10.1115/1.1467645>
- Zhang, T., An, C., Cui, Y., Zhang, J., Bi, P., Yang, C., ... Hou, J. (2022). A universal nonhalogenated polymer donor for high-performance organic photovoltaic cells. *Advanced Materials*, 34(2), 2105803. <https://doi.org/10.1002/adma.202105803>

## ARAŞTIRMA MAKALELERİ

### Research Articles

- Covid 19 Pandemisinin Kocaeli İli Toplu Ulaşım Sistemi Enerji Tüketimi Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi** 360-373  
*Investigation of The Effect Of The Covid 19 Pandemic On Energy Consumption of Natural Gas Buses In Kocaeli Province Public Transportation System*  
İsmail GÜLSOY, Mustafa ÖZCAN
- Hayvan Gübresinden Biyogaz Üretim Potansiyelinin Belirlenmesi: Ankara, Gaziantep, Kars** 409-431  
*Determination Of Biogas Production Potential From Animal Manure: Specific To The Provinces Of Ankara, Gaziantep, Kars*  
Utku CANCI MATUR, Aytaç ATASAYIN
- The Impact Of Covid-19 On The Technology Sector: The Case Of The Turkish Consultancy Company** 432-461  
*Covid-19'un Teknoloji Sektörüne Etkisi: Bir Danışmanlık Şirketi Örneği*  
Eda GÖZÜTOK, İlayda ÜLKÜ
- Ticari Biyokütle Yakma Sistemlerinde Kül Kaynaklı Problemler Üzerine Bir Değerlendirme** 462-486  
*An Assessment On Ash-Related Issues In Commercial Biomass Combustion Systems*  
Anıl BADEM, Hayati OLGUN

## DERLEME MAKALELERİ

### Review Articles

- Compliance Strategy For The Certification of Environmental Control System In Military Applications** 374-408  
*Çevresel Kontrol Sistemi'nin Askeri Uygulamalara Özel Uçuşa Elverişlilik Sertifikasyonuna İlişkin Uyum Doğrulama Stratejisi*  
Emre GÜLER
- Matris Malzemesi Olarak Alüminaya Titanyum ve Grafen İlavelerinin Etkilerinin Belirlenmesi** 487-520  
*Determination Of The Effects Of Titanium and Graphene Additions To Alumina As A Matrix Material*  
Samet YAVUZ, Mevlüt GÜRBÜZ
- Electricity Generation Methods From Solar Energy** 521-557  
*Güneş Enerjisinden Elektrik Üretim Yöntemleri*  
Berire Şen AYVAZ, Alper BAYRAK