



YEKARUM

JOURNAL OF YEKARUM

e - DERGI



e-ISSN: 1309-9388



<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yekarum>

Cilt:9 Sayı:1

2024

Volume:9 Number:1

DergiPark
AKADEMİK



YEKARUM e-DERGİ

Cilt: 9 Sayı: 1 Yıl: 2024

Journal of YEKARUM

Volume: 9 Number: 1 Year: 2024

E - ISSN:1309-9388

Yazıların tüm bilimsel sorumluluğu yazara veya yazarlara aittir. Dergide yayınlanan yazılardan editör, editör yardımcısı ve yayıncı sorumlu tutulamaz..Bu dergi, aşağıda listelenen veri tabanları tarafından taranmaktadır. All the scientific responsibilities of the manuscripts belong to the authors (s). The editor, assistant editor and publisher accept no responsibility for the articles published in the journal.

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/vekarum>

İndeksler

<https://scholar.google.com/>, <https://www.base-search.net/>, <https://atif.sobiad.com/>





Süleyman Demirel Üniversitesi
YEKARUM e-DERGİ
(Journal of YEKARUM)



Cilt 9, Sayı 1, 2024
E - ISSN:1309-9388

Bas Editör / Editor in Chief

Prof. Dr. İbrahim ÜÇGÜL

Editörler / Editors

Prof..Dr. Ramazan ŞENOL

Doç. Dr. Bekir AKSOY

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Erhan ŞAHİN

Öğr. Gör. Dr. Ahmet ELBİR

Yayın Danışma Kurulu

Prof. Dr. Serhii YEVSEİEV

Kharkiv Politeknik Enstitüsü, Ukrayna

Prof. Dr. Salah LARBİ

Politeknik Üniversitesi, Cezayir

Dr. N. Nnamdi Ekere

Wolverhampton Üniversitesi, İngiltere

Dr. Khaoula IKHLEF

Politeknik Üniversitesi, Cezayir

Prof. Dr. Reşat SELBAŞ

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Isparta

Doç. Dr. Onur SEVLİ

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Burdur

Doç. Dr. Utku KÖSE

Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta

Dr. Öğr. Üyesi Özdemir DENİZ

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Isparta

Mizampaj / Layout

Burcu ATAY



Süleyman Demirel Üniversitesi
YEKARUM e-DERGI
(Journal of YEKARUM)



Cilt 9, Sayı 1, 1-130, 2024
E - ISSN:1309-9388

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Arastırma Makalesi / Research Articles

- Wearable Technologies: Wearable Sensor and Detection of Motion Sensor Data Using Fuzzy Logic
Giyilebilir Teknolojiler: Giyilebilir Sensör ve Hareket Sensör Verilerinin Bulanık Mantık ile Tespiti
Murat KODALOĞLU, Feyza AKARSLAN KODALOĞLU 1-19
- Çelik Geodezik Kubbelerde Geometrik Frekans ve Geometrik Oransal Değerlerin Çelik Malzeme Tüketimine Etkileri
Effects of Geometric Frequency and Geometric Proportional Values on Steel Material Consumption in Steel Geodesic Domes
Rumeysa Nur ÖNDER, Zeki AY 20-32
- Weaving Machine Design of Cam and Follower Mechanism and Manufacturing
Dokuma Makinası Kam ve İzleyici Tasarım ve İmalatı
Murat KODALOĞLU33-44

Derleme Makalesi / Compilation Articles

- Kırşehir İlinin Biyogaz Atık Potansiyelinin Ceviz (*Juglans regia L.*) Üretiminde Kullanılabilirliği
Availability of Biogas Waste Potential of Kırşehir Province in Walnut (*Juglans regia L.*) Production
Elmas YAĞMUR, Sevil SAĞLAM YILMAZ45-62
- A Review on Hydrogen with a Critical Role in Sustainable Energy
Sürdürülebilir Enerjide Kritik Rolü Olan Hidrojen Üzerine Bir İnceleme
Berces KURT 63-90



Süleyman Demirel Üniversitesi
YEKARUM e-DERGİ
(Journal of YEKARUM)



Cilt 9 , Sayı 1 , 1-19 , 2024
E - ISSN:1309-9388

Wearable Technologies: Wearable Sensor and Detection of Motion Sensor Data Using Fuzzy Logic

Murat Kodaloğlu^{1*}, Feyza Akarslan Kodaloğlu²

^{1*}Occupational Health and Safety Program, Vocational School of Technical Sciences, Isparta University of Applied Sciences, Isparta, Türkiye, (ORCID: 0000-0001-6644-8068), muratkodaloglul@isparta.edu.tr

²Textile Engineering Department, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Suleyman Demirel University, Isparta, Türkiye (ORCID: 0000-0002-7855-8616), fezzaakarslan@sdu.edu.tr

(İlk Geliş Tarihi 18/03/2024 ve Kabul Tarihi 28/05/2024)

ABSTRACT :

With the developing technology in recent years, innovative products find use in many areas of life. Wearable technologies have a wide range of impact, from healthcare to education, from tourism to applications for the disabled. While these technologies make it easier to monitor people's health, they can enrich the learning experience in education and offer important opportunities in many areas. From a health perspective, while it has advantages such as management of chronic diseases, personalized health monitoring and rapid health access, disadvantages such as privacy concerns, technological problems and cost should not be ignored.

In the future, wearable technologies may have major impacts in areas such as the ability to send signals in health emergencies, virtual reality experiences in the entertainment industry, augmented reality applications in tourism and guidance for the disabled. It is envisaged that these technologies, combined with fashion and functionality, will bring new markets and areas of use. In the future, a great change and progress is expected in the field of wearable technologies in a wide range of application areas. In this study, sensor data obtained while users interacted was used. Fuzzy logic method was used to determine the activity and acceleration of motion sensors within a certain time period from raw sensor data.

Keywords: *Wearable Technologies, Motion sensor, Fuzzy logic, Wearable sensor*

Giyilebilir Teknolojiler: Giyilebilir Sensör ve Hareket Sensör Verilerinin Bulanık Mantık ile Tespiti

ÖZET

Son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte yenilikçi ürünler hayatın pek çok alanında kullanım alanı bulmaktadır. Giyilebilir teknolojiler, sağlık hizmetlerinden eğitime, turizmden engellilere yönelik uygulamalara kadar geniş bir etki alanına sahiptir. Bu teknolojiler, insanların sağlık takibini kolaylaştırırken, eğitimde öğrenme deneyimini zenginleştirebilir ve birçok alanda önemli fırsatlar sunabilir. Sağlık açısından bakıldığında, kronik hastalıkların

* Sorumlu yazar E-mail:

yönetimi, kişiye özgü sağlık takibi ve hızlı sağlık erişimi gibi avantajları bulunurken, gizlilik endişeleri, teknolojik sorunlar ve maliyet gibi dezavantajlar da göz ardı edilmemelidir.

Gelecekte, giyilebilir teknolojilerin sağlıkta acil durumlarda sinyal gönderme yeteneği, eğlence sektöründe sanal gerçeklik deneyimleri, turizmde artırılmış gerçeklik uygulamaları ve engellilere yönelik rehberlik gibi alanlarda büyük etkileri olabilir. Bu teknolojilerin moda ve işlevsellikle birleşerek yeni pazarları ve kullanım alanlarını da beraberinde getireceği öngörülmektedir. Gelecekte giyilebilir teknolojiler alanında, çok çeşitli uygulama alanlarında büyük bir değişim ve ilerleme beklenmektedir. Bu çalışmada, kullanıcılar etkileşim halindeyken elde edilen sensör verileri kullanılmıştır. Ham sensör verilerinden hareket sensörlerinin belirli bir zaman dönemi içinde aktivitesini belirlemek ve ivmelenmesini tespit etmede Bulanık mantık yöntemi kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Giyilebilir teknoloji, Hareket sensörü, Bulanık mantık, Giyilebilir sensör.*

1. INTRODUCTION

The concept of wearability is particularly important in areas such as healthcare, wellness, and fitness/sports tracking. Wearable technology is portable devices that allow users to retrieve information and facilitate user interaction. Wearable technology products are designed as special electronic tracking devices that are synchronized to a computer or smartphone to provide long-term data tracking, in many cases wirelessly. Rings, smart glasses, smart watches, bracelets, etc. They are state-of-the-art wearable computers that can be integrated into various parts of used objects in different ways, such as [1]. Technological advances, miniaturized electronic devices, data storage improvements provide greater energy efficiency [2]. Wearable technologies offer innovative solutions to monitor its user's biometric data (psychophysiological measurements [3, 4], daily activity and behavior patterns [5] throughout the day in both formal and informal settings [6, 7].

It can be said that the most interesting among wearable technology products are smart implants. Implants are products that will always be with the person no matter where they go or what they do. It can be used by surgically implanting it into the body for health reasons such as insulin problems, birth control, and blood pressure problems [8, 9]. Current devices generally fall into two main categories: head-mounted displays and body sensors. These are portable devices designed to detect or record physiological functions of the human body and visual devices mounted on the user's head. However, there are deficiencies regarding the impact of this technology on patients' health [10]. In another study, De Rossi et.al developed a garment called upper limb kinesthetic garment (ULKG) to detect the posture and movement of the arm, especially after stroke. ULKG can act as a virtual trainer to treat patients who need to continue exercises that are vital to regain control of the paralyzed limb and therefore quality of life. It allows medical staff to monitor multiple patients in real time and communicate with each individually [11].

Wearable technology is a type of technology found within electronic devices that is worn on the body as an accessory or as part of materials used in clothing. One of the most important features of wearable technology is the ability to connect to the Internet [12]. In a patient monitoring system architecture using wearable sensors, body-worn sensors communicate wirelessly with fixed (wireless local area network) or wearable (mobile phone) gateway devices to transmit sensor data to remote locations. Measurements can be stored locally in a wearable monitoring device for later transmission or transmitted directly to a medical center (e.g. over the public telephone network) where the patient's data can be accessed online using the internet, regardless of the patient's location. Different approaches are used to detect chest wall movement associated with breathing. (Figure 1). One approach is to measure linear displacements along the anteroposterior axis of the chest.



Figure 1. Location of various wearable devices on the body that can estimate ventilation from chest surface movement [8].

Wearable technologies offer new opportunities in healthcare by making patient clinical, behavioral and self-monitoring data more accessible. Wearable technologies developed from a patient-oriented perspective allow patients to manage their own health conditions, protect their freedom and perform self-care. However, the integration of these technologies into healthcare systems and the integration of growing amounts of data into clinical practices also present several challenges. In this context, how to use the data obtained

using wearable technology to provide added value to healthcare professionals, healthcare institutions and patients is an important problem [13]. For developers of this technology, it is a great challenge to develop solutions that can be easily integrated and used by healthcare professionals, taking into account existing limitations.

The first examples of wearable technology appeared in China in the 13th century with abacus-like calculators. Later, in the 17th century, portable time tracking became possible with pocket watches. With the advancement of technology, wearable devices such as radio headsets and mobile phones emerged, and in the 21st century, popular wearable technologies such as smart watches and health monitoring devices were developed. These devices helped people monitor their activities, track their health data, and communicate. [14].

1.1. Wearable Technologies in Healthcare

Wearable technologies have found a significant area of development in healthcare. It attracts attention with the benefits it offers especially for the aging population. Malwade et al. The study conducted by [15] discussed in detail the advantages of these technologies for elderly individuals and the difficulties in this field. Wearable devices are widely used for health monitoring and diagnostic purposes due to their comfort and ability to provide daily care. Various hardware such as skin-based devices, bio-fluid-based devices, and other competitive wearable technologies play a major role in monitoring and managing various disease conditions.

Chuah et. get. [16], their study examines the use of smart watches and the effects of perceived usefulness and visibility on usage intention. The findings show that perceived usefulness and visibility determine the attitude towards the use of smartwatches, which in turn translates into usage intention. The research makes a significant contribution to understanding user perception of wearable technologies and developing strategies. The study emphasizes that wearable technologies include both technology and fashion dimensions and discusses different approaches from a managerial perspective. Chuah et al.'s study provides a foundation for understanding the impact of smartwatches, as well as other wearable technologies, on consumers' perceptions and reactions.

One of the topics highlighted in the articles is the relevant techniques used to monitor different biological and chemical parameters. Studies have discussed the effectiveness and applicability of wearable technologies in monitoring basic parameters such as blood pressure, heart rate and sweat rate. Additionally, various applications of wearable devices in monitoring

physiological and psychological parameters and their potential future impact in these areas have also been extensively studied. However, the current limitations and future development possibilities of these devices have also been evaluated in detail. This information provides important insight into the potential of wearable technologies for healthcare to improve the quality of life of the aging population.

He notes that continuous and real-time monitoring technologies play a critical role in the management of individuals with chronic diseases. According to the World Health Organization (WHO), chronic diseases account for the vast majority of all deaths worldwide and also cause high economic costs. Therefore, different approaches are needed to monitor and diagnose conditions such as cardiovascular diseases, diabetes and neurological disorders. In this context, HWDs (Wearable Health Devices) stand out as an effective strategy. HWDs help us understand changes in the human body and contribute to the prevention and treatment of diseases. For example, wearable biosensors are used to measure different biopotentials (e.g. ECG, EMG, EEG, EOG) and improve the healthcare system by reducing the burden on hospitals and providing more reliable and timely information. Studies examine in detail skin-based HWDs, textile-based HWDs, tattoo-based HWDs, and wearable devices for drug delivery systems, highlighting the important contributions of these devices in the field of healthcare [16].

Wearable devices include input mechanisms for collecting clinical and environmental data, processing units for real-time processing of this information, and output mechanisms that provide feedback or control functions. Wearable devices have a variety of applications, including assisting doctors with care services, remote monitoring, rehabilitation support, and electronic patient records. They can also be used as health trackers or fitness aids for healthy individuals [17]. Integrating telemetric features into wearable devices is compatible with mainstream healthcare and allows citizens to transmit their health data from anywhere, anytime. There are also advances in more complex multi-signal monitoring and decision support devices developed for astronauts and military personnel (Figure 2).

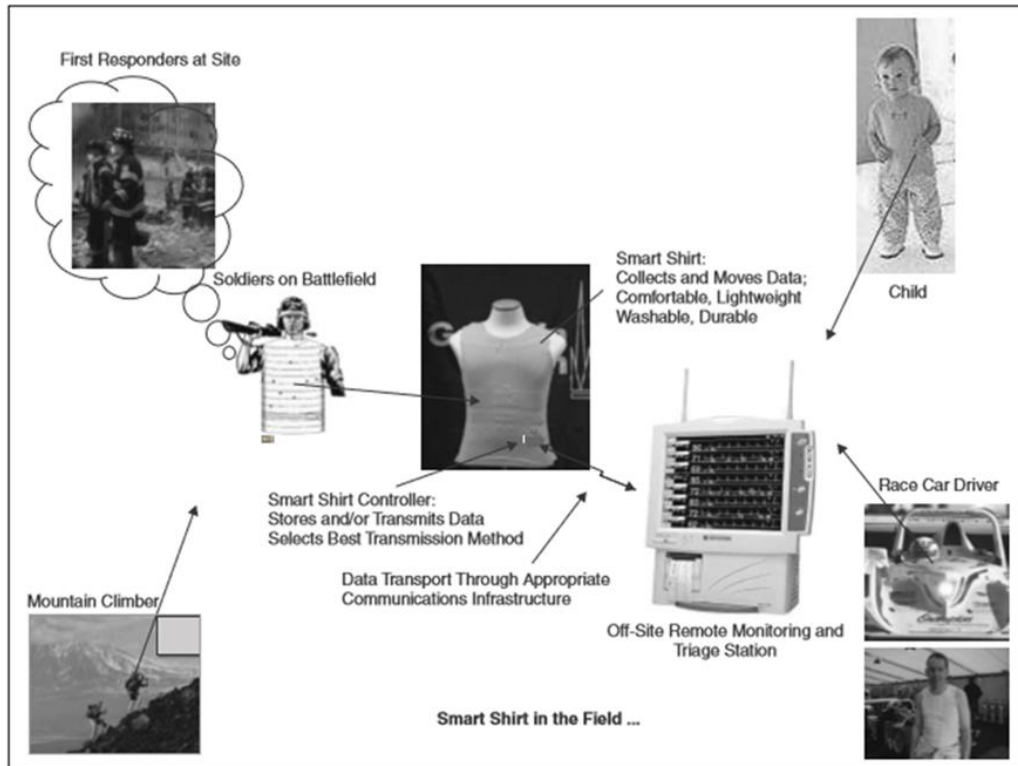


Figure 2. Wearable devices in various fields of application [29]

It is noteworthy that the majority of studies on developed wearable systems are on monitoring heart movements. Heart rhythm and oxygen levels can be monitored with these systems. Original Holter monitors require the patient to carry a relatively large device with several wires leading to electrodes placed on the chest. Newly developed patch-like devices can be worn unnoticed by the patient and benefit from wireless data transfer. Some of these devices also provide more advanced capabilities, such as the ability to measure respiration and skin temperature. Suzuki et.al. In the system developed by [7], ECG, pulse and body temperature information coming from a sensor that can be placed on the chest in the form of a patch can be transferred to a smartphone via Bluetooth connection for 24 hours.

Pulse and oximetry measurements can also be made with recently developed smart watches. Wang et al. It has been stated that 10% stronger signals can be obtained with the PPG (Photoplethysmogram) system developed by [6], which is attached to the earlobe and uses multiple LED lamps and photodiodes, compared to measurements made from the finger. A new and interesting trend is the use of headphones that combine audio features with pulse oximetry and step counting (Figure 3).

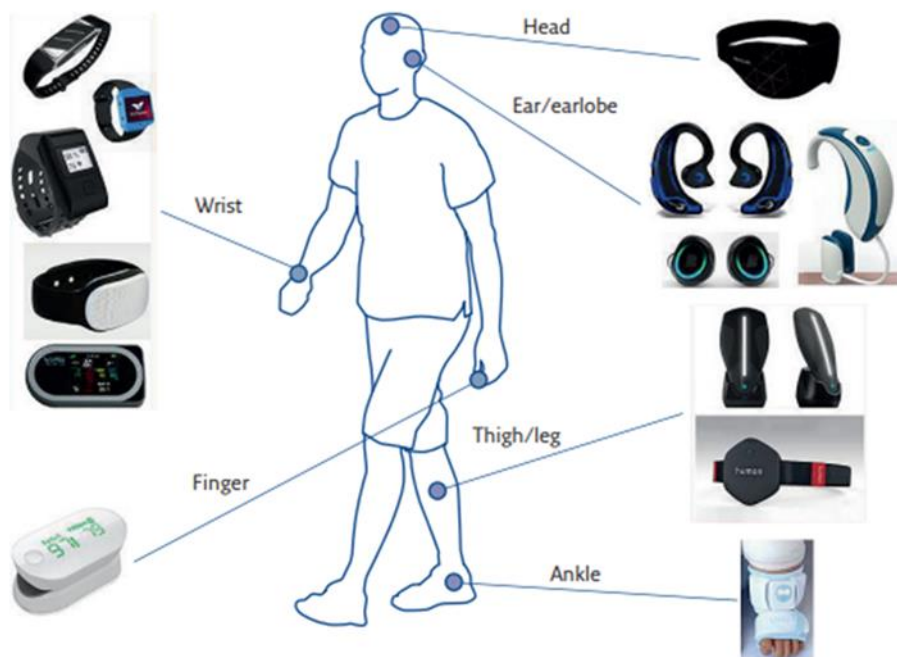


Figure 3. Location on the body of various wearable devices capable of pulse oximetry [8]

1.2. Wearable Technologies in Education

With the development of information and information technologies, communication types and learning-teaching methods also change. The most important impact of technological developments in the field of education is that they provide access to various data sources and content at increasing speeds. Bower and Sturman, 2015 examined the possibilities that wearable technologies can offer in education. This study provides a comprehensive look at how wearable technologies can be evaluated in the field of education, especially what opportunities they offer in terms of pedagogy. The authors investigate how wearable technologies can be integrated into learning processes and how students and teachers can use these technologies effectively. The article reveals the potential that wearable technologies can offer in education through analysis and literature review on a sample of 66 international educators. These potentials include pedagogical uses such as communication, student participation and interaction, recording, simulation, as well as elements that increase learning efficiency and logistical advantages. The article discusses the benefits of wearable technologies in education as well as potential problems. In particular, issues such as distraction, excessive technology addiction, and privacy concerns point to the difficulties that may be encountered in the use of these technologies. This study provides a guide on how

wearable technologies can enrich classroom experiences and offers an important perspective on how the role of these technologies in education can be shaped [18].

With the use of wearable technology, children with autistic syndrome can be monitored and alerts can be generated when certain limits are crossed. Thus, the safety of autistic children in the school environment can be increased. In studies conducted in areas where wearable technologies are used, various benefits of these technologies to education are mentioned [19, 20]. Increasing students' interest in the lesson, changing their learning experiences, offering new learning areas, increasing their participation in the lesson, improving their learning, providing feedback during the lesson, and providing faster access to information can be counted among the benefits of wearable technologies. In addition to its benefits, it also has disadvantages such as data security risk, confidentiality of personal information, software development, education quality, cost and technical problems. In the study of Sezgin, 2016, the possible contributions of wearable technologies to the field of education were discussed by classifying them according to the studies in the literature, their theoretical foundations and results. Recommendations are presented for studies on the educational use of these

1.3. Advantages and Disadvantages of Wearable Technologies

- **Management of Chronic Diseases:** Remote monitoring systems and wearable devices can help individuals with chronic diseases monitor their health status. This may reduce the need for regular doctor visits.

- **Personalized Health Tracking:** These technologies allow individuals to monitor their own health data more closely. Data such as pulse, sleep patterns, and physical activity can be continuously monitored.

- **Fast and Remote Access:** Healthcare professionals can access patients' health data quickly and remotely, so they can intervene faster.

However, some disadvantages should not be ignored:

- **Privacy and Security Concerns:** The collection and transmission of personal health data may raise privacy concerns. The security of this data and the risk of misuse is important.

- **Technological Problems and Incorrect Data:** If wearable devices have technical malfunctions or provide incorrect data, an accurate health assessment may not be possible.

- **Cost:** Some wearable technologies can be high-cost, which can limit their accessibility.

It is clear that such technologies have significant potential in the field of healthcare. However, to realize this potential, important issues such as privacy, security and accuracy need to be addressed [22].

1.4. The Future and Impacts of Wearable Technologies

Wearable technologies may have the potential for great impact in the future in areas such as health monitoring, entertainment, tourism and disability assistance. These technologies can monitor health indicators, send automatic signals in case of emergencies, and share users' location with emergency services. For example, it can detect a drop in insulin levels and inject the required amount into the body.

In the entertainment industry, wearable technologies can drastically change the gaming industry. It allows users to experience virtual environments as if they were real. Motion detection devices, on the other hand, can detect real movements without the need for tools such as a keyboard or joystick.

In the field of tourism, augmented reality integrated wearable technologies allow people to virtually tour cities or tourist attractions without visiting them. Tourism agencies can show customers hotels in virtual 3D format, so they can make the right choices.

For people with disabilities, wearable technologies have the potential for great impact. For the visually impaired, smart glasses can provide guidance. For the hearing impaired, smart glasses can detect sound and convert it into text format and display it.

Overall, wearable technologies can have major impacts in many areas such as healthcare, entertainment, tourism and disability assistance. With the spread of these technologies, new opportunities and services may emerge [23].

Wearable technologies represent an extremely exciting market. In every field, from the field of personal hygiene to intensive care hospitals, textile products with specific medical properties and functions are always of vital importance. Unlike functional products such as wound dressings, diapers, and face masks, truly intelligent wearable technologies are products that can combine the functionality of sophisticated medical devices with the comfort and user-friendliness of clothing products. This type of clothing has emerged as a synthesis of recent developments in different fields such as advanced material processing, polymer research, microelectronics, sensor technologies, telecommunications and information technology [24, 25].

The outstanding feature of wearable products is that they not only replace existing heavy or fixed medical devices, but also offer the opportunity to constantly monitor the body functions of individuals at risk or measure the performance of workers, drivers, athletes, emergency personnel or soldiers while doing their job, thus opening up completely new markets. is that it allows. The functions of wearable technologies can range widely, from detection of abnormal conditions to active corrective measures, regardless of whether intervention is made by the user [24]. These new products have the potential to be combined with fashion items and other types of clothing.

Smart shirt can contribute to reducing the cost of healthcare, reducing costs while improving quality of life. For example, a patient undergoing heart surgery at home can wear a Smart Shirt and ECG can be regularly transmitted to the hospital wirelessly (via mobile phone, internet, etc.). This monitoring will help the patient feel more “safer” and can facilitate recovery while also reducing the cost and time associated with recovery. Moreover, in case of an emergency, the doctor can be notified immediately. Using online medical records, the doctor can administer the right treatment, at the right time, at the right cost and save a life. For example, it can be used to monitor mentally ill patients. By treating those suffering from manic depression or even children with suspected ADD (attention deficit disorder) on a regular basis, doctors can better understand the relationship between their vital signs and behavioral patterns so that their treatment can be modified appropriately. Other potential applications include treating anxiety and phobias. Such medical monitoring of individuals is critical to the successful implementation of telemedicine, which has become economically viable in the context of advances in computing and telecommunications, particularly the Internet [26-32] .

2. MATERIAL AND METHOD

The fuzzy logic tables created in this study were described using the MATLAB program and the resulting data were examined. The Mamdani method allows us to define expertise in a more intuitive, more human-like way. Figure 4 shows the fuzzy logic model created with input and output parameters.

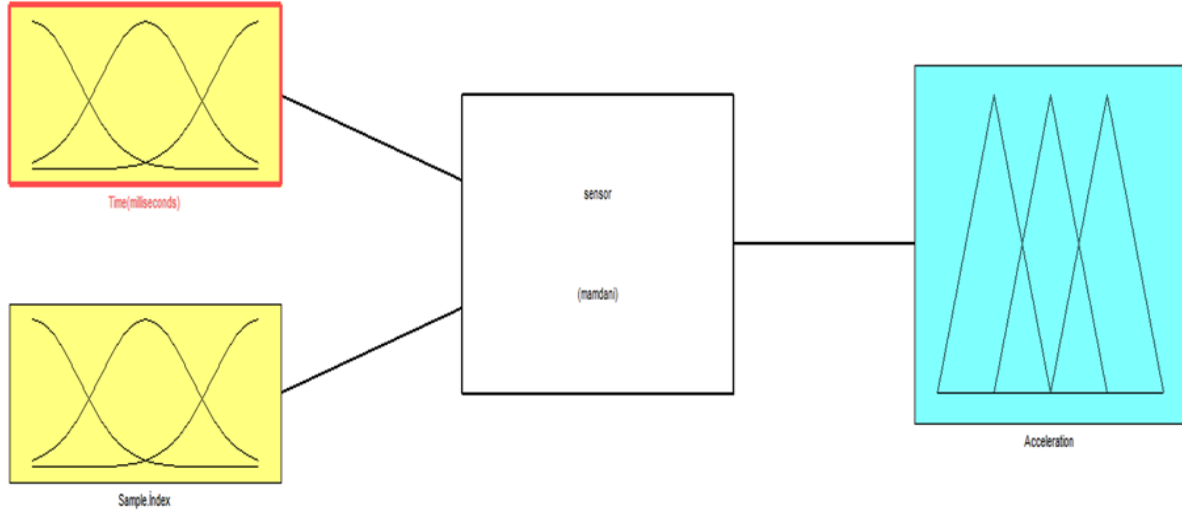


Figure 4. Fuzzy logic method

At the same time, fuzzy logic is rule-based to produce an information output. Figure 5 shows the fuzzy logic rule table. In the study, the type of membership functions used in the input sets is the Generalized Bell Membership Function (GBellMF) method, and the type of membership functions used in the output sets is the Generalized Bell Membership Function (GBellMF) method, thus the trapezoidal shape, which is a geometric shape, is obtained. Our input membership functions, Time (milliseconds), were chosen at three intervals, Sample Index at ten, and our output membership functions, breaking acceleration, at sixteen intervals. It was created with a hundred and thirty rule base in order to understand the effect of the relationship between the determined membership functions on the result.

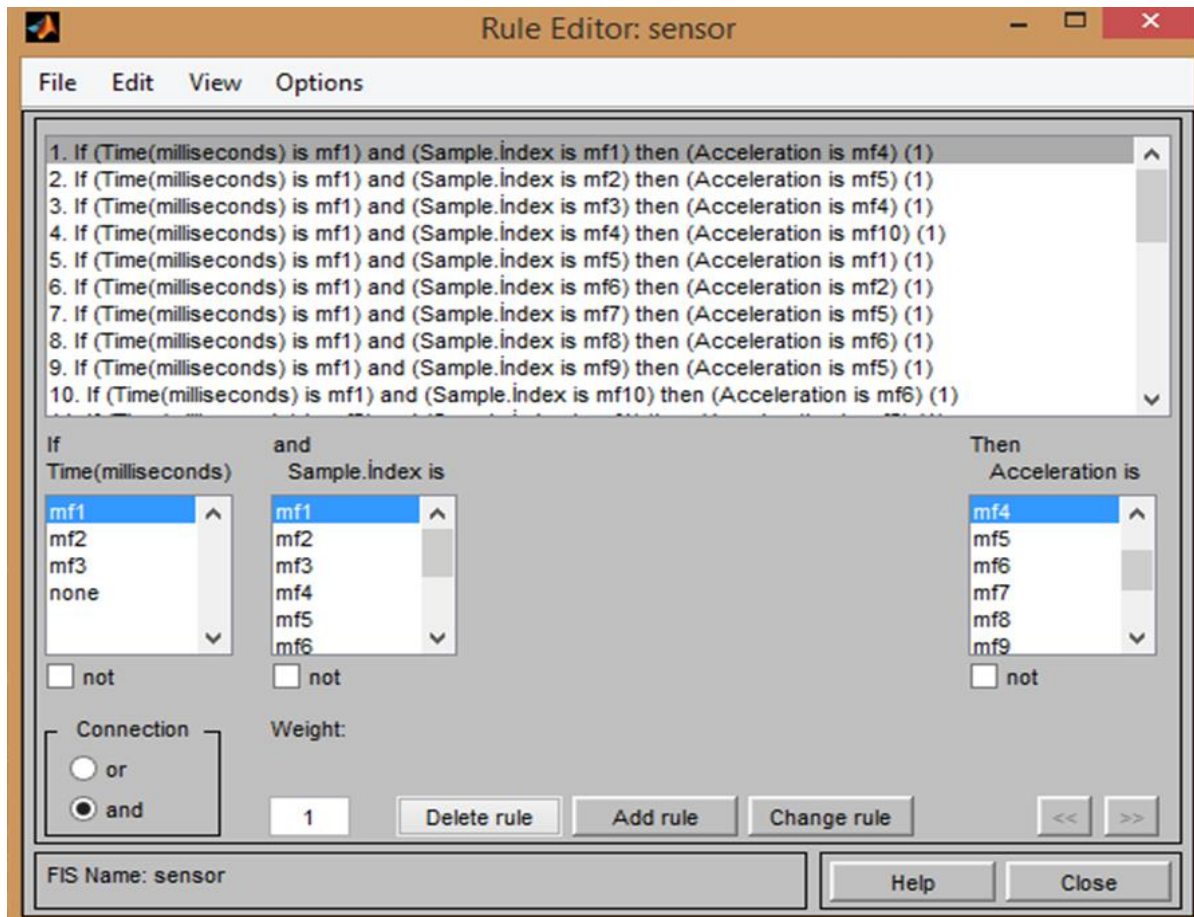


Figure 5. The fuzzy logic rule

3. RESULT AND DISCUSSION

In motion sensors, acceleration and deceleration create a minimum and a maximum in the acceleration curve. The graphs below show movements on the X and Y axis and up-down acceleration patterns. Figure 6 shows the acceleration graph for X-axis.

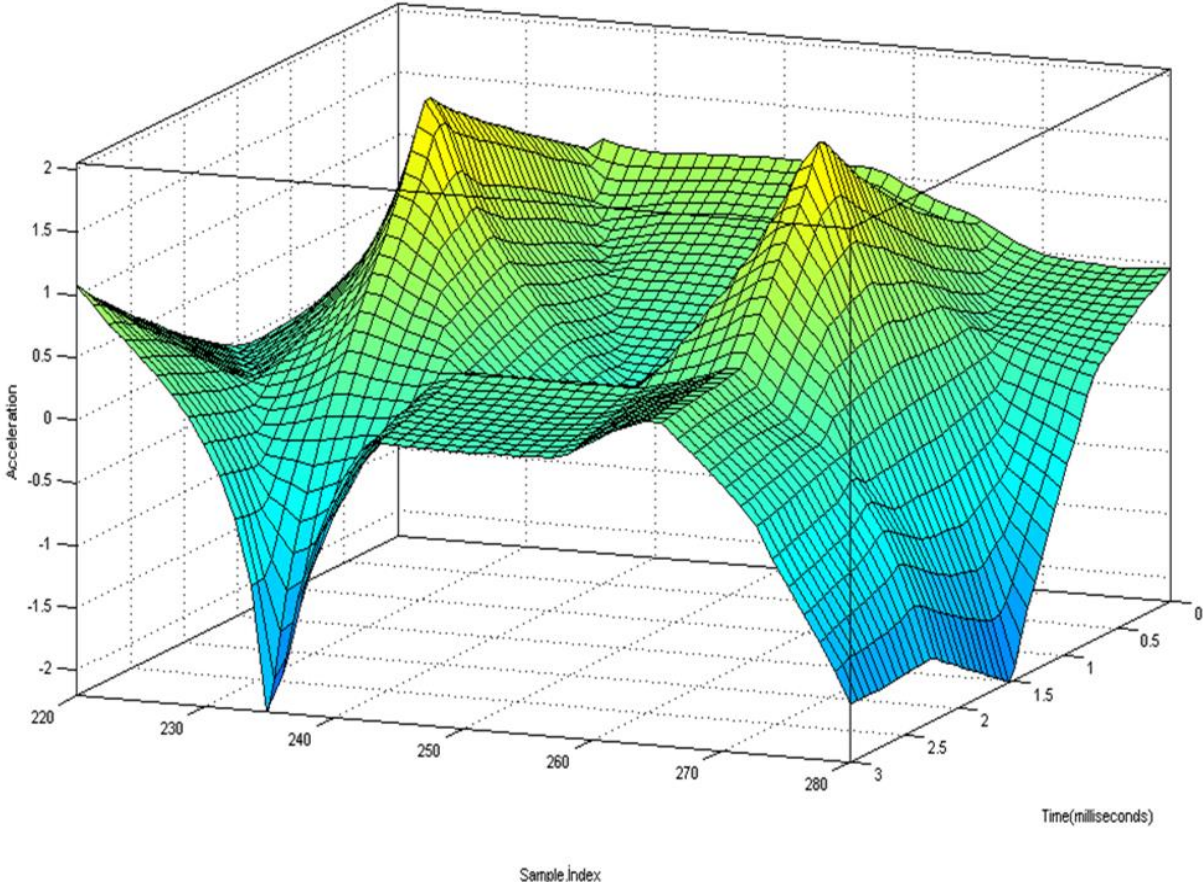


Figure 6. Acceleration graph for X-axis

Figure 6 helps to find out what is happening with the motion sensor. In the X-axis, a deceleration with a value of -2.2 is defined, followed by an acceleration with a value of 1.4.

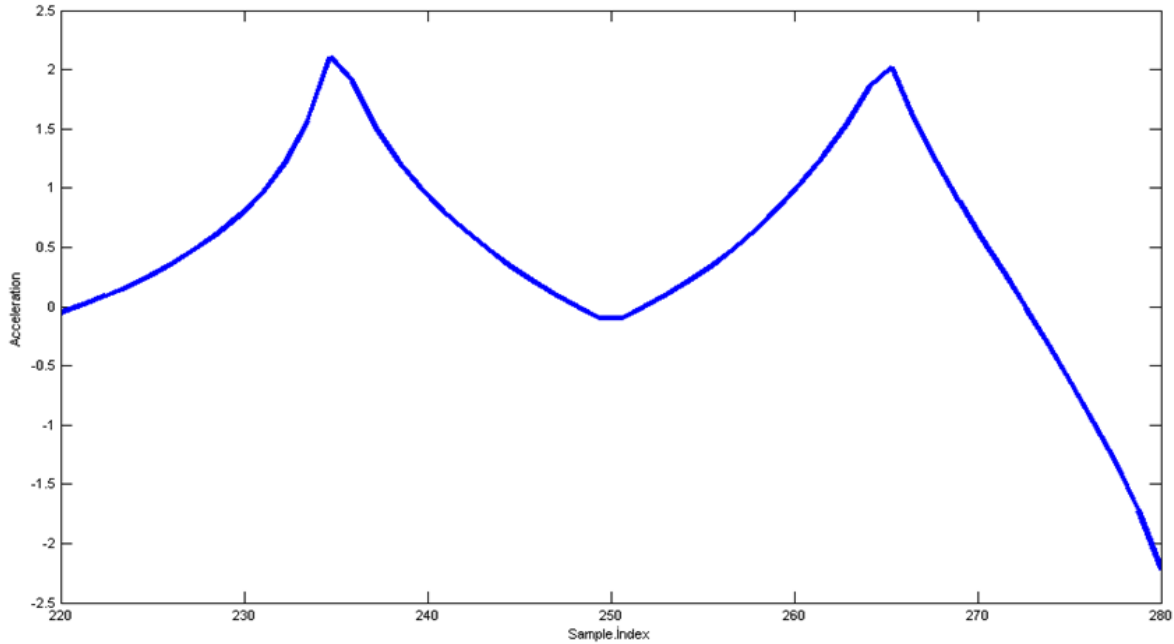


Figure 7. Relationship between sample index and acceleration for X-axis

In the acceleration graph on the X-axis, acceleration becomes 2.2 at a sample index value of 235, acceleration becomes -0.1 at a sample index value of 250, acceleration becomes 2.1 at a sample index value of 265, acceleration reaches a value of -2.4 at a sample index value of 280. These data are interpreted to coordinate the distances of movements using the graphs above. Figure 8 shows the acceleration graph for Y-axis.

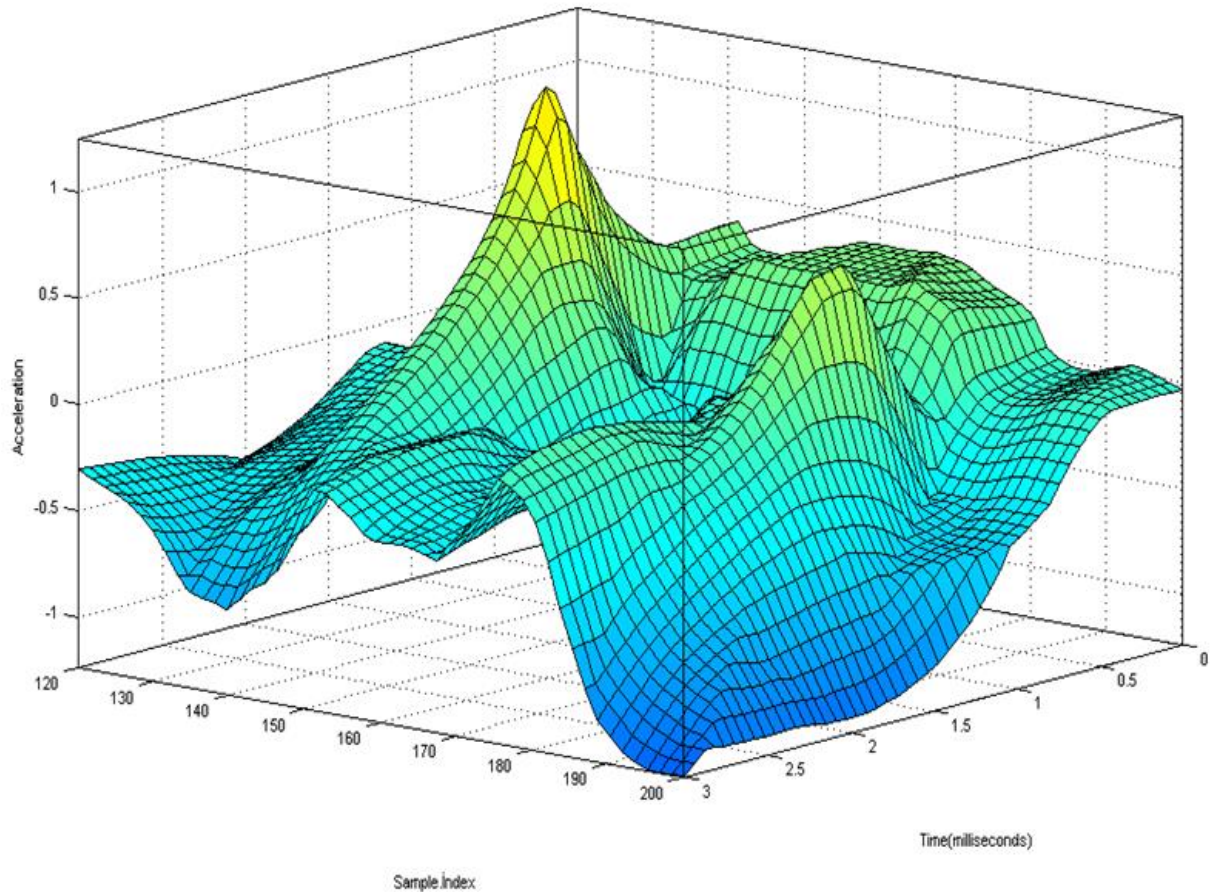


Figure 8. Acceleration graph for Y-axis

Given the y-axis, we can make inferences between the distances and directions of their movements. In the Y axis, a deceleration with a value of -1.2 is defined, followed by an acceleration with a value of 0.9.

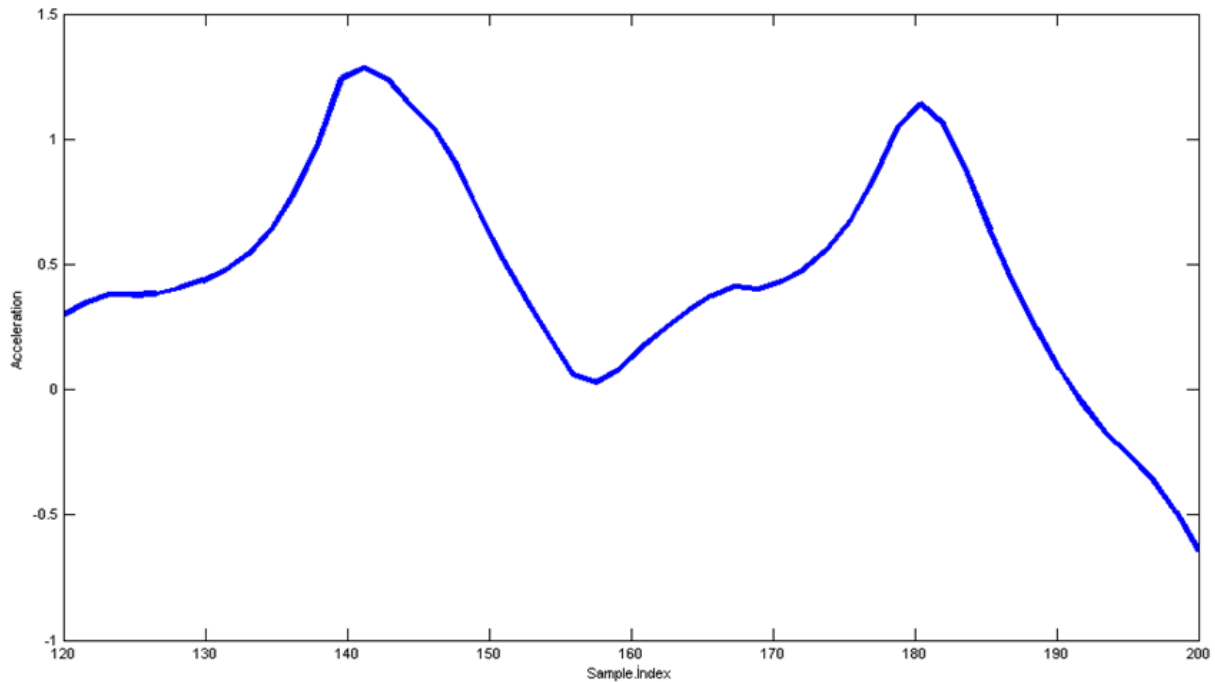


Figure 9. Relationship between sample index and acceleration for Y-axis

In the acceleration graph on the Y axis, the acceleration is 1.3 at 140 sample index value, 0.1 at 155 sample index value, 1.2 at 180 sample index value, and -0.6 at 200 sample index value. One after another, the sensors show unique acceleration and deceleration movements.

4. CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS

The broad advantages offered by wearable technologies in the healthcare sector and education are clearly visible. In the field of healthcare, wearable technologies provide a significant increase in patient monitoring, management of chronic diseases and functionality of healthcare professionals. These technologies have found various applications that allow individuals to track their own health data and gain easier access to healthcare. On the other hand, it is observed that wearable technologies in education have a significant potential such as student interaction, efficiency and integration into learning processes.

The evolution of wearable technologies in the field of healthcare is bringing a radical change in modern healthcare. Wearable technologies, which are clinically useful technologies

in patient diagnosis, treatment and care, stand out thanks to their low cost and ability to collect data for a long time in any environment. Cloud integration facilitates access to big data, allowing machine learning algorithms to be applied for new results. However, the lack of strict data management and appropriate verification standards in this area remains a significant problem, even though the technology is still maturing. Nevertheless, appropriate data regulations, widespread verification processes and integration into global networks stand out as important steps for wearable technologies to realize their potential. On the other hand, some difficulties that may be encountered in the use of these technologies have also been noted [27-28]. In particular, issues such as privacy concerns, technical malfunctions and cost are important points to consider.

Fuzzy logic method was used to determine the activity and acceleration of motion sensors within a certain period of time. With the fuzzy logic method designed to detect movement in the X and Y axes, it determined a deceleration with a value of -2.2 in the In this way, it is possible to make objective evaluation from fuzzy concepts.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında çıkar çatışması yoktur.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Çalışma, araştırma ve yayın etiğine uygundur.

REFERENCES

- [1] K. Kaewkannate and S. Kim, “A comparison of wearable fitness devices,” *BMC public health*, 16, 1-16, (2016).
- [2] V. G. Motti, “Wearable technologies in education: A design space,” in *Learning and Collaboration Technologies (Lecture Notes in Computer Science 11591)*, P. Zaphiris and A. Ioannou, Eds. Cham, Switzerland: Springer, pp. 55–67, 2019.
- [3] M. Bauer, C. Brauer, J. Schuldt, M. Niemann, and H. Kromker, “Application of wearable technology for the acquisition of learning motivation in an adaptive e-learning platform,” in *Advances in Human Factors in Wearable Technology Design*, T. Ahram, Ed. Cham, Switzerland: Springer, pp. 29–40, 2019.
- [4] A. A. Vartak, C. M. Fidopiastis, D. M. Nicholson, W. B. Mikhael, and D. D. Schmorow, “Cognitive state estimation for adaptive learning systems using wearable

- physiological sensors,” in *Proc. 1st Int. Conf. Bio-Inspired Syst. Signal Process*, no. 2, pp. 147–152, 2008.
- [5] H. A. Frank, K. Jacobs, and H. McLoone, “The effect of a wearable device prompting high school students aged 17–18 years to break up periods of prolonged sitting in class,” *Work*, vol. 56, no. 3, pp. 475–482, 2017.
- [6] L. Wang, B. Lo, and G.-Z. Yang, “Multichannel reflective ppg earpiece sensor with passive motion cancellation,” *Biomedical Circuits and Systems*, IEEE Transactions on, vol. 1, no. 4, pp. 235–241, 2007.
- [7] T. Suzuki, H. Tanaka, S. Minami, H. Yamada, and T. Miyata, “Wearable wireless vital monitoring technology for smart health care,” *Medical Information and Communication Technology (ISMICT)*, 7th International Symposium, pp. 1–4, 2013.
- [8] A. Aliverti, “Wearable technology: role in respiratory health and disease,” *Breathe* 2017; 13: e27–e36.
- [9] F. S. Çakır, A. Aytekin, and F. Tüminçin, “Nesnelerin interneti ve giyilebilir teknolojiler,” *Sosyal Araştırmalar ve Davranış Bilimleri Dergisi*, 4(5), 84-95, (2018).
- [10] M. H. Iqbal, A. Aydın, O. Brunckhorst, P. Dasgupta, and K. Ahmed, “A review of wearable technology in medicine,” *Journal of the Royal Society of Medicine*, 109(10), 372–380, 2016.
- [11] R. Paradiso, and D. De Rossi, “Advances in textile technologies for unobtrusive monitoring of vital parameters and movements,” *In 2006 International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pp. 392-395, (2006).
- [12] H. Ö. Kılıç, “Giyilebilir teknoloji ürünleri pazarı ve kullanım alanları,” *Aksaray Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 9(4), 99-112, (2017).
- [13] H. Lewy, “Wearable technologies – future challenges for implementation in healthcare services,” *Healthcare Technology Letters*, 2(1), 2–5, 2015.
- [14] A. Ometov, V. Shubina, and L. Klus, “A Survey on Wearable Technology: History, State-of-the-Art and Current Challenges,” *Computer Networks*, 108074. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108074>, 2021.
- [15] S. Malwade, and L. Cilliers, “Mobile and Wearable Technologies in Healthcare for the Ageing Population,” *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, doi: 10.1016/j.cmpb.2018.04.026,(2018).

- [16] S. H. Chuah, and Lade, S. “Wearable technologies: The role of usefulness and visibility in smartwatch adoption,” *Computers in Human Behavior*, 65, 276–284. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2016.07.047>, 2016.
- [17] S. M. A. Iqbal, and W. Asghar, “Advances in healthcare wearable devices,” *npj Flexible Electronics*, 5(1), 9. <https://doi.org/10.1038/s41528-021-00107-x>, 2021.
- [18] C. Glaros, and D. I Fotiadis, “Wearable Devices in Healthcare,” *In StudFuzz* 184 , pp. 237–264, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. (2005).
- [19] M., Bower, and D. Sturman, “What are the educational affordances of wearable technologies,” *Computers and Education*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compedu.2015.07.013>, 2015.
- [20] H. A. Almusawi, C. M. Durugbo, and A. M. Bugawa, “Wearable technology in education: A systematic review,” *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 14(4), 540-554, (2021).
- [21] B. Attallah, and Z. Ilagure, “Wearable technology: Facilitating or complexing education,” *International Journal of Information and Education Technology*, 8(6), 433-436, 2018.
- [22] S. Sezgin, “Eğitimde giyilebilir teknolojiler: fırsatlar ve eğilimler,” *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 1(40), 2019.
- [23] R. Collier, and A. B. Randolph, “Wearable Technologies for Healthcare Innovation,” *In SAIS 2015 Proceedings* (pp. 18). Southern Association for Information Systems. Retrieved from <http://aisel.aisnet.org/sais2015/18>, 2015.
- [24] M. Çiçek, “Wearable Technologies And Its Future Applications,” *International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication*, 3(4), 45-50, (2015).
- [25] L. Walter, “Research in Intelligent Biomedical Clothing vs. Realities in the European Textile Business,” *In A. Lymberis & D. de Rossi (Eds.), Wearable eHealth Systems for Personalised Health Management*, pp. 75-80, IOS Press, 2004.
- [26] C. E. Erkiş, and A. Yalçın, “Evaluation of the wearable technology market within the scope of digital health technologies,” *Gazi Journal of Economics and Business*, 6(3), 310-323. doi: <https://doi.org/10.30855/gjeb.2020.6.3.006>, 2020.
- [27] M. M. M. Nawawi, K. A. Sidek, and A. W. Azman, “ECG in Real World Scenario: Time Variability in Biometric Using Wearable Smart Textile Shirts,” *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 40(2), 36-49, 2024.

Murat KODALOĞLU, Feyza AKARSLAN KODALOĞLU, “ Wearable Technologies: Wearable Sensor and Detection of Motion Sensor Data Using Fuzzy Logic”, *Yekarum e-Dergi*, 9 / 1 (2024) 1-19

- [28] A. Godfrey, V. Hetherington, H. Shum, P. Bonato, N. H. Lovell, and S. Stuart, “From A to Z: Wearable technology explained,” *Maturitas*, 113, 40–47. DOI: 2018.
- [29] S. Park and S. Jayaraman, “Enhancing the quality of life through wearable technology” *IEEE Engineering in medicine and biology magazine*, 22(3), 41-48 2003.
- [30] N. Morresi, V. Cipollone, S. Casaccia, G. M. Revel, “Measuring thermal comfort using wearable technology in transient conditions during office activities,” *Measurement*, 224, 2024.
- [31] M. Jafarzadeh Esfahani, N. Sikder, “Citizen neuroscience: wearable technology and open software to study the human brain in its natural habitat,” *European Journal of Neuroscience*, 59(5), 948-965, 2024.
- [32] M. Tanaka, S. Ishii, A. Matsuoka, “Perspectives of Japanese elders and their healthcare providers on use of wearable technology to monitor their health at home: A qualitative exploration,” *International Journal of Nursing Studies*, 152, 2024.



Süleyman Demirel Üniversitesi
YEKARUM e-DERGİ
(Journal of YEKARUM)



Cilt 9 , Sayı 1 , 20-32 , 2024
E - ISSN:1309-9388

Çelik Geodezik Kubbelerde Geometrik Frekans ve Geometrik Oransal Değerlerin Çelik Malzeme Tüketimine Etkileri

Rumeysa Nur Önder*¹, Prof. Dr. Zeki AY²

* Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Isparta, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-4747-5674), rumeysanurkaratop@gmail.com

² Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Isparta, Türkiye, (ORCID: 0000-0000-0000-0000), zekiay@sdu.edu.tr

(İlk Geliş Tarihi 28/5/2024 ve Kabul Tarihi 10/06/2024)

ÖZET:

Geodezik kubbeler, geometrilerinin sağladığı enerji ve yapım maliyetleri ile ilgili faydaların yanı sıra, prefabrikasyona uygunluğu, demonte kolaylığı gibi diğer yapı sistemlerine göre önemli üstünlüklere sahiptirler. Dünya üzerinde çok farklı kullanım alanlarında tercih edilmektedirler. Kullanım alanına göre de farklı malzemeler ile inşa edilebilirler.

Bu çalışmada çelik geodezik kubbelerin geometrisine göre, yani geometrik frekans ve geometrik oransal değerlerine göre, on farklı model için, altı metre standart çelik profil boyu esas alınarak gerekli çelik malzeme tüketimi belirlenmiştir.

Böylece, bu alanda çalışan, tasarımcı mühendis ve üretici firmalara belirlenen bir kubbe çapı veya taban alanına göre en uygun geometrik modeli belirleme olanağı sunulmuş olmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Geodezik kubbe, Geometrik frekans, Geometrik oran, Çelik tüketimi*

Effects of Geometric Frequency and Geometric Proportional Values on Steel Material Consumption in Steel Geodesic Domes

ABSTRACT

Geodesic domes, in addition to the benefits related to energy and construction costs provided by their geometry, have significant advantages over other building systems such as suitability for prefabrication and ease of disassembly. They are preferred in many different areas of use around the world. They can be constructed with different materials depending on the area of use.

In this study, the required steel material consumption are determined for ten different models, based on the six-meter standard steel profile length, according to the geometry of steel geodesic domes, that is, geometric frequency and geometric proportional values.

Thus, designer engineers and manufacturing companies working in this field are offered the opportunity to determine the most appropriate geometric model according to a determined dome diameter or base area.

Keywords: *Geodesic domes, Geometric frequency, Geometric rate, Steel consumption*

1. GİRİŞ

Özellikle son yıllarda, dünya çapında yaşanmakta olan pandemi süreci ve yoğun şehirleşme sonucunda insanlar daha fazla doğa ile bütünleşik bir yaşam için alternatif çözümlerine girmiştir. Bu arayış çerçevesinde insanlar, bilindik yapı sistemlerinden farklı olarak, tiny house (küçük ev), karavan, kubbe vb. taşınabilir, kolay inşa edilir, ekonomik yapı sistemlerine yönelmişlerdir. Geodezik kubbeler, bu amaçlar çerçevesinde, tercih edilen yapı sistemleri olmuştur. Şekil 1, Şekil 2’de farklı kullanım alanlarında tercih edilen geodezik kubbe yapı sistemleri için örneklere yer verilmiştir.



Şekil 1. Çelik geodezik kubbe çerçevesi



Şekil 2. Geodezik kubbe yapı sistemi

Bu çalışmada, prefabrikasyona uygunluğu ve demonte özelliklerinden dolayı, çubuk kubbeler içerisinde dünyada yaygın olarak kullanılan geodezik kubbelerden biri olan çelik geodezik kubbelerin çap ve geometrik frekans gibi geometri değişimlerine göre malzeme tüketimleri incelenmiştir.

Bu çalışmanın bir geodezik kubbenin dayanıklı, kullanışlı, estetik bir görünümde ve en önemlisi uygun maliyette olması için üretici firmalara ve tasarımcı mühendislere yardımcı olması amaçlanmaktadır.

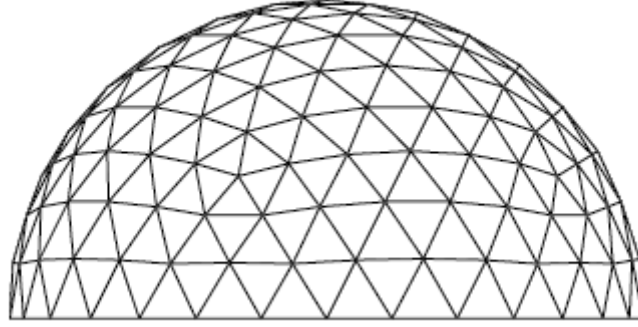
1.1. Kubbe Sistemler

Kubbeler, tarih boyunca en dayanıklı yapı sistemleri olarak büyük açıklıkların geçilmesinde yapısal form olarak tercih edilmişlerdir [1]. 20.yüzyılın başından itibaren çelik malzeme teknolojisindeki gelişmelerle birlikte, özellikle büyük açıklıklı yapıların inşasında çelik, bir yapı malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde, kagir ve betonarme kubbelerin yanı sıra çelik kubbeler de yaygın olarak inşa edilmektedir [2].

Kubbe sistemler içerisinde yer alan çubuk kubbeler, nervürlü kubbeler (ribbed domes), schwedler kubbeler (ağ kubbeler), üç doğrultuda ızgara tek hatlı kubbeler, paralel-lamella kubbeler, çift hatlı kubbeler ve geodezik kubbeler olarak sınıflandırılmaktadır [1],[3].

Kubbe sistemlerinin geometrileri yarım küreye benzer. Küre, yüzey alanına oranla maksimum hacmi içeren matematiksel bir nesnedir. Dolayısıyla büyük hacimli bir yapı, minimum maliyet ile yapılmak istenildiğinde yapı geometrisini küreye yaklaşan bir formda yapmak oldukça mantıklı olacaktır [4],[5].

Çelik bir kubbe yapılmak istenildiğinde, çelik elemanlar doğrusal formda üretildiklerinden, küreye yaklaşan bir formu yakalamak için çelik eğrisel elemanlar kullanmak, yapı maliyetini oldukça artırmaktadır. İşte bu noktada, çelik bir kubbede doğrusal elemanlar ile küre şeklini yakalamak için kubbe sistemlerin içerisinde yer alan ve Buckminster Fuller tarafından 1954’lerde geliştirilmiş geodezik kubbe sistemler uygun bir tercih olacaktır [6]. Şekil 1.’de bir geodezik kubbe modeli örneği verilmiştir.



Şekil 3. Geodezik kubbe modeli örneği [4]

1.2. Geodezik kubbeler ve geodezik kubbelerin geometrileri

Geodezik kubbelerin matematiksel bir model olarak oluşturulmasında en belirleyici form küredir. Doğrusal çubuklar ile küreye yakın bir geometri elde edilmek istenildiğinde, çubuklar ile üçgenler oluşturularak geodezik kubbe yüzeyi mozaiklenmektedir. Ayrıca çubuklar, dörtgen formda da birleştirilebilir. Fakat çubuklar dörtgen formda birleştirildiğinde, çubukların birleştiği noktalar tamamen rijit değilse bu noktalar dönebilir. Bu nedenle, geodezik kubbe yüzeyinde üçgenler kullanmak doğru olacaktır. Aynı zamanda bu üçgenlerin eşkenar üçgen olmaları yapıya gelen yükün tüm çubuk elemanlara eşit olarak dağılmasını da sağlayacaktır [5].

Geodezik kubbelerin temelini Platonik katılar oluşturur. 20 eşkenar üçgen yüzden oluşan ve aynı zamanda Platonik bir katı olan icosahedron, geodezik kubbelerin geometrileri için en çok tercih edilen katı olmaktadır. Icosahedronun 12 köşesinden ise tam bir küre geçer [4].

Icosahedronun, her bir üçgen yüzü daha küçük üçgenlere bölüldüğünde farklı frekanslarda icosahedronlar oluşur. Oluşan bu küçük üçgenlerin köşeleri de küre yüzeyine taşınırsa, ortaya geodezik küreler çıkar. İşte bu geodezik küreler, geometrik oransal ifadelerle göre bölünüp kubbe haline getirildiğinde, bir geodezik kubbenin geometrisi tamamlanmış olur [4].

Geodezik kubbeler, farklı geometrik frekans değerlerinde modellenebilir. Geometrik frekans değişimleri, yapısal dayanım ve maliyet değerlendirmesinde büyük önem taşır. Frekans ne kadar yüksek olursa, lineer çubuklar ile oluşturulan kubbe o kadar çok yarım küreye benzeyecektir.

1.3. Geodezik kubbelerin tasarımı

Geodezik kubbelerde kullanım amacına bağlı olarak istenilen taban alanı esas alınarak çap belirlenmektedir. Daha sonra çap ile kullanım amacı doğrultusunda seçilen kaplama, yapıya gelen yükler göz önüne alınarak geometrik frekans ve geometrik oransal ifade seçimi yapılır. Bu seçimin yapılabilmesi için, bir diğer önemli nokta çubuk eleman giderinin ve buna bağlı olarak meydana gelen çubuk eleman zayıflığının öngörülebilmesidir. Bilinmelidir ki, küçük çaplı kubbelerin yüksek geometrik frekans değerine sahip olması gereksiz yere birim alana düşecek olan malzeme miktarını artırmaktadır. Bu durum, birim alandaki yapı maliyetini olumsuz yönde etkileyecektir. Diğer taraftan, büyük çaplı kubbelerin düşük geometrik frekans değerine sahip olması çubuk eleman boylarının büyük olmasına ve dolayısıyla çubukların burkulma boylarının büyümesine neden olacağı için yapıda yerel ya da tümsel stabilite bozuklukları ortaya çıkacaktır. Bu durumda, yapının stabilitesini sağlayabilmek amacıyla eleman kesitleri büyüyecektir. Ayrıca, çelik elemanların üretimi sadece boy olarak değil enkesit olarak da standart olduğu için yapısal tasarım sonucunda tam olarak gerekli enkesite sahip profil kullanma olasılığı oldukça düşüktür. Bu nedenle çoğu zaman, gereğinden daha büyük enkesitli profiller kullanmak zorunda kalınır. Büyük enkesitli elemanlar kullanılması montaj maliyetini yükseltmekle beraber çelik malzeme giderinin de artması sonucunda yapı maliyetini yükseltecektir.

2. MATERYAL ve METOT

2.1. Materyal

Bir geodezik kubbenin statik tasarımında, öncelikle, seçilen çapa, geometrik frekansa ve geometrik oransal ifadeye göre geodezik kubbenin geometrisi belirlenir. Burada geometrinin belirlenmesi demek, çubuk boyları ve sayılarının, düğüm noktası sayılarının, üçgen yüzey elemanı boyları ve sayılarının belirlenmesi demektir.

Aynı çapa sahip geodezik kubbelerin, geometrik frekanslarına göre farklı sayılarda düğüm ve çubukları olacaktır. Geometrik frekans seçimi, birim alana düşen çubuk ve düğüm noktası sayısını, dolayısıyla, geodezik kubbe maliyetini de doğrudan etkileyecektir. Bu noktada yapısal optimizasyona ihtiyaç ortaya çıkar [7].

Bir mühendisin geodezik kubbelerin yapısal optimizasyonunu gerçekleyebilmesi için çap, geometrik frekans ve geometrik oransal ifadelerle göre çubuk boyu metrajının değişimini bilmesi büyük önem taşımaktadır. Dolayısıyla, bir mühendis, bu çalışma sonuçlarından

faydalanarak farklı çaplarda hangi geometrik frekans ve geometrik oransal ifadelerin uygun olacağına kolayca karar verebilecektir. Yapacağı çok fazla yapısal optimizasyon için emek ve zaman harcamamış olacaktır. Böylece yapacağı tasarım estetik, kullanışlı ve ekonomik bir tasarım olacaktır.

Bu çalışmada, model olarak, uygulamada yaygın olarak kullanılan 2v-1/2, 3v-3/8, 3v-4/9, 3v-5/8, 3v-5/9, 4v 5/12, 4v-1/2, 4v-7/12, 5v-7/15, 5v-8/15 geodezik kubbe modelleri seçilmiştir. Her model için 4m, 6m, 8m, 10m, 12m, 14m, 16m, 18m ve 20m çapları kullanılmıştır. Aşağıda Tablo 1’de çalışmaya esas toplam 90 adet geodezik kubbe modelleri verilmiştir.

Tablo 1. Geodezik kubbe modelleri

Model	Çap (m)	Model	Çap (m)	Model	Çap (m)	Model	Çap (m)	Model	Çap (m)
2V-1/2	4	3V-4/9	4	3V-5/9	4	4V-1/2	4	5V-7/15	4
2V-1/2	6	3V-4/9	6	3V-5/9	6	4V-1/2	6	5V-7/15	6
2V-1/2	8	3V-4/9	8	3V-5/9	8	4V-1/2	8	5V-7/15	8
2V-1/2	10	3V-4/9	10	3V-5/9	10	4V-1/2	10	5V-7/15	10
2V-1/2	12	3V-4/9	12	3V-5/9	12	4V-1/2	12	5V-7/15	12
2V-1/2	14	3V-4/9	14	3V-5/9	14	4V-1/2	14	5V-7/15	14
2V-1/2	16	3V-4/9	16	3V-5/9	16	4V-1/2	16	5V-7/15	16
2V-1/2	18	3V-4/9	18	3V-5/9	18	4V-1/2	18	5V-7/15	18
2V-1/2	20	3V-4/9	20	3V-5/9	20	4V-1/2	20	5V-7/15	20
3V-3/8	4	3V-5/8	4	4V-5/12	4	4V-7/12	4	5V-8/15	4
3V-3/8	6	3V-5/8	6	4V-5/12	6	4V-7/12	6	5V-8/15	6
3V-3/8	8	3V-5/8	8	4V-5/12	8	4V-7/12	8	5V-8/15	8
3V-3/8	10	3V-5/8	10	4V-5/12	10	4V-7/12	10	5V-8/15	10
3V-3/8	12	3V-5/8	12	4V-5/12	12	4V-7/12	12	5V-8/15	12
3V-3/8	14	3V-5/8	14	4V-5/12	14	4V-7/12	14	5V-8/15	14
3V-3/8	16	3V-5/8	16	4V-5/12	16	4V-7/12	16	5V-8/15	16
3V-3/8	18	3V-5/8	18	4V-5/12	18	4V-7/12	18	5V-8/15	18
3V-3/8	20	3V-5/8	20	4V-5/12	20	4V-7/12	20	5V-8/15	20

Tablo 1.’de verilen geodezik kubbe modellerinden, 2v-1/2 ve 4v-1/2 modelleri bir geodezik kürenin Ekvator’undan tam olarak 2’ye bölünmesiyle oluşur. 3v-3/8, 3v-4/9, 4v-5/12, 5v-7/15 modelleri, geodezik kürenin Ekvator’unun biraz üzerinden bölünmesiyle, 3v-5/8, 3v-5/9, 4v-7/12, 5v-8/15 modelleri ise geodezik kürenin Ekvator’unun biraz altından bölünmesiyle oluşmaktadır [4]. Bu modeller kendi aralarında basıklıklarına göre gruplandırılabilir. Bu çalışmada, 2v-1/2 ve 4v-1/2 modelleri normal basıklığa sahip kubbeler, 3v-3/8, 3v-4/9, 4v-5/12,

5v-7/15 modelleri basık kubbeler, 3v-5/8, 3v-5/9, 4v-7/12, 5v-8/15 basık olmayan kubbeler olarak gruplandırılmıştır. Bu sayede, kubbe geometrilerinde önemli bir geometrik faktör olan basıklık kavramı da bu araştırma çerçevesinde değerlendirilmiş olacaktır.

2.Yöntem

2.1 Geodezik kubbelerde çubuk eleman boy hesabı

Geodezik kubbelerin geometrilerinde frekans ve çap iki temel parametredir. Bu çalışmada, bu iki temel parametreye bağlı olarak geodezik kubbelerin çubuk eleman boyları açısından metrajları çıkarılmıştır. Çubuk eleman boyları ile sayıları bakımından aynı çaptaki farklı modellerdeki geodezik kubbeler için hazırlanan tablolar Bölüm 3’te verilmiştir.

Geodezik kubbelerde çubuklar, kubbelerin yapım maliyetini etkileyen parametrelerden biridir. Çubuk boyları, düğüm noktalarındaki açılar ile birlikte kubbe geometrisinin oluşumunda önemli rol oynarlar. Bu nedenle çubuk boyu hesabının doğru yapılması, geodezik kubbelerde büyük önem taşır.

Geodezik kubbelerde çubuk boyu, geodezik kubbenin yarıçapının çubuk faktörü denilen bir katsayı ile çarpılması sonucunda elde edilir. Çubuk faktörü, yarıçapı bir birim olan bir kürede, bir çubuk elemanın iki ucuna doğru çizilen iki yarıçap arasındaki çubuk boyudur [8].

Bu çalışmada tercih edilen 2v, 3v, 4v ve 5v frekans değerine sahip geodezik kubbelerden, 2v-1/2, 3v-3/8, 3v-5/8, 4v-1/2, 5v-7/15, 5v-8/15 Metot-1 ile, 3v-4/9, 3v-5/9, 4v 5/12, 4v-7/12 ise Kruschke yöntemi ile modellenmişlerdir [9]. Modellenen geodezik kubbelere ait çubuk faktörü sayıları dolayısıyla farklı boydaki çubuk sayıları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Çubuk faktörü sayıları

Model	Yöntem	Çubuk Faktörü Sayısı
2V-1/2	Metot-1	2
3V-3/8	Metot-1	3
3V-4/9	Kruschke	3
3V-5/8	Metot-1	4
3V-5/9	Kruschke	4
4V-5/12	Kruschke	6
4V-1/2	Metot-1	6
4V-7/12	Kruschke	6
5V-7/15	Metot-1	9
5V-8/15	Metot-1	9

Bu çalışmada kapsamında değerlendirilen geodezik kubbe modellerine ait çubuk faktörü değerleri de hesaplanmış ve Bölüm 3’te yapılan çalışmalar için kullanılmıştır.

2.1 Geodezik kubbelerde çubuk eleman metraji

Bilindiği üzere çelik elemanlar belirli standart ölçülerde üretilir. Bu nedenle, bu çalışmada, kubbe imalatında 6 metre standart boya sahip çelik profiller esas alınmıştır.

Bölüm 3’te hazırlanan tablolarda, farklı çaplarda ve farklı modellerde geodezik kubbeler için çubuk boyları hesaplanmıştır. Hesaplanan çubuk boylarına göre, 6 metre standart boya sahip çelik profillerin kullanılması halinde her boyda meydana gelecek olan profil kaybı da göz önüne alınarak kayıpsız tam boy profil sayıları belirlenmiş ve Bölüm 3’te hazırlanan tablolarda verilmiştir.

Profil sayıları belirlenirken, 1 tam boydan, aynı çubuk boy değerine sahip çubuk elemanların üretildiği varsayılmıştır.

3. ARAŞTIRMA SONUÇLAR ve TARTIŞMA

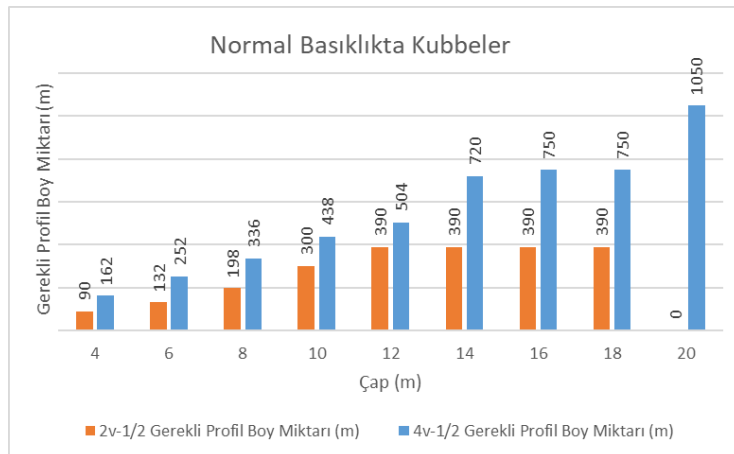
Farklı modellerde, farklı çaplarda geodezik kubbe modellerinin çubuk boyları için, Bölüm 2’de de bahsedildiği üzere, ilk etapta çubuk faktörleri değerleri hesaplanmıştır. Hemen ardından çubuk boy değerleri de bulunmuştur. Aşağıda Tablo 3’de verilen gerekli profil sayıları ve metre olarak gerekli profil uzunlukları metrajları ise, hesaplanan bu çubuk boylarına göre oluşturulmuştur. 2v-1/2 modelinde 20m çap için hesaplanan çubuk boyu uzunluğu 6m’yi geçtiğinden, bu çalışmada 6 m’lik çelik profillerden üretilemez. Bu nedenle 2v-1/2 modelin 20m çap için gerekli profil sayıları ve metre olarak gerekli profil uzunluklarına Tablo 3’de yer verilmemiştir.

Tablo 3. Farklı model ve çaplarda geodezik kubbelerde gerekli profil sayıları ve uzunlukları

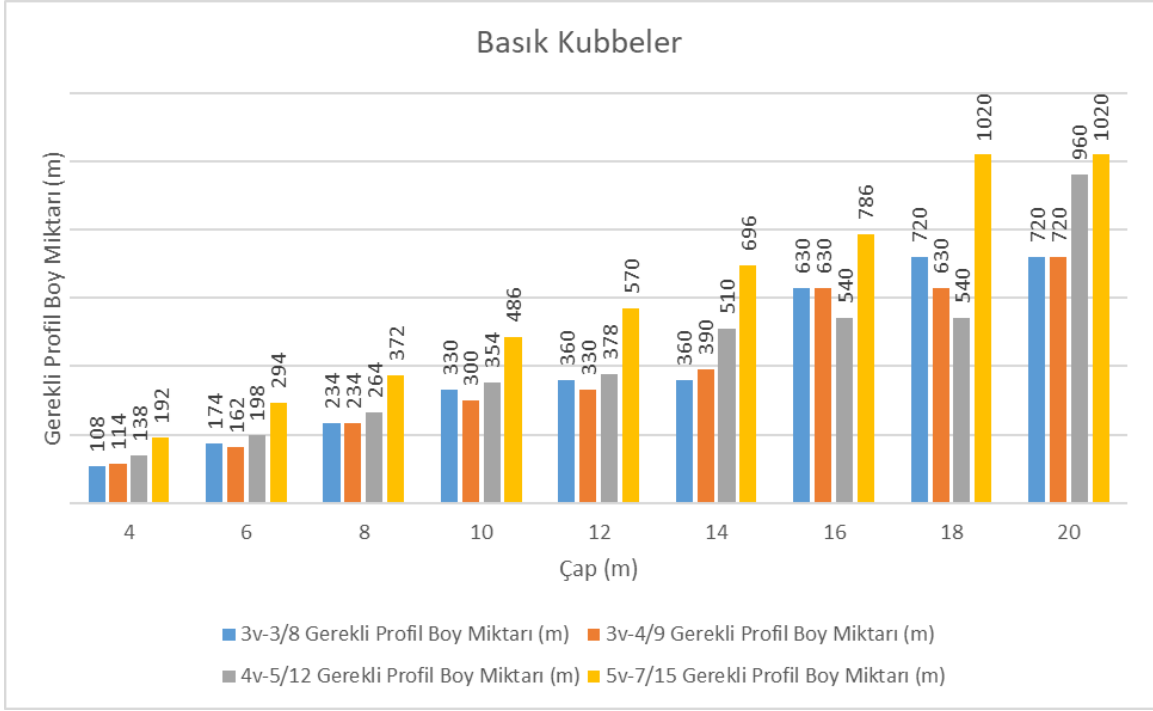
Çap (m)	Model	Gerekli Profil Boy Sayısı	Gerekli Profil Miktarı (m)	Çap (m)	Model	Gerekli Profil Boy Sayısı	Gerekli Profil Miktarı (m)	Çap (m)	Model	Gerekli Profil Boy Sayısı	Gerekli Profil Miktarı (m)
4	2V-1/2	15	90	6	2V-1/2	22	132	8	2V-1/2	33	198
	3V-3/8	18	108		3V-3/8	29	174		3V-3/8	39	234
	3V-4/9	19	114		3V-4/9	27	162		3V-4/9	39	234
	3V-5/8	24	144		3V-5/8	40	240		3V-5/8	54	324
	3V-5/9	25	150		3V-5/9	37	222		3V-5/9	54	324
	4V-5/12	23	138		4V-5/12	33	198		4V-5/12	44	264
	4V-1/2	27	162		4V-1/2	42	252		4V-1/2	56	336
	4V-7/12	35	210		4V-7/12	52	312		4V-7/12	74	444

	5V-7/15	32	192		5V-7/15	49	294		5V-7/15	62	372
	5V-8/15	39	234		5V-8/15	56	336		5V-8/15	76	456
10	2V-1/2	50	300	12	2V-1/2	65	390	14	2V-1/2	65	390
	3V-3/8	55	330		3V-3/8	60	360		3V-3/8	60	360
	3V-4/9	50	300		3V-4/9	55	330		3V-4/9	65	390
	3V-5/8	78	468		3V-5/8	83	498		3V-5/8	83	498
	3V-5/9	72	432		3V-5/9	78	468		3V-5/9	93	558
	4V-5/12	59	354		4V-5/12	63	378		4V-5/12	85	510
	4V-1/2	73	438		4V-1/2	84	504		4V-1/2	120	720
	4V-7/12	98	588		4V-7/12	103	618		4V-7/12	145	870
	5V-7/15	81	486		5V-7/15	95	570		5V-7/15	116	696
	5V-8/15	99	594		5V-8/15	116	696		5V-8/15	142	852
16	2V-1/2	65	390	18	2V-1/2	65	390	20	2V-1/2	-	-
	3V-3/8	105	630		3V-3/8	120	720		3V-3/8	120	720
	3V-4/9	105	630		3V-4/9	105	630		3V-4/9	120	720
	3V-5/8	150	900		3V-5/8	165	990		3V-5/8	165	990
	3V-5/9	150	900		3V-5/9	150	900		3V-5/9	165	990
	4V-5/12	90	540		4V-5/12	90	540		4V-5/12	160	960
	4V-1/2	125	750		4V-1/2	125	750		4V-1/2	175	1050
	4V-7/12	151	906		4V-7/12	151	906		4V-7/12	278	1668
	5V-7/15	131	786		5V-7/15	170	1020		5V-7/15	170	1020
	5V-8/15	161	966		5V-8/15	208	1248		5V-8/15	208	1248

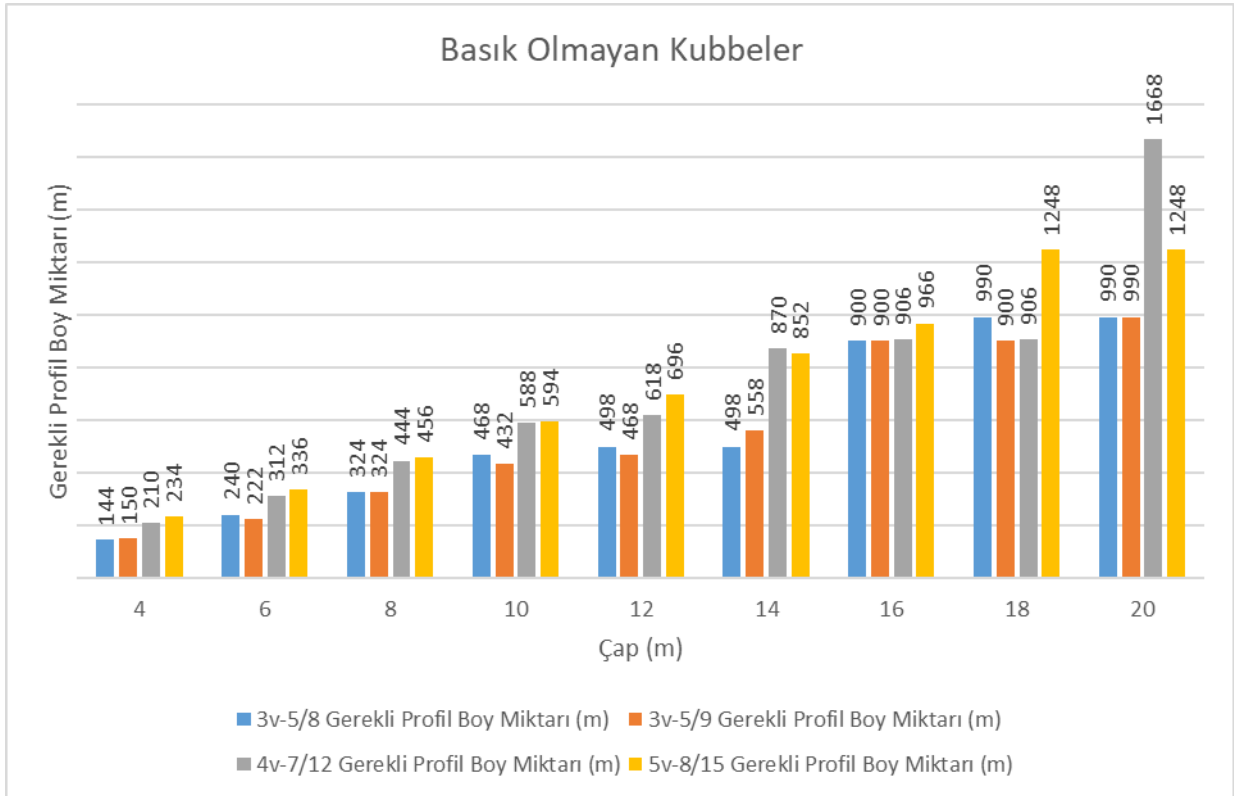
Tablo 3’de hesaplanan değerler doğrultusunda normal basıklıkta kubbeler için Şekil 4 verilen grafik, basık kubbeler için Şekil 5’te verilen grafik ve basık olmayan kubbeler için de Şekil 6’da verilen grafikler hazırlanmıştır.



Şekil 4. Normal basıkta kubbeler için gerekli profil boy miktarı (m)



Şekil 5. Basık kubbeler için gerekli profil boy miktarı (m)



Şekil 6. Basık olmayan kubbeler için gerekli profil boy miktarı (m)

4. SONUÇ ve ÖNERİLER

Basıklıklarına göre gruplandırılan geodezik kubbe modelleri, belirlenen çaplara göre, uzunluk olarak çelik malzeme tüketimi grafikleri incelenmiş ve yapılan değerlendirmeler aşağıda verilmiştir.

1- Basıklık durumu normal geodezik kubbeler;

Doğal bir sonuç olarak çap arttıkça çelik malzeme tüketimi artmış, bazı çaplar için aynı kalmıştır. Her çap kendi içerisinde değerlendirildiğine, $4v-1/2$ modelin $2v-1/2$ modelinden her çapta daha fazla çelik malzeme tüketimine ihtiyaç duyduğu görülmüştür. Buna rağmen, sadece bu sonuca bakarak $2v-1/2$ modelin daha uygun olduğunu söylemek doğru bir yaklaşım olmayacaktır. Bunun yerine, gerekli yapısal tasarım yapıldıktan sonra, ağırlık olarak malzeme tüketimi değerlendirmeye esas alınmalıdır. Ancak, uzunluk olarak aynı boy çelik malzeme tüketimi ve aynı çapa sahip modellerin bu grafiklerden hareketle değerlendirmeleri gerçekçi bir yaklaşım olacaktır. Fakat Şekil 4’de verilen grafik, üretici firmalara uzunluk olarak çelik malzeme tüketimi ile ilgili bilgi verecektir.

2- Basık geodezik kubbeler;

Normal basıklık durumundaki gibi, çap arttıkça çelik malzeme tüketimi artmış, bazı çaplar için aynı kalmıştır. Uzunluk olarak çelik malzeme tüketimi için her çap kendi içerisinde değerlendirmelidir. Bu değerlendirme çerçevesinde, basık geodezik kubbelerde, modellerin frekans değerleri arttıkça çubuk eleman sayıları artmasına rağmen, uzunluk olarak çelik malzeme tüketiminde her zaman artış söz konusu olmamıştır.

3- Basık olmayan geodezik kubbeler;

Basık olmayan geodezik kubbelerde de, çap arttıkça çelik malzeme tüketimi artmış, bazı çaplar için aynı kalmıştır. Yine, uzunluk olarak çelik malzeme tüketimi için her çap kendi içerisinde değerlendirmelidir. Çünkü, çapa göre düzenli bir değişim söz konusu değildir. Bazı çaplarda, farklı geodezik kubbe modelleri için uzunluk olarak çelik malzeme tüketimi değerleri birbirine çok yakın ya da aynıdır. Bu durumda, düz tabanlı modellerin seçimi önerilir.

Sonuç olarak, çelik geodezik kubbelerde uzunluk olarak çelik malzeme tüketimi çap, geometrik frekans ve geometrik oransal ifadeler göre önemli değişimler göstermektedir. Bu nedenle, geodezik kubbelerin tasarımı ya da üretimi ile ilgilenenlerin model ve çapa göre genel değerlendirmelerden uzak durarak, model seçiminde çap, basıklık ve tabanın düz olmasını esas alarak her çap için kendi içerisinde çelik malzeme tüketimi irdelerek karar vermelidir.

Mühendislerin vereceği bu karar yapısal tasarıma başlamadan önce, ön boyutlandırma için oldukça faydalı olacaktır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında çıkar çatışması yoktur.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Çalışma, araştırma ve yayın etiğine uygundur.

KAYNAKLAR

- [1] A.J.Mohammed, "Çelik Kubbe Sistemler", Yüksek Lisans Semineri, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2015.
- [2] Z.Ay, "Çelik Yapılar" [Çevrimiçi]. Mevcut: <http://www.zekiay.com.tr/Ders-notu-celik-yapilar-93871.html> [Erişim:28.05.2024]
- [3] Z.S.Makowski, "*Steel Space Structures*", 1.baskı, London, M.Joseph, 1965.
- [4] T.Davis, "Geodesic Domes" [Çevrimiçi]. [Last Updated:18.02.2011] Mevcut: <http://www.geometer.org/mathcircles/> [Erişim:28.05.2024]
- [5] F.R.Buckminster, "Geodesic Domes", Buckminster Fuller Institute, [Çevrimiçi]. Mevcut:<https://www.bfi.org/about-fuller/geodesic-domes/#geodesic-domes> [Erişim:28.05.2024]
- [6] F.R.Buckminster, "Geodesic Structures", Patent US3197927A, ABD, 1965.
- [7] Z.Peng, "Geodesic Dome Structural Analysis and Design ", ENG4111 AND 4112 Research Project towards the degree of Bachelor of Engineering (Honours) (Civil Engineering), Civil Engineering, Toowoomba, Queensland, Avustralya, 2016
- [8] J D.Clinton, "Definitions-Topology/Geometry of Geodesics", [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://www.domerama.com/wp-content/uploads/2011/12/geodesic.definitions.pdf> [Erişim:28.05.2024]
- [9] D.Kruschke, "*Dome Cook Book of Geodesic Geometry*", 2.baskı, Kruschke, 1975.



Süleyman Demirel Üniversitesi
YEKARUM e-DERGI
(Journal of YEKARUM)



Cilt 9 , Sayı 1 , 33-44 , 2024
E - ISSN:1309-9388

Weaving Machine Design of Cam and Follower Mechanism and Manufacturing

Murat Kodaloğlu¹

¹*Occupational Health and Safety Program, Vocational School of Technical Sciences, Isparta University of Applied Sciences, Isparta, Türkiye, (ORCID: 0000-0001-6644-8068), muratkodaloglu@isparta.edu.tr

(İlk Geliş Tarihi 19/03/2024 ve Kabul Tarihi 13/06/2024)

ABSTRACT :

In this research, we delved into the mechanisms responsible for opening sheds in weaving machines, focusing on both the shed opening systems such as cam and follower mechanisms utilized in dobby systems. Our aim was to devise a novel cam and follower system that is not only cost-effective but also simple to manufacture and maintain, drawing inspiration from the principles underlying dobby mechanisms. Specifically, we aimed to develop a system capable of producing fabrics with minimal tension in warp threads. Following the completion of the cam and follower design phase, we proceeded to fabricate and assemble the drive, selection, and motion transmission mechanisms onto the frames. Upon meticulous adjustment of these mechanisms, they were set to operate automatically at various speeds.

Keywords: *Weaving, Cam, Desing, Mechanism.*

Dokuma Makinası Kam ve İzleyici Tasarım ve İmalatı

ÖZET

Bu araştırmamızda dokuma makinelerinde ağızlık açmadan sorumlu mekanizmaları derinlemesine inceleyerek, armür sistemlerinde kullanılan kam gibi ağızlık açma sistemlerine ve takipçi mekanizmalarına odaklandık. Amacımız, armür mekanizmalarının altında yatan ilkelerden ilham alarak, yalnızca uygun maliyetli değil, aynı zamanda üretimi ve bakımı da basit olan yeni bir kam ve takipçi sistemi tasarlamaktır. Özellikle çözgü ipliklerinde minimum gerginlikle kumaş üretebilen bir sistem geliştirmeyi hedefledik. Kam ve takipçi tasarım aşamasının tamamlanmasının ardından tahrik, seçme ve hareket aktarma mekanizmalarını üretip çerçevelere monte etmeye başladık. Bu mekanizmalar titizlikle ayarlandıktan sonra otomatik olarak çeşitli hızlarda çalışacak şekilde ayarlandı.

Anahtar Kelimeler: *Dokuma, Kam, Tasarım, Mekanizma.*

1. INTRODUCTION

The efficiency of weaving machines and the fabric quality they produce are influenced significantly by several pivotal factors, notably shed geometry, shed formation, and the movement of warps within the shed. Prior to the introduction of the weft in weaving machines, it is imperative for the warp threads to undergo a process of segregation into two layers, ultimately forming a triangular tunnel, commonly referred to as a mouthpiece, through which the weft is threaded. Various systems, known as shedding mechanisms, have been devised to facilitate this separation of warp threads during shed formation. These mechanisms are typically classified into three primary groups based on their operational principles[1-4].

In our investigation, we have undertaken the design and fabrication of the cam and follower mechanism, a fundamental shed opening device utilized in weaving machines to orchestrate the movement of frames for shed creation. The cam and follower system developed in this study is purpose-built, featuring unique designs and manufacturing techniques. Distinguishing itself from research conducted in other institutions globally, this cam mechanism, in conjunction with its tracker, boasts significant advancements, particularly in its drive, selection, and motion transmission mechanisms tailored to the frames [5-8].

Moreover, our research has yielded a revolutionary weaving machine pattern mechanism, supplanting conventional commercial patterns restricted by cam and tracer systems. This innovative mechanism facilitates the adaptation of diverse and intricate patterns on weaving machines, liberating fabric design from previous constraints[9-11]. By transcending these limitations, we have successfully pioneered the development of a proficient dobby mechanism for the mechanical dobby production of woven fabrics within our country [12, 13].

Lima et al. They compared several common methods used for the appropriate design of cam mechanisms and realized the production of cam mechanisms [14,15]. Podgornyj et al. Design analysis of cam mechanisms shows that the laws of motion are established by a standard set of acceleration curves. It is designed to suggest the most efficient equipment for the follower mechanism for the contact point between the comb and the fabric edge [16]. Hamza et al. More geometric parameter design problems are solved to improve the optimum design quality of the cam mechanism [17]. Yousuf, et al. The contact between the cam and the follower was examined in terms of the periodicity of the follower during the movement [18]. Abderazek et al. Formulated for maximum strength resistance for optimum cam design. The effect of

choosing the follower motion law on the optimal design of the mechanism was investigated [19]. Rao et al. It shows different prediction performances at different preloads and different cam rotation speeds to predict the change in friction coefficient and friction force depending on the cam rotation angle [20]. As a result of the literature research, shedding systems in weaving machines produced with different methods attract attention. When the literature is examined, the deficiency in shedding in weaving machines draws attention. Therefore, in this study, unlike the literature, a new cam and follower system design that is not only cost-effective but also simple in production and maintenance was examined.

2. MATERIAL AND METHOD

To develop the new cam design as outlined in this study, an initial step involved conducting thorough analysis and calculations of the parameters influencing the design [7-9]. Key parameters integral to the design of shedding mechanisms employed in weaving looms include the number of frames, inter-frame distance, shed width, shed angle, frame displacement height, and warp thread tension forces during weaving. The determination of the number of frames is contingent upon the fabric type intended for weaving on the looms.

$$\alpha = 30^\circ; \quad n_k = 200 \frac{\text{rev.}}{\text{min.}}; \quad \varphi_{\text{height}} = 270^\circ; \quad \varphi_{\text{üb}} = 90^\circ; \quad \beta = 22^\circ; \quad l = 70 \text{ mm}; \quad r_o = 42 \text{ mm};$$

Following the theoretical exploration of design parameters, the process of designing the cam mechanism commenced. Through the investigations conducted in this study, it was observed that by imparting oscillating motion to the main shaft within the program mechanism, significant simplification of the mechanism, and subsequently the dobbie, could be achieved. This approach also allowed for the utilization of standard machine elements and bearings, leading to the realization of a novel dobbie design capable of implementing this principle [10].

A specialized research-oriented dobbie has been developed, affording full parameter interference and entirely designed and manufactured using domestic resources. Notably, a system has been devised to produce fabrics with minimized tensions in warp threads [11]. Furthermore, a foundational support framework has been established for future dobbie device manufacturers in our country. This initiative not only mitigates reliance on expensive imported machinery but also enables the production of domestically manufactured dobbies of superior quality at reduced costs. Additionally, a unique mechanical pattern system has been devised to

regulate woven fabric manufacturing processes with desired precision and quality [12]. The creation of the cam profile employs the method of motion transformation.

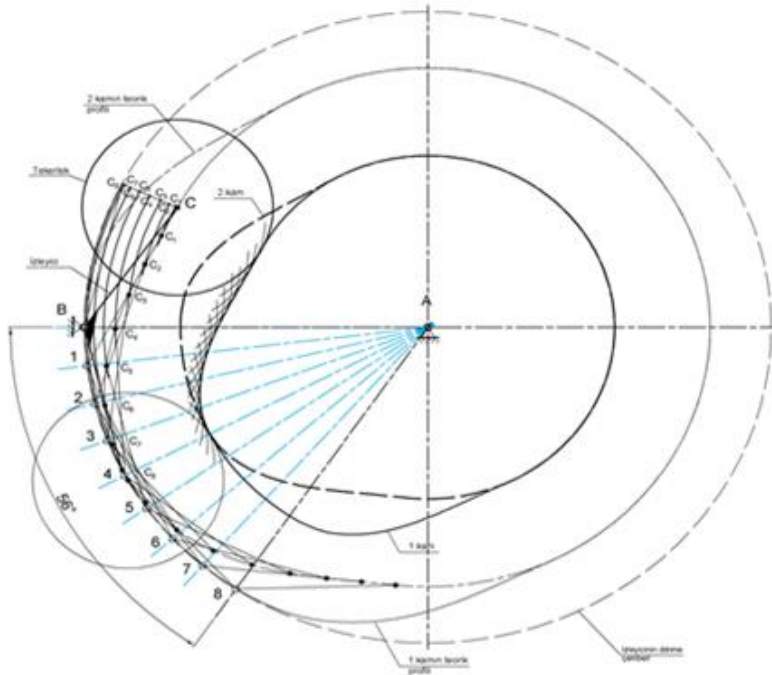


Figure 1. Design of double cam profile

Figure 1 illustrates the cam profile depicted by a solid line and the profile of the second cam by a dashed line. In positive systems, these cams transmit motion to the followers, which are linked to the frame legs. Followers operate with eccentrics, either with or without channels, depending on their construction. Non-channel eccentrics feature the ball of the foot situated on the eccentric, whereas channeled eccentrics have the ball of the foot positioned within the channel

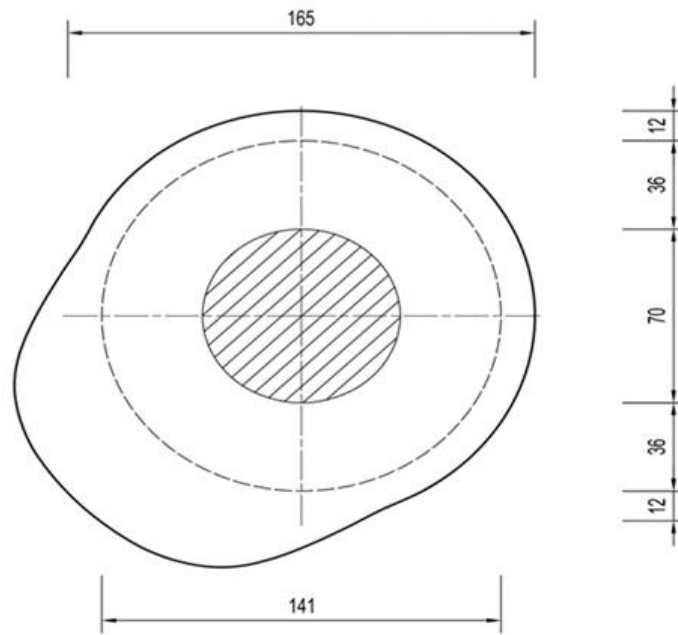


Figure 2. The technical drawing of the dobby cam mechanism is shown

In the figures below, the technical drawing of the arms, their unprocessed and machined dobby mounting conditions are shown.

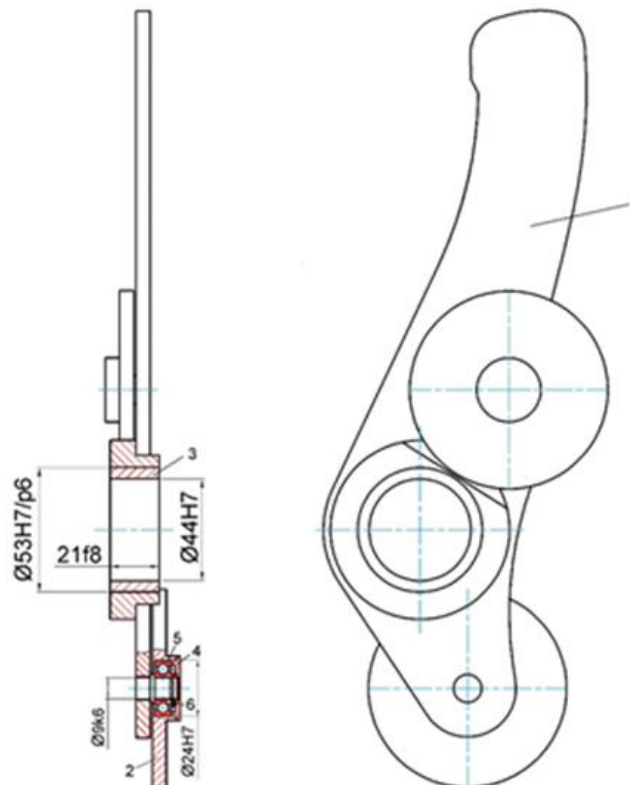


Figure 3. Drawing of cam follower

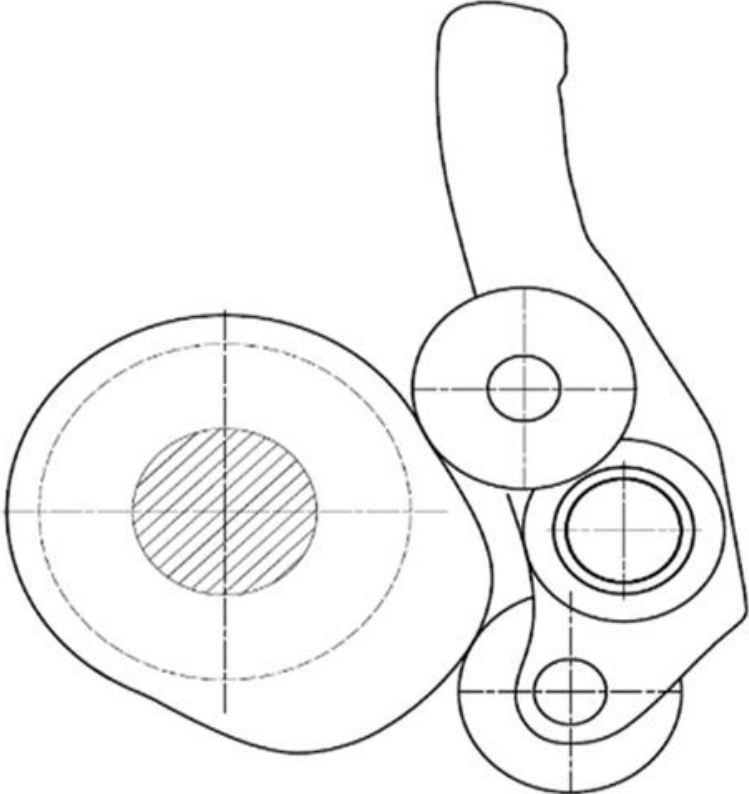


Figure 4. Assembly drawing states of cam and follower mechanism



Figure 5. Example of cam follower

3. RESULT AND DISCUSSION



Figure 6. Manufacturer of the audience

The purpose is to shift the cam body, which is affixed to the dobbie, along the axis of the shaft. To ease the movement of the cam, the cylinder is installed on the cam mechanism body.



Figure 7. Cam follower



Figure 8. Dobby cam mechanism



Figure 9. Assembly of cam and follower mechanism

When dealing with intricate or frequently changing knitting patterns, traditional shedding mechanisms prove inadequate, necessitating the development of a programmable shedding mechanism. A dobby system comprises three interlinked mechanisms: the drive mechanism, the selection mechanism, and the motion transmission mechanism to the frames. However, in the proposed system, traditional drive mechanisms and motion transmission components such as gears, chains, or belts that relay motion from the main shaft to the dobby are omitted.

Rotary dobby systems expend considerable energy to counteract warp tension, frame weight, and spring traction. Over time, fatigue in the return springs can lead to uneven lowering of frames during nozzle opening, resulting in irregular shed formation. Additionally, the weight of frames and spring assemblies restricts the operating speed of weaving machines equipped with rotary dobby systems, limiting them to the production of medium or lightweight fabrics.

4. CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS

In the developed cam mechanism, specifically designed cams for the program reading unit allow for their manipulation and retention based on signals received from the program reading unit. This unique feature sets apart the cam mechanism from classical dobby systems that rely on electromagnets and electronic operation.

Upon completion of the study, a comparison was drawn between the produced cam mechanism and those available on the market, assessing their alignment with existing literature and identifying distinctive characteristics. The cam mechanism exhibited superior mechanical and design properties compared to literature benchmarks, thereby introducing novel contributions to the field.

A noteworthy aspect of this study is the creation of an experimental model, which was then compared with theoretical models found in the literature. This comparative analysis facilitated the realistic determination of optimal cam parameters, ultimately aiming to mitigate warp yarn breakage.

The introduction of this device is expected to catalyze the initiation of innovative and fruitful projects across our nation, particularly in areas such as product and material development, parameter optimization, weaving technology enhancement, and flexible control strategies. This initiative is particularly significant in a landscape where the availability of universities and research centers is limited, necessitating the importation of expensive cam mechanisms from abroad.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında çıkar çatışması yoktur.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Çalışma, araştırma ve yayın etiğine uygundur.

REFERENCES

- [1] G. Abdulla, B. Haşçelik, and A. S. Soydan, “Yeni bir armür konstrüksiyonun analizi ve deneysel çalışmaları,” *Makine Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi*. s. 119-124. Konya. 2001.
- [2] G. Abdulla, “Dokuma makinesi için yüksek hızlı armür dizaynı,” *TÜBİTAK Projesi, İSAG-139*, 87s. Ankara, 2002.

- [3] G. Abdulla, “Dokuma makinelerinde ağızlık açma mekanizmalarının araştırılması ve modernizasyonu,” *DPT Projesi*, 2003K120950, 138s. Ankara, 2006.
- [4] G. Abdulla, and S. Palamutçu, “RA - 14 Rotatif armürünün programlama kilit sisteminin konstrüksiyonunun sentezi ve hesabı,” *2. Tekstil Teknolojileri ve Tekstil Makinaları Kongresi*, s.85-89. İstanbul, 2006.
- [5] S. Adanur, “Handbook of weaving,” *Technomic publishing company*, 429p. Pennsylvania, 2001.
- [6] M. Kodaloğlu, “Pnö-mekanik armür makinesinin tasarım ve imalatı,” *Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 124s, 2019.
- [7] R. Eren, “Armürlü ağızlık açma mekanizmaları,” *Tekstil Maraton*, 5:46-55 2000.
- [8] R. Eren, G. Özkan, M. Karahan, “Comparison of heald frame motion generated by rotary dobby and crank and cam shedding motions,” *Fibres and Textiles*, Vol. 13, Issue 52, Pages 78-83, 2005.
- [9] R. Eren, G. Özkan, Y. Turhan, “Kinematics of rotary dobby and analysis of heald frame motion in weaving process,” *Textile Research Journal*,78:1070-1079, 2008.
- [10] Fimtextile Firması Armür Makineleri ürün katalogları, 2018.
- [11] B. Hasçelik, “Beklemeli salınım hareketli rotatif armür makinesinin kinematik ve dinamik analizi,” *Pamukkale Üniversitesi, Yüksek Lisans tezi*, 114s. Denizli, 2008.
- [12] R. Marks, “Principles of weaving,” *The Textile Institute Manchester*, 248p. Manchester, 1976.
- [13] M. Kodaloğlu, F. Bedir, F. A. Kodaloğlu, “Design and manufacturing of pneu-mechanic dobby machinery,” *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 11:3, 880-885, 2023.
- [14] M. Lima, P. Zabka, “Design and analysis of conjugate cam mechanisms for a special weaving machine application,” *Romanian Review Precision Mechanics, Optics and Mechatronics*, 37, 31-38, 2010.
- [15] C. Ming, X. Chi, Z. Sun, Y. Sun, “Design of electronic cam for lower hook mechanism of fishing net-weaving machine based on polynomial fitting,” *Textile Research Journal*, 92:11-12, 1748-1759, 2022.
- [16] Y. I. Podgornyj, V. Y. Skeebea, A. V. Kirillov, T. G. Martynova, P. Y. Skeebea, “Motion laws synthesis for cam mechanisms with multiple follower displacement,” In IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering* Vol. 327, p. 042079, 2018.

- [17] F. Hamza, H. Abderazek, S. Lakhdar, D. Ferhat, A. R. Yıldız, “Optimum design of cam-roller follower mechanism using a new evolutionary algorithm,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 99: 1267-1282, 2018.
- [18] L. S. Yousuf, “Experimental and simulation investigation of nonlinear dynamic behavior of a polydyne cam and roller follower mechanism,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, 116: 293-309, 2019.
- [19] H. Abderazek, A. R. Yildiz, S. Mirjalili, “Comparison of recent optimization algorithms for design optimization of a cam-follower mechanism,” *Knowledge-Based Systems*, 191, 105237, 2020.
- [20] R. V. Rao, R. B. Pawar, “Design optimization of cam–follower mechanisms using Rao algorithms and their variants,” *Evolutionary Intelligence*, 1-26. (2022).



Süleyman Demirel Üniversitesi
YEKARUM e-DERGİ
(Journal of YEKARUM)



Cilt 9 , Sayı 1 , 45-62 , 2024
E - ISSN:1309-9388

Kırşehir İlinin Biyogaz Atık Potansiyelinin Ceviz
(*Juglans regia* L.) Üretiminde Kullanılabilirliği

Elmas Yağmur^{1*}, Sevil Sağlam Yılmaz²

^{1*} Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarımsal Biyoteknoloji A.B.D., Kırşehir, Türkiye,
(ORCID: 0000-0002-6363-3855), elmasmurtyagmur@gmail.com

² Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarımsal Biyoteknoloji Bölümü, Kırşehir Türkiye, (ORCID:
0000-0003-1302-9147), ssaglam@ahievran.edu.tr

(İlk Geliş Tarihi 03/12/2023 ve Kabul Tarihi 16/04/2024)

ÖZET :

Günümüzde enerji kaynaklarının azalması ile birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi artmaktadır. Alternatif bir enerji kaynağı olan biyokütlenin alt segmentini oluşturan biyogaz, organik atıkların belirli işlemlerden geçerek hem artan nüfusun enerji ihtiyacını karşılamakta hem de tarımsal faaliyetlerde kullanılmak üzere organik gübreyi meydana getirmektedir. Enerji artan nüfusun ihtiyacını karşılarken, organik gübre tarım alanlarında kullanılarak kimyasal içeriğe sahip gübre kullanımına olan talebi azaltmaktadır. Bu çalışmada, Kırşehir ilinde faaliyet gösteren biyogaz tesislerinden elde edilen veriler kullanılarak, Kırşehir ili genelinde bitkisel ve hayvansal atıkların biyogaz potansiyeli belirlenmeye ve bu potansiyelin Kırşehir ili için önemli bir ekonomik gelir kaynağı olan ceviz üretimine olası katkıları belirlenmeye çalışılmıştır. İl genelinde tarımsal atıklardan elde edilen yıllık toplam biyogaz enerji potansiyeli 11.04 MW yıl⁻¹ olup, bu enerjinin yaklaşık %1'ini bitkisel, %99'unu ise hayvansal atıklar oluşturmaktadır. Biyogaz enerjisi ilde en fazla Mucur ilçesinden temin edilmektedir. Üretimi gerçekleştirilen bu biyogaz atıklarının Kırşehir ceviz üreticilerine cevizin verim ve kalitesini artırması bakımından avantaj sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Biyogaz, Ceviz, Organik Gübre, Yenilenebilir Enerji*

Availability of Biogas Waste Potential of Kırşehir Province in Walnut (*Juglans regia* L.) Production

ABSTRACT

Today, with the decrease in energy resources, the interest in renewable energy sources is increasing. Biogas, which constitutes the sub-segment of biomass, which is an alternative energy source, passes through certain processes of organic wastes and both meets the energy needs of the increasing population and creates organic fertilizer for use in agricultural activities. While energy meets the needs of the increasing population, organic fertilizers are used in agricultural areas, reducing the demand for fertilizers with chemical content. In this study, it has been tried to determine the biogas potential of plant and animal wastes in Kırşehir province and the possible contributions of this potential to walnut production, which is an important source of economic income for Kırşehir province, by using the data obtained from the biogas facilities operating in Kırşehir province. The annual total biogas energy potential obtained from agricultural wastes throughout the province is 11.04 MW year⁻¹, approximately 1% of this energy is vegetable waste and 99% is animal waste. Biogas energy is supplied mostly from Mucur district in the province. It is thought that these biogas wastes will provide an advantage to Kırşehir walnut producers in terms of increasing the yield and quality of walnuts.

Keywords: *Biogas, Walnut, Organic Fertilizer, Renewable Energy*

1. INTRODUCTION

Dünya nüfusunun 8 milyarı geçmesiyle birlikte gıda ve enerjiye olan talebin yükselmesi, azalan kırsal nüfus, artan kentleşme ve endüstrileşme gibi faktörlerden dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarına olan gereksinim artmaktadır [1], [2]. Yenilenebilir enerji kaynakları, hidroelektrik enerji, jeotermal enerji, güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, biyokütle enerjisi ve dalga enerjisi olarak kabul edilmektedir [3], [4], [5].

Biyokütle, yaşayan veya yakın zamanda yaşamış canlı organizmalardan elde edilmiş fosil olmayan organik maddelerdir. Bu organik maddeler biyokütle enerji kaynağı, bu kaynaklardan elde edilen enerji ise, biyokütle enerjisi olarak tanımlanmaktadır. Tarımsal atıklar biyokütle atık potansiyelinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır [6]. Enerji kaynaklarına olan artan talebi karşılayabilmek için, Türkiye gibi tarımsal atık potansiyeli yüksek olan ülkeler biyolojik kökenli atıklarını daha fazla enerji üretmede kullanması gerekecektir [7], [8]. Biyokütle enerjisi ile biyogaz, etanol, hidrojen, metan, metanol ve motorin gibi yakıtlar elde edilmektedir. Bu yöntemi diğer yöntemlerden ayıran en önemli özellik tarımsal ve evsel biyokütle atıklarının oksijensiz ortamda biyolojik bir süreçten geçerek elde ediliyor olmasıdır [9], [10].

1.1 Türkiye’de biyogaz üretimi için başlıca biyokütle kaynakları

1.1.1. Tarımsal Biyokütle Kaynakları

- Yağlı tohumlu bitkiler (kanola, ayçiçeği, soya vb.)
- Şeker ve nişasta bitkileri (patates, buğday, mısır, şeker pancarı vb.)
- Elyaf bitkileri (keten, kenevir, sorgum, miskantus vb.)
- Bitkisel artıklar (dal, sap, saman, kök, kabuk, zeytin kara suyu, çay atıkları vb.)

1.1.2. Orman ve Orman Ürünlerinden Elde Edilen Biyokütle Kaynakları

- Orman ve ormancılık endüstrisi atık ve artıkları, enerji ormanları, enerji bitkileri.

1.1.3. Hayvansal Biyokütle Kaynakları

- Büyükbaş, küçükbaş, kümes hayvanlarının dışkıları, mezbaha atıkları ve hayvansal ürünlerin işlenmesi sırasında ortaya çıkan atıklar.

1.1.4. Kentsel ve Endüstriyel Atıklardan Elde Edilen Biyokütle Kaynakları

- Biyolojik kökenli endüstri atıkları, belediye atıkları, arıtma çamurları [11], [12], [13].

Günümüzde tarımsal ve endüstriyel organik atıkların yeterince değerlendirilememesi önemli bir sorundur [14]. Farklı biyokütle kaynaklarından üretilen biyogaz verimi miktarları Tablo 1 [15]'de verilmiştir.

Tablo 1. Farklı biyokütle kaynaklarından üretilen biyogaz verimi miktarları

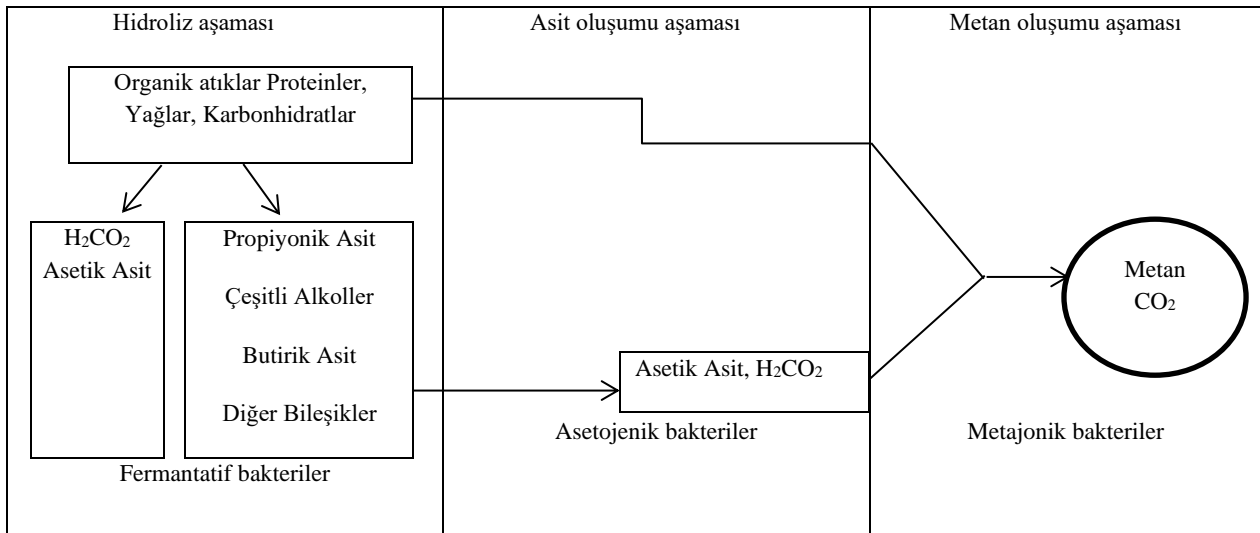
Kaynak	Biyogaz verimi (litre kg ⁻¹)
Sığır Gübresi	90- 310
Kanatlı Gübresi	310- 620
Buğday Samanı	200- 300
Çimen	280- 550
Ziraat Atıkları	310- 430
Dökülmüş Ağaç Yaprakları	210- 290
Atık Su Çamuru	310-800

Ülkemiz topraklarının organik madde bakımından fakir olması toprakların zamanla biyolojik, fiziksel ve kimyasal özellikleri gibi yapılarının bozulmasına neden olmaktadır [16]. Toprağın bu özelliklerinin yeniden iyileşme göstermesi için toprak organik madde oranının artırılması gerekmektedir. Bu yüzden biyogaz üretimi sırasında organik atıkların işlenmesi ile içindeki mikroorganizma aktivitesi sayesinde besin elementleri daha yararlı forma geçmektedir. Oluşan bu fermente gübrenin toprağa uygulanması hem toprak özelliklerinin iyileşmesini hem de bitki gelişimini teşvik etmektedir. Bu gübrelerin tarımsal alanlarda değerlendirilmesi toprağın sürdürülebilirliğini, verimini ve kaliteyi arttırmaktadır [17], [18]. Bu fermente gübrelerin faydaları arasında toprak düzenleyici görevi görmek, toprağı havalandırmak, su tutma kapasitesini arttırmak, yüzey akışını ve buharlaşmayı engellemek, toprağın tava gelmesini kolaylaştırmak, agregatlaşmayı sağlamak gibi birçok faydaları bulundurmaktadır [19]. Bu çalışma, ekonomik öneme sahip ceviz bitkisinin verim ve kalitesinin artırılmasında fermente gübrelerin kullanımının önemini ortaya koymaktadır.

2. BİYOGAZ TESİSLERİ

Biyogaz, organik atıkların anaerobik ortamda biyokimyasal reaksiyon ve mikroorganizmaların aktiviteleri sonucu kontrollü olarak çürütülmesi ile oluşan bir gazdır. Biyogazın içeriğinde, %25-60 karbondioksit (CO₂), %40-75 metan (CH₄), çok az hidrojen ve azot ayrıca %2 kadar hidrojen sülfür (H₂S) bulunmaktadır. Metan gazı biyogazın içeriğinde bulunan ve biyogazın ısı değerini oluşturan temel maddedir ve biyogaza yanıcı etkiyi veren bileşendir [9], [20].

Biyogaz üretimi üç safhada gerçekleşmektedir. Bunlar Şekil 1’de gösterildiği gibi hidroliz, asit oluşumu ve metan oluşumudur. Hidroliz aşamasında, yağ, selüloz, hemiselüloz, protein, nişasta vb. polimer yapıya sahip olan katı ve çözünmüş organik maddeler, bakterilerin hücre dışı enzimleri sayesinde sindirime uğrayarak organik yapıları monomere dönüştürülmektedir [21]. Asit oluşumu aşamasında monomerlerine ayrılmış organik maddeler asit bakterileri tarafından önce uçucu yağ asitlerine ardından da asetik aside dönüştürülmektedir. Metan oluşumu aşamasında ise asetik asit parçalanmakta veya H_2 ve CO_2 sentezi sonucu metan üretimi gerçekleşmektedir [22].



Şekil 1. Biyogaz üretim safhaları

Biyogaz oluşum süreci fermantasyona bırakılan organik atıkların neler olduğuna, biyogaz tesisinin işletme şartlarına, sindirim süresine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Her atığın ayrışma süresi farklıdır. İçeriğinde farklı yapılar bulunan her bir organik atığın anaerobik proseslerde ayrışması farklı sürelerde gerçekleşmektedir [9]. Biyogazın üretimi için anaerobik ortam, uygun ısı değeri, bakteriler ve organik madde bileşenlerinin sağlanması gerekmektedir [23].

Ülkemizde $240\ 673\ 168\ m^3\ yıl^{-1}$ biyogaz üretimi, tarımsal atıklardan elde edilebilecektir [24]. Avrupa'nın beşinci Türkiye'nin ise en büyük biyogaz tesisi Konya'nın Çumra ilçesinde kurulmuş ve 72 bin metreküp biyogaz üretim kapasitesine sahip olan Konya Biyogaz tesisidir. Bu tesiste 200 bin ton sıvı gübre, 30 ton organik katı gübre üretimi yapılmakta ve 12 MW elektrik üretilmektedir.

Kırşehir’de 2022 yılı itibariyle biri yeni faaliyete başlamak üzere toplam dört adet biyogaz tesisi bulunmaktadır. Bu tesislere ait bilgiler Tablo 2 [25]’de verilmiştir.

Tablo 2. Kırşehir ilinde faaliyet gösteren biyogaz tesislerine ait bilgiler

Sıra No	Tesisin adı	Tesisin bulunduğu ilçe	Sıvı gübre kapasitesi (ton)	Katı gübre kapasitesi (ton)
1	Çağlayanlar	Mucur	700	300
2	Emin Biyogaz	Merkez	600	80
3	As Koç Enerji	Merkez	600	60
4	Anka Biyogaz	Boztepe	-	-

Kırşehir ilinde faaliyet gösteren bu biyogaz tesislerinden elde edilen 2022 yılı verilerine göre, Kırşehir ili genelinde tarımsal atıklardan elde edilebilecek yıllık toplam biyogaz enerji potansiyeli 11.04 MW yıl⁻¹'dir. Biyogaz enerjisi ilde 4.8 MW yıl⁻¹ ile en fazla Mucur ilçesinden elde edilmektedir. Mucur ilçesini ise toplam 6.24 MW yıl⁻¹ (3.12 MW yıl⁻¹ +3.12 MW yıl⁻¹) enerji potansiyeli ile Merkez ilçesinde yer alan iki biyogaz tesisi takip etmektedir. Bu enerjinin yaklaşık %1'ini bitkisel atıklar yaklaşık %99'unu ise hayvansal atıklar oluşturmaktadır. Bitkisel atık kaynakları daha çok domates yaprakları, patates, mısır silajı, pancar küspesi ve diğer bütün bitkisel ürün atıklarından oluşmaktadır. Hayvansal atık kaynakları ise ağırlıklı olarak kanatlı hayvan gübreleri, küçükbaş hayvan ve büyükbaş hayvansal atıklardan oluşmaktadır [26]. Bu tesislerden elde edilen katı ve sıvı gübreler ticari olmaksızın üreticilerin kullanımına sunulmaktadır. Biyogaz tesislerinden elde edilen gübreler ceviz üreticileri tarafından tam kapsamlı kullanılmamaktadır. Fakat son bir yıldır üreticiler deneme amaçlı bu gübreleri ceviz bahçelerinde kullanımı söz konusudur.

3. CEVİZ YETİŞTİRİCİLİĞİ ve GÜBRELEMENİN ÖNEMİ

Ceviz *Juglandales* takımının, *Juglandaceae* familyasının, *Juglans* cinsine ait bir bitkidir. *Juglans* cinsi 18 türden oluşmakta ve bu cinsin en üstün meyve özelliklerine sahip olan ve en önemli türü ise *Juglans regia*'dir [27]. Cevizde verim ve kaliteyi artırmak için uygun toprak ve iklim şartlarında yetiştiricilik yapılmalıdır. Gübreleme, budama, sulama gibi uygulamalar gerektiği miktarda ve zamanında yapılmalı, zararlılar ve hastalıklar ile mücadele edilmeli, kuraklık ve don gibi çevresel stres koşullarına karşı önlem alınmalıdır [28]. Cevizin anavatanı Türkiye, Irak, İran, Afganistan, Güney Rusya, Hindistan, Mançurya ve Kore'dir [29]. Türkiye, cevizin gen merkezleri arasında yer alıyor olması ve üretim bakımından dünya ülkeleri arasında üçüncü olmasına rağmen, üretim ve ihracatta maalesef istenen seviyede değildir [30], [31]. Dünyada ceviz üretiminin genel durumu Çizelge 3 [32]'de verilmiştir. Tabloya göre; Çin, ABD, Türkiye ve Hindistan dünyanın ceviz üreten ülkelerin başında gelmektedir.

Tablo 3. Ceviz üreten ülkelerin 2020 yılına ait üretim alanları (ha), miktarları (ton) ve verimleri (kg da⁻¹)

Ülke	Alan (ha)	%	Ülke	Miktar (ton)	%	Ülke	Verim (kg da ⁻¹)
Çin	284 375	27.8	Çin	1 100 000	33.0	Romanya	2 531
ABD	153 781	15.0	ABD	707 604	21.2	Avusturya	1 661
Türkiye	141 790	13.8	İran	356 666	10.7	Özbekistan	952
Meksika	108 771	10.6	Türkiye	286 706	8.6	Ukrayna	845
İran	59 920	5.8	Meksika	164 652	4.9	Pakistan	837
Şili	43 328	4.2	Şili	158 000	4.7	Peru	597
Fransa	24 990	2.4	Ukrayna	113 320	3.4	İran	595
Moldova	20 947	2.0	Romanya	48 350	1.4	Butan	576
Yunanistan	20 270	1.9	Özbekistan	47 374	1.4	Mısır	517
Arjantin	16 287	1.5	Yunanistan	36 400	1.0	Kırgızistan	467
Dünya	1 021 391	100	Dünya	3 323 964	100	Dünya	325

Türkiye’de önemli ceviz üreticisi illerin 2021 yılına ait üretim miktarları ise Tablo 4 [33]’te verilmiştir.

Tablo 4. Türkiye’de önemli ceviz üreticisi illerin 2021 yılına ait üretim miktarları (ton)

İller	Miktar (ton)	Pay (%)
Mersin	22 598	6.95
Kahramanmaraş	19 237	5.91
Bursa	18 991	5.84
Denizli	13 595	4.18
Çorum	10 986	3.38
İzmir	10 286	3.15
Antalya	10 255	3.15
Çanakkale	10 149	3.12
Sakarya	10 104	3.12
Manisa	8 838	2.71
Kocaeli	8 139	2.50
Hakkari	7 216	2.22
Van	7 074	2.17
Tokat	6 833	2.10
Bitlis	6 730	2.07

Balıkesir	6 530	2.00
Aydın	6 284	1.93
Burdur	6 088	1.87
Kastamonu	6 066	1.86
Karaman	5 193	1.59
Toplam (20 İl)	201 192	61.90
Toplam (Türkiye)	325 000	100.00

Kırşehir ili ise ülkemizdeki önemli ceviz üreticisi iller arasında üretim bazında 4.672 ton ile ilk 20 il arasında bulunmamaktadır.

Ülkemizin neredeyse tamamında ceviz üretimi yapılmaktadır. Üretilen cevizin yarısından fazlası 20 ilde yetiştirilmekte ve bu illerden ilk sırayı Mersin almaktadır. Bununla birlikte üretimin %50-60 kadarı 20 ilde gerçekleştirilmektedir.

Topraktan eksilen bitki besin maddelerini toprağa tekrar kazandırılması ile toprağın verim kalitesini arttıran ve tarımsal üretimi iyileştirmeyi amaçlayan bileşiklere gübre denir [34]. Eksilen besin elementlerinin toprağa geri verilmesi ise gübrelemedir [35]. Hayvan, bitki ve insan kaynaklı atıklardan ya da kalıntılardan oluşan organik gübreler bitki besin kaynağını oluşturmaktadır. Bitki besin kaynağı olarak kullanılan önemli gübreler çiftlik gübresi, yeşil gübre, hümik asit, kompost, torf ve biyogaz fermente gübrelerdir [36]. Biyogaz üretiminde oluşan fermente gübreler, biyogaz tesislerinde atık hammaddelerin işlenmesi ve seperatör ile ayrıştırılması sonucu elde edilen, son oluşan sıvı ve katı maddelerdir. Kırşehir’ deki bir biyogaz tesisinden elde edilen sıvı formda (Tablo 5) ve katı formdaki (Tablo 6) biyogaz atığına ait kimyasal içerikler aşağıda verilmiştir.

Tablo 5. Sıvı biyogaz atığına ait kimyasal kompozisyon

Analiz Değişkenleri	Analiz Verileri	Birim
Tuzluluk (EC)	2.89	dS m ⁻¹
Nem (70 °C)	91.8	%
Organik Madde	5.2	%
Toplam (Hümik+ Fulvik) Asit	1.6	%
Toplam Organik Karbon (TOC)	2.8	%
Toplam Azot (%)	0.5	%
Nitrat Azotu	<0.24	%
Amonyum Azotu	0.3	%
C N ⁻¹ Oranı	5.6	
Ph	8.5	
Toplam Serbest Amino Asitler		
Ornitin	<0.0009	g 100g ⁻¹
Lizin	<0.0039	g 100g ⁻¹

Tablo 6. Katı biyogaz atığına ait kimyasal kompozisyon

Analiz Değişkenleri	Analiz Verileri	Birim
Tuzluluk (EC)	2.05	dS m ⁻¹
Nem (70 °C)	73.9	% (Kuru Madde)
Organik Madde	80.1	% (Kuru Madde)
Toplam (Hüyük+ Fulvik) Asit	44.7	% (Kuru Madde)
Toplam Organik Karbon (TOC)	43.7	% (Kuru Madde)
Toplam Azot (%)	2.8	% (Kuru Madde)
Nitrat Azotu	1.1	% (Kuru Madde)
Amonyum Azotu	1.0	% (Kuru Madde)
C N ⁻¹ Oranı	15.6	
pH	9.1	
Toplam Serbest Amino Asitler		
Ornitin	<0.0009	g 100g ⁻¹ (Kuru Maddede)
Lizin	<0.0039	g 100g ⁻¹ (Kuru Maddede)

Bitkilerin gelişmesinde mutlak gerekli olan 17 element vardır. Bunlar, O, C, P, H, N, K, Mg, Ca, Fe, S, B, Mn, Cu, Zn, Mo, Cl, Na'dur [37]. Makro elementler, O, C, H, K, N, S, P, Ca, Mg, (Na, Si); mikro elementler ise Fe, Mn, Cu, Zn, Mo, B ve Cl'dür [38]. İç Anadolu Bölgesindeki bazı illerde ceviz yetiştiriciliği sorunları ve çözüm yolları üzerine yapılan bir çalışmada Niğde, Nevşehir ve Kırşehir'deki üreticilerin %71.43'ünün yaprak analizi yaptıkları bildirilmiştir. Ancak aynı çalışmaya göre, ceviz üreticilerinin çok bilinçli bitki besleme programı uygulamadıkları, üreticilerin bazılarının sadece toprak, bazılarının ise sadece yaprak analizi yaptırarak gübreleme yaptıkları anlaşılmaktadır [39]. Ceviz bahçesi tesisinde dikim öncesinde K, Mg ve kireç ihtiyacı karşılanmalıdır. Cevizin en önemli bitki besin maddesi ihtiyacı azottur. Orta ve ağır topraklarda hasattan sonra 10-15 kg da⁻¹ azotlu gübre verilmelidir. 2-10 yaş arasındaki ağaçlara 10-12 kg ağaç⁻¹, olgun ağaçlara ise 20-40 kg süperfosfat atılmalıdır. Ceviz iç dolgunluğu ve iç kalitesi için toprakta fosfor elementinin noksanlığı mutlaka giderilmelidir. Potasyum fazlalığında Mg alımı azalmakta olduğundan dolayı potasyumlu gübre kullanımında daha dikkatli olunmalıdır. Çinko uygulaması ZnSO₄ şeklinde 2.5-5.0 kg ağaç⁻¹ şeklinde uygulanmalıdır. Demir ihtiyacı ise 25-50 kg toz kükürdün uygulanması ile giderilebilmektedir. Bor noksanlığında ise 2 kg boraks toprağa serpilerek kullanılması tavsiye edilmektedir. Mangan noksanlığında mangan sülfat çözeltisi ağaçlara püskürtülerek kullanılabilir. Bakır noksanlığı için 5 kg bakır sülfat ile 5 kg sönmüş kirecin 400 litre suda çözündürülmesi ile elde edilen bordo bulamacının Haziran başlarında uygulanması gerekmektedir. Magnezyum noksanlığı için 2.5 kg magnezyum sülfat çözeltisi Haziran başlarında ağaçlara püskürtülmelidir. Bununla beraber kullanılacak gübrelerin cinsi, miktarı, verilme şekli ve zamanının tespiti için mutlaka toprak ve yaprak analizlerinin yapılması gerekmektedir [40], [41].

4. BİYOGAZ ATIKLARININ CEVİZ ÜRETİMİNDE KULLANIM OLANAKLARI

Biyogaz tesislerinin bir çıktısı olan katı ve sıvı gübreler toprağın mikrobiyolojik, fiziksel, kimyasal ve biyolojik yapılarını iyileştirmesi sebebiyle güvenilir organik gübrelerdir. Hümik asit bakımından zengin olan bu fermente gübreler bitkilerin besin maddesi alımını arttırmakta ve metal alımını kısıtlamaktadır [6]. En iyi bilinen özelliği; yeterli oranda yarayışlı bitki besin maddelerini içermesi, kullanıldığı toprağın içeriğini iyileştirmesi ile ürün verimini ve kalitesini artırması, çevreci ve uzun vadede kullanıldığında ekonomik bir gübre olması sayılabilmektedir [42].

Ülkemizde son yıllarda kanalizasyon ve kentsel katı atık arıtma tesisleri yanında yoğun çiftlik hayvancılığı sonucu açığa çıkan katı atıkların değerlendirilmesi amacıyla biyogaz üretim tesisleri de yaygınlaşmaktadır. Bu tesislerden elde edilen fermente gübreler bazen mineral gübrelerle karıştırılmak suretiyle daha verimli şekle dönüştürülmektedir [43]. Bu gübrelerin çiftçiler tarafından kullanılıp ve bu kullanımın da süreklilik sağlamasını teşvik etmek amacıyla bazı biyogaz tesisleri elde ettikleri fermente gübreleri çiftçilere ücretsiz olarak vermektedir.

Biyogaz atıklarının bitkisel üretimde bitki veriminin artırılması veya kalite kriterlerine olan etkileri gibi agronomik ya da biyoteknolojik akademik çalışmalar henüz yeterli değildir. Bu konuda yapılmış birkaç tane yüksek lisans tezi ve makale mevcuttur. Bu çalışmaların tamamı bitkilerin verim ve kalite kriterleri üzerinedir. Bu konuda çalışmalar son beş yılda başlamış ve domates, buğday, marul, mısır, sorgum ve arpa üzerine yapılmıştır.

Koçar ve ark. (2018), domates (*Solanum lycopersicon* L.) bitkisinin fide üretiminde perlit, zeolit, torf ve fermente gübrenin farklı kombinasyonlarının çimlenme ve fide gelişimi üzerine etkisini araştırdıkları çalışmalarında zeolit, torf ve fermente gübrenin (1:100:15) birlikte kullanıldığı uygulamanın diğer uygulamalara göre çimlenmeyi %8 oranında artırdığı sonucuna varmışlardır [44]. Aynı yıl Yaraşır (2018), yaptığı çalışmada ise 0, 9, 18 kg da⁻¹ dozlarında azotlu mineral gübre ve 0, 1, 2, 3, 4 ton da⁻¹ dozlarında sıvı biyogaz atık gübre dozları ile karışımlarını Ceyhan-99 buğday çeşidinin verim ve kalitesi üzerine etkilerini incelemiştir. Sıvı biyogaz atıklarının başak sayısının metrekarede miktarı, bitki boyu, başakta tane sayısı, bayrak yaprak alan miktarı, tane verimi, tanede kül oranı, bin tane ağırlığı, tanede lif oranı, tek başak ağırlığı, hektolitre ağırlığı, tek başak verimine en iyi etkinin 3 ton da⁻¹ sıvı biyogaz atığı ile 18 kg da⁻¹ mineral azot dozu kombinasyonundan elde ettiğini bildirmiştir [45].

Baştabak (2019), organik madde bakımından değerli olan fermente gübrenin marul bitkisinin üç farklı gelişme dönemine olan etkisini incelemiş ve biyogaz fermente ürünü (BFÜ) gübreyi; katı ortam kültürü faaliyetinde, fide yetiştiriciliğinde ve tohum ön işleme uygulamalarında kullanılabilecek katma değeri yüksek bir ürün olarak ifade etmiştir [6].

Yaraşır (2018), mısırdaki yapmış olduğu çalışmada, üç farklı katı biyogaz dozunun (0, 2 ve 4 ton da⁻¹), iki farklı mineral azot dozu (0 ve 20 kg da⁻¹) ve sıvı biyogazın üç değişik dozu (0.0, 2.5, 5.0 ton da⁻¹) ve bunların kombinasyonlarının bazı agronomik, kalite özellikleri ve tane verimine olan etkilerini incelemiştir. Hem katı hem sıvı biyogaz atığı gübrelerin mısır üretiminde diğer organik gübrelere alternatif olarak kullanılabileceğini tavsiye etmişlerdir [45]. İbil (2019), sorgum-sudanotu melezinin [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] Rox çeşidi ile sorgum bitkisinin (*Sorghum bicolor* x *Sorghum sudanense* Mtapf) Gözde-80 çeşidi ile yaptığı

çalışmada, Aydın ekolojik koşullarında 5 farklı katı biyogaz dozu (0, 500, 1000, 1500, 2000 kg da⁻¹) uygulamasının verim ve kalite üzerine etkilerini incelemiştir. Katı biyogazın kullanılan çeşitlerin yaprak sayısı, kuru ot verimi, bitki boyu gibi verim öğeleri ve NDF, ADL, ADF, ham protein oranı gibi kalite parametreleri üzerine etkileri üzerine herhangi bir doz önerisinde bulunmamıştır [46].

Kara ve ark. (2019), yaptıkları çalışmada 0, 9, 18 kg da⁻¹ azotlu mineral gübre ve 0, 2, 4, 6, 8 ton da⁻¹ katı biyogaz dozu ile bunların kombinasyonlarının buğdayın antioksidan aktivitesi ve fenol içeriği üzerine etkisini araştırmışlardır. Maksimum fenol içeriği 331. 99 µg GAE g⁻¹ ile 2 ton da⁻¹ katı biyogaz uygulaması ve 18 kg saf N da⁻¹ uygulamasından elde edilmiştir. Antioksidan aktivite değerleri ise %16.17-29.68 arasında değişmiş olup, en yüksek değer 2 ton da⁻¹ katı biyogaz atık ve 18 kg saf N da⁻¹ uygulamasından elde edilmiştir. Çalışmada en iyi sonuçlar 18 kg da⁻¹ mineral azot ile 2 ton da⁻¹ katı biyogaz atığı karışımından elde edilmiştir [47].

Demirel ve Ereku (2020), yapmış oldukları çalışmada BFÜ gübre uygulamasının buğdayın gelişimi ve mineral beslenmesine etkisini araştırmıştır. BFÜ'nün toprağın yarayışlı besin elementi içeriklerini iyileştirerek buğdayın mineral beslenmesini ve topraktan almış olduğu besin elementi miktarlarını olumlu yönde etkilediğini bildirmişlerdir [48].

Hacıüstemoğlu (2021), biyogaz üretimi sonucu ortaya çıkan organik gübre ile ayrı ayrı yerlerde ya da bir arada uygulanan potasyum (*K*), fosfor (*P*) ve azot (*N*)'un buğdayın (*Triticum aestivum* L.) besin elementleri alımı ve gelişimi üzerine etkisini incelemiştir. Sera koşullarında oluşturulan saksı denemeleri sonuçlarına göre, BFÜ gübrenin bitki besin elementleriyle bir arada bitki gelişimi üzerindeki etkisinin olumlu olduğu tespit edilmiştir. Uygulamanın tüm saksıya karıştırma ve özellikle de yüzeyin 5 cm altına yapıldığında daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir [43].Yaylacı (2020), çiftlik gübresinden elde edilen biyogazın, Tarm-92 arpa çeşidinde kalite özellikleri, verim ve verim öğeleri ile üzerine etkilerini araştırmıştır. Çalışmada farklı dozlarda (0, 1, 2, 3 ve 4 ton da⁻¹) biyogaz atığı uygulanmıştır. Araştırmada incelenen özellikler üzerine biyogaz atığı uygulamaları olumlu etkide bulunmuş, arpa yetiştiriciliğinde 3 ton da⁻¹ biyogaz atığının hem kalite özellikleri hem verim üzerinde en iyi sonuçları verdiği ifade edilmiştir [49].

Ülkemiz için çok değerli bir meyve olan ceviz üretimi için biyogaz ürünü olan fermente gübrenin kullanımı hem verimi hem de ürün kalitesini arttıracaktır. Ceviz bahçelerindeki toprak içeriğinin organik madde miktarına bağlı olarak değişebilecek verim miktarı toprak analizine bağlıdır. Eğer organik madde yönünden çok fakir bir toprak değil ise kullanılabilir olan bir

biyogaz çıktısı olan organik gübre bitki boyunu ve bitki vejetasyonunu artırarak verimi %30-35 arttırabilmektedir. Türkiye’de de önemli bir potansiyele sahip ceviz bahçelerinde bu gübrelerin uygulanması gelecek açısından önem arz etmektedir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Tarımsal ve kentsel artıkların en doğru biçimde değerlendirilip organik maddesi düşük topraklara ilave edilmesi Türkiye’de tarım sektörünün öncelikli hedeflerinden olması gerekmektedir. Ayrıca, ortaya çıkan atıkların çevresel riskler oluşturmasının da önüne geçilmesi sağlanabilmelidir. Üzerinde yaşadığımız dünyanın ekosistemini korumak, daha temiz ve verimli üretim sağlamak için evrensel eylemler gerekmektedir.

Türkiye’nin enerji tüketiminde dışa bağımlılığının azaltılması, organik atıkların değerlendirilmesi ile bu atıkların yararlı bir şekilde toprağa geri kazandırılması biyogaz tesis sayısının artırılması ile mümkündür. Atıkların toprağa kazandırılması biyogazın bir çıktısı olan fermente gübreler ile sağlanabilmektedir.

Günümüzde üreticilerin büyük bir kısmının klasik kimyasal gübre kullanımını tercih etmelerinden dolayı ülkemizde fermente gübrelerin çok yaygın kullanıma sahip olmadığını görmekteyiz. Türkiye’nin birçok ilinde biyogaz üretimi sonucu açığa çıkan fermente gübrenin ticari satışını yapan firmalar bulunmaktadır. Üretici toprak analizini yaptırıp bitki isteğine göre satış noktalarından istediği içeriğe sahip fermente gübreye ulaşabilmektedir. Fermente gübre, istediği içeriğe sahip değil ise, fermente gübrenin içeriğinin dışında bu gübreye fiziksel olarak eklenmiş minerallerden oluşmuş organomineral gübreleri tercih edebilirler.

Ceviz üreticileri de toprak analizleri sonucunda kullanabilecekleri fermente gübre veya organomineral gübreleri tercih ederek Türkiye’de önemli bir ekonomik potansiyele sahip bu meyve türünün ceviz bahçelerine uygulanması ile hem verim artışını sağlayan hem de ürün kalitesini arttıran bir sonuca varabilirler. Ceviz ülkemizde birçok sektörde kullanılmaktadır. Ayrıca ceviz kabuğu atıkları biyokütle üretiminde de önemli bir hammadDEDİR. Türkiye ceviz üretiminde dünya üçüncüsü olmasına rağmen verimde dünya ortalamasının altındadır. Verim düşüklüğü sorununun ortadan kaldırılmasında organik içeriği yüksek gübrelerin kullanımı kaçınılmazdır. Çevre dostu olan biyogaz fermente gübrelerin ülkemiz ceviz üretiminde kullanımı hem cevizin verim ve kalitesini artıracak hem de toprak verimliliğinin artmasına sebep olarak sürdürülebilir tarıma da katkı sağlayacaktır.

Teşekkür

Çalışmamızda etik kurul izni gerekmemiştir ve çalışmamız araştırma ve yayın etiğine uygun olarak hazırlanmıştır. Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır. Yazarlar çalışmaya ortak katkı sağlamıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında çıkar çatışması yoktur.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Çalışma, araştırma ve yayın etiğine uygundur.

KAYNAKLAR

- [1] M. Topal, ve E.I. Arslan, ‘*Biyokütle Enerjisi ve Türkiye,*’ VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, 17, 19, 2008.
- [2] R. Atelge, ‘Kısmi Yük Koşullarında Dizel-Biyogaz Kullanılarak Çift Yakıtlı Dizel Motorun Enerji ve Ekserji Analizi,’ *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi,* (27): 334-346, 2021.
- [3] <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-biyokutle>.
- [4] E. Koç ve K. Kaya, ‘ Enerji Kaynakları–Yenilenebilir Enerji Durumu,’ *Mühendis ve Makina,* 56(668): 36- 47, 2015.
- [5] H. H. Öztürk, ‘*Yenilenebilir Enerji Kaynakları,*’ Birsen Yayınevi, pp.667, İstanbul, 2021.
- [6] B. Baştabak, ‘Biyogaz Sistemlerinden Elde Edilen Fermente Gübrenin Marul Yetiştiriciliğinde Bitki Gelişimine Etkilerinin İncelenmesi,’ Yüksek Lisans, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.
- [7] S. Saraçoğlu, ‘Yenilenebilir Enerji Kaynağı Olarak Biyokütle Üretiminin Dünya’da ve Türkiye’de Durumu,’ *Fiscaoeconomia,* 1(3): 126-155, 2017.
- [8] M. Taşova ve G. Ergüneş, ‘Determination of Biomass Potential and Energy Values of Walnut (*Juglans regia* L.) Wastes: Case of Tokat Province,’ *ISVOS Journal,* 2(2): 67-72, 2018.
- [9] Ç. F. Kılıç, ‘Biyogaz, Önemi, Genel Durumu ve Türkiye'deki Yeri,’ *Mühendis ve Makine Dergisi,* 52 (617): 94- 106, 2011.
- [10] S. Işık ve S. Yavuz, ‘Biyokütleden Elde Edilen Biyoyakıtlara Genel Bir Bakış,’ *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi,* (34): 193-201, 2022.

- [11] H. Şenol, E. A. Elibol, Ü. Açıklık ve M. Şenol, ‘Türkiye’de Biyogaz Üretimi İçin Başlıca Biyokütle Kaynakları,’ *Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6 (2): 81-92, 2017.
- [12] N. Mutlu, M. Tolay, C. Karaca ve H. H. Öztürk, ‘Biyokütle Gazlaştırma Teknolojisindeki Gelişmeler,’ *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 15 (2): 53-59, 2020.
- [13] Anonim 2022a. Biyokütle. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-biyokutle> (Erişim tarihi: 26.08.2022).
- [14] Y. Ulusoy, R. Arslan, A. H. Ulukardeşler, C. Kaplan, B. Kul ve R. Arslan, ‘Bursa İli Tarımsal Organik Atık Kaynaklı Biyogaz Potansiyeli ve Biyogazın Dizel Motorlarda Yakıt Olarak Kullanımının İncelenmesi,’ *Bursa Uludağ Üniv. Ziraat Fak. Derg.*, 29(2), 2015.
- [15] F. Y. Şahin, ‘Enerji Üretimi Bakımından Karadeniz Bölgesi’nin Biyokütle Potansiyeli ve Bölgenin Ekonomisine Katkısı,’ Yüksek Lisans, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 2019.
- [16] S. Erşahin, ‘Toprak Amenajmanı Tarımda Sürdürülebilirlik ve Çevre Kalitesi,’ *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları*, No:56, Ders Notları Serisi No:21, Tokat, 2001.
- [17] Z. Bayramoğlu, ‘Tarımsal Verimlilik ve Önemi,’ *Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences*, 24(3): 52-61, 2010.
- [18] N. Küren, ‘Farklı Su Stresli Koşullarında Yetiştirilen Buğday Bitkisinde Biyogaz Atığı Kompostunun Rizosfer Mikrobiyolojisine Etkisi,’ Yüksek Lisans, Ondokuz Mayıs Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018.
- [19] S. Anacak ve E. Özdemir, ‘*Biyogaz Tesisi Çıktısı Sıvı Fermente Gübre Yönetimi*,’ Organomineral Gübre Çalıştayı, İstanbul, p:206, 2018.
- [20] F. Tufaner ve Y. Avşar, ‘*Yenilenebilir Bir Enerji Kaynağı Olarak Organik İçeriği Yüksek Atıklardan Biyogaz Üretim Teknolojisi*,’ Adıyaman Üniversitesi Bilim, Kültür ve Sanat Sempozyumu, 2014.
- [21] J. Gülen ve Ç. Çeşmeli, ‘Biyogaz Hakkında Genel Bilgi ve Yan Ürünlerinin Kullanım Alanları,’ *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 5(1): 65-84, 2012.
- [22] H. Çelikkaya, Fırat Kalkınma Ajansı, Biyogaz. Erişim adresi: <https://fka.gov.tr>. 2016.
- [23] Y. Korkmaz, S. Aykanat ve A. Çil, ‘Organik Atıklardan Biyogaz ve Enerji Üretimi,’ *Sakarya Üniversitesi Fen Edebiyat Dergisi*, 1, 489-497, 2012.

- [24] S. Çakal ve S. Çelik, ‘Türkiye Genelinde En Çok Yetiştirilen Tarımsal Ürünlerin Atıklarının Biyogaz Potansiyelinin Belirlenmesi,’ *El-Cezeri*, 9(1):1-11, 2022.
- [25] Anonim 2022b. 2022 Yılı Biyogaz Yekdem Listesi. <https://biyogazder.org/biyogaz-tesisleri/> (Erişim tarihi:26.11.2022).
- [26] S. Boyacı, ‘Determination of Biogas Potential from Animal Waste in Kırşehir Province,’ *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 4(4), 447-455, 2017.
- [27] S. Bayazit, H. Tefek ve O. Çalışkan, ‘Türkiye’de Ceviz (*Juglans regia* L.) Araştırmaları,’ *Ziraat Fakültesi Dergisi*, 11(1):169-179, 2016.
- [28] N. Kılıç, ‘Ceviz Yetiştiriciliğinde Kaolin Uygulamasının Meyve Kalitesi Üzerine Etkileri,’ Doktora tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2014.
- [29] E. Canhoş, N. Öztürk, M. Sütyemez, S. T. Demiray ve A. Hazır, ‘Ceviz,’ Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK). Tarım, Ormancılık ve Veterinerlik Araştırma Grubu Yayını (69 p.), 54-68, 2014.
- [30] E. Kapluhan, ‘Ziraat Coğrafyası Açısından Bir İnceleme: Kaman İlçesinde (Kırşehir) Ceviz Üretim Faaliyetleri,’ *Marmara Coğrafya Dergisi*, (32): 147-170, 2015.
- [31] T. Karadeniz ve E. Güler, ‘Cumhuriyetin İlk Yıllarından Günümüze Ceviz Yetiştiriciliği,’ *Bahçe*, 46 (özel sayı 2): 53 – 56, 2017.
- [32] Anonim 2022c. ‘Food and Agriculture Organisation.’ Data. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> (Erişim tarihi: 1.11.2022).
- [33] Anonim 2022d. ‘Bitkisel Üretim İstatistikleri.’ <http://www.tuik.gov.tr/tarım> (Erişim tarihi: 1.10.2022).
- [34] U. Yıldırım, ‘Trakya Bölgesinde Tarımsal Gübre Kullanımının Analizi,’ Yüksek Lisans, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2020.
- [35] S. Taban ve Ö. Şahin, *GübreKullanımının Öyküsü*, Erişim adresi: <https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php>, 2022.
- [36] E. Beşeli, ‘Gübrelemenin Bazı Toprak Karakterleri ve Bitki Gelişimine Etkisi,’ Yüksek Lisans, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2021.
- [37] B. Kacar, ‘*Gübre Bilgisi*’ (4. Basım). Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, Ankara. 397p. 1994.
- [38] M. Aktaş, ‘*Bitki Besleme ve Toprak Verimliliği*,’ (3. Baskı). Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, Ankara. 33p. 1995.

- [39] H. İ. Oğuz, O. Gökdoğan ve M. F. Baran, ‘İç Anadolu Bölgesinin Bazı İllerinde Ceviz Yetiştiriciliğinin Sorunları ve Çözüm Yolları,’ *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 3(2): 105-113, 2016.
- [40] S. M. Şen, ‘Ceviz Yetiştiriciliği Besin Değeri ve Folklorü,’ (4. Baskı). ÜÇM Yayıncılık, Ankara. 99p. 2011.
- [41] V. Yurtkulu, ‘Ceviz Bahçe Tesisi Projesi Fizibilite Raporu ve Yatırımcı Rehberi,’ T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Bitkisel Üretim Genel Müdürlüğü, Ankara. 2020.
- [42] A. Yılmaz, S. Ünvar, T. Koca ve A. Koçer, ‘Türkiye’de Biyogaz Üretimi ve Biyogaz Üretimi İstatistik Bilgileri,’ *Technological Applied Sciences*, 12(4): 218-232, 2017.
- [43] K. D. Hacırüstemoğlu, ‘Biyogaz Tesisi Kaynaklı Organik Gübrenin Model Bitki Buğdayın Gelişimi ve Besin Elementleri Alımı Üzerine Etkisi,’ Yüksek Lisans, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2021.
- [44] G. Koçar, B. Baştabak ve B. G. Yağbasan, ‘Biyogaz Sistemlerinden Elde Edilen Kurutulmuş Fermente Gübrenin *solanum lycopersicon* L. Fide Üretiminde Kullanılabilirliğinin İncelenmesi,’ *Akademia Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, Özel Sayı, 2018.
- [45] N. Yaraşır, ‘Farklı Dozlarda Sıvı Biyogaz Atıklarının Buğday (*Triticum aestivum* L.) Bitkisinde Verim ve Kalite Üzerine Etkisi,’ Yüksek Lisans tezi, Adnan Menderes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018.
- [46] A. İbil, ‘Farklı Katı ve Sıvı Biyogaz Atıklarının Mısır (*Zea mays* L.) Bitkisinin Verim ve Kalitesi Üzerine Etkisi,’ Yüksek Lisans tezi, Adnan Menderes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.
- [47] E. Kara, M. Sürmen, H. Erdoğan, ‘Katı Biyogaz Atığı Uygulamalarının Sorgum ve Sorgum x Sudanotu Melezi Bitkilerinde Yem Verimi ve Kalitesi Üzerine Etkileri,’ *Uluslararası Tarım ve Yaban Hayatı Bilimleri Dergisi*, 5(2): 355 - 36, 2019.
- [48] M. Demirel ve O. Ereku, ‘Farklı Dozlarda Katı Biyogaz Atıklarının Buğday (*Triticum aestivum* L.) Bitkisinin Toplam Fenol İçeriği ve Antioksidan Aktivitesi Üzerine Etkisi,’ *Ziraat Fakültesi Dergisi Türkiye 13. Ulusal, I. Uluslararası Tarla Bitkileri Kongresi Özel Sayısı*:87-94, 2020.
- [49] C. Yaylacı, ‘Biyogaz Fermantasyon Ürünü ve Farklı NPK Seviyelerinin Buğdayın Gelişimi ve Mineral Beslenmesine Etkisi,’ Yüksek Lisans Tezi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 2020.

Elmas Yağmur, Sevil Sağlam Yılmaz, “ Kırşehir İlinin Biyogaz Atık Potansiyelinin Ceviz (*Juglans regia* L.) Üretiminde Kullanılabilirliği ”, *Yekarum e-Dergi*, 9 / 1 (2024) 45-61

[50] R. Karaman, ve C. Türkay, ‘ Arpada (*Hordeum vulgare* L.) Biyogaz Atığı Uygulamalarının Agronomik ve Bazı Kalite Özellikleri Üzerine Etkisi,’ *Ege Üniversitesi Ziraat Fak. Dergisi*, 59 (4):633-643, 2022.



Süleyman Demirel Üniversitesi
YEKARUM e-DERGI
(Journal of YEKARUM)



Cilt 9 , Sayı 1, 63-90 , 2024
E - ISSN:1309-9388

A Review on Hydrogen with a Critical Role in Sustainable Energy

*Berces KURT

*Erzincan Binali Yıldırım University, Department of Aircraft Technology, Erzincan, Turkey, (ORCID: 0000-0002-1285-0542), berces.kurt@erzincan.edu.tr

(İlk Geliş Tarihi 10/05/2024 ve Kabul Tarihi 10/06/2024)

ABSTRACT

Developing sustainable and renewable energies can solve the energy crisis in the world. In this regard, one of the focal points in the energy field is to expand the use of lower-carbon technologies soon. Furthermore, it is necessary to prevent depletion problems of non-renewable energy resources and environmental issues such as climate change. Energy security can be improved by using sustainable and renewable energy sources. Transitioning to sustainable energy is vital, especially in sectors with high energy consumption, such as aviation. Hydrogen can play a critical role in the transition to sustainable energy, as it has enormous potential and can be used as an energy carrier. However, the purity rate of the hydrogen produced and the storage problems of the hydrogen are obstacles to the widespread use of hydrogen. The purity of hydrogen is related to the technology used to produce the hydrogen. In this context, hydrogen production with a renewable energy source is mentioned in this study. Also, the usability of a metal hydride to overcome hydrogen storage problems is discussed. In the literature, many researches and studies exist on sustainable development goals and hydrogen energy. However, studies and analyses on the relationship between hydrogen energy and sustainable development goals are lacking. This review mentions the importance of hydrogen energy in line with sustainable development goals. In addition, it is aimed to create a source for future studies by compiling studies in the literature on sustainable energy sources, hydrogen production methods and hydrogen storage with metal hydrides.

Keywords: *Clean Energy Sources; Sustainable Development; Hydrogen Production with Sustainable Energy; Hydrogen Storage with Metal Hydrides.*

Sürdürülebilir Enerjide Kritik Rolü Olan Hidrojen Üzerine Bir İnceleme

ÖZET:

Sürdürülebilir ve yenilenebilir enerjiler geliştirmek dünyadaki enerji krizini çözebilir. Bu bağlamda enerji alanındaki odak noktalarından biri de düşük karbonlu teknolojilerin kullanımının yakın zamanda yaygınlaştırılmasıdır. Ayrıca yenilenemeyen enerji kaynaklarının tükenme sorunlarının ve iklim değişikliği gibi çevresel sorunların önlenmesi gerekmektedir. Enerji güvenliği, sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak geliştirilebilir. Sürdürülebilir enerjiye geçiş, özellikle havacılık gibi enerji tüketiminin yüksek olduğu sektörlerde hayati önem taşıyor. Hidrojen, muazzam bir potansiyele sahip olması ve bir enerji taşıyıcısı olarak kullanılabilmesi nedeniyle sürdürülebilir enerjiye geçişte kritik bir rol oynayabilir. Ancak üretilen hidrojenin saflık oranı ve hidrojenin depolanması problemleri, hidrojenin yaygınlaşmasına engel teşkil etmektedir. Hidrojenin saflığı, hidrojeni üretmek için kullanılan teknoloji ile ilgilidir. Bu bağlamda, bu çalışmada hidrojenin bir yenilenebilir enerji kaynağı ile üretilmesine değinilmiştir. Ayrıca hidrojenin depolanma problemlerinin üstesinden gelinmesi için bir metal hidritin kullanılabilirliği tartışılmıştır. Literatürde sürdürülebilir kalkınma hedefleri ve hidrojen enerjisi ile ilgili birçok araştırma ve çalışma bulunmaktadır. Ancak, hidrojen enerjisi ile sürdürülebilir kalkınma hedefleri arasındaki ilişkiye yönelik çalışmalar ve araştırmalar eksiktir. Bu derleme, sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda hidrojen enerjisinin öneminden bahsetmektedir. Ayrıca sürdürülebilir enerji kaynakları, hidrojen üretim yöntemleri ve hidrojen depolanması ile ilgili literatürdeki çalışmalar derlenerek ileride yapılacak çalışmalara kaynak oluşturulması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Temiz Enerji Kaynakları; Sürdürülebilir Kalkınma; Sürdürülebilir Enerji ile Hidrojen Üretimi; Metal Hidritlerle Hidrojen Depolanması.*

1. INTRODUCTION

Aydın [1] stated that the energy demand could be supplied from renewable or non-renewable energy sources. Firoz [2] noted that underground minerals and fossil fuels such as natural gas and coal are considered non-renewable energy sources. The preference for non-renewable energy sources such as fossil fuels as an energy source leaves a wearing and negative effect on the environment [3]. Ilker et al. emphasized that non-renewable energy resources such as oil, coal and natural gas may become depleted in the future [4]. According to the 'COP24 Special Report', non-renewable energy sources such as oil and natural gas cause air pollution and climate change [5]. Falehi and Rafiee [6] emphasized that commercial management in the world mostly depends on fossil fuels. Farhad et al. [7] pointed out that the consumption of fossil fuels is increasing globally and that this situation has adverse effects on the environment, such as climate change. Olabi and Abdelkareem [8] stated that despite the harmful effects of fossil fuels, they continue to be used intensively in the energy sector. Zoungrana and Çakmakci [9] emphasized that due to the continuation of the fossil energy consumption model, the world will be challenging to live in due to the environmental impact and the formation of greenhouse gases. Shoab et al. [10] emphasized that non-renewable energy resources are running out. While greenhouse gas emissions are formed using non-renewable energy sources, greenhouse gas emissions can be controlled using renewable energy sources [11].

Renewable energy is vital to prevent environmental problems such as the depletion of non-renewable energy sources and climate change [12], [13]. Zhao et al. [14] pointed out that in many countries, priority is given to renewable energy studies to reduce environmental pollution and overcome the energy problem. Chehouri et al. [15] stated that there is a tendency towards alternative renewable energy sources due to the ever-increasing energy demand in the world. Renewable energy sources are energy types that do not experience depletion problems and have fewer harmful environmental effects than traditional energy production methods [16]. Barros et al. [17] mentioned in their study that using renewable energy sources can reduce adverse ecological effects. Sadorsky [18] noted that using renewable energy sources can increase energy security, and the effects caused by fossil fuel consumption can be reduced. Han et al. [19] emphasized the importance of incentives for renewable energy sources. Uihlein et al. [20] stated that renewable resources had gained prominence in many areas due to their environmental significance and limited fossil resources. Marks-Bielska et al. [21] mentioned that using renewable resources in energy production is very important to prevent economical problems and ensure energy security.

Dincer [22] stated that renewable energy sources are closely related to sustainable development. Sustainable development is a circular investment or technology that changes to suit our present and future needs [23]. The United Nations recommends producing low-cost sustainable energy resources to ensure energy security and sustainable growth within the scope of the Sustainable Development Goals [24]. One of the sustainable development goals is to make clean energy more accessible [25]. With the widespread use of renewable energy within the scope of sustainable development goals, problems such as climate change can be combated [26].

For this reason, sustainable development must prefer renewable energy sources such as biomass, wind, and sun to supply the energy needed [27]. Kumar and Majid [28] stated that renewable energy sources play a vital role in sustainable energy supply. Rezaei et al. [29] emphasized that using renewable energy resources is one of the most effective and efficient solutions to achieve sustainable development goals. Østergaard et al. [30] stressed that sustainable energy is a prerequisite for sustainable development.

Barreto et al. [31] mentioned that hydrogen-based energy systems could meet sustainability goals and are convenient and advantageous because they are reliable and clean. Falcone et al. [32] pointed out the increasing interest in hydrogen regarding industry development and society's sustainable development. Midilli et al. [33] stated that hydrogen production could also be carried out sustainably since hydrogen can be produced from sustainable and renewable energy sources.

There are many researches and studies on sustainable development goals and hydrogen energy in the literature, but research and analyses on the relationships between hydrogen energy and sustainable development goals are lacking. Environmental problems such as depletion and climate change due to non-renewable energy sources should be prevented. Furthermore, energy security can be improved by using sustainable and renewable energy sources. As a clean and renewable option, hydrogen will play a vital role in building a sustainable energy future.

Hydrogen can be shown among the strongest candidates to ensure the transition to sustainable energy. However, the purity of hydrogen energy needs to be increased. Moreover, there are already storage problems for hydrogen. In this context, since the potential of solar energy is relatively high, hydrogen production from solar energy is one of the methods that can be used for sustainable energy. In addition, the storage problem that limits the use of hydrogen can be solved by using metal hydrides. Therefore, the second part discusses hydrogen production methods with solar energy and hydrogen storage with metal hydrides. This review mentions the importance of hydrogen energy in line with sustainable development goals and examines hydrogen production methods with sustainable energy sources. In this article, studies in the literature about hydrogen production methods with sustainable energy sources have been compiled, and it is aimed to create a resource for future studies.

2. HYDROGEN PRODUCTION USING SUSTAINABLE ENERGY AND HYDROGEN STORAGE WITH METAL HYDRIDES

2.1. Hydrogen Production with Sustainable Energy

Khalilnejad and Riahy [34] stated that hydrogen could be a reliable option in any application where fossil fuels are used. Hydrogen is low-cost, clean, and high-performance [35]. Hydrogen has high specific energy content and a low emission rate [36]. Hydrogen can be used as a fuel and is preferred as an energy carrier in storage and fuel cells [37]. Since hydrogen is the most common ingredient globally, it can be obtained from renewable and non-renewable sources and various processes [38]. Singh et al. [39] stated that hydrogen could be produced with almost any energy source. Ishaq et al. [40] noted that hydrogen production methods could be classified into three basic categories: renewable energy-based, nuclear energy-based, and coal gasification-natural gas based. Wang et al. [41] pointed out that most of the hydrogen production in the world is carried out with fossil fuels. Yu et al. [42] stated that hydrogen is mainly produced worldwide by converting fossil fuels, such as reforming natural gas with steam. Hosseini and Wahid [43] noted that hydrogen production techniques with non-renewable energy sources are widely used. Nikolaidis and Poullikkas [44] stated that hydrocarbon reforming and pyrolysis methods could produce hydrogen from fossil fuels. Harichandan et al. [45] emphasized that hydrogen purity is related to the technology used to produce and use hydrogen. Frowijn and Van Sark [46] stressed that renewable hydrogen production methods should be preferred for a sustainable future.

Since the potential of solar energy is relatively high, hydrogen production from solar energy is one of the methods that can be used for sustainable energy [47]. Agrafiotis et al. [48] emphasized that sunlight can be converted to hydrogen to benefit from solar energy. Solar hydrogen production systems generally include photoelectrochemical, concentrated solar thermal, photobiological, and photovoltaic processes [49], [50]. Table 1 shows the advantages and disadvantages of various hydrogen production methods [51], [52], [53], [54], [55], [56], [57], [58], [59], [60], [61], [62], [63], [64], [65], [66], [67], [68].

Table 1. The advantages and disadvantages of various hydrogen production methods [51], [52], [53], [54], [55], [56], [57], [58], [59], [60], [61], [62], [63], [64], [65], [66], [67], [68].

Method	Advantage	Ref.	Disadvantage	Ref.
Photovoltaic	It is low cost.	[51].	It cannot provide energy in the absence of sunlight.	[52].
	It uses solar energy in an accessible way.	[52].		
	There is no greenhouse gas emission.	[52].		
	No pollution for the environment.	[53].		
	It has no moving parts and has an extensive working capacity.	[54].		
Photoelectrochemical	It is environmentally friendly as it has fewer emissions.	[55].	A large amount of light is needed.	[56].
	It can be installed on large/small systems with simple technology.	[57].		
	It is efficient, low-cost, and straightforward.	[58].		
Photobiological	Its efficiency is high, and it does not cause environmental pollution.	[59], [60].	It should be improved in terms of sustainability and cost.	[61].
	It does not cause greenhouse gas emissions.	[62].		
	It is an easily applicable method.	[62].		
Concentrated solar thermal	By using high-concentration solar thermal, very high-efficiency rates can be achieved.	[64].	Both economic and technical feasibility should be considered for hybridization.	[65], [66].
	It can store heat energy, and this energy can be used in the absence of sunlight.	[67].		
	It plays an essential role in reducing greenhouse gas emissions compared to traditional heating systems.	[68].		
	It offers the opportunity to hybridize with different systems.	[66].		

In table 1, it is seen that photovoltaic technology is low-cost [51], can benefit from sunlight [52], does not cause environmental pollution [53], does not contain moving parts [54], but cannot produce energy in the absence of sunlight [52]. On the other hand, when photoelectrochemical technology is examined, it is understood that it has less emission [55], can be used in small or large systems [57], is efficient and cheap [58], but requires a high amount of light [56]. When photobiological technology is examined, it is understood that it is highly efficient [59], [60], does not generate greenhouse gases [62], and is easily applicable [62], but needs to be improved in terms of sustainability and cost [61]. Therefore, its use in

large-scale production is limited [63]. On the other hand, when concentrated solar energy is examined, it is understood that it can reach high-efficiency rates [64], has heat energy storage capacity [67], plays a vital role in reducing greenhouse gas emissions [68], and offers the opportunity to hybridize with different systems [66]. Still, hybridization's economic and technical feasibility should be evaluated [65], [66].

Khalilnejad et al. [51] stated that photovoltaic systems can be preferred for energy production due to their environmental friendliness, abundance, and low cost. Furthermore, they emphasized that photovoltaic energy can be converted into hydrogen fuel in terms of reliability. In obtaining hydrogen with photovoltaic systems, photovoltaic cells convert solar energy into electrical energy [69]. Figure 1 shows the method of obtaining hydrogen using a photovoltaic system [37], [70], [71].

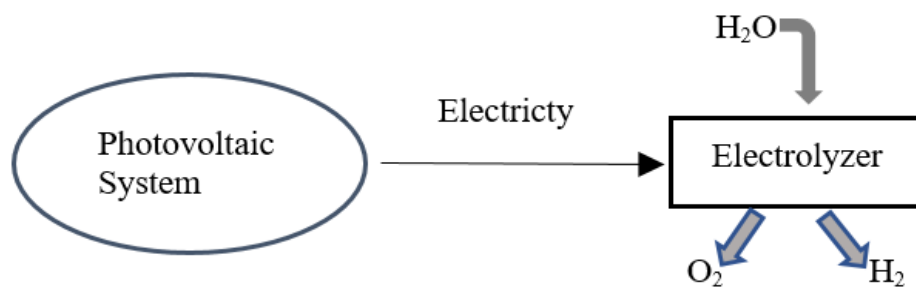


Figure 1: Hydrogen production method using the photovoltaic system [36], [69], [70].

As seen in Figure 1, the first energy is produced by photovoltaic cells, which are used to obtain hydrogen in water electrolysis [46]. Gibson and Kelly [72] found that the efficiency of the photovoltaic electrolysis system increased thanks to the optimization they made using the method of matching the voltage and maximum power output of the photovoltaics with the working voltage of the proton exchange membrane (PEM) electrolyzers. Peharz et al. [73] presented an integrated design combining high-efficiency III-V solar cells with a polymer electrolyte membrane electrolyzer. Thanks to this design, they determined that the conversion efficiency from the sun to hydrogen increased. Dahbi et al. [74] found that the efficiency of the photovoltaic system increased due to their investigation by combining a DC/DC converter and a water flow controller. Bicer et al. [75] established a solar simulator for obtaining hydrogen using photovoltaic cells. They used a reflective mirror in this simulator, and as a result of the investigations, they found that using a reflective mirror reduces efficiency. In another study, Erden et al. [76] examined an integrated system for hydrogen production by electrolysis, consisting of a plate collector, a solar pool, and an organic Rankine loop. As a result of these investigations, they determined that more electricity was produced.

Another preferred method for hydrogen production using solar energy is the photoelectrochemical method. This method obtains the energy needed in water electrolysis using photoelectrochemical cells [53]. The photoelectrochemical system comprises a photo anode, photocathode, and electrolyte [56], [57]. Electron hole pairs are formed when sunlight falls on the photo anodes. These vacancies are separated from the electrons and react with water, thus releasing oxygen and positively charged hydrogen as a result of the reaction. Electrons

circulate outside and reach the photocathode. Due to the potential difference between the photoelectrodes, an electric field is created, and the electrons react with the positive hydrogen ions formed by the dissociation of water to form hydrogen gas [57], [77]. Kim et al. [78] stated that perovskite solar cells could be used in photoelectrochemical hydrogen production due to their electrical and optical properties. Licht [79] presented a model for increasing the hydrogen production rate. According to the given model, it is stated that short-wavelength radiations from the sun are used in the photoelectrochemical conversion. In contrast, long-wavelength radiations from the sun heat the reactor and reduce the water-splitting potential. Thus, they stated that solar electrolysis could be performed at high temperatures, where water is the most efficient for hydrogen production. Boudjemaa et al. [80] examined hydrogen production with a photo anode formed with the Fe_2O_3 structure in their study. As a result of this examination, they determined that the system increased the hydrogen production efficiency. Alarawi et al. [81] investigated MoS_2/Si -heterojunction photocathode for photoelectrochemical hydrogen production in their study and found that the MoS_2/Si -heterojunction photocathode had high performance.

The photobiological method of hydrogen production is a method that requires a light source for energy production, a substrate to obtain electrons, and a catalyst to combine protons and electrons [82]. The photobiological hydrogen production method is a promising technique that can replace fossil fuels [83]. Chen [61] states that the photobiological hydrogen production method is one of the most effective green hydrogen energy production methods. Wutthithien et al. [84] also noted that the photobiological hydrogen production method attracts attention due to its high potential and low environmental impact.

Chen et al. [85] reported that the photobiological hydrogen production method had attracted much attention by solving the limiting factors of oxygen scavengers and sulfur deprivation. Biological hydrogen production techniques are divided into two main groups: light-dependent and light-independent processes [86]. Indirect biophotolysis, direct biophotolysis and photo fermentation are light-dependent. But dark fermentation is light-independent [53], [86]. The biophotolysis method involves the decomposition of water by light in the presence of cyanobacteria or microalgae [86]. Many techniques can be used for photobiological hydrogen production. But microalgae, cyanobacteria and purple non-sulfur bacteria stand out among these techniques [87]. The efficiency of hydrogen production with microalgae in processes such as light capture efficiency, oxygen sensitivity and carbon dioxide fixation efficiency is low, which limits hydrogen production with microalgae [88]. Ge et al. [89] stated that adding sulfur is essential in the photobiological production of hydrogen from microalgae. Table 2 shows the advantages and disadvantages of various photobiological hydrogen production methods [44], [86], [90], [91], [92], [93].

Table 2. Advantages and disadvantages of various photobiological hydrogen production methods [44], [86], [90], [91], [92], [93].

Method	Advantage	Ref.	Disadvantage	Ref.
--------	-----------	------	--------------	------

Direct biophotolysis	Hydrogen can be produced directly using water and sunlight.	[86], [90], [92], [93].	High-intensity sunlight is needed.	[90], [93].
	There is an increase in energy conversion efficiency from the sun.	[86], [90].	It is susceptible to oxygen.	[90], [93].
Indirect biophotolysis	Nitrogen (N ₂) can be fixed from the atmosphere.	[86], [90], [92].	Hydrogenase enzymes must be removed to prevent the degradation of hydrogen.	[90], [93].
	Hydrogen can be extracted from water with the use of cyanobacteria.	[86], [90].	The gas mixture contains 30% oxygen.	[90], [93].
Photo fermentation	The use of intense spectral light energy is possible.	[86], [92], [93].	Oxygen has an inhibitory effect on nitrogenase.	[93].
	Different types of organic waste can be used.	[44], [93].	The conversion rate of sunlight is relatively low.	[93].
	It contributes to the recycling of waste.	[44].	It needs sunlight.	[44].
	It has a high substrate conversion capacity.	[90], [91].	A large reactor surface area is required.	[44], [90].
		[91].	The PH value and stretch of the solution affect the hydrogen production rate.	[91].
		[91].	It is not suitable for large-scale hydrogen production.	[91].
[90].		Pre-treatment may be required due to the toxic nature of the substrate used.	[90].	
Dark fermentation	Hydrogen can be produced without sunlight.	[44], [92], [93].	Hydrogen efficiency is lower.	[44], [93].
	Many carbon sources can be used as substrates.	[86], [92], [93].	Fatty acids are removed.	[44].
	Important metabolites, such as acetic acid, butyric acid, etc., are formed as by-products.	[86], [92], [93].	The hydrogen production rate is affected by the PH value of the solution and the salt content.	[91].
	Problems such as oxygen limitation do not occur.	[44], [91], [93].		
	It contributes to the recycling of waste.	[44].		

Table 2 shows that direct biophotolysis technology can produce hydrogen by directly using water and sunlight [86], [90], [92], [93], increases solar energy conversion efficiency [86], [90],

but requires high-intensity sunlight [90], [93] and is susceptible to oxygen [90], [93]. On the other hand, in indirect biophotolysis, nitrogen (N_2) can be fixed from the atmosphere [86], [90], [92]. In this technique, hydrogen can be obtained from water using cyanobacteria [86], [90]. However, in the indirect biophotolysis method, hydrogenase enzymes must be removed to prevent the degradation of hydrogen [90], [93]. Furthermore, in this method, the gas mixture contains a high percentage of oxygen [90], [93]. When the photo fermentation technology is examined, it is understood that it is possible to use intense spectral light energy [86], [92], [93], different organic wastes can be used [44], [93], and it has a high substrate conversion capacity [90], [91]. However, it is understood that photo fermentation technology has a meager light conversion rate [93], requires a large reactor surface area [44], [90], and is not suitable for large-scale hydrogen production [91]. On the other hand, in the dark fermentation method, hydrogen production can be realized without sunlight [44], [92], [93], and many carbon sources can be used as substrates [86], [92], [93]. Moreover, there is no oxygen limitation in this method [44], [91], [93]. However, removing fatty acids is required in dark fermentation [44]. In this technique, the hydrogen production rate is affected by the PH value of the solution and the salt content [91].

Yang et al. [94] stated that the method of energy production using concentrated solar energy is a new technology. This method differs from photovoltaic production regarding thermal energy storage and production technique [94]. With the concentrated solar thermal process, radiation from the solar can be converted into heat and electricity [67]. Storing energy with a concentrated solar thermal method is straightforward [66]. This technique includes processes such as solar thermolysis and solar thermochemical cycles [50]. In solar thermolysis, water is thermally decomposed under high temperatures to produce hydrogen [50], [53]. In the solar thermochemical cycle technique, heat and electrolysis are used together to decompose water into hydrogen and oxygen [95]. Fang et al. [96] emphasized that the efficiency of gasification could be improved by integrating the concentrated solar thermal method and biomass gasification technology. Temiz and Dincer [97] examined integrating the concentrated solar copper-chlorine (Cu-Cl) cycle with thermal energy storage and geothermal systems to obtain products such as hydrogen and electricity. They stated that production improved with this integration.

2.2. Hydrogen Storage with Metal Hydrides

To produce hydrogen, first of all, energy is produced by any method, and then the energy produced is converted into hydrogen. Other processes can be summarized as the storage of hydrogen, it's recycling into various forms of energy transport, and energy consumption [98]. Amirthan and Perera [99] stated that one of the factors that need to be developed regarding hydrogen is storage systems. Excess hydrogen produced by various methods can be stored so that the stored hydrogen can be reused when needed [100]. Zhang et al. [101] stated that hydrogen could be stored in many forms, such as solid, liquid, gas, or derived chemical molecules. Chu et al. [102] emphasized the need for hydrogen storage improvements.

In recent years, research on material-based hydrogen storage has gained importance [103]. Huang et al. [104] stated that metal hydrides could be used for solid-state hydrogen storage.

However, they emphasized that the gravimetric hydrogen storage densities of metal hydrides are low. They stated that amorphous structures could be used to increase the performance of metal hydrides [104]. Edalati et al. [105] stated that magnesium and its alloys could be used in solid-state hydrogen storage as metal hydrides.

Li et al. [106] stated that magnesium hydride (MgH_2) could be used for hydrogen storage due to its advantages, such as being environmentally friendly and having a high storage capacity. However, there are problems to be solved regarding the thermodynamics and kinetics of these materials [105]. Ding et al. [107] emphasized that magnesium-based solid-state hydrogen storage could be used. Still, problems such as low high operating temperature and slow reaction rate of magnesium hydride (MgH_2) must be overcome [107]. Table 3 shows the properties of magnesium hydride (MgH_2) [108], [109], [110], [111].

Table 3. Properties of magnesium hydride (MgH_2) [108], [109], [110], [111].

Properties	MgH₂	Ref.
H-atoms per ($\times 10^{22}/cm^3$)	6.7	[109].
Hydrogen capacity (%)	7.6	[108], [109], [110].
Useable temperature range ($^{\circ}C$)	350–450	[110].
T1 bar ($^{\circ}C$)	282	[110].
Density (g/cm^3)	1.4	[109].
Energy density (kJ/kg hydride)	2811	[111].

Sui et al. [112] emphasized that nanostructured magnesium-based hydrogen storage can improve the hydrogen storage capacity of magnesium-based materials. They also emphasized that adding a catalyst and alloy can reduce the dehydrogenation temperature of magnesium-based materials [112]. Yahya et al. [113] studied the effect of adding K_2NbF_7 to MgH_2 material in their study. As a result of this review, it was emphasized that positive results were obtained.

Ismail [114] investigated the hydrogen storage capacity of lanthanum chloride ($LaCl_3$) doped MgH_2 material. This study determined that the sorption kinetics of MgH_2 material improved by adding $LaCl_3$. In addition, it was determined that the decomposition temperature of MgH_2 material decreased.

Ismail [115] investigated the effect of adding Hafnium Tetrachloride (HfCl_4) at specific rates to MgH_2 material. As a result of this examination, it has been determined that the best ratio for MgH_2 material to reduce the decomposition temperature and improve its kinetic performance is 15%.

3. THE ROLE OF HYDROGEN IN BUILDING A SUSTAINABLE FUTURE

In parallel with the recent intensive population growth and rising living standards, there has been a significant increase in global energy consumption [116]. Fossil fuels provide about 80% of the energy needed [117]. The high use of fossil fuels causes global warming and environmental pollution [118]. Because such energy sources face depletion problems and cause climate change, the search for alternative renewable resources has increased in many countries [119]. The transition to low-carbon energy is based on developing renewable and sustainable energy systems [120]. In this context, hydrogen may be the most suitable option to replace fossil fuels [121].

Hydrogen has the advantages of high heating value and non-pollution [122]. Moreover, hydrogen has the benefits of being the lightest element and having a long storage life [123]. Hydrogen is referred to as the 'ultimate energy carrier' [124]. Hydrogen has become the center of attention in sustainable energy due to its high conversion efficiency, high energy density, abundance in nature and environmental friendliness [125]. Hydrogen has come into focus due to its potential use as an energy carrier in fuel cells [126].

Further expansion and improvement of existing work in sustainable energy are essential for the security and stability of our future. Hydrogen, a clean and renewable energy source, will be vital in building a sustainable future. Hydrogen is one of the strongest candidates for sustainable energy use. However, due to our limited hydrogen infrastructure, regular and reliable hydrogen production shortcomings must be urgently addressed. Hydrogen will become a critical resource in the future, as it can reduce greenhouse gas emissions and increase energy efficiency and security. Shortly, hydrogen energy is expected to be used in many areas [127]. One of the most critical problems in the coming years will be the inability to produce enough hydrogen [128]. The focus on hydrogen is no longer limited to the transportation sector; hydrogen has also become a focal point in industries such as heating, steel and chemicals [129].

In recent years, there has been a remarkable increase and diversity in research and studies on hydrogen production. Using non-renewable sources such as fossil fuels for hydrogen production is very high today [130]. Renewable hydrogen production costs must be competitive with other energy sources for sustainable hydrogen production to become widespread. For this, systematic studies that will lead to definitive results are required. Besides the limiting factors of hydrogen production, there are many technical problems to be solved, such as hydrogen storage [131]. In this context, critical breakthroughs such as considering the impact of climate change, designing integrated systems, and accelerating infrastructure and facility works are essential.

3.1. Hydrogen's Role in Sustainable Aviation

Baroutaji et al. [132] emphasized that the aviation sector significantly impacts world energy consumption, with total energy consumption ranging from 2.5% to 5%. It is aimed to reach net zero carbon emissions in the aviation sector by 2050 [133]. Sustainable aviation aims to use renewable energy sources without leaving any environmental footprint [134].

Yusaf et al. [135] stated that hydrogen has a savior role in sectors such as aviation, which cause environmental problems. Musa Ardo et al. [136] emphasized that hydrogen can replace fossil fuels in the aviation sector. Penke et al. [137] stated that renewable hydrogen could be used to produce aviation fuel. The preference for hydrogen in aviation is closely related to the decarbonization of aviation [138]. In addition, using hydrogen in aviation can prevent problems such as climate change [139]. Bauen et al. [140] stated that hydrogen has a much higher gravimetric energy density than kerosene and a lower volumetric energy density than kerosene. These properties of hydrogen are critical to aircraft performance [140].

Nicolay et al. [141] carried out an aircraft design and optimization to examine the potential of liquid hydrogen and fuel cells in general aviation. In this context, they have completed the hydrogen fuel cell-powered aircraft concept. It has been found that this aircraft concept does not generate carbon dioxide emissions, and the performance of this aircraft design is comparable to conventional aircraft performances. However, it was emphasized that this hydrogen aircraft should be developed to show the same performance at higher altitudes [141].

Eissele et al. [142] investigated how a regional aircraft with a capacity of 50 passengers could be hybridized to fly with minimal emissions in 2040. This study stated that liquid hydrogen could be used efficiently by combining it with a fuel cell. They found that this integration is feasible. However, they emphasized that hydrogen production and storage should be improved [142].

Otto et al. [143] stated that hydrogen is a candidate that can be used as an energy carrier in aircraft. However, due to the explosive nature of hydrogen, the use of hydrogen in aviation and flight operations is quite risky [143].

4. CONCLUSION

Renewable or non-renewable energy sources can be used to meet the worldwide energy demand. However, commercial management worldwide primarily depends on fossil fuels [6]. The preference for non-renewable energy sources, such as fossil fuels, causes air pollution and climate change. Nevertheless, despite their adverse effects, fossil fuels are used extensively in the energy sector [8]. If it continues like this, our living standards will become more difficult due to the environmental impact and the formation of greenhouse gases [9]. This negative situation can be controlled using renewable energy sources [11], [17]. In many countries, priority is given to studies on renewable energy to reduce environmental pollution and overcome energy problems [14]. In this context, incentives for renewable and sustainable energy sources are significant. In addition, it is crucial to prefer renewable energy to prevent economic problems and ensure energy security [21].

Renewable energy and sustainable development are closely related. For example, the United Nations recommends using low-cost sustainable energy resources to ensure energy security and sustainable growth [24]. Energy security can be improved by choosing sustainable and renewable energy sources. In this context, hydrogen can be used in the transition to sustainable energy because it has low cost, is very clean, and has high performance [35]. Hydrogen can be used as a fuel, as an energy carrier in fuel cells, or for storage [37]. Hydrogen can be produced using almost any energy source [39]. Worldwide, hydrogen is produced mainly by converting fossil fuels, such as steam-reforming natural gas [41], [42], [43].

The purity of hydrogen is related to the technology used to produce and use the hydrogen [45]. In this regard, using renewable and sustainable energy sources in hydrogen production is essential. Since the potential of solar energy, a renewable energy source, is relatively high, it can be used in hydrogen production. Solar hydrogen generation systems cover photoelectrochemical, concentrated solar energy, photobiological and photovoltaic methods [49], [50]. Photovoltaic technology has advantages such as low cost, no environmental pollution, and no moving parts. However, in the absence of sunlight, hydrogen production is impossible with this technique [51], [52], [53], [54]. Photoelectrochemical technology has advantages such as less emission, being able to be used in small or large systems, and low cost. However, this technique requires much light [55], [56], [57], [58]. Photobiological technology has the advantages of being highly efficient, not generating greenhouse gases, and being easily applicable. However, this technique should be improved in terms of cost [59], [60], [61], [62]. Concentrated solar thermal technology has advantages such as being highly efficient, storing heat energy, and hybridizing with different systems. Economic and technical feasibility must be appropriate for hybridizing the concentrated solar thermal method with other systems [64], [65], [66], [67], [68].

Hydrogen draws attention to sustainable energy due to its high conversion efficiency, energy density, natural abundance, and environmental friendliness. Some advantages and disadvantages of hydrogen production from solar energy are discussed above. In addition, the importance of hydrogen was emphasized in line with sustainable development goals. It is seen that the production of hydrogen with a renewable energy source such as the sun positively affects the purity of the hydrogen.

In sectors with high energy consumption, such as aviation, it is necessary to use sustainable energy sources instead of fossil fuels. In this context, hydrogen is a strong candidate for the transition to sustainability in aviation. However, the factors affecting the use of hydrogen need to be eliminated. The purity rate of the hydrogen produced and the storage problems of the hydrogen are obstacles to the widespread use of hydrogen. In this context, producing hydrogen with a renewable and sustainable method can increase hydrogen purity. This study investigated the hydrogen production method with solar energy to increase the purity of the hydrogen produced. It seems possible to produce hydrogen with solar technology. Moreover, the abundance of sun and the high efficiency of solar technology increase the usability of this technique. Another factor affecting the use of hydrogen is storage problems. In this study, the availability of magnesium hydride (MgH_2) for the storage of hydrogen was investigated. Using MgH_2 for hydrogen storage can be presented as a possible solution. However, some problems

must be solved regarding the thermodynamics and kinetics of MgH₂ materials. Some additives can be added to the MgH₂ material to overcome these problems. However, MgH₂ materials still need to be developed.

Funding

The author(s) received no financial support for this research, authorship, and/or publication of this article.

Declaration of Competing Interest

The author(s) declared no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.

REFERENCES

- [1] M. Aydin, “Renewable and non-renewable electricity consumption–economic growth nexus: Evidence from OECD countries,” *Renew. Energy*, vol. 136, pp. 599–606, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.01.008.
- [2] S. Firoz, “A review: Advantages and Disadvantages of Biodiesel,” vol. 04, no. 11.
- [3] H. Ahmad, S. K. Kamarudin, L. J. Minggu, U. A. Hasran, S. Masdar, and W. R. Wan Daud, “Enhancing methanol oxidation with a TiO₂-modified semiconductor as a photocatalyst,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 42, no. 14, pp. 8986–8996, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.04.135.
- [4] İ. İnan, İ. Akbulut, and E. Aslan, “ENERJİ SORUNUNUN ÇÖZÜMÜNDE YENİLENEMEZ VE YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ YERİ VE ÖNEMİ,” *Türk Dünya. Araştırmaları*, vol. 120, no. 237, Art. no. 237, Dec. 2018.
- [5] W. H. Organization, “COP24 special report: health and climate change,” 2018.
- [6] A. Darvish Falehi and M. Rafiee, “Maximum efficiency of wind energy using novel Dynamic Voltage Restorer for DFIG based Wind Turbine,” *Energy Rep.*, vol. 4, pp. 308–322, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.egyr.2018.01.006.
- [7] S. Farhad, M. Saffar-Avval, and M. Younessi-Sinaki, “Efficient design of feedwater heaters network in steam power plants using pinch technology and exergy analysis,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 32, no. 1, pp. 1–11, 2008, doi: 10.1002/er.1319.
- [8] A. G. Olabi and M. A. Abdelkareem, “Renewable energy and climate change,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 158, p. 112111, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112111.

- [9] A. Zoungrana and M. Çakmakci, “From non-renewable energy to renewable by harvesting salinity gradient power by reverse electrodialysis: A review,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 45, no. 3, pp. 3495–3522, 2021, doi: 10.1002/er.6062.
- [10] M. Shoaib, I. Siddiqui, S. Rehman, S. Khan, and L. M. Alhems, “Assessment of wind energy potential using wind energy conversion system,” *J. Clean. Prod.*, vol. 216, pp. 346–360, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.128.
- [11] M. Mohsin, H. W. Kamran, M. Atif Nawaz, M. Sajjad Hussain, and A. S. Dahri, “Assessing the impact of transition from nonrenewable to renewable energy consumption on economic growth-environmental nexus from developing Asian economies,” *J. Environ. Manage.*, vol. 284, p. 111999, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.111999.
- [12] A. Ahmed, T. Ge, J. Peng, W.-C. Yan, B. T. Tee, and S. You, “Assessment of the renewable energy generation towards net-zero energy buildings: A review,” *Energy Build.*, vol. 256, p. 111755, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111755.
- [13] A. A. Kebede, T. Kalogiannis, J. Van Mierlo, and M. Bercibar, “A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 159, p. 112213, May 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112213.
- [14] Z.-Y. Zhao, R.-D. Chang, and Y.-L. Chen, “What hinder the further development of wind power in China?—A socio-technical barrier study,” *Energy Policy*, vol. 88, pp. 465–476, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.enpol.2015.11.004.
- [15] A. Chehouri, R. Younes, A. Ilinca, and J. Perron, “Review of performance optimization techniques applied to wind turbines,” *Appl. Energy*, vol. 142, pp. 361–388, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.12.043.
- [16] Ş. Anatürk, “Yenilenebilir ve Yenilenemeyen Enerji Kaynakları Ile Ekonomik Büyüme Arasındaki İlişki: Türkiye Örneği,” PhD Thesis, Anadolu University (Turkey), 2021.
- [17] J. J. Cartelle Barros, M. Lara Coira, M. P. de la Cruz López, and A. del Caño Gochi, “Comparative analysis of direct employment generated by renewable and non-renewable power plants,” *Energy*, vol. 139, pp. 542–554, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.08.025.
- [18] P. Sadorsky, “Wind energy for sustainable development: Driving factors and future outlook,” *J. Clean. Prod.*, vol. 289, p. 125779, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125779.

- [19] M. Han, J. Lao, Q. Yao, B. Zhang, and J. Meng, “Carbon inequality and economic development across the Belt and Road regions,” *J. Environ. Manage.*, vol. 262, p. 110250, May 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110250.
- [20] A. Uihlein, S. Ehrenberger, and L. Schebek, “Utilisation options of renewable resources: a life cycle assessment of selected products,” *J. Clean. Prod.*, vol. 16, no. 12, pp. 1306–1320, Aug. 2008, doi: 10.1016/j.jclepro.2007.06.009.
- [21] R. Marks-Bielska, S. Bielski, K. Pik, and K. Kurowska, “The Importance of Renewable Energy Sources in Poland’s Energy Mix,” *Energies*, vol. 13, no. 18, Art. no. 18, Jan. 2020, doi: 10.3390/en13184624.
- [22] I. Dincer, “Renewable energy and sustainable development: a crucial review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 4, no. 2, pp. 157–175, Jun. 2000, doi: 10.1016/S1364-0321(99)00011-8.
- [23] S. O. Oyedepo, “Towards achieving energy for sustainable development in Nigeria,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 34, pp. 255–272, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.03.019.
- [24] M. Can and Z. Ahmed, “Towards sustainable development in the European Union countries: Does economic complexity affect renewable and non-renewable energy consumption?,” *Sustain. Dev.*, vol. 31, no. 1, pp. 439–451, 2023, doi: 10.1002/sd.2402.
- [25] J. Bei and C. Wang, “Renewable energy resources and sustainable development goals: Evidence based on green finance, clean energy and environmentally friendly investment,” *Resour. Policy*, vol. 80, p. 103194, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.resourpol.2022.103194.
- [26] G. E. Halkos and A. S. Tsirivis, “Electricity Production and Sustainable Development: The Role of Renewable Energy Sources and Specific Socioeconomic Factors,” *Energies*, vol. 16, no. 2, Art. no. 2, Jan. 2023, doi: 10.3390/en16020721.
- [27] T. Güney, “Renewable energy, non-renewable energy and sustainable development,” *Int. J. Sustain. Dev. World Ecol.*, vol. 26, no. 5, pp. 389–397, Jul. 2019, doi: 10.1080/13504509.2019.1595214.
- [28] C. R. Kumar. J and M. A. Majid, “Renewable energy for sustainable development in India: current status, future prospects, challenges, employment, and investment opportunities,” *Energy Sustain. Soc.*, vol. 10, no. 1, p. 2, Jan. 2020, doi: 10.1186/s13705-019-0232-1.

- [29] M. Rezaei, “The Role of Renewable Energies in Sustainable Development: Case Study Iran,” *Iran. J. Energy Environ.*, vol. 4, no. 4, Dec. 2013, doi: 10.5829/idosi.ijee.2013.04.04.02.
- [30] P. A. Østergaard, N. Duic, Y. Noorollahi, H. Mikulcic, and S. Kalogirou, “Sustainable development using renewable energy technology,” *Renew. Energy*, vol. 146, pp. 2430–2437, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.08.094.
- [31] L. Barreto, A. Makihira, and K. Riahi, “The hydrogen economy in the 21st century: a sustainable development scenario,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 28, no. 3, pp. 267–284, Mar. 2003, doi: 10.1016/S0360-3199(02)00074-5.
- [32] P. M. Falcone, M. Hiete, and A. Sapio, “Hydrogen economy and sustainable development goals: Review and policy insights,” *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.*, vol. 31, p. 100506, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.cogsc.2021.100506.
- [33] A. Midilli, M. Ay, I. Dincer, and M. A. Rosen, “On hydrogen and hydrogen energy strategies: I: current status and needs,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 9, no. 3, pp. 255–271, Jun. 2005, doi: 10.1016/j.rser.2004.05.003.
- [34] A. Khalilnejad and G. H. Riahy, “A hybrid wind-PV system performance investigation for the purpose of maximum hydrogen production and storage using advanced alkaline electrolyzer,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 80, pp. 398–406, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.01.040.
- [35] C. Acar and I. Dincer, “Review and evaluation of hydrogen production options for better environment,” *J. Clean. Prod.*, vol. 218, pp. 835–849, May 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.02.046.
- [36] M. Balat, “Potential importance of hydrogen as a future solution to environmental and transportation problems,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 33, no. 15, pp. 4013–4029, Aug. 2008, doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.05.047.
- [37] H. Ishaq and I. Dincer, “Comparative assessment of renewable energy-based hydrogen production methods,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 135, p. 110192, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110192.
- [38] O. Bičáková and P. Straka, “Production of hydrogen from renewable resources and its effectiveness,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 37, no. 16, pp. 11563–11578, Aug. 2012, doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.05.047.
- [39] S. Singh et al., “Hydrogen: A sustainable fuel for future of the transport sector,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, pp. 623–633, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.06.040.

- [40] H. Ishaq, I. Dincer, and C. Crawford, “A review on hydrogen production and utilization: Challenges and opportunities,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 47, no. 62, pp. 26238–26264, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.11.149.
- [41] M. Wang, G. Wang, Z. Sun, Y. Zhang, and D. Xu, “Review of renewable energy-based hydrogen production processes for sustainable energy innovation,” *Glob. Energy Interconnect.*, vol. 2, no. 5, pp. 436–443, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.gloi.2019.11.019.
- [42] M. Yu, K. Wang, and H. Vredenburg, “Insights into low-carbon hydrogen production methods: Green, blue and aqua hydrogen,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 46, no. 41, pp. 21261–21273, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.04.016.
- [43] S. E. Hosseini and M. A. Wahid, “Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 57, pp. 850–866, May 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.112.
- [44] P. Nikolaidis and A. Poullikkas, “A comparative overview of hydrogen production processes,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 597–611, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.044.
- [45] S. Harichandan, S. K. Kar, R. Bansal, and S. K. Mishra, “Achieving sustainable development goals through adoption of hydrogen fuel cell vehicles in India: An empirical analysis,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 48, no. 12, pp. 4845–4859, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.024.
- [46] L. S. F. Frowijn and W. G. J. H. M. van Sark, “Analysis of photon-driven solar-to-hydrogen production methods in the Netherlands,” *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 48, p. 101631, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101631.
- [47] M. Gopinath and R. Marimuthu, “A review on solar energy-based indirect water-splitting methods for hydrogen generation,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 47, no. 89, pp. 37742–37759, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.08.297.
- [48] C. C. Agrafiotis, C. Pagkoura, S. Lorentzou, M. Kostoglou, and A. G. Konstandopoulos, “Hydrogen production in solar reactors,” *Catal. Today*, vol. 127, no. 1, pp. 265–277, Sep. 2007, doi: 10.1016/j.cattod.2007.06.039.
- [49] S. E. Hosseini and M. A. Wahid, “Hydrogen from solar energy, a clean energy carrier from a sustainable source of energy,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 44, no. 6, pp. 4110–4131, 2020, doi: 10.1002/er.4930.

- [50] A. S. Joshi, I. Dincer, and B. V. Reddy, “Solar hydrogen production: A comparative performance assessment,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 36, no. 17, pp. 11246–11257, Aug. 2011, doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.11.122.
- [51] A. Khalilnejad, A. Abbaspour, and A. I. Sarwat, “Multi-level optimization approach for directly coupled photovoltaic-electrolyser system,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 41, no. 28, pp. 11884–11894, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.05.082.
- [52] A. S. Joshi, I. Dincer, and B. V. Reddy, “Performance analysis of photovoltaic systems: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 8, pp. 1884–1897, Oct. 2009, doi: 10.1016/j.rser.2009.01.009.
- [53] M. Öztürk, A. Elbir, N. Özek, and A. K. Yakut, “Güneş Hidrojen Üretim Metotlarının İncelenmesi,” in 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS’11), 2011, p. 18.
- [54] M. ÖZTÜRK, “Evsel Uygulamalar için Birleşik Rüzgar-Güneş-Hidrojen Sisteminin Termodinamik Analizi,” *El-Cezeri*, vol. 3, no. 3.
- [55] M. Ahmed and I. Dincer, “A review on photoelectrochemical hydrogen production systems: Challenges and future directions,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 44, no. 5, pp. 2474–2507, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.12.037.
- [56] A. Kumtepe, “Fotoelektrokimyasal sistemler için ileri malzemeler geliştirilmesi: Üretim, karakterizasyon ve sistem entegrasyonu,” Master’s Thesis, TOBB ETÜ, 2022.
- [57] E. K. Can, “Foto elektrokimyasal hidrojen üretimi uygulamaları için elektrot dizaynı ve performans ölçümü,” Master’s Thesis, TOBB University of Economics and Technology, Graduate School of Engineering ..., 2017.
- [58] J. Joy, J. Mathew, and S. C. George, “Nanomaterials for photoelectrochemical water splitting – review,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 43, no. 10, pp. 4804–4817, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.01.099.
- [59] S. Thanigaivel, S. Rajendran, T. K. A. Hoang, A. Ahmad, and R. Luque, “Photobiological effects of converting biomass into hydrogen – Challenges and prospects,” *Bioresour. Technol.*, vol. 367, p. 128278, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.biortech.2022.128278.
- [60] A. Sharma and S. K. Arya, “Photobiological Production of Biohydrogen: Recent Advances and Strategy,” in *Prospects of Renewable Bioprocessing in Future Energy Systems*, A. A. Rastegari, A. N. Yadav, and A. Gupta, Eds., in *Biofuel and Biorefinery Technologies*. , Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 89–116. doi: 10.1007/978-3-030-14463-0_3.

- [61] Y. Chen, “Global potential of algae-based photobiological hydrogen production,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 15, no. 7, pp. 2843–2857, Jul. 2022, doi: 10.1039/D2EE00342B.
- [62] R. S. Poudyal et al., “10 - Hydrogen production using photobiological methods,” in *Compendium of Hydrogen Energy*, V. Subramani, A. Basile, and T. N. Veziroğlu, Eds., in *Woodhead Publishing Series in Energy*, Oxford: Woodhead Publishing, 2015, pp. 289–317. doi: 10.1016/B978-1-78242-361-4.00010-8.
- [63] J. Chen et al., “Engineering a chemoenzymatic cascade for sustainable photobiological hydrogen production with green algae,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 13, no. 7, pp. 2064–2068, Jul. 2020, doi: 10.1039/D0EE00993H.
- [64] J. C. Restrepo, D. Luis Izidoro, A. Milena Lozano Násner, O. José Venturini, and E. Eduardo Silva Lora, “Techno-economical evaluation of renewable hydrogen production through concentrated solar energy,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 258, p. 115372, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.115372.
- [65] J. H. Peterseim, S. White, A. Tadros, and U. Hellwig, “Concentrated solar power hybrid plants, which technologies are best suited for hybridisation?,” *Renew. Energy*, vol. 57, pp. 520–532, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.renene.2013.02.014.
- [66] K. M. Powell, K. Rashid, K. Ellingwood, J. Tuttle, and B. D. Iverson, “Hybrid concentrated solar thermal power systems: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 80, pp. 215–237, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.067.
- [67] M. Shahabuddin, M. A. Alim, T. Alam, M. Mofijur, S. F. Ahmed, and G. Perkins, “A critical review on the development and challenges of concentrated solar power technologies,” *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 47, p. 101434, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101434.
- [68] H. I. Villafán-Vidales, C. A. Arancibia-Bulnes, D. Riveros-Rosas, H. Romero-Paredes, and C. A. Estrada, “An overview of the solar thermochemical processes for hydrogen and syngas production: Reactors, and facilities,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 75, pp. 894–908, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.070.
- [69] A. Yilanci, I. Dincer, and H. K. Ozturk, “A review on solar-hydrogen/fuel cell hybrid energy systems for stationary applications,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 35, no. 3, pp. 231–244, Jun. 2009, doi: 10.1016/j.pecs.2008.07.004.
- [70] A. S. Joshi, I. Dincer, and B. V. Reddy, “Exergetic assessment of solar hydrogen production methods,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 35, no. 10, pp. 4901–4908, May 2010, doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.09.067.

- [71] Z. Ö. Özdemir and H. Mutlubaş, “ENERJİ TAŞIYICISI OLARAK HİDROJEN VE HİDROJEN ÜRETİM YÖNTEMLERİ”.
- [72] T. L. Gibson and N. A. Kelly, “Optimization of solar powered hydrogen production using photovoltaic electrolysis devices,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 33, no. 21, pp. 5931–5940, Nov. 2008, doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.05.106.
- [73] G. Peharz, F. Dimroth, and U. Wittstadt, “Solar hydrogen production by water splitting with a conversion efficiency of 18%,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 32, no. 15, pp. 3248–3252, Oct. 2007, doi: 10.1016/j.ijhydene.2007.04.036.
- [74] S. Dahbi, R. Aboutni, A. Aziz, N. Benazzi, M. Elhafyani, and K. Kassmi, “Optimised hydrogen production by a photovoltaic-electrolysis system DC/DC converter and water flow controller,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 41, no. 45, pp. 20858–20866, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.05.111.
- [75] Y. Bicer, I. Dincer, and C. Zamfirescu, “Effects of various solar spectra on photovoltaic cell efficiency and photonic hydrogen production,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 41, no. 19, pp. 7935–7949, May 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.11.184.
- [76] M. Erden, M. Karakilcik, and I. Dincer, “Performance investigation of hydrogen production by the flat-plate collectors assisted by a solar pond,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 42, no. 4, pp. 2522–2529, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.04.116.
- [77] Ö. Coşkun, “Tandem perovskit foto-elektrokimyasal güneş pilleri için elektron ve boşluk taşıyıcı tabakaların geliştirilmesi,” Master’s Thesis, TOBB ETÜ, 2022.
- [78] D. Kim, D.-K. Lee, S. M. Kim, W. Park, and U. Sim, “Photoelectrochemical Water Splitting Reaction System Based on Metal-Organic Halide Perovskites,” *Materials*, vol. 13, no. 1, Art. no. 1, Jan. 2020, doi: 10.3390/ma13010210.
- [79] S. Licht, “Solar water splitting to generate hydrogen fuel—a photothermal electrochemical analysis,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 30, no. 5, pp. 459–470, Apr. 2005, doi: 10.1016/j.ijhydene.2004.04.015.
- [80] A. Boudjema, S. Boumaza, M. Trari, R. Bouarab, and A. Bouguelia, “Physical and photo-electrochemical characterizations of α -Fe₂O₃. Application for hydrogen production,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 34, no. 10, pp. 4268–4274, May 2009, doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.03.044.
- [81] A. Alarawi, V. Ramalingam, H.-C. Fu, P. Varadhan, R. Yang, and J.-H. He, “Enhanced photoelectrochemical hydrogen production efficiency of MoS,” *Opt. Express*, vol. 27, no. 8, pp. A352–A363, Apr. 2019, doi: 10.1364/OE.27.00A352.

- [82] M. Lucia Ghirardi, A. Dubini, J. Yu, and P.-C. Maness, “Photobiological hydrogen - producing systems,” *Chem. Soc. Rev.*, vol. 38, no. 1, pp. 52–61, 2009, doi: 10.1039/B718939G.
- [83] H. Sakurai, H. Masukawa, M. Kitashima, and K. Inoue, “Photobiological hydrogen production: Bioenergetics and challenges for its practical application,” *J. Photochem. Photobiol. C Photochem. Rev.*, vol. 17, pp. 1–25, Dec. 2013, doi: 10.1016/j.jphotochemrev.2013.05.001.
- [84] P. Wutthithien, P. Lindblad, and A. Incharoensakdi, “Improvement of photobiological hydrogen production by suspended and immobilized cells of the N₂-fixing cyanobacterium *Fischerella muscicola* TISTR 8215,” *J. Appl. Phycol.*, vol. 31, no. 6, pp. 3527–3536, Dec. 2019, doi: 10.1007/s10811-019-01881-y.
- [85] J. Chen et al., “Chemical Flocculation-Based Green Algae Materials for Photobiological Hydrogen Production,” *ACS Appl. Bio Mater.*, vol. 5, no. 2, pp. 897–903, Feb. 2022, doi: 10.1021/acsabm.1c01281.
- [86] S. Meher Kotay and D. Das, “Biohydrogen as a renewable energy resource—Prospects and potentials,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 33, no. 1, pp. 258–263, Jan. 2008, doi: 10.1016/j.ijhydene.2007.07.031.
- [87] G. Liu, Y. Sheng, J. W. Ager, M. Kraft, and R. Xu, “Research advances towards large-scale solar hydrogen production from water,” *EnergyChem*, vol. 1, no. 2, p. 100014, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.enchem.2019.100014.
- [88] M. H. Razu, F. Hossain, and M. Khan, “Advancement of Bio-hydrogen Production from Microalgae,” in *Microalgae Biotechnology for Development of Biofuel and Wastewater Treatment*, Md. A. Alam and Z. Wang, Eds., Singapore: Springer, 2019, pp. 423–462. doi: 10.1007/978-981-13-2264-8_17.
- [89] B. Ge et al., “Evaluation of various sulfides for enhanced photobiological H₂ production by a dual-species co-culture system of *Chlamydomonas reinhardtii* and *Thiomonas intermedia*,” *Process Biochem.*, vol. 82, pp. 110–116, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.procbio.2019.03.028.
- [90] S. Koumi Ngoh and D. Njomo, “An overview of hydrogen gas production from solar energy,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 9, pp. 6782–6792, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.07.027.

- [91] X. Xu, Q. Zhou, and D. Yu, “The future of hydrogen energy: Bio-hydrogen production technology,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 47, no. 79, pp. 33677–33698, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.07.261.
- [92] R. Kothari, D. P. Singh, V. V. Tyagi, and S. K. Tyagi, “Fermentative hydrogen production – An alternative clean energy source,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 4, pp. 2337–2346, May 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.01.002.
- [93] D. Das and T. N. Veziroglu, “Advances in biological hydrogen production processes,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 33, no. 21, pp. 6046–6057, Nov. 2008, doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.07.098.
- [94] H. Yang et al., “Exploiting the operational flexibility of a concentrated solar power plant with hydrogen production,” *Sol. Energy*, vol. 247, pp. 158–170, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.solener.2022.10.011.
- [95] E. Bozoglan, A. Midilli, and A. Hepbasli, “Sustainable assessment of solar hydrogen production techniques,” *Energy*, vol. 46, no. 1, pp. 85–93, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.energy.2012.03.029.
- [96] Y. Fang, M. C. Paul, S. Varjani, X. Li, Y.-K. Park, and S. You, “Concentrated solar thermochemical gasification of biomass: Principles, applications, and development,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 150, p. 111484, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111484.
- [97] M. Temiz and I. Dincer, “Concentrated solar driven thermochemical hydrogen production plant with thermal energy storage and geothermal systems,” *Energy*, vol. 219, p. 119554, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2020.119554.
- [98] T. Peng et al., “Choice of hydrogen energy storage in salt caverns and horizontal cavern construction technology,” *J. Energy Storage*, vol. 60, p. 106489, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.est.2022.106489.
- [99] T. Amirthan and M. S. A. Perera, “The role of storage systems in hydrogen economy: A review,” *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 108, p. 104843, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.jngse.2022.104843.
- [100] A. Salehabadi, E. A. Dawi, D. A. Sabur, W. K. Al-Azzawi, and M. Salavati-Niasari, “Progress on nano-scaled alloys and mixed metal oxides in solid-state hydrogen storage; an overview,” *J. Energy Storage*, vol. 61, p. 106722, May 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.106722.

- [101] T. Zhang, J. Uratani, Y. Huang, L. Xu, S. Griffiths, and Y. Ding, “Hydrogen liquefaction and storage: Recent progress and perspectives,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 176, p. 113204, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113204.
- [102] C. Chu, K. Wu, B. Luo, Q. Cao, and H. Zhang, “Hydrogen storage by liquid organic hydrogen carriers: Catalyst, renewable carrier, and technology - A review,” *Carbon Resour. Convers.*, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.crcon.2023.03.007.
- [103] G. A. Russell-Parks, T. Gennett, and B. G. Trewyn, “Balancing molecular level influences of intermolecular frustrated Lewis pairs (FLP) for successful design of FLP catalysts for hydrogen storage applications,” *Int. J. Hydrog. Energy*, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.01.304.
- [104] L. J. Huang, H. J. Lin, H. Wang, L. Z. Ouyang, and M. Zhu, “Amorphous alloys for hydrogen storage,” *J. Alloys Compd.*, vol. 941, p. 168945, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.jallcom.2023.168945.
- [105] K. Edalati et al., “Impact of severe plastic deformation on kinetics and thermodynamics of hydrogen storage in magnesium and its alloys,” *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 146, pp. 221–239, May 2023, doi: 10.1016/j.jmst.2022.10.068.
- [106] Z.-Y. Li et al., “Optimizing hydrogen ad/desorption of Mg-based hydrides for energy-storage applications,” *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 141, pp. 221–235, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.jmst.2022.08.047.
- [107] Z. Ding et al., “Tailoring MgH₂ for hydrogen storage through nanoengineering and catalysis,” *J. Magnes. Alloys*, vol. 10, no. 11, pp. 2946–2967, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.jma.2022.09.028.
- [108] I. P. Jain, C. Lal, and A. Jain, “Hydrogen storage in Mg: A most promising material,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 35, no. 10, pp. 5133–5144, May 2010, doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.08.088.
- [109] T. Sadhasivam, H.-T. Kim, S. Jung, S.-H. Roh, J.-H. Park, and H.-Y. Jung, “Dimensional effects of nanostructured Mg/MgH₂ for hydrogen storage applications: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 72, pp. 523–534, May 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.01.107.
- [110] G. R. de Almeida Neto, F. H. Matheus, C. A. Gonçalves Beatrice, D. R. Leiva, and L. A. Pessan, “Fundamentals and recent advances in polymer composites with hydride-forming metals for hydrogen storage applications,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 47, no. 80, pp. 34139–34164, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.08.004.

- [111] R. Kumar Goyal and EswaramoorthyMuthusamy, “Thermo-physical properties of heat storage material required for effective heat storage and heat transfer enhancement techniques for the solar cooking applications,” *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 56, p. 103078, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.seta.2023.103078.
- [112] Y. Sui et al., “Recent progress of nanotechnology in enhancing hydrogen storage performance of magnesium-based materials: A review,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 47, no. 71, pp. 30546–30566, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.06.310.
- [113] M. S. Yahya, N. N. Sulaiman, N. S. Mustafa, F. A. Halim Yap, and M. Ismail, “Improvement of hydrogen storage properties in MgH₂ catalysed by K₂NbF₇,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 43, no. 31, pp. 14532–14540, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.05.157.
- [114] M. Ismail, “Effect of LaCl₃ addition on the hydrogen storage properties of MgH₂,” *Energy*, vol. 79, pp. 177–182, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.energy.2014.11.001.
- [115] M. Ismail, “Effect of adding different percentages of HfCl₄ on the hydrogen storage properties of MgH₂,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 46, no. 12, pp. 8621–8628, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.12.068.
- [116] A. Z. Arsad et al., “Hydrogen electrolyser for sustainable energy production: A bibliometric analysis and future directions,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 48, no. 13, pp. 4960–4983, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.023.
- [117] I. U. Hassan et al., “Advances in photochemical splitting of seawater over semiconductor nano-catalysts for hydrogen production: A critical review,” *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 121, pp. 1–14, May 2023, doi: 10.1016/j.jiec.2023.01.006.
- [118] R. Gautam, J. K. Nayak, N. V. Ressa, R. Steinberger-Wilckens, and U. K. Ghosh, “Bio-hydrogen production through microbial electrolysis cell: Structural components and influencing factors,” *Chem. Eng. J.*, vol. 455, p. 140535, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.cej.2022.140535.
- [119] S. M. Jokar et al., “The recent areas of applicability of palladium based membrane technologies for hydrogen production from methane and natural gas: A review,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 48, no. 16, pp. 6451–6476, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.05.296.
- [120] Z. Chen, W. Wei, L. Song, and B.-J. Ni, “Hybrid Water Electrolysis: A New Sustainable Avenue for Energy-Saving Hydrogen Production,” *Sustain. Horiz.*, vol. 1, p. 100002, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.horiz.2021.100002.

- [121] P. R. Lanjekar, N. L. Panwar, and C. Agrawal, "A comprehensive review on hydrogen production through thermochemical conversion of biomass for energy security," *Bioresour. Technol. Rep.*, vol. 21, p. 101293, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.biteb.2022.101293.
- [122] D. D. Giri et al., "Sustainable production of algae-bacteria granular consortia based biological hydrogen: New insights," *Bioresour. Technol.*, vol. 352, p. 127036, May 2022, doi: 10.1016/j.biortech.2022.127036.
- [123] A. Al-Ahmed, "Photocatalytic properties of graphitic carbon nitrides (g-C₃N₄) for sustainable green hydrogen production: Recent advancement," *Fuel*, vol. 316, p. 123381, May 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2022.123381.
- [124] K. Chand and O. Paladino, "Recent developments of membranes and electrocatalysts for the hydrogen production by anion exchange membrane water electrolyzers: A review," *Arab. J. Chem.*, vol. 16, no. 2, p. 104451, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.arabjc.2022.104451.
- [125] D. Li, J. Tu, Y. Lu, and B. Zhang, "Recent advances in hybrid water electrolysis for energy-saving hydrogen production," *Green Chem. Eng.*, vol. 4, no. 1, pp. 17–29, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.gce.2022.11.001.
- [126] S. Karishma, A. Saravanan, P. Senthil Kumar, and G. Rangasamy, "Sustainable production of biohydrogen from algae biomass: Critical review on pretreatment methods, mechanism and challenges," *Bioresour. Technol.*, vol. 366, p. 128187, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.biortech.2022.128187.
- [127] M. Liu et al., "Issues and opportunities facing hydrolytic hydrogen production materials," *Chem. Eng. J.*, vol. 461, p. 141918, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.cej.2023.141918.
- [128] G. Bilgiç, E. Bendeş, B. Öztürk, and S. Atasever, "Recent advances in artificial neural network research for modeling hydrogen production processes," *Int. J. Hydrog. Energy*, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.02.002.
- [129] J. A. Riera, R. M. Lima, and O. M. Knio, "A review of hydrogen production and supply chain modeling and optimization," *Int. J. Hydrog. Energy*, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.12.242.
- [130] F. Tahir, M. A. Saeed, and U. Ali, "Biomass energy perspective in Pakistan based on chemical looping gasification for hydrogen production and power generation," *Int. J. Hydrog. Energy*, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.01.247.

- [131] L. Wang, N. Zhang, T. Yue, H. Liu, J. Zhu, and X. Jia, “Three-axis coupled flight control law design for flying wing aircraft using eigenstructure assignment method,” *Chin. J. Aeronaut.*, vol. 33, no. 10, pp. 2510–2526, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.cja.2020.03.016.
- [132] A. Baroutaji, T. Wilberforce, M. Ramadan, and A. G. Olabi, “Comprehensive investigation on hydrogen and fuel cell technology in the aviation and aerospace sectors,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 106, pp. 31–40, May 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.02.022.
- [133] “iata-agm-resolution-on-net-zero-carbon-emissions.pdf.” Accessed: Mar. 22, 2023. [Online]. Available: <https://www.iata.org/contentassets/dcd25da635cd4c3697b5d0d8ae32e159/iata-agm-resolution-on-net-zero-carbon-emissions.pdf>
- [134] A. Goldmann et al., “A Study on Electrofuels in Aviation,” *Energies*, vol. 11, no. 2, Art. no. 2, Feb. 2018, doi: 10.3390/en11020392.
- [135] T. Yusaf et al., “Sustainable Aviation—Hydrogen Is the Future,” *Sustainability*, vol. 14, no. 1, Art. no. 1, Jan. 2022, doi: 10.3390/su14010548.
- [136] F. Musa Ardo et al., “A review in redressing challenges to produce sustainable hydrogen from microalgae for aviation industry,” *Fuel*, vol. 330, p. 125646, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2022.125646.
- [137] C. Penke, C. Falter, and V. Batteiger, “Pathways and Environmental Assessment for the Introduction of Renewable Hydrogen into the Aviation Sector,” in *Progress in Life Cycle Assessment 2019*, S. Albrecht, M. Fischer, P. Leistner, and L. Schebek, Eds., in *Sustainable Production, Life Cycle Engineering and Management.*, Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 41–52. doi: 10.1007/978-3-030-50519-6_4.
- [138] J. Huete and P. Pilidis, “Parametric study on tank integration for hydrogen civil aviation propulsion,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 46, no. 74, pp. 37049–37062, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.08.194.
- [139] J. Hoelzen, D. Silberhorn, T. Zill, B. Bensmann, and R. Hanke-Rauschenbach, “Hydrogen-powered aviation and its reliance on green hydrogen infrastructure – Review and research gaps,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 47, no. 5, pp. 3108–3130, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.10.239.
- [140] A. Bauen, N. Bitossi, L. German, A. Harris, and K. Leow, “Sustainable Aviation Fuels: Status, challenges and prospects of drop-in liquid fuels, hydrogen and electrification in aviation,” *Johns. Matthey Technol. Rev.*, vol. 64, no. 3, pp. 263–278, 2020.

- [141] S. Nicolay, S. Karpuk, Y. Liu, and A. Elham, “Conceptual design and optimization of a general aviation aircraft with fuel cells and hydrogen,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 46, no. 64, pp. 32676–32694, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.07.127.
- [142] J. Eissele et al., “Hydrogen-Powered Aviation—Design of a Hybrid-Electric Regional Aircraft for Entry into Service in 2040,” *Aerospace*, vol. 10, no. 3, Art. no. 3, Mar. 2023, doi: 10.3390/aerospace10030277.
- [143] M. Otto, K. L. Chagoya, R. G. Blair, S. M. Hick, and J. S. Kapat, “Optimal hydrogen carrier: Holistic evaluation of hydrogen storage and transportation concepts for power generation, aviation, and transportation,” *J. Energy Storage*, vol. 55, p. 105714, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.105714.