
ÇEVRE BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİNDE İLERİ ARAŞTIRMALAR

Editör: Doç.Dr. Elanur ADARYAZAR

Çevre Bilimleri ve Mühendisliğinde İleri Araştırmalar

Editör

Doç. Dr. Elanur ADAR YAZAR

yaz
yayınları

2024

Çevre Bilimleri ve Mühendisliğinde İleri Araştırmalar

Editör: Doç.Dr. Elanur ADAR YAZAR

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-6171-53-4

Aralık 2024 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

info@yazyayinlari.com

İÇİNDEKİLER

Supercritical Water Oxidation And Occupational Health And Safety	 1
---	----------------

Elanur ADAR YAZAR

Atık Yönetimine Sürdürülebilir Bir Bakış Açısı	 23
---	-----------------

Abdullah YINANÇ

Recent Foraminiferal Assemblations In The Eastern Mediterranean (Ar-suz-Hatay/Turkey) And Bio-Ecological Effects Of Toxic Element Pollution On Foraminifera	 41
--	-----------------

Zeki Ünal YÜMÜN

Erol KAM

İklim Değişikliği Etkisinde Elektrik Enerjisi Üretimi	 66
--	-----------------

Serkan KÖÇER

Gülbin FERİDUN

Çevre Mühendisliği Alanında Yenilikçi Uygulamalarda Kullanılan Gaz Kromatografi-Kütle Spektrometrisi (Gc-Ms)	 100
---	------------------

Cihan PALOLUOĞLU

Ceviz Kabuğu ve Pirina Atıklarının Farklı Disiplinlerde Kullanımlarına Yönelik Gelişmeler	 136
--	------------------

Muvahhid KILIÇARSLAN

MUHAMMED BIYIKLI

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

SUPERCRITICAL WATER OXIDATION AND OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY

Elanur ADAR YAZAR¹

1. INTRODUCTION

Supercritical Water Oxidation (SCWO) is a promising closed technology for the rapid, highly efficient, and environmentally friendly disposal of organic waste. This process, carried out under high temperature ($>375^{\circ}\text{C}$) and high pressure ($>22.1\text{ MPa}$), leads to the complete oxidation of organic matter, converting it into harmless products such as CO_2 and H_2O (Vadillo et al., 2018). However, the high temperature and pressure operating conditions of this process pose significant occupational health and safety (OHS) risks for workers in SCWO facilities. This study aims to address the OHS aspects of the SCWO process by examining the associated hazards, risks, and risk mitigation strategies based on risk analysis.

2. SUPERCRITICAL WATER OXIDATION

Supercritical water (SCW), above 374°C and 22.1 MPa , possesses weak hydrogen bonds, low dynamic viscosity, high thermal conductivity, low diffusion coefficient, low density, zero surface tension, high dissolving performance for organic substances and gases, a low ionic product, low inorganic solubility, and a low dielectric constant (Akizuki et al., 2011). Thanks to these properties, SCW is a good solvent for organic substances, while it is not a solvent for inorganic substances, especially salts. SCW has a liquid-like density and a gas-like transport property, which allows for easy extraction from solid materials. SCW is both a solvent and a reactant in the oxidation process.

¹ Assoc. Prof. Artvin Çoruh University, Faculty of Health Sciences, Occupational Health and Safety, aelanur@artvin.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9609-0439.

Being a reactant eliminates the need for dewatering of wastewater. Its function as a catalyst/solvent enables reactions to occur in a short time (Adar et al., 2019).

SCWO utilizes the unique properties of supercritical water to provide efficient and environmentally friendly oxidation of hazardous and non-hazardous organic-containing wastewaters. In SCWO, non-hazardous H_2O_2 , O_2 , and air are used as oxidants. The wastewater is oxidized to CO_2 and H_2O , and oxidation occurs in less than one minute with over 99% efficiency (Schanzenbächer et al., 2002).

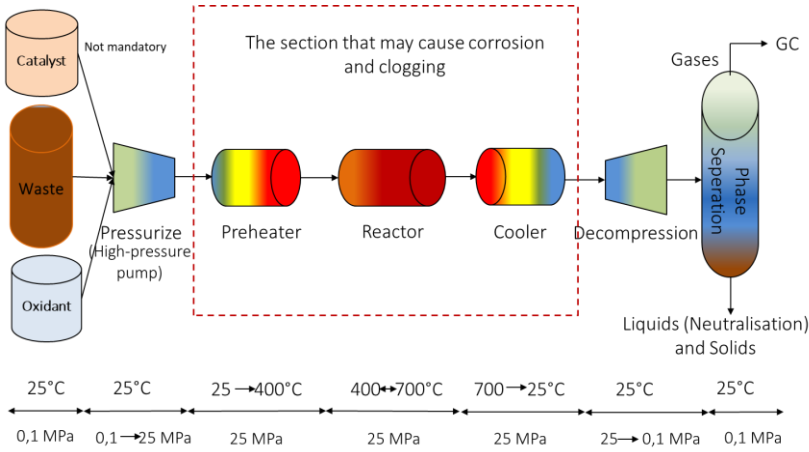
In the classic SCWO process, hazardous/non-hazardous organic wastewaters are heated with an oxidant (oxygen, air, peroxide), water, and a catalyst, if necessary, in the range of 375-650 °C and pressurized at 23 - 25 MPa, and complete oxidation occurs in a short time. Then cooling and depressurization are performed. Gas-liquid-solid product separation is carried out (Figure 1). If possible, excess heat can be recovered to generate steam or electricity (Yang et al., 2019).

In SCWO, N (nitrogen) is commonly converted to NO_3 , NH_4 , and other organic-N in liquid products; and to NH_3 , N_2 , and N_2O in gaseous products (Al-Duri et al., 2016; Yang et al., 2017). Heteroatoms such as Cl, S, and P in the feed solution/wastewater are converted to inorganic acids HCl , H_2SO_4 , and H_3PO_4 (Veriansyah et al., 2005; Wang et al., 2011). These acids, if not neutralized, are a potential source of corrosion for the reactor, especially under subcritical conditions (Marrone and Hong, 2009).

The advantages of the SCWO process as a treatment process compared to other conventional processes are that the reaction time is short, it breaks down organic matter into smaller quantities, simpler structures (smaller molecular weight species), harmless, and biodegradable final products, metals in was-

tewater are oxidized and converted into harmless metal salt forms, meaning that the effluent and emissions after the process are not hazardous or toxic and do not require any complex post-treatment (Loppinet-Serani et al., 2010; Gürbulak, 2019).

Figure 1. SCWO System



The potential of SCWO was recognized in the 1980s. The first commercial SCWO company was MODAR, established in 1980 (and acquired by General Atomics in 1996) (Şentürk, 2015). However, the technology has not yet been fully commercialized. The industrial application of SCWO has been slowed down by issues of corrosion and salt precipitation. To solve these problems, companies and universities are developing more complex reactors. Some facilities that were established have been closed due to technical reasons (corrosion, clogging, explosion, etc.). Some pilot-scale facilities are in operation. Laboratory studies, which are difficult to scale up, are being carried out extensively (Marrone 2013; Adar et al., 2019; Tekbaş, 2019; Zhang et al., 2022).

3. OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY

Occupational health and safety (OHS) is a broad field that encompasses systematic efforts aimed at ensuring and protecting the physical, mental, and social well-being of workers. Defined by the International Labour Organization (ILO) and the World Health Organization (WHO), OHS aims to prevent hazards in workplaces, create a healthy and safe working environment, and reduce work accidents and occupational diseases (Emin 2019).

Historically, legal regulations regarding work accidents and occupational diseases began in the late 19th century, and the scope of OHS has expanded over time. Legal regulations such as the Labor Law No. 4857 and the OHS Law No. 6331 have systematized OHS in Türkiye. The importance of OHS is not only to protect the health and safety of employees but is also critical in preventing work accidents and occupational diseases that affect families, society, and the national economy (Yılmaz 2011; Öztürk et al., 2012; Akpınar and Çakmakkaya, 2014; Faruk, 2015; Çiçek and Öçal, 2016; Emin, 2019; Nuray, 2019). The development and implementation of global OHS standards are ongoing through the cooperation of the ILO and WHO.

4. RISK ANALYSIS

Risk assessment is carried out through teamwork (employer, OHS specialist, physician, employee representative, etc.) and is repeated at certain intervals (every 2-6 years) depending on the hazard level (low-hazard, hazardous, very hazardous) (Official Gazette 2012). The control process includes prioritizing risks, eliminating or minimizing them, implementing and monitoring control measures. Collective measures should be prioritized, and personal protective equipment should be used as a supplementary measure (Melek 2020; Gurbet 2021).

Risk analysis methods vary, including qualitative (PHA, HAZOP, SWOT, etc.), quantitative (L matrix, X matrix, etc.), and hybrid (FMEA, FTA, ETA, etc.) methods (Erginel 2004; Özkılıç 2007; Hubbards and Evans, 2010; Taşdemir and Altın, 2017). Each method has its advantages and disadvantages; for example, quantitative methods provide more precise results with numerical data, while qualitative methods allow for more comprehensive evaluations. The method to be chosen should be determined according to the characteristics of the business and the risk profile (Gurbet 2021). European Union and ILO regulations hold employers responsible for conducting risk assessments and taking necessary measures (Taşdemir and Altın, 2017). In conclusion, risk analysis is a crucial process that forms the basis of OHS and is vital in preventing work accidents and occupational diseases.

The L-type (5x5) matrix method is a simple risk assessment method that calculates a risk score by evaluating the probability of an event occurring and the severity of its consequences (Özkılıç 2005). The biggest advantage of the method is that it can be easily applied by a single expert. By determining cause-and-effect relationships, it reveals hazards and related risks that require priority measures to be taken. Using Table 1 and Table 2, probability and severity values are determined by the expert for each hazard. The risk priority number is calculated by multiplying the probability and severity of the event. In the L-type matrix method, 1 is evaluated as an acceptable risk; 2-6 as a low-level risk; 8-12 as a medium-level risk; 15-20 as a high-level risk; and 25 as an unacceptable risk. Work should not be carried out in hazards with RPN values above 15 without taking the necessary measures (Özkılıç 2005).

Table 1. Probability Values for L-Type Matrix (Özkılıç 2005)

Likelihood	Rating	Probability of Occurrence
Very Low	1	Almost never
Low	2	Very rare (Once a year)
Medium	3	Rare (A few times a year)
High	4	Frequent (Once a month)
Very High	5	Very frequent (Once a week, every day)

Table 2. Severity Values for L-Type Matrix (Özkılıç 2005)

Consequence	Rating	Description
Very Slight	1	No lost work time, first aid required
Slight	2	No lost work days, outpatient treatment
Moderate	3	Minor injury, bed rest treatment
Serious	4	Serious injury, prolonged treatment, occupational disease
Very Serious	5	Death, disability

The SCWO process involves various hazards and risks due to its operation under high pressure and temperature conditions, the use of toxic and corrosive oxidants, the processing of hazardous and inorganic-containing wastewater, and potential explosion risks. These hazards and risks have been identified in detail, and their impacts have been classified as low, medium, and high levels in terms of human health, cost, environmental

damage, and corporate reputation, as shown in Table 3. Their risk priority numbers (RPNs) are presented in Table 4, calculated using the L-type matrix method. Therefore, Tables 3 and 4 provide a risk analysis that quantitatively and qualitatively evaluates the potential hazards and risks of the SCWO process and the relative importance of these risks.

The analysis of Table 3 shows that explosions caused by high pressure and clogging pose the most serious risk in terms of human health, cost, environmental impact, and corporate reputation among various sources of hazards. Similarly, fire, explosion, and corrosion incidents that may be caused by chemical reactions are also ranked at the highest hazard level. Other hazard sources pose low or medium levels of risk.

Table 4 shows the risk priority numbers calculated based on the probability and severity values determined using an L-type matrix. Considering the magnitude of the hazard's impact, RPN values are ranked from highest to lowest. According to this ranking, explosion due to clogging has the highest risk priority number and is ranked first. Corrosion caused by high temperature, oxidants, and inorganic-containing wastewater, as well as risks caused by work stress, are identified as other significant hazards. In the event of these high-priority hazards, operations should not commence without taking the necessary measures and reducing the risks. Although an explosion caused by clogging is more dangerous than other hazards, it has been evaluated as a medium-level risk due to its moderate probability despite its high severity. It is mandatory to take measures for medium-level risks in a suitable timeframe. For low-level risks, routine checks are sufficient, but measures should be taken when necessary. In the SCWO process risk analysis, no risk was identified at the 25 (unacceptable) or 1 (acceptable) levels. This indicates that the scale and evaluation criteria used in the analysis were designed to cover all risks and that the risks are at a manageable level.

Table 3. Hazards, Risks, and Impacts for SCWO

Hazards	Risks	Impacts (Low-Medium-High)			
Physical		Human	Cost	Environment	Prestige
High Pressure	Explosion	High	High	High	High
	Corrosion	Low	Medium	Medium	Low
High Temperature	Corrosion	Low	Medium	Medium	Low
	Fire	Medium	Medium	Medium	Medium
	Burning of employees	Low	Low	Low	Low
Noise	Hearing problems in employees	Medium	Medium	Low	Low
	Environmental complaint	Medium	Medium	Medium	Medium
Odor	Illness of employees (allergies, respiratory diseases, etc.)	Medium	Medium	Low	Low
	Environmental complaint	Medium	Medium	Medium	Medium
Blockage	Explosion	High	High	High	High
Sudden pressure drop	System inefficiency	Low	Low	Low	Low
Temperature-pressure irregularity	System inefficiency	Low	Low	Low	Low

Chemical					
Oxidant use	Corrosion	Low	Me- dium	Medium	Low
	Irritation in em- ployees	Me- dium	Low	Low	Low
Toxic gas production	Air pollution	Me- dium	Low	Medium	Low
	Illness of employees	Me- dium	Low	Low	Low
	Environmental comp- laint	Me- dium	Me- dium	Medium	Me- dium
Corrosive environ- ment	Corrosion	Low	Me- dium	Medium	Low
	Additional cost incre- ase	Low	Me- dium	Low	Low
	Toxic gas emissions- air pollution	Me- dium	Low	Medium	Low
Chemical reactions	Fi- re/Explosion/Corrosio n	High	High	High	High
Biological					
Wastewater use	Infection in em- ployees	Me- dium	Me- dium	Low	Low
Electricity					
Electric	Fire	Me- dium	High	Low	Me- dium
	Electrocution of emp-	High	Me-	Low	Me-

	loyees		dium		dium
Psychoso- cial					
Psychoso- cial	Stress/headaches etc. in employees	Me- dium	Low	Low	Low
Other					
Employee errors	System inefficiency	Low	Me- dium	Low	Low
	Increasing dangers	Me- dium	Me- dium	Medium	Low
Mechani- cal- structural failures	System inefficiency	Low	Me- dium	Low	Low
	Additional cost incre- ase	Low	Me- dium	Low	Low
	Leakage- environmental pollu- tion	Me- dium	Me- dium	Medium	Low
Material non- conformity	Corrosion	Low	Me- dium	Low	Low
	Additional cost incre- ase	Low	Me- dium	Low	Low

Table 4. RPN Values and Rankings for SCWO

Hazard	Risk	Probabi- lity	Seve- rity	RP N	Ran k
Physical					
High Pressu- re	Explosion	3	4	12	5
	Corrosion	4	3	12	6
High Tempe- rature	Corrosion	5	3	15	2
	Fire	2	4	8	18
	Burning of employees	4	2	8	19
Noise	Hearing problems in employees	4	3	12	8
	Environmental compla- int	4	2	8	21
Odor	Illness of employees (allergies, respiratory diseases, etc.)	4	2	8	20
	Environmental compla- int	4	2	8	22
Blockage	Explosion	4	4	16	1
Sudden pressure drop	System inefficiency	3	2	6	28
Temperatu- re-pressure irregularity	System inefficiency	3	2	6	29
Chemical					

Oxidant use	Corrosion	5	3	15	3
	Irritation in employees	3	2	6	25
Toxic gas production	Air pollution	3	2	6	26
	Illness of employees	3	3	9	13
	Environmental complaint	4	2	8	23
Corrosive environment	Corrosion	4	3	12	9
	Additional cost increase	4	2	8	24
	Toxic gas emissions-air pollution	3	2	6	27
Chemical reactions	Fire/Explosion/Corrosion	3	4	12	7
Biological					
Wastewater use	Infection in employees	3	3	9	15
Electricity					
Electric	Fire	2	4	8	16
	Electrocution of employees	2	4	8	17
Psychosocial					
Psychosocial	Stress/headaches etc. in employees	5	3	15	4

Other					
Employee errors	System inefficiency	3	2	6	32
	Increasing dangers	3	3	9	14
Mechanical-structural failures	System inefficiency	3	2	6	31
	Additional cost increase	4	3	12	10
	Leakage-environmental pollution	2	3	6	30
Material non-conformity	Corrosion	4	3	12	10
	Additional cost increase	4	3	12	12

The OHS precaution strategies that can be implemented for the identified risks in the SCWO process vary depending on the type and severity of the risk. However, a comprehensive approach can be created by combining the following strategies:

High Risks ($RPN \geq 15$) and OHS Measures:

1. The Risk of Explosion Due to Clogging: RPN 16: This is the highest risk. As a precaution:

Engineering Controls:

Process Design: Designing the system to be resistant to clogging (e.g., appropriate pipe diameters, fluid dynamics simulations, appropriate material selection, filter systems).

Explosion Prevention Systems: Installing and regularly testing safety systems such as explosion suppression systems

and pressure relief valves to prevent or reduce the effects of an explosion.

Automatic Shutdown Systems: Installation of sensors and automatic shutdown systems that detect clogging or pressure increase.

Operating Procedures:

Operating Instructions: Preparation of clear and comprehensive operating instructions and training of employees.

Regular Inspection and Maintenance: Regular inspection, cleaning, and maintenance of the system.

Emergency Plans: Creation of a comprehensive emergency plan that identifies the procedures to follow in the event of clogging or an explosion, and conducting drills for employees.

2. The Risk of High Temperature and Corrosion: RPN 15

Engineering Controls:

Material Selection: Selection of corrosion-resistant materials (e.g., special alloys, specific grades of stainless steel).

Thermal Insulation: Ensuring temperature control by using thermal insulation.

Temperature Control Systems: Use of sensitive temperature sensors and control systems to continuously monitor and control temperature.

Corrosion Inhibitors: Use of appropriate corrosion inhibitors.

Operating Procedures:

Temperature Monitoring: Continuous monitoring of the system temperature and taking precautions against abnormal temperature increases.

Preventive Maintenance: Implementation of regular maintenance and cleaning procedures to prevent corrosion.

3. The Risks Arising from Employee Stress: RPN 15

Ergonomic Design: Designing and organizing workstations ergonomically.

Employee Training: Providing comprehensive training on occupational safety, emergency procedures, and stress management.

Motivation and Support: Creating a safe and supportive work environment, balanced distribution of workload, and establishing open communication channels.

Psychological Counseling: Providing psychological support to employees when needed.

4. General OHS Measures:

Personal Protective Equipment (PPE): Provision and use of appropriate PPE (e.g., heat-resistant gloves, protective goggles, respiratory masks).

Emergency Equipment: Ensuring that emergency equipment (e.g., fire suppression systems, emergency showers, eyewash stations) are in place and in working order.

Safety Data Sheets (SDS): Ensuring that SDSs for all chemicals used are accessible and available to employees.

Regular Audits and Inspections: Conducting regular audits and inspections to assess and improve the effectiveness of OHS procedures.

Compliance with OHS Regulations: Ensuring that all OHS activities are carried out in accordance with relevant national and international standards and guidelines.

These strategies should be implemented as part of an integrated approach to enhance the safety of the SCWO process and protect employee health. Appropriate OHS precaution strategies should be determined and implemented, taking into account the specific conditions of each facility. This should be based on risk assessment and a risk management plan.

Medium Risks (RPN 9-14):

Similar measures to the above should be applied for medium risks, but the frequency and scope may be less intensive. For example, fire prevention and suppression systems for the risk of fire/explosion/corrosion due to chemical reactions, health checks, and personal protective equipment for the risks of employees falling ill should be reviewed regularly.

Low Risks (RPN <9):

For low risks, regular checks and routine maintenance will be sufficient. However, these risks should not be neglected, and measures should be taken when necessary.

Monitoring and Reporting: Regular reporting of these types of risks and prioritization when necessary can be ensured.

The PDCA (Plan, Do, Check, Act) cycle can be used in the implementation of these plans in accordance with the principle of continuous improvement.

5. CONCLUSION

In this study, a comprehensive risk analysis was conducted to evaluate the risks of the supercritical water oxidation (SCWO) process. Using an L-type decision-making matrix, risk priority numbers (RPNs) were calculated considering probability and severity values. The analysis results showed that the most significant risks in the SCWO process are explosions caused by clogging, high temperature and corrosion caused by oxidant and inorganic wastewater content, as well as risks arising from employee stress. In particular, explosions that may occur as a result of clogging, despite having a high severity potential, were classified as a medium-level risk due to their moderate probability, but they were still identified as the highest priority risk. For medium and low-level risks, measures to reduce risks and regular controls were recommended. This study plays an important role in identifying the measures required for the safe and efficient operation of the SCWO process and in developing risk management strategies. Reducing risks will ensure that the environmental benefits of SCWO technology can be utilized more safely and efficiently.

REFERENCE

- Adar, E., İnce, M., Bilgili, M.S. (2019). Evaluation of development in supercritical water oxidation technology. *Desalin. Water Treat*, 161, 243-253.
- Akizuki, M., Tomita K., Oshima Y. (2011). Kinetics of solid acid catalyzed 1- octene reactions with TiO_2 in sub- and supercritical water. *Journal of Supercritical Fluids*, 56(1), 14–20.
- Akpınar, T., & Çakmakkaya, B.Y. (2014). İş sağlığı ve güvenliği açısından işverenlerin risk değerlendirme yükümlülüğü. *Çalışma ve Toplum-Ekonomi ve Hukuk Dergisi*, 40, 2014-1.
- Al-Duri, B., Alsoqyiani F., Kings I. (2016). Supercritical water oxidation (SCWO) for the removal of N-containing heterocyclic hydrocarbon wastes. Part I: Process enhancement by addition of isopropyl alcohol. *Journal of Supercritical Fluids*, 116, 155–163.
- Çiçek, Ö. & Öçal, M. (2016). Dünya da ve Türkiye’de iş sağlığı ve iş güvenliğinin tarihsel gelişimi. *Emek ve Toplum Dergisi*, 11, 106-129.
- Derya, K. (2019). *Bir kömür madeninde iş sağlığı ve güvenliği risk değerlendirmesi için uygun yöntem seçimi* (Master thesis). Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- Emin, T. (2019). *İş hayatında iş sağlığı ve güvenliğinin sağlanması ve geliştirilmesi* (Master thesis). İstanbul Medeniyet Üniversitesi, İstanbul.
- Erginel, M.N. (2004). Tasarım hata türü ve etkileri analizinin etkinliği için bir model ve uygulaması. *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 15(3), 17-26.

- Faruk, E. (2015). *İşletmelerde iş sağlığı ve güvenliğinin sağlanmasında önleyici uygulamaların önemi* (Master thesis). Beykent Üniversitesi, İstanbul.
- Gurbet, E. (2021). *Bir yeraltı maden işletme tesisinde iş sağlığı ve güvenliği uygulamaları ve farklı değerlendirme yöntemlerinin karşılaştırılması* (Master thesis). Dicle Üniversitesi, Diyarbakır.
- Gürbulak E. (2019). *Mühimmat endüstrisi atıksularının süperkritik su oksidasyonu ile arıtılabilirliğinin araştırılması* (Doktora tezi), Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli.
- Hubbards, D., & Evans, D. (2010). Problems with scoring methods and ordinal scales in risk assessment. *IBM Journal of Research and Development*, 54(3).
- Kurt, M., Ceylan, H. (2001). İş güvenliğinde tehlike değerlendirme teknikleri. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14, 1117-1130.
- Loppinet-Serani, A., Aymonier, C., Cansell, F. (2010). Supercritical water for environmental Technologies. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 85(5), 583–589.
- Marrone, P.A., & Hong, G.T. (2009). Corrosion control methods in supercritical water oxidation and gasification processes. *The Journal of Supercritical Fluids*, 51, 83-103.
- Melek, E. (2020). *Türkiye’de elektrik işlerinde iş sağlığı ve güvenliği çalışmalarının teknik ve idari açıdan incelenmesi (hidroelektrik santrali örneği)* (Master thesis). İstanbul Esenyurt Üniversitesi, İstanbul.
- Nuray, Ç. (2019). *Sanayinin geleceği endüstri 4.0 ve iş sağlığı ve güvenliği* (Master thesis). İstanbul Medeniyet Üniversitesi, İstanbul

- Özkılıç, Ö. (2005). *İş sağlığı ve güvenliği, yönetim sistemleri ve risk değerlendirme metodolojileri*. TİSK Yayınları.
- Özkılıç, Ö. (2007). *İş sağlığı, güvenliği ve çevresel etki risk değerlendirmesi*. TİSK Yayınları.
- Öztürk, H., Babacan, E. & Anahar, E.Ö. (2012). Hastanede çalışan sağlık personelinin iş güvenliği. *Gümüşhane Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi*, 1 (4), 252-268.
- Marrone, P.A. (2013). Supercritical water oxidation-current status of full-scale commercial activity for waste destruction. *J. Supercrit. Fluids*, 79, 283–288.
- Resmi Gazete. (2012). *İş sağlığı ve güvenliği risk değerlendirmesi yönetmeliği*.
<https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2012/12/20121229-13.htm> (22.09.2024).
- Schanzenbächer, J., Taylor, J.D., Tester, J.W. (2002). Ethanol oxidation and hydrolysis rates in supercritical water. *Journal of Supercritical Fluids*, 22(2), 139–147
- Şentürk, S. (2015). *Deterjan fabrikası atık suyunun süperkritik su oksidasyonu yöntemi ile arıtımı* (Master Thesis). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Taşdemir, Ş. & Altın, M. (2017). *İş sağlığı ve güvenliği*. Eğitim Yayınevi, Türkiye.
- Tekbaş, M. (2019). *Arıtma çamurlarının süperkritik su oksidasyonu ile arıtılabilirliğinin araştırılması* (PhD Thesis). Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli.
- Vadillo, V., Sánchez-Oneto, J., Portela, J.R., & de la Ossa, E.J.M. (2018). *Supercritical water oxidation*. In *Advanced Oxidation Processes for Waste Water Treatment*, Elsevier.

- Veriansyah, B., Kim, J.D., Lee, J.C., Lee, Y.W. (2005). OPA oxidation rates in supercritical water. *Journal of Hazardous Materials*, 124 (1–3), 119–124.
- Wang, S., Guo, Y., Chen, C., Zhang, J., Gong, Y., Wang, Y. (2011). Supercritical water oxidation of landfill leachate. *Waste Management*, 31 (9–10), 2027–2035.
- Yang, B., Shen, Z., Cheng, Z., Ji, W. (2017). Total nitrogen removal, products and molecular characteristics of 14 N-containing compounds in supercritical water oxidation. *Chemosphere*, 188, 642–649.
- Yang, J., Wang, S., Li, Y., Zhang, Y., Xu, D. (2019). Novel design concept for a commercial-scale plant for supercritical water oxidation of industrial and sewage sludge. *Journal of Environmental Management*, 233, 131–140.
- Yilmaz, F. (2011). *Avrupa birliği ve Türkiye’de iş sağlığı ve güvenliği: Türkiye’de iş sağlığı ve güvenliği kurullarının etkinlik düzeyinin ölçülmesi* (PhD Thesis). İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Zhang, F., Li, Y., Liang, Z., Wu, T. (2022). Energy conversion and utilization in supercritical water oxidation systems: A review. *Biomass and Bioenergy*, 156, 106322.

ATIK YÖNETİMİNE SÜRDÜRÜLEBİLİR BİR BAKIŞ AÇISI

Abdullah YİNANÇ¹

1. GİRİŞ

Küresel nüfus artışı, hızlı kentleşme ve tüketim alışkanlıklarındaki değişiklikler, atık üretimini küresel çapta belirgin bir şekilde artırmıştır. Bu durum çevresel bozulma, kaynakların tükenmesi ve iklim değişikliği gibi önemli sorunları beraberinde getirmektedir. Yaşanan bu sorunlar başta insanlar olmak üzere bütün canlıların yaşamını ve geleceğini tehdit etmekte sosyal ve ekonomik birtakım sorunlara neden olmaktadır (Murat ve Şengül, 2024: 717). Geleneksel atık yönetimi stratejileri yalnızca atığın bertaraf edilmesine odaklanmakta ve uzun vadede uygulanabilir bir çözüm sunamamaktadır. Bu ortamda, atık yönetiminde sürdürülebilir bir yaklaşımın benimsenmesi, çevreye duyarlı, ekonomik ve sosyal avantajlar sağlayan kapsamlı çözümlerin formüle edilmesi için oldukça önemli hale gelmiştir.

Teknolojik gelişmeler ve artan sanayileşme ile birlikte kentleşme ve nüfus artışının hızlanması, hem ulusal hem de küresel ölçekte çevre üzerinde baskı oluşturmuştur (Gündüzalp ve Güven, 2016: 2). Antropojenik çevresel değişiklikler insanların yaşamsal faaliyetlerini önemli ölçüde etkilemektedir (Şengül ve Murat, 2024: 342). Son yıllarda, nüfus artışının bir sonucu olarak doğal kaynaklar hızla tükenmektedir. İsteklerin sınırsız, doğal kaynakların ise sınırlı olduğu düşünüldüğünde, kaynak kullanımında verimliliğin sağlanması ve atıklardan ekonomik fayda elde edilmesi, yani atık yönetimi önemlidir.

¹ Doç, Dr. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, ayinanc@nku.edu.tr ORCID: 0000-0002-8144-8266

Atık azaltma ve geri dönüşüm ile ilgili tüm konular atık yönetimini kapsamaktadır (Öktem, 2016: 135). Sanayileşmiş ülkelerin çoğu atık yönetimi uygulamalarında başarılı olsa da bu konu ekonomik olarak gelişmekte olan ülkelerde önemli bir sorun olmaya devam etmektedir (Ömürbek, 2019: 125). Kalkınma yarışında geride kalan gelişmekte olan ülkelerde, etkili atık yönetimi, kaynak israfını ortadan kaldırmak ve kaynak verimliliğini artırmak, dolayısıyla sınırlı doğal kaynaklarının kullanımını optimize etmek için çok değerli bir girişim olarak kabul edilmektedir (Şahin ve Önder, 2021: 198).

Küreselleşmenin etkisiyle sanayileşme ve kentleşmedeki gelişmeyle birlikte kaynaklar bilinçsizce yok edilmeye başlanmış ve tüketim faaliyetleri çok yüksek seviyelere ulaşmıştır. Bu tüketim atık üretmektedir. Artan atık sorunu bireyleri, toplumları ve çevreyi olumsuz etkilemektedir. Sonuç olarak, atığın yönetimi ve sürdürülebilirliği tüm dünya için kritik öneme sahiptir. Atık yönetimi, doğal kaynakların korunması, çevresel sonuçların hafifletilmesi ve sosyal refahın teşvik edilmesi için çok önemli bir konudur. Geleneksel atık yönetimi yaklaşımları genellikle atıkların bertaraf edilmesine odaklanırken, sürdürülebilir bir bakış açısı atıkların en aza indirilmesini, yeniden kullanılmasını ve geri dönüştürülmesini amaçlamaktadır ve bu çalışma sürdürülebilir bir atık yönetimi konusuna odaklanmaktadır.

2. ATIK VE ATIK YÖNETİMİ

En basit tanımıyla atık, kullanım dışı kalmış yada bırakılmış her şey olarak tanımlanır. Resmi Gazete'nin 02.04.2015 tarihli ve 29314 sayılı nüshasında yayımlanan Atık Yönetimi Yönetmeliği, atığı “üreticisi veya fiilen elinde bulunduran gerçek veya tüzel kişi tarafından çevreye atılan veya bırakılan ya da atılması zorunlu olan herhangi bir madde veya materyal” olarak tanımlamaktadır (T.C. Resmi Gazete, 2015: 1). Atıklar fiziksel durumlarına göre (katı, sıvı, gaz), orijinal kullanımlarına göre

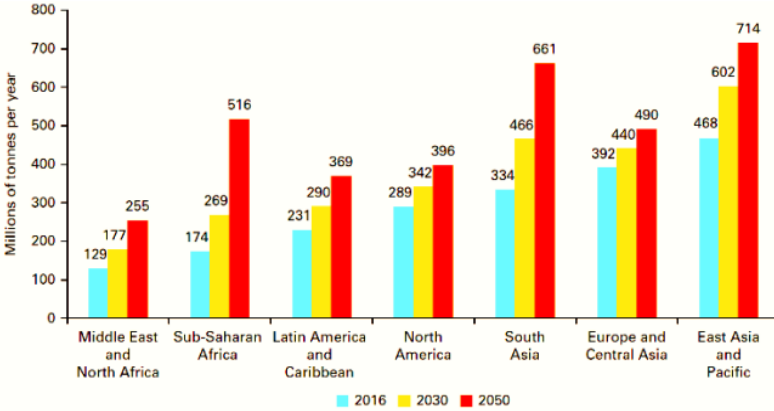
(ambalaj atıkları, gıda atıkları vb.), bileşen malzemelerine göre (plastik, cam, kağıt vb.), fiziksel özelliklerine göre (yanıcı, geri dönüştürülebilir vb.), değer oranlarına göre değersiz, az, orta yada değersiz) ve güvenlik seviyelerine göre (tehlikeli, tehlikesiz) göre sınıflandırılabilir (McDougall vd., 2008: 2 ve A., Yinanç 2023). Ayrıca atıklar; belediye atıkları, tehlikeli atıklar, endüstriyel atıklar, tıbbi atıklar, inşaat ve moloz atıkları, radyoaktif atıklar, maden atıkları, tarım ve bahçe atıkları olarak ifade edilmektedir (Pichtel, 2005). Atıklar Atık Yönetimi Yönetmeliği Ek 4’te yer alan listeye göre ise 20 gruba ayrılmaktadır. Bu atıklar Tablo 1’de verilmektedir.

Tablo 1. Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik Ek-4 Atık Listesi

	Atık İsimleri
1	Madenlerin Aranması, Çıkarılması, İşletilmesi, Fiziki ve Kimyasal İşlem Sırasında Ortaya Çıkan Atıklar
2	Tarım, Bahçivanlık, Su Kültürü, Ormancılık, Avcılık ve Balıkçılık, Gıda Hazırlama ve İşlemeden Kaynaklanan Atıklar
3	Ahşap İşleme ve Kâğıt, Karton, Kâğıt Hamuru, Panel (Sunta) ve Mobilya Üretiminden Kaynaklanan Atıklar
4	Deri, Kürk ve Tekstil Endüstrilerinden Kaynaklanan Atıklar
5	Petrol Rafinasyonu, Doğal Gaz Saflaştırma ve Kömürün Piroolitik İşlenmesinden Kaynaklanan Atıklar
6	Anorganik Kimyasal İşlemlerden Kaynaklanan Atıklar
7	Organik Kimyasal İşlemlerden Kaynaklanan Atıklar
8	Astarlar (Boyalar, Vernikler ve Vitriye Emayeler), Yapıştırıcılar, Macunlar ve Baskı Mürekkeplerinin Üretim, Formülasyon, Tedarik ve Kullanımından Kaynaklanan Atıklar
9	Fotoğraf Endüstrisinden Kaynaklanan Atıklar
10	Isıl İşlemlerden Kaynaklanan Atıklar
11	Metal ve Diğer Malzemelerin Kimyasal Yüzey İşlemi ve Kaplanması İşlemlerinden Kaynaklanan Atıklar; Demir Dışı Hidrometalurjik
12	Metallerin ve Plastiklerin Fiziki ve Mekanik Yüzey İşlemlerinden ve Şekillendirilmesinden Kaynaklanan Atıklar
13	Yağ Atıkları ve Sıvı Yakıt Atıkları (Yenilebilir Yağlar, 05 ve 12 Hariç)
14	Atık Organik Çözücüler, Soğutucular ve İtici Gazlar (07 ve 08 Hariç)
15	Atık Ambalajlar; Başka Bir Şekilde Belirtilmemiş Emiciler, Silme Bezleri, Filtre Malzemeleri ve Korumucu Giysiler
16	Listede Başka Bir Şekilde Belirtilmemiş Atıklar
17	İnşaat ve Yıkım Atıkları (Kirlenmiş Alanlardan Çıkarılan Hafriyat Dahil)
18	İnsan ve Hayvan Sağlığı ve/veya Bu Konulardaki Araştırmalardan Kaynaklanan Atıklar (Doğrudan Sağlığa İlişkin Olmayan Mutfak ve Restoran Atıkları Hariç)
19	Atık Yönetim Tesislerinden, Tesis Dışı Atık Su Arıtma Tesislerinden ve İnsan Tüketimi ve Endüstriyel Kullanım İçin Su Hazırlama Tesislerinden Kaynaklanan Atıklar
20	Ayrı Toplanmış Fraksiyonlar Dahil Olmak Üzere Belediye Atıkları (Evsel Atıklar ve Benzer Ticari, Endüstriyel ve Kurumsal Atıklar)

Atık yönetimi, atık miktarının artmasının çevresel, sosyal ve ekonomik alanlarda olumsuz etkilere sahip olması nedeniyle giderek daha da önemli bir konu haline gelmiştir (Aydın ve Deniz, 2017: 435). Atık yönetimi, tarih boyunca farklı amaçlarla da olsa her zaman gündemde olmuştur. Halk sağlığı, çevresel kaygılar veya atığın ekonomik değeri atık yönetiminin başlıca nedenleridir (Veral, 2018: 13). Atık yönetimi, "atıkların oluşumunu önleme, kaynağında azaltma, yeniden kullanma, özelliklerine ve türlerine göre ayırma, biriktirme, toplama, geçici depolama, taşıma, geçici depolama, geri dönüştürme, geri kazanma, enerji geri kazanımı dahil, bertaraf etme, bertaraf işleminden sonra izleme, kontrol etme ve denetleme faaliyetlerini" ifade eder (Atık Yönetimi Yönetmeliği, 2015, Madde 4). Dünya Bankası (Worldbank, 2023) verilerine göre;

yıllar ve bölgeler için atık üretimi büyüme oranları tahmin edilmiştir. Küresel atığın 2050 yılına kadar 3,40 milyar tonu aşacağı ve bu süre zarfında nüfus artış hızının iki katından fazla artacağı tahmin edilmektedir.



Şekil 1. Bölgeye Göre Yordanan Atık Üretimi (milyon ton/yıl) (Worldbank, 2023).

Şekil 1’de belirtilen gerçeklere dayanarak, atık önümüzdeki yıllarda daha da büyük bir sorun haline gelecektir. Bu nedenle, sürdürülebilir ve yaşanabilir şehirler yaratmak etkili bir atık yönetimi gerektirmektedir. Etkin atık yönetimi için sürdürülebilir ve sosyal sorumluluk sahibi entegre sistemler gereklidir (Worldbank, 2023).

Verimli atık yönetimi, sınırlı doğal kaynakların ve hammaddelerin korunmasını da garanti edebilir. Atık olarak değerlendirilen maddelerin önemli bir kısmı geri dönüştürülebilir ve karlı ve sürdürülebilir uygulamalar için yeniden kullanılabilir (Gündüz, 2021). 02.04.2015 tarihli Atık Yönetimi Yönetmeliği, atık oluşumunun en aza indirilmesi, atıkların insan ve çevre sağlığını etkilemeden bertaraf edilmesi, yeniden kullanılması, geri dönüştürülmesi ve doğal kaynakların kullanımının sınırlandırılması gibi konuların nasıl ve kim tarafından yapılacağını düzenlemektedir. İlgili yönetmelik, doğal kaynak tüketimini en aza indiren teknolojik gelişmeler yoluyla atık üretimi, kullanımı, geri kazanımı ve bertarafının teşvik edilmesi, dayanıklı, tekrar kullanılabilir ve geri dönüştürülebilir ürünlerin tasarlanması, atıkların toplanması, taşınması, geri dönüştürülmesi ve bertarafı süreçleri sırasında insanlara, çevreye ve diğer organizmalara yönelik riskleri azaltan yöntemlerin uygulanması ve atıkların doğrudan denizlere, göllere, nehirlere veya benzer alıcı ortamlara atılmasının yasaklanması dahil olmak üzere çeşitli ilkeler belirlemiştir (Atık Yönetimi Yönetmeliği, 2015).

3. ATIK HİYERARŞİSİ

Atık Yönetimi, evsel, tıbbi tehlikeli ve tehlikesiz atıkların en aza indirilmesi, kaynakta ayrıştırılması, ara depolama, ihtiyaç halinde aktarma istasyonlarının kurulması, taşınması, geri kazanımı, bertarafı, geri kazanım ve bertaraf tesislerinin işletilmesi, kapatılması, kapatma sonrası bakımı, izleme ve kontrol süreçlerini kapsayan sistematik bir yaklaşımdır (Öktem,

2016:138). Atıkların toplanması, taşınması, işlenmesi, bertaraf edilmesi ve izlenmesi atık yönetimine dahildir. Çevresel etkileri en aza indirmek ve doğal kaynakları korumak için gelişmiş atık yönetim sistemleri öncelikli planlar oluşturur. Atık üretiminin azaltılması, bu taktiklerin temelini oluşturan atık yönetimi hiyerarşisinin hedefidir (Demirbaş, 2011). Hiyerarşik olarak atıkların yönetimi Şekil 2’de gösterilmektedir (Parker, 2010: 143).

Şekil 2. Hiyerarşik olarak atık yönetimi



Şekil 2’deki piramidin tepesindeki önleme aşaması atık yönetimi hiyerarşisinde en çok tercih edilen seçenektir, oysa tabandaki bertaraf en son önceliklendirilecek seçenektir (EU, 2008: 10). Şekil 2’de yukarı doğru çıkıldıkça sürdürülebilirlik ve çevresel alternatifler çoğalmaktadır (Öktem, 2016:140)

Atık yönetimi metodolojileri şunlardır: Entegre atık yönetimi stratejisi, sürdürülebilir atık yönetimi stratejisi, sıfır atık yönetimi stratejisi. Sıfır atık yönetim sistemi atık üretimini en aza indirme, atıkları kaynakta ayırma, geçici depolama, taşıma ve işleme aşamalarının tümünü kapsar. Sistem, fayda ve maliyet fikirleri göz önünde bulundurularak oluşturulmuştur (SAY, 2019).

4. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK

Sürdürülebilirlik ilkesi nesiller arasındaki kalıcı ilişkiyi vurgular. Çevre biliminde sürdürülebilirlik, gelecek nesillerin aynı kaynaklara olan gereksinimlerini göz önünde bulundurarak çağdaş doğal kaynakların akıllıca kullanımıyla ilgilidir. Sürdürülebilirlik, gelecek nesillerin uzun vadede doğal kaynaklardan elde ettiği tüm fayda düzeyinin devamıdır (Pezzey, 1997). Sürdürülebilir kalkınmanın ele alınmasının gerekliliği 1992 Rio Konferansı'nda vurgulanmıştır. Sonuç elde etmeyi engelleyen pahalı, bürokratik, yavaş, çoğunlukla da etkili ve hızlı metodolojilere güvenmek yerine, daha yeni olan 'sürdürülebilir' paradigmaya dayalı alternatifler ortaya çıkmıştır. Sürdürülebilir kalkınma anlayışı, çevresel sorunlara yönelik önleyici bir stratejiyi vurgular (Zeytin ve Kırlioğlu, 2014: 239). Morelli (2011), doğal kaynakların sınırlı olduğunu ve akıllıca kullanılması gerektiğini belirterek çevresel sürdürülebilirliğin önemini vurgular. Bu kavram, tüm hayat formlarının çevresel sürdürülebilirlik için önemli bir sorumluluk taşıdığını ve doğal kaynakların korunması gerektiğini göstermektedir. Çevresel sürdürülebilirlik, doğal kaynakları koruma, atık ve kirliliği en aza indirme, geri dönüşümü savunma ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını artırma gibi eylemleri içerirken, aynı zamanda çevrenin uygun yasal kısıtlamalar ve koşullarla korunması gerektiğini de savunmaktadır.

Dünyanın daha yaşanılabilir olması ve kaynaklarının gelecek nesillere aktarılabilmesi için, ürün üretiminde kullanılan sistemlerin, sürdürülebilir kaynak kullanımına katkı sağlaması gerekmektedir (Mercan, 2022: 129). Bu bağlamda sürdürülebilirlik, çevresel korumayla uyumlu bir hayat tarzını teşvik ederek sosyal ve ekonomik çabalar için yeni bir paradigmayı temsil eder (Murcott, 1997). Sürdürülebilir kalkınmanın temel ilkesi, doğal hayat destek sistemlerinin uzun vadeli yaşayabilirliğini garanti altına almak, ekolojik zararı ortadan kaldırmak ve doğayı

içsel süreçleri içinde korumaktır. Kaynak tüketimini düzenlemek, ekolojik hesap verebilirlik için esastır. Bu çerçevede, yenilenebilir kaynakların kullanımı yenilenebilir kapasitelerinin altında kalmalı, yenilenemeyen kaynakların tüketimi ise yenilenebilir kaynakların gelişim potansiyelini aşmamalıdır. Kirlilik, ekolojik bileşen tarafından emredildiği gibi ekosistemin özümleme kapasitesini aşmamalıdır (Mengi ve Algan, 2003: 10-11). Bu noktada sürdürülebilir hayat alanlarının oluşturulabilmesinde atık yönetimi ve pek çok diğer tehditler için aslında bu tehditleri oluşturan insanoğlunun bu konuları önemsemesinin ve önlemler almasının gerekliliğinin farkına varmasının önemi büyüktür (Cansaran, 2020). ‘Akan su pislik tutmaz’ diyen atalarımız, suyun doğal halde arıtma kapasitesi olduğunu vurgulayarak, haddi aşan kapasite fazlası kirliliğin çöküntü oluşturacağını vurgulamıştır.

5. SÜRDÜRÜLEBİLİR ATIK YÖNETİMİ

Atık yönetimi, atık azaltma ve geri dönüşümün kolaylaştırılmasıyla ilişkili tüm eylemleri kapsar. Bu bağlamda, kamu-özel sektör ortaklıkları etkili atık piyasası uygulamaları geliştirmek için önemli olarak kabul edilir. Çevreyi atıktan korumak için, görev, yetki ve sorumlulukların çeşitli ortaklar arasında paylaşıldığı ve işbirliğinin gönüllülük esasına dayandığı bir prosedür tasarlanmalıdır (Nshimbi ve Vinya 2014: 472). Atık yönetimi, geri dönüşüm ve kaynakların etkili kullanımına odaklanan sürdürülebilir bir uygulamadır. Geri dönüşüm, hammadde ve ürün oluşturma ile ilişkili harcamalarda önemli tasarruflar sağlar. Doğal kaynakların etkin kullanımı, geri dönüşüm ve atıkların azaltılması sürdürülebilirliğin temel taşlarıdır (Nemli, 2007). Çevre açısından bakıldığında Bonn ve Fisher (2011, 5-6), maddi kaynakların etkin kullanımı ve yenilenemeyen kaynakların tükenmesi ve sanayileşmenin biyolojik çeşitlilik üzerindeki etkileri gibi sorunlarla mücadele edilmesi gibi sürdürülebilirliğin temellerini vurgulamaktadır. Sürdürülebilirlik, başlangıçta daha

çok çevresel konularla ilişkili olarak ortaya çıkmasına rağmen, 2000'li yıllarda ekonomik, sosyal, kültürel ve teknolojik yönleri de içerecek şekilde genişlemiştir (Balcı ve Koçak, 2014). Sürdürülebilir atık yönetimi, çevre korumayı, kaynak verimliliğini, atık minimizasyonunu ve geri dönüşümü vurgulayan stratejik bir stratejidir. Çevremizdeki birçok ülke, sürdürülebilir atık yönetimi mevzuatının formüle edilmesi yoluyla atık üretimini azaltmaya, geri dönüşümü savunmaya ve çevresel olarak güvenli atık bertarafını garanti etmeye çalışmaktadır. Sürdürülebilirlik, mevcut ve gelecek nesillerin gereksinimlerini karşılayabilmelerini sağlamak için doğal kaynakların ve çevrenin korunması, kullanılması ve yönetilmesini gerektirir. Sürdürülebilirlik, doğal kaynakların etkin ve verimli kullanımı, çevrenin korunması ve ekonomik kalkınma için uygun çözümlerin uygulanmasını gerektirirken, gelecek nesillerin taleplerinin de bugünün talepleriyle birlikte dikkate alınmasını gerektirir. Sürdürülebilir atık yönetimi, kaynak azaltma, geri dönüşüm, yeniden kullanım ve enerji üretimi gibi tekniklerle doğal kaynakları koruyan, çevre kirliliğini azaltan, ekonomik avantajlar sunan ve toplumsal refahı artıran bir stratejidir (Kömür, 2024: 60).

Mevcut kaynakların kullanımını optimize etmek için doğanın sosyo-ekolojik dengesini yeniden sağlamak için devam eden çabalar esastır. Bir yandan, atığı azaltmak için ileri teknoloji gerekirken, diğer yandan, üretilen en az atığı geri dönüştürmek ve işlemek için uygun teknoloji yaratılmalıdır (Sushil 1990: 4). Bunun için en önemli adımlardan birisi endüstriyel değişimdir (Yılmaz, 2020: 381). Atık yönetim sistemleri, tüm teknolojik, sosyal, çevresel ve ekolojik faktörler göz önünde bulundurularak geliştirilmelidir. Etkili atık yönetim programları ve sistemleri, aşağıdakiler de dahil olmak üzere çeşitli sosyal ve ekonomik avantajlar sağlar (Sushil 1990: 4):

- ✓ Geliştirilmiş üretim nedeniyle daha düşük ürün maliyetler
- ✓ Azaltılmış malzeme kıtlığı
- ✓ Atık malzemelerin kurtarılmasından elde edilen ekonomik kazançlar
- ✓ Atıkların geri dönüştürülmesi/yeniden kullanılması yoluyla yeni ürünlerin tanıtılması
- ✓ Enerji krizinden kurtulma
- ✓ Daha hijyenik, daha güvenli ve kirlilikten uzak bir çevre
- ✓ Hastalıkların azaltılması
- ✓ Daha temiz ve daha konforlu hayat koşulları ve daha yüksek hayat standardı
- ✓ İşsizliğin daha iyi kontrol edilmesi ve daha sağlıklı bir toplumun geliştirilmesi
- ✓ Hızlandırılmış ve sürdürülebilir ulusal kalkınma ve ulusal özgüven

Sürdürülebilir atık yönetiminin ekolojik olarak etkili, ekonomik olarak uygulanabilir ve sosyal olarak kabul edilebilir olması beklenmektedir. İzlenecek strateji, atık üretimini en aza indirmek ve kaçınılmaz olarak üretilecek atığı ele almak için entegre atık yönetimi kurmaktır (Sedef, 2016: 9). Katı atık yönetiminde sürdürülebilirlik, politik, kurumsal, sosyal, ekonomik, mali ve teknik etkenler göz önünde bulundurularak, katı atık yönetim sisteminin yerel özelliklere ve kapasitelere uyarlanması ve ilgili paydaşlar (yerel yönetimler, kamu, sivil toplum kuruluşları ve özel sektör) tarafından yürütülmesi olarak tanımlanmaktadır (Palabıyık, 2001: 43).

6. SONUÇ

Çevresel sorunlar tanımlanırken plansız olarak yapılan her şey yada adımın zararlarından bahsederiz. Burada; sanayileşme, kentleşme, nüfus artışı, tarım, hayvancılık yada diğer etkin unsurlar dan hep sebep olarak bahsederiz. Plansızlığın sonucu ise çoğu zaman sayısal ifadesi dahi zor olan, çevresel sorunlardır. Sebepler sonucu tetiklemekte, buda atık artışının artmasına katkıda bulunmaktadır. Niteliği ne olursa olsun, artan her atık hem çevre hem de ekonomi üzerinde zararlı etkilere neden olabilmektedir. Bu zararı önlemek yad en aza indirmek için etkin atık yönetimi planlaması şarttır. Etkin atık yönetimi planlaması kirliliği azaltabilir ve geri dönüştürülebilir malzemeleri kaynak döngüsüne yeniden kazandırabilir (Karagözoğlu vd., 2009: 2). Bu sadece katı atık için değil tüm atık türleri için de geçerlidir. Esasen atık tan fayda temini olgusu yeni değildir. Tarihi zaman içinde toplumlar hem atığı yönetmiş, hem de çevresel olarak ekonomik faydalar elde etmişlerdir. Atık yönetiminin ekonomik ve çevresel olarak değerlendirilmesi, aynı zamanda insan sağlığına katkı açısından da hayati öneme sahiptir. Atıkların toplanması, taşınması ve işlenmesi belirli ekonomik giderleri olan işlemlerdir. Bununla birlikte, atıktan hammadde olarak değer elde etmek ve gelir getirici çabaları ödemekten kaçınarak enerji çıkarmak gerekmektedir (Şiriner Önver, 2019: 116). Atığın fiziksel, kimyasal ve biyolojik nedenlerle çevre ve insan sağlığı için risk oluşturduğu düşünüldüğünde sistematik atık yönetiminin gerekliliği büyük önem kazanmaktadır. Sonuç olarak atık yönetimi sistemselsel bir yaklaşım gerektiren bir konudur. Sistem yaklaşımı, atık yönetiminin temel bileşenleri olan atık üretimi, toplanması, arıtılması ve bertarafının yanı sıra enerji, çevre koruma, kaynak tasarrufu, üretkenliğin artırılması ve istihdam gibi konuların bütünleşik bir şekilde ele alınmasını gerektirir. Atık yönetimine yönelik sistem yaklaşımı, katı atıkların insan ortamlarından uzaklaştırılmasını sağlarken, çevre ve

insan sağlığını koruyarak ve iyileştirerek ekonomik kalkınmayı olumlu yönde etkileyecektir (Sushil, 1990). Bu nedenle, atık sorununun yalnızca çevresel ve insani bir endişe değil, aynı zamanda yönetim çevreleri, politika uygulayıcıları ve yöneticiler tarafından yüksek öncelik verilmesi gereken bir konu olduğu açıktır (Gündüzalp ve Güven, 2016: 2).

Atık yönetimi, çevresel sorunları hafifletmek ve bireylerin hayat kalitesini artırmak için çok önemlidir. Bu konu hem belediye idareleri hem de merkezi hükümet kuruluşları tarafından acilen ele alınmalıdır. Sanayileşmiş ulusların üretim ve tüketim süreçlerindeki eksikliklerin farkına varılması ve atık yönetimi uygulamalarının izlenmesi, sürdürülebilir atık yönetiminin yürütülmesini kolaylaştırabilir. Sonuç olarak, sanayileşmiş uluslar tarafından atık yönetimi konusunda yürütülen, önleme ve azaltma, yeniden kullanım, geri dönüşüm, enerji geri kazanımı ve rutin depolama üzerine odaklanan çalışmalar da dahil olmak üzere araştırmalar örnek teşkil edebilir (Sedef, 2016: 39). Atık hem ekonomik hem de çevresel bakış açılarından incelenir. Katı atık, ambalaj atığı, tehlikeli atık, tıbbi atık ve ürün tüketiminden kaynaklanan özel atık dahil olmak üzere çeşitli atık türlerinin taşınması, toplanması, bertarafı ve yönetimi son derece önemlidir. Katı atık yönetimine özellikle dikkat etmek hayati önem taşır. Çeşitli formları kapsayan bu atık kategorisi, bireyleri, ekosistemleri, sağlığı, çevreyi ve ekonomiyi önemli ölçüde etkiler. Atıkların depolanması, toplanması ve taşınmasıyla ilişkili masraflar ulusal ekonomileri olumsuz etkileyebilir. Sonuç olarak, bu masrafları azaltmak için geri dönüşüm kullanılır. Geri dönüşüm, toplumun tüm kesimlerinde önceliklendirilmesi gereken kapsamlı bir konudur. Kağıt, plastik ve piller dahil olmak üzere malzemelerin geri dönüştürülmesi, atığın olumsuz çevresel etkilerini azaltır ve yeniden kullanım yoluyla ekonomiyi iyileştirir (Gündüzalp ve Güven, 2016: 15). Atık yönetiminde sürdürülebilir ilerlemeyi sağlamak için atık üretiminin azaltılması, yeniden

kullanım ve geri dönüşümün artırılması, kullanılmayan atıkların kontrollü depolanması, katı atık yönetimi sektörleri arasında etkili koordinasyon, tüketiciler, özel girişimciler ve yerel yönetimler için uygulanabilir finansal sistemlerin kurulması, meşru bir ücret yapısıyla güvenli istihdam sağlanması, sağlık ve güvenliğe vurgu yapılması, temiz ve sağlıklı bir kentsel çevrenin korunmasında verimliliğin teşvik edilmesi ve bu alanda ilgili kurumlara ve tüketicilere rehberlik edecek yasal çerçevelerin hayata geçirilmesi önceliklendirilmesi zorunludur (Bound, 2001: 3-12; Akdoğan ve Güleç, 2007: 44). Kurumlarda sosyal sorumluluğun bir gereği olarak da çevre kirliliğinin azaltılması, bitki örtüsünün korunması, temiz üretim süreçleri, enerji tasarrufu ve geri dönüşüm gibi konulara önem verilmelidir (Aktan ve Börü, 2007; Yılmaz, 2018). Ayrıca atıkların insan ve çevre sağlığı açısından büyük bir tehdit oluşturduğu gerçekliğinden hareketle bu konuda kişi ve kurumların birlikte hareket etmesinin ve eğitim çalışmalarının önemi göz ardı edilmemelidir (Cansaran, 2020: 316). Sürdürülebilir bir gelecek inşa etmek için şirketler ve bireyler atığı etkin bir şekilde yönetmek üzere birlikte çalışmalıdır. Bireylerin atabileceği basit ama etkili adımlar arasında organik maddeleri kompostlaştırmak, geri dönüştürülebilir maddeleri ayırmak, atıkları kaynağında en aza indirmek ve çevre dostu şirketleri ve ürünleri desteklemek yer almaktadır. Sürdürülebilir üretim yöntemlerini benimseyerek, atık azaltma planlarını uygulamaya koyarak, en son geri dönüşüm teknolojilerine yatırım yaparak ve personel ve paydaşlar arasında çevreye duyarlı bir kültürü teşvik ederek kuruluşlar olumlu bir etki yaratabilir. Bu önlemler ekip çalışması, kamuoyu bilinçlendirme kampanyaları ve sağlam politikalarla güçlendirilebilir; bu da atıkların düzenli bir şekilde ele alınmasını ve çevresel etkilerinin asgari düzeyde tutulmasını sağlayarak sürdürülebilir bir atık yönetim sistemine yardımcı olur.

Gelecekte daha yaşanabilir bir dünya sağlamak için bireyler, şirketler ve hükümetler bu süreci bir görev olarak kabul etmeli ve gerekli eylemleri yapmalıdır. Sürdürülebilir atık yönetimi, ekonomik fırsatlar yaratarak sosyal avantajlar sağlarken çevresel sürdürülebilirliği de teşvik eder. Ancak bu geçiş, kapsamlı politikaların benimsenmesini, kamuoyunun farkındalığının artırılmasını ve yenilikçi teknolojinin teşvik edilmesini içermektedir. Ülkemizde son on yılda mevcut çevre fonu kaynaklarının reel ölçekteki kayda değer artışı, özellikle ‘‘Bilinçlendirme Boyutuna’’ önemli katkı sağlamıştır. Bunun ulusal alt yapıya yansımaları için ise, çalışmaların sadece kaynak yada bilinçlendirme boyutunun dışına çıkarılarak, **Kavramsalın Uygulaması ve Sürdürülebilirliği** olarak kısa vadede uygulanması sağlanmalıdır.

KAYNAKÇA

- Akdoğan, A., & Güleç, S. (2007). Sürdürülebilir katı atık yönetimi ve belediyelerde yöneticilerin katı atık yönetimiyle ilgili tutum ve düşüncelerinin analizine yönelik bir araştırma. *Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 25(1), 39-69.
- Aktan, C. C. & Börü, D. (2007). Kurumsal sosyal sorumluluk, işletmeler ve sosyal sorumluluk, İstanbul: İgiad Yayınları.
- Atık Yönetimi Yönetmeliği. (2015, 2 Nisan). *Resmi Gazete Sayı: 29314*.
<https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2015/04/20150402-2.htm>
- Atık Yönetimi Yönetmeliği. (2017, 2 Nisan). *Resmî Gazete*, 29314.
<https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/1.5.2872.pdf>
(Erişim: 22.07.2024)
- Aydın, M., & Deniz, K. (2017). Atık yönetiminde vergi politikasının rolü: Türkiye değerlendirmesi. *Yönetim Bilimleri Dergisi*, 15(30), 435-461.
- Balcı, V., & Koçak, F. (2014). Spor ve rekreasyon alanlarının tasarımında ve kullanımında çevresel sürdürülebilirlik, *Spor ve Performans Araştırmaları Dergisi*, 5(2), 46-58.
- Bonn, I., & Fisher, J. (2011). Sustainability: The missing ingredient in strategy. *Journal of Business Strategy*, 32(1), 5-14.
- Bound, I., Grafakos, S., Hordijk, M., & Post, J. (2001). Quality of life and alliances in solid waste management. *Cities*, 18(1), 3-12.

- Cansaran, D. (2020). Bir çevre sorunsalı olarak evsel çöpler: Amasya örneği. *Sosyal ve Beşeri Bilimlerde Teori ve Araştırmalar II*, 3, 309-317. Gece Kitaplığı.
- Cansaran, D. (2020). Sürdürülebilir hayat ve kent. In A. Cansaran (Ed.), *Çevre ve İnsan* (pp. 129-151). Eğiten Kitap.
- Demirbaş, A. (2011). Waste management, waste resource facilities, and waste conversion processes. *Energy Conversion and Management*, 52(2), 1280-1287.
- European Union. (2008). Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain directives. *Official Journal of the European Union*, L 312, 19.11.2008. <https://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:0030:en:PDF> (Erişim: 15.08.2024)
- Gündüz, M. Y. (2021). Geri dönüşebilir atıkların kontrolü ve sıfır atık projeleri uygulamaları: Necmettin Erbakan Üniversitesi örneği (Yüksek Lisans Tezi). Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Gündüzalp, A. A., & Güven, S. (2016). Atık, çeşitleri, atık yönetimi, geri dönüşüm ve tüketici: Çankaya Belediyesi ve semt tüketicileri örneği. *Hacettepe Üniversitesi Sosyolojik Araştırmalar E-Dergisi*, 9(1), 1-19.
- Gündüzalp, A. A., & Güven, S. (2016). Atık, çeşitleri, atık yönetimi, geri dönüşüm ve tüketici: Çankaya Belediyesi ve semt tüketicileri örneği. <https://docplayer.biz.tr/17299195-Atik-cesitleri-atik-yonetimi-geri-donusum-ve-tuketici-cankaya-belediyesi-ve-semt-tuketicileri-ornegi.html> (Erişim: 09.09.2024)
- Karagözoğlu, M. B., Özyonar, F., Yılmaz, A., & Atmaca, E. (2009, Haziran 15-17). Katı atıkların yeniden kazanımı

ve önemi. *Türkiye’de Katı Atık Yönetimi Sempozyumu*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

Kömür, D. (2024). Türkiye’deki biyogaz tesislerine genel bir bakış ve sürdürülebilir atık yönetimi (Doktora Tezi). Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.

McDougall, F. R., White, P. R., Franke, M., & Hindle, P. (2008). *Integrated solid waste management: A life cycle inventory*. John Wiley & Sons.

Mengi, A., & Algan, N. (2003). Küreselleşme ve yerelleşme çağında bölgesel sürdürülebilir gelişme: AB ve Türkiye örneği. *Siyasal Kitabevi*.

Mercan, Y. (2022). Endüstri 4.0’ın sürdürülebilir üretimdeki rolü, tedarik zinciri yönetiminde sürdürülebilirlik ve teknoloji, Ed.: O. Çetin. Çanakkale: Paradigma Akademi.

Morelli, J. (2011). Environmental sustainability: A definition for environmental professionals. *Journal of Environmental Sustainability*, 1(1), 2.

Murcott, S. (1997). Appendix A: Definitions of sustainable development. AAAS Annual Conference, IIASA “Sustainability Indicators Symposium” MIT. <http://www.sustainableliving.org/appen-a.htm> (Erişim:05.08.2024)

Murat, G., & Şengül, B. (2024). Küresel iklim değişikliğinin işgücü verimliliği ve istihdam üzerine yansımaları: Bir sosyal politika önlemi olarak yeşil işler. *Mülkiye Dergisi*, 48(3), 717-748.

Nemli, E. (2007). Sürdürülebilir gelişme: Ekonomi ile çevre arasındaki denge. İstanbul, Kalder-Çevre Uzmanlık Grubu. (Erişim: 16.10.2024).

- Nshimbi, M., & Vinya, R. (2014). Impacts of public-private partnership on local livelihoods and natural resource dynamics: Perceptions from Eastern Zambia. *Resources*, 3(2), 471-487.
- Öktem, B. (2016). Atık yönetiminde entegre uygulama. *Batman Üniversitesi Hayat Bilimleri Dergisi*, 6(2), 135-147.
- Ömürbek, V., Erk, Ç., & Herek, S. (2019). Üniversitelerde atık yönetimi uygulamaları. *Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 35, 124-161.
- Palabıyık, H. (2001). Belediyelerde katı atık yönetimi: İzmir Büyükşehir Belediyesi örneği (Doktora Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir.
- Parker, D. (2010). Briefing: Remanufacturing and reuse trends and prospects. *Waste and Resource Management*, 163(4), 141-147.
- Pezzey, J. (1997). Sustainability constraints versus 'optimality' versus intertemporal concern, and axioms versus data. *Land Economics*, 73(4), 448-466.
- Pichtel, J. (2005). *Waste management practices: Municipal, hazardous, and industrial*. Taylor & Francis.
- Say, S. (2019). Sıfır atık yönetmeliği. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=32659&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>
- Sushil. (1990). Waste management: A systems perspective. *Industrial Management & Data Systems*, 90(5), 1-67.
- Sushil. (1995). Waste management: A systems perspective. *Industrial Management & Data Systems*, 90, 1-67. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.034>

- Şahin, G., & Önder, H. (2021). Atık yönetimi, sera gazı emisyonları ve Türkiye: Avrupa Yeşil Mutabakatı çerçevesinde bir değerlendirme. *Akademik Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 9(112), 194-216.
- Şengül, B., & Murat, G. (2024). Küresel iklim krizinin sosyal boyutu ve sosyal politika önlemleri. *Süleyman Demirel Üniversitesi Vizyoner Dergisi*, 15(41), 342-358.
- Şiriner Önver, M. (2019). Çöp/Atık yönetimi ve belediyeler. *Journal of Current Debates in Social Sciences*, 2(1), 111-123.
- Veral, E. S. (2018). Atık sorunsalı bağlamında Avrupa Birliği'nin yeni ekonomi modeli olarak döngüsel ekonominin değerlendirilmesi (Doktora Tezi). Ankara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara.
- World Bank. (2023, July 13). *Solid waste management*. <https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/brief/solid-waste-management> (Erişim: 11.08.2024)
- Yılmaz, F. (2018). Corporate social responsibility. In K. Özdaşlı, et al. (Eds.), *Innovative Approaches in Social, Human and Administrative Science*, Ankara: Gece Akademi.
- Yılmaz, F. (2020). Dijital insan kaynakları yönetimi. In H. T. Uysal, C. Aksoy, & F. Yılmaz (Eds.), *Dijital Yönetim içinde* (s. 381-404). Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.
- Zeytin, M., & Kırlioğlu, H. (2014). Çevre yönetim sistemi ve yerel yönetimler. *Akademik Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 2(5), 238-254.

RECENT FORAMINIFERAL ASSEMBLATIONS IN THE EASTERN MEDITERRANEAN (ARSUZ- HATAY/TURKEY) AND BIO-ECOLOGICAL EFFECTS OF TOXIC ELEMENT POLLUTION ON FORAMINIFERA

Zeki Ünal YÜMÜN¹

Erol KAM²

1. INTRODUCTION

Due to reasons such as technological developments and population increases, the natural environment, which is thought to be inexhaustible, is becoming increasingly polluted (Yinanç, 2022_a: 29). Heavy metals are important pollutants for water ecosystems. To show toxic effects on living organisms and bio-accumulation are the most dangerous properties of toxic elements. Toxic elements reach water through domestic and industrial pollutants and natural resources. In addition to industry, agricultural activities, the structure of rocks and the presence of mineral deposits are other sources of toxic element pollution in the environment. Drainage water of agricultural origin may contain significant Na, K, Ca, Cd, Ni and B depending on soil properties and fertilizers and pesticides used (Dökmeci, 2005). These sources constitute the origin of pollution especially in areas where there is no industrialization. The toxic elements reaching to the marine environment begin to accumulate in the sea bottom sediment. This accumulation causes various effects on li-

¹ Prof. Dr. Tekirdağ Namık Kemal University, Çorlu Engineering Faculty, Environmental Engineering Department, zyumun@nku.edu.tr ORCID: 0000-0003-0658-0416

² Prof. Dr. İstanbul Technical University, Engineering Faculty, Environmental Engineering Department, erolkam@hotmail.com ORCID: 0000-0001-5850-5464

ving creatures in the sediment. Long-term exposure of marine organisms to toxic elements in low concentrations causes them to be transferred to all living things through biological accumulation and then through the food chain (Forstner and Wittmann, 1979). Information can be obtained about environmental pollution by examining the reactions of these creatures against heavy metals. Studies on heavy metal pollution in aquatic environments have focused on the heavy metal content accumulated within living things used as bio-indicators (Apaydın et. al., 2005). In addition, in order to prevent such pollution, fertilisers and pesticides used in agricultural activities should be taken under control, industrial wastes should be discharged into the seas after being treated in advanced treatment facilities, and the discharge of wastes of ships into the sea in maritime transport should be prevented (Yinanç, 2022_b: 265).

Aquatic organisms used as bio-indicators; fish, mussels and foraminifera. Foraminifers with calcium carbonate-shelled genus and species live in the sea floor, on the surface of the sediment or in the sediment. In these species exposed to heavy metals, some morphological changes (twin individual formation, shape changes in the shell structure, color changes, excessive growth or shrinkage, etc.) or mass extinctions can occur. In previous years, it has been studied that foraminifera were used as bioindicators by various researchers (Yümün et. al. 2016, Yümün 2017, Yümün and Önce 2017, Meriç et. al. 2009, Meriç et. al. 2005, Türkmen 2005, Akça et al. 2003). The foraminiferal assemblages dating from the Pleistocene to the Holocene in the Gulf of Iskenderun, located in the eastern part of the Mediterranean Sea, have been described with the help of three core drilling samples used in this study (Figure 1). Morphological changes occurring in defined individuals due to heavy metals were investigated.

Pollution caused by radioactivity, organic waste and heavy metal waste in the Marmara and Aegean Seas and surrounding waters in western Turkey has been studied by many researchers. While radioactivity pollution was carried out by Kam et al. (2016), Kam et al. (2017), Yümün et al. (2019) and Yümün et al. (2021), organic and radioactivity pollution was investigated by Dinçer et al. (2019), Kam and Önce (2016), Yümün and Önce (2017), Yümün et al. (2022). The articles mentioned above were used in the conceptual production of this study.

1.1. General Geology

In the region where the study area is located, basically there are Sadan, Zobuk, Koruk, Sosink, Kardere, Kızlaç, Bedinan, Dedeler, Akçadağ, Bahçe, Hasanbeyli Formations. These units also have the Paleozoic aged. Mesozoic is represented by Arılık, Çanaklı, Keldağ, Teknecik Karakolu, Yayık Damlar, Yalaz and Keleboğazı Formation and Kızıldağ Ophiolite. Cenozoic is represented by Uluyol, Okçular, Kışlak, Balyatağı, Sofular, Tepehan, Nurzeytin, Vakıflı and Samandağ Formations. However, the Upper Cretaceous aged Kızıldağ Ophiolite, Miocene aged Vakıflı Formation and the Pliocene aged Samandağ Formation at the top are located in the regions close to the study area. All these units are overlain by Quaternary aged alluviums with angular unconformity.

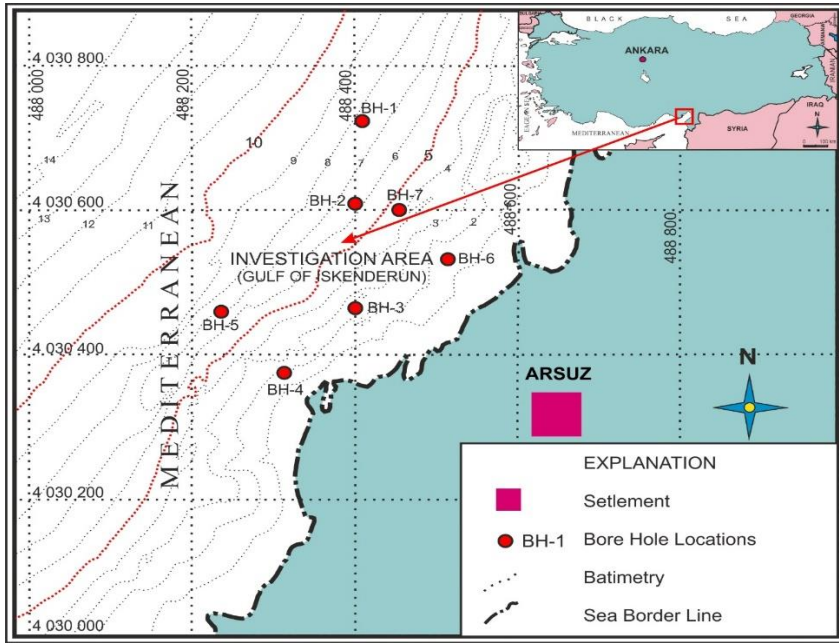


Figure 1: Investigation area and drilling locations map

Stratigraphy: Paleozoic-Mesozoic aged Arabian Otokton Platform Sediments, Late Cretaceous aged Amanos Olistostrome and Ophiolites are mainly surfaced in the areas close to the study area. These basement rocks are unconformably overlain by Late Maestrichtian-Pliocene aged Neo-Otokton rocks and Quaternary aged alluviums (Figure 2).

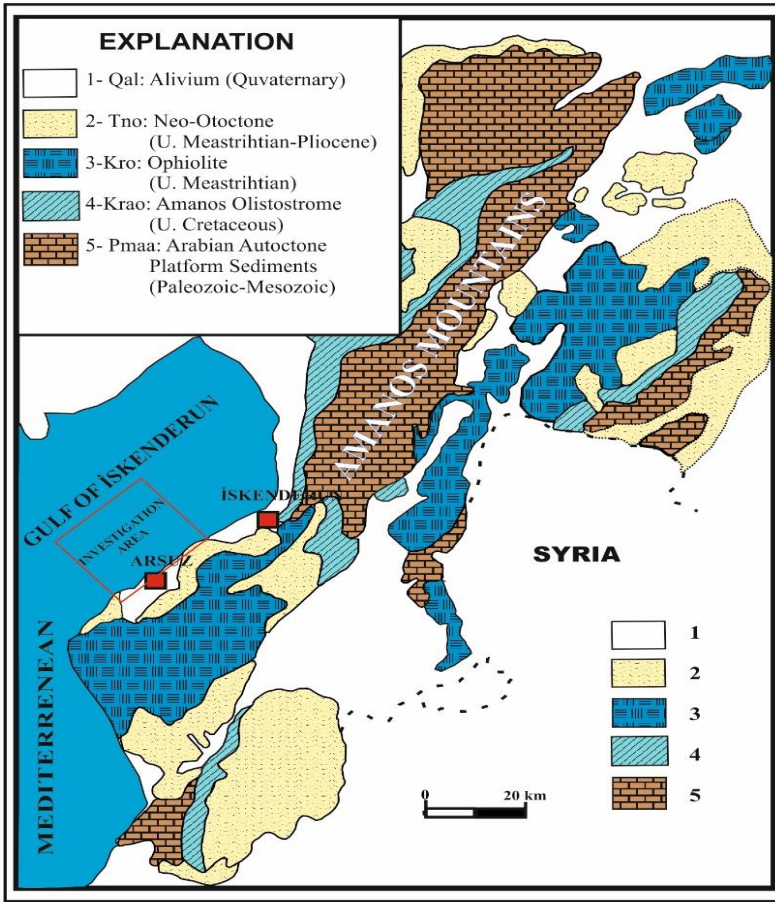


Figure 2: Geological map of the study area (Tekeli and Erendil, 2005)

Paleozoic Units: The Paleozoic Units, which surface in the vicinity of the study area, extends from the Cambrian to the Lower Carboniferous (Figure 2). The Cambrian units are mostly composed of fine and coarse grains. The upper levels of unites have a dolomitic lithology. The upper levels of sequence of Grovak and sleyt are the only fossil-containing level in the Cambrian series (Dean and Krummenacher, 1961). The Ordovician series starts with a quartzite level at the base and continues with alternation of green and brown sandstone and siltstone

with trace fossils (Dean and Monod, 1985). The Ordovician sequence is covered by a Silurian sequence composed of quartzite, conglomerate, siltstone and mudstone alternation with abundant brachiopod fauna. Silurian units are covered by a 20-30 m thick quartzitic guide level which is the beginning of the Devonian-Lower Carboniferous sequence. The Permian period is known as a regional stratigraphic gap (Tekeli and Erendil, 1985).

Mesozoic Sequence: There is a Mesozoic marine carbonate sequence with a thickness of 1500 m on the Paleozoic units (Blumenthal, 1938). The clastic sequence in the southern part of the Amanos starts with a quartzite unit containing a quartzite gravelly conglomeratic level (Arilik quartzite: Atan, 1969). In the northern part of the Amanos Mountains, the Mesozoic sequence is overlain by a carbonate level and the Paleozoic aged clastic rocks. The clastic level at the base is fossil-free, but there are fossils at the upper level of carbonate that give the age of the Skitian. The Triassic part consists of dolomitic rocks, while the Jurassic and Cretaceous limestones are mostly composed of limestones (Tekeli and Erendil, 1985).

Amanos Olistostromu: Amanosde carbonate platform rocks are covered by Amanos olistostromas containing ophiolitic blocks. Olistostrom is exposed to small tectonic windows in the northern part of the Kızıldağ ophiolite. It is seen in wide expansions on both western and eastern slopes of the Amanos mountains (Tekeli and Erendil, 1985).

Ophiolite Settlement: The platform carbonates and the Amanos olistostrome are overlain by ophiolitic nappes in the late Senonian. This settlement of nappe is an example of the ophiolite overstepping (Stoneley, 1975) in the Late Cretaceous on the Arabian platform (Tekeli and Erendil, 1985).

Neo-Autochthonous Cover Rocks: The formation of the first neo-autochthonous layer began upon the end of the nappe settlement in Upper Maestrichtian (Selcuk, 1981). The cover sediments which are shallow marine character and begin with conglomerates derived from the lower ophiolitic rocks. The unit consisting of sandy limestones at the upper levels passes to Paleocene rocks (Aslaner, 1977). The open-sea limestone sedimentation in the Eocene-Early Miocene period continues with the Late Miocene flysch deposits (Tekeli and Erendil, 1985).

Alluvium: The unit, which has a wide spread in the region, consists of sand and gravel size clastics. The unit consists of slope debris, alluvial cone and stream bed cover lithologies (Kozlu, 1982).

2. MATERIAL AND METHODS

The study area between the Amanos Mountains and the Mediterranean is located within the borders of Hatay province (Figure 1). To determine the heavy metal concentrations of marine sediments and the foraminiferal assemblage, three marine drilling samples were used (Table 1). The drillings were conducted by Yümün Mühendislik on 05-25/2013. And the core samples were kept in a dark in a way not to breathe in plastic core boxes. Geochemical analysis of these ground samples (Fe, Zn, Al, Mn, As, B, Co, Cr, Cu, Ni, Sb, Na, Mg, K, Ca, P, Pb, Hg, Cd, Ag, Bi, Cd, Mo, Pb, Pt, Sn, Se, Hg) was carried out using the SPECTROBLUE model ICP-OES device. For the heavy metal analysis, 15 g of each sediment sample were simultaneously taken from the same levels as were sampled for palaeontological analyses. Once the samples had been dried at 50 °C for 24 hours, they were then pulverized in a mortar.

Heavy metal analysis of the pulverized samples was carried out using a SPECTROBLUE model ICP-OES housed at NABİLTEM. For sample combustion, 0.5 g of the pulverized samp-

les was weighed and transferred to combustion tubes. A 12-ml amount of HNO_3 and 4ml of HCl were added to these samples, which were heated at 98 °C for 1 h and at 200 °C for 1.5 h. The tops of the cooled tubes were opened in a fume hood, ultra-pure water was added to the tubes up to 50 ml, and the contents were strained through filter paper. The prepared samples were placed in the measurement unit of the ICP-OES device (Smart Analyser Vision) to take readings. The prepared samples were placed in the measurement unit of the ICP-OS device (Smart Analyser Vision) to take readings. The concentrations in parts per million (ppm) of 24 heavy metals (Cd, Fe, Cu, Pb, Zn, Co, Cr, Al, Mn, Ni, As and Hg) were then determined. Wet sieve analysis was used to determine the grain-size distribution of the present-day sediment samples. Prior to the sieve analysis, 10% H_2O_2 was added to 15 of each sediment sample. The samples were then stored for 24 h and washed with water in a 0.125 mm sieve. Following the washing process, the samples were dried for 6e8 h at 75 C, and the foraminifers and ostracods were identified with a binocular microscope. Microphotographs of the foraminifers genera and species were taken with a scanning electron microscope (SEM) belonging to the Scientific and Technological Research and Application Centre of Namık Kemal University.

3. RESULTS AND FINDINGS

3.1. Drilling Works

Seven marine drillings were conducted by Yümün Mühendislik Ltd. Co., for Arsuz Fisherman Shelter Geotechnical Study in 2013. BH-1, BH-2 and BH-3 samples were taken by using anhydrous rotary method. Sediment samples obtained as cores were divided into 10 cm sections. In these drillings, seawater depths were measured as 8.5 m, 8.7 m and 7.5 m according to the drilling sequence (BH-1, BH-2 and BH-3). In the drilling of BH-1, there are blackish gray colored gravelly sand,

dark brown gravelly sandy clay, brownish-dirty white colored gravelly sandstone and dirty white colored gravelly claystones. In the drilling of BH-2, there are yellowish brown gravelly sandy clay, grayish brown sandy clay, yellowish dark brown and whitish brown colored clayey gravelly sand and whitish yellow sandstone (Table 1).

Table 1: Soil properties and drilling coordinates obtained in BH-1 Marine Drilling work

Drilling Depth (m)	Soil/Rock Türü	Coordinates	
		Y	X
Vertical Distribution of Sediments in BH-1 Drilling Site			
0,0-8.50	Sea Water	36 ⁰ ,4071146	35 ⁰ ,8707887
-8.50-15.50	Blackish gray colored gravelly sand		
-15.50-17.10	Dark brown gravelly sandy clay		
-17.10-20.00	Brownish-dirty white colored gravelly sandstone		
-20.00-21.50	Dirty white colored gravelly claystone		
Vertical Distribution of Sediments in BH-2 Drilling Site			
0,0-8.70	Sea Water	36 ⁰ ,4059874	35 ⁰ ,8700659
-8.70-11.80	Yellowish brown gravelly sandy clay		
-11.80-15.00	Grayish brownish sandy kil		
-15.00-19.00	Yellowish dark brown and whitish brownish clayey gravelly sand		
-19.00-21.00	Yellowish yellow sandstone		

Vertical Distribution of Sediments in BH-3 Drilling Site

0,0-7.50	Sea Water		
-7.50-8.40	Fine grained clay sand		
-8.40-14.00	Whitish pale yellow sandy- gravelly silt-clay		
-14.00-16.00	Bluish dark gray colored multi-silty clay		
-16.00-16.50	Gravelly sand	36⁰,4047244	35⁰,8688417
16.50-19.00	Grayish white colored gravelly sandy silty clay		
19.00-22.00	Whiteish yellow colored sandstone		

In the drilling of BH-3, there are whitish pale yellow sandy-gravelly silt-clay, bluish dark gray multi-silty clay, coarse gravelly sand, grayish-white gravelly sandy silty clay, whitish yellow colored sandstone. These samples taken with drilling can be included in the alluviums given in the general geology department. Samples taken as a result of drilling studies were divided into 10 cm sections in laboratory and granulometric and geochemical analyzes were performed. Clay and fine silt grains were sieved by sifting through a 125 micron sieve with granulometric studies. The foraminifera were extracted from the grains on the sieve and defined .

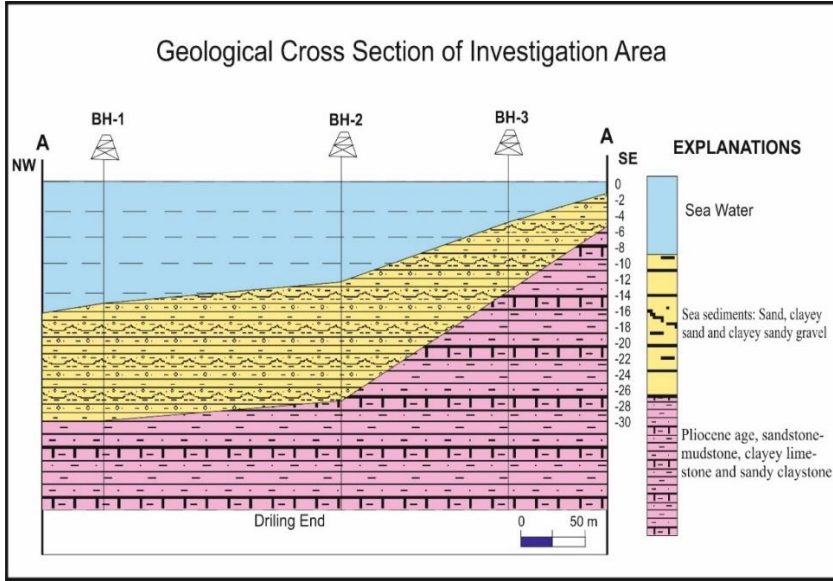


Figure 3. Geological cross section of investigation area (Cross-section A-A)

3.2. Foraminiferal Communities

A large number of foraminiferous genera and species were extracted from the sediments obtained from the drillings made in the study area. There are 18 genera and 25 species in the foraminiferal assemblage (Table 2, 3 ve 4, Plate 1 and 2). This community is (*Adelosina duthiersi*, *Adelosina mediterraneensis*, *Ammonia compacta*, *Ammonia tepida*, *Amphistegina lobiferan*, *Ammonia tepida*, *Ammonia* sp., *Cibicidoides cicatricococ*, *Criboelphidium bartletti*, *Cycloforina contorta*, *Elphidium complanatum*, *E. charlottense*, *E. crispum*, *Eponides concameratus*, *Eponides concameratus*, *Lachlanella carinata*, *Massilina secans*, *Peneroplis arietinus*, *Planorbulina mediterraneensis*, *Pseudotriloculina subgranulata*, *Rosalina brodyi*, *Spiroloculina angulosa*, *Spiroloculina antillarum*, *Spiroloculina dilatata*, *Spiroloculina ornata*, *Triloculina rotunda*) typically Mediterranean fauna, and *Amphistegina lobiferan* is of Indo-pacific origin. These foreign foraminifers were probably transported by bilge

and ballast waters of ships. The presence of *Amphistegina lobifera* species at the highest levels of the drilling cores is an important proof that these forms are of foreign origin. Alien foraminifera in the Central Mediterranean coast of Turkey very intense while; It is less in the study area located in the Gulf of Iskenderun. The presence of alien foraminifera in the sea of Turkey, reinforces the idea that they began to spread from ports in the Middle Mediterranean region.

3.3. Geochemical Analysis

3.3.1. Inductive Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry (ICP-OES) Analysis for Sediment Samples:

Since the SK-2 drilling is located at the mid-point of the study area and it can represent the best in the region, ICP-OES analyzes were applied to the samples obtained from this drilling (Table 4, Figure 4 and 5). Core samples were divided into 50 cm sections in the vertical direction and element concentrations (As, Cr, Zn, Ni, Pb, Cu, S, Cd, Hg, Co, Fe, Al, K, Mg, ve Mn) were determined in divided samples (Table 2). The results of these analyzes are shown graphically in Figures 4 and 5, and the distribution of element concentration values in Table 2 is evaluated. According to the theese analysis, it has seen that the concentrations of some elements have been higher in the upper levels of drilling than in the lower levels of drilling. This situation is seen as a result of agricultural activities and wastes thrown into the sea in the current period.

Table 2: Geochemical analysis results of the first group in BH-2 drilling

Dep ht	As	Cr	Z n	Ni	P b	C u	S	C d	H g	C o	Fe	Al	Mg	K	M n	
			P		P	P										
(m)	pp m	pp m	p m	pp m	p m	p m	pp m	pp b	pp m	pp m	ppm	ppm	ppm	pp m	pp m	
8.00	74.	.6	59	5	96	0.	17	.3	.6	20	.5	3589	1359	7886	24	48
-8.5	98	5	9	.5	10	.8	0	0	.6	5	4.2	5.3	.10	5	5	
8.50	75.	.5	49	7	68	0.	13	.9	.5	17	.6	2873	1148	7937	25	42
-9.0	55	7	2	.2	11	.5	0	0	.8	3	3.7	0.45	.00	1	5	
9.00	93.	72	5	70	0.	15	9.	.6	.5	.8	2867	1214	8412	16.	42	
-9.5	28	.5	6	.3	05	.4	30	0	0	8	2.9	4.7	.60	2	5.0	
9.50			5					17	18	23				30		
-	50.		2.	81	0.	13	9.	.7	.6	.1	3299	1304	1083	27.	8.0	
10.0	96	81	7	.6	12	.2	50	0	0	6	0.7	5.4	9.50	5	0	
10.0			5					16	13	26				51	50	
-	96.	59	9.	88	0.	16	8.	.3	.7	.5	3624	1246	1050	87.	6.5	
10.5	97	.5	4	.7	42	.5	70	0	0	5	5.95	0.6	6.20	4	4	
10.5			4					14		19				47	44	
-	74.	71	4.	83	0.	17	6.	.4	9.	.2	3368	1556	1090	09.	5.6	
11.0	25	.2	8	.5	38	.3	80	0	00	0	5.3	3.6	4.90	9	7	
11.0			6	10				13		32				51	72	
-	57.	68	3.	2.	0.	16	6.	.2	8.	.5	2867	1452	1148	91.	1.5	
11.5	88	.5	5	4	25	.9	90	0	30	5	5.9	9.6	0.90	6	6	
11.5		64	4					12		28				56	58	
-	65.	.5	8.	89	0.	22	7.	.3	7.	.7	3186	1429	9474	30.	2.9	
12.0	73	6	6	.3	34	.4	10	0	50	5	5.6	4.5	.20	0	2	
12.0		60	6					11		26				66	60	
-	57.	.8	5.	85	0.	21	5.	.9	6.	.6	3917	1658	1028	24.	5.2	

Çevre Bilimleri ve Mühendisliğinde İleri Araştırmalar

12.5	89	5	5	.4	00	.6	40	0	20	5	4.6	4.8	5.30	2	3
12.5			6					10		28				57	79
-	68.	52	4.		0.	25	3.	.3	5.	.6	3760	1621	1039	31.	5.6
13.0	34	.3	4	75	05	.8	20	5	90	3	5.7	6.9	2.00	9	2
13.0			5							29				52	81
-	54.	55	8.	76	0.	26	1.	9.	5.	.9	4675	1484	1035	83.	6.0
13.5	53	.6	7	.4	41	.7	10	20	00	5	7.45	5.7	2.70	6	0
13.5			4					10		28				49	77
-	75.	64	9.	73	0.	19	0.	.8	4.	.7	3563	1325	1065	73.	8.6
14.0	56	.8	3	.6	13	.4	9	0	80	5	4.7	8.3	4.70	7	5
14.0		53	5							35				80	76
-	89.	.9	1.	71	0.	29	1.	8.	5.	.5	3638	1475	1390	64.	5.3
14.5	65	5	8	.5	11	.3	2	50	70	0	2.8	4.5	7.40	8	2
14.5		58	5							26				71	72
-	93.	.6	2.	80	0.	31	0.	8.	4.	.5	3787	1453	1163	54.	9.5
15.0	54	5	6	.6	38	.6	09	10	30	6	0.55	5.7	1.20	4	4
15.0		53	5							23				77	40
-	72.	.6	3.	74	0.	33	0.	7.	3.	.4	2958	1467	1360	81.	1.2
15.5	35	5	9	.4	26	.8	28	60	45	8	3.4	0.1	0.80	7	5
15.5			5							23				70	60
-	61.	43	6.	77	0.	25	0.	6.	3.	.6	3686	1334	1178	15.	5.3
16.0	57	.5	4	.8	41	.0	24	50	20	5	5.53	2.2	8.60	7	2
16.0		63	6							29				74	78
-	98.	.5	3.		0.	24	0.	4.	2.	.7	4425	1537	1233	97.	5.6
16.5	05	4	9	88	02	.7	31	3	20	8	1.5	6.9	4.80	7	5
16.5		61	6							28				64	65
-	65.	.6	1.	93	0.	26	0.	3.	2.	.6	4483	1537	1379	21.	0.2
17.0	78	9	7	.1	66	.9	12	2	15	5	9.1	5.4	1.50	0	0
17.0			3							25				67	53
-	82.	75	8.	79	0.	31	0.	2.	1.	.8	3239	1145	1368	95.	1.7
17.5	15	.5	7	.2	82	.2	09	30	80	5	5.9	3.7	4.90	8	0
17.5	75.	61	5	67	0.	31	0.	1.	1.	22	3128	1082	1246	77	59
-	56	.9	5.	.9	98	.9	05	00	60	.3	5.65	5.1	5.00	11.	8.3

18.0	3										6			6			0		
18.0	63										5			26			72		52
-	45.	.6	4.	88	0.	32	0.	0.	0.	.0	3829	1675	1393	79.	2.0				
18.5	68	5	1	.4	00	.4	12	90	90	3	0.6	6.7	8.30	8	0				
18.5	5										24			86			55		
-	36.	62	9.	93	0.	24	0.	0.	0.	.5	3522	1425	1587	94.	4.6				
19.0	00	.6	3	.6	95	.7	22	65	75	6	8.4	0.1	7.30	7	0				

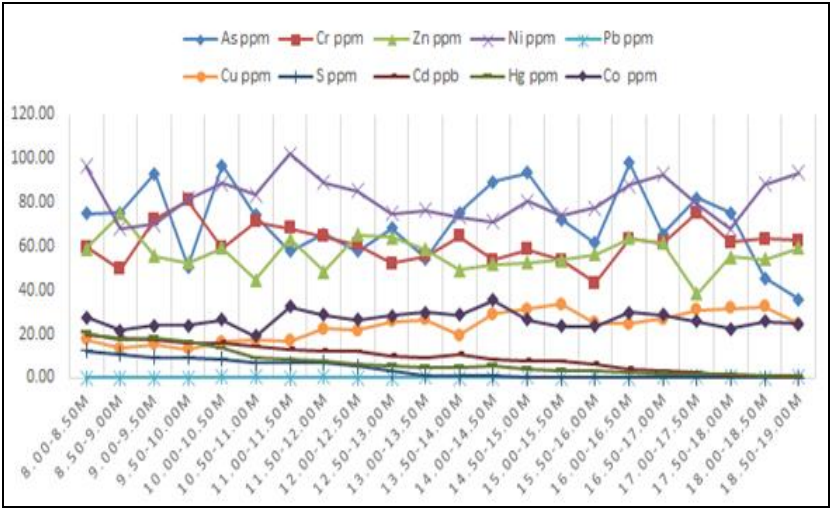


Figure 4. Heavy Metals concentrations in BH-2 samples (As, Cr, Zn, Ni, Pb, Cu, S, Cd, Hg and Co)

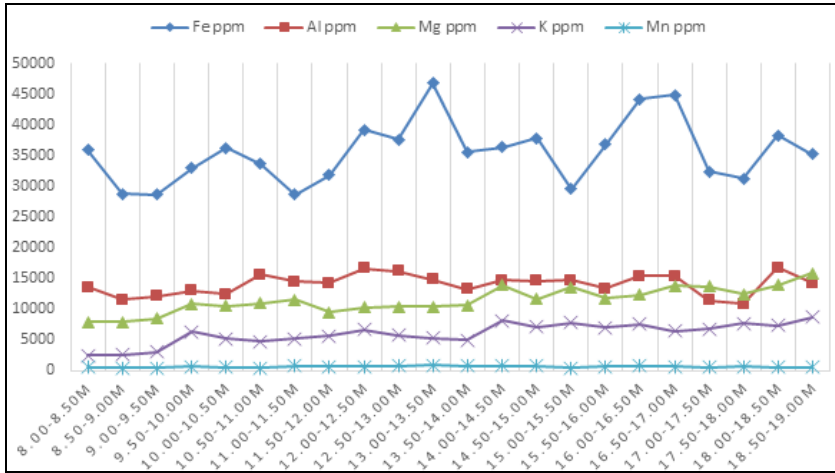


Figure 4. Heavy Metals concentrations in BH-2 samples (Fe, Al, Mg, K and Mn)

3.3.2. Morphological deformities in the foraminifers and the geochemical analyses of their shells

The color of foraminifera taking from BH-2 drilling samples varies black to gray and from yellow to brown (Figure 7). Blackish colors are dominated in the lower levels of the drilling while the yellowish brown color of the upper levels are more common. Surface Electron Microscope (SEM) analyzes were performed on *Miliolinella subratunda* (BH 2, 8.40-8.50 m) shells with yellow-brown color change (Figure 8).

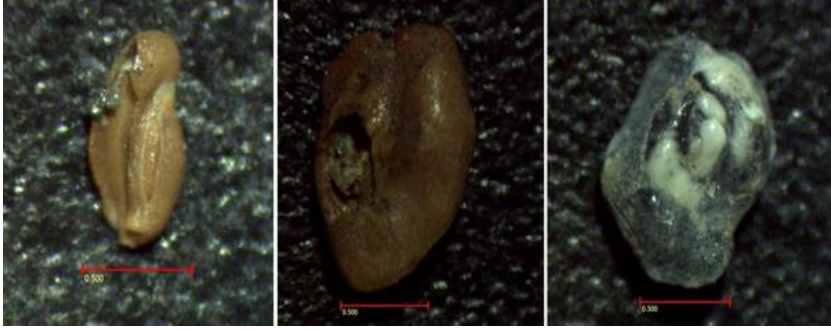


Figure 6. Morphological differentiations in Arsuz sea drilling A: Quinqueloculina seminula (BH 2, 8.00-8.10 m); B: Miliolinella subratunda (BH- 2, 8.40-8.50 m); C: Massilina secans (BH-2, 8.90-9.00 m)

Color changes of Arsuz SK-2 samples are due to high concentrations of sulfur (S), iron (Fe) and manganese (Mn). As mentioned in the previous section, Zn, Cd and S concentration values were found to be high in surface sediments representing the current period. In particular, sulfur can be shown as the reason for the shells being yellow and yellowish brown. In addition, in foraminifera shell structure has carbon (C), Oxygen (O), Magnesium (Mg), Potassium (K), Calcium (Ca) are elements such as.

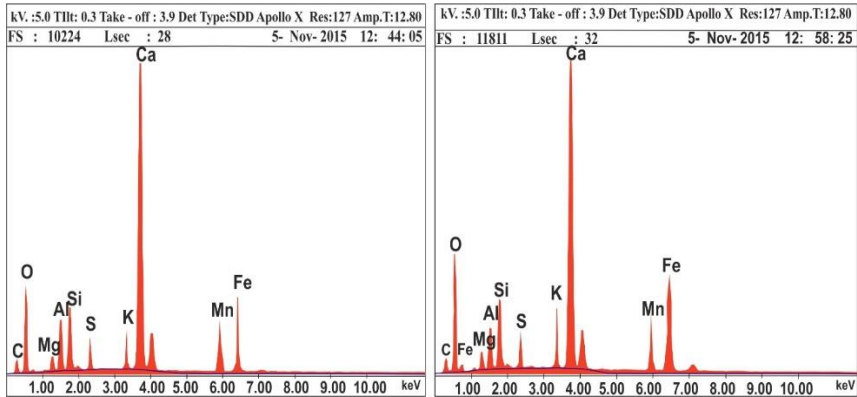


Figure 7. Graph of surface element analysis (Miliolinella subratunda (SK 2, 8.40-8.50 m))

4. DISCUSSIONS

In the Eastern Mediterranean (Arsuz / Hatay), the effects of toxic element concentrations on the foraminifers (bio-ecological results) in the current marine sediments were investigated. In this scope, three marine drilling cores were examined in the study area. Benthic foraminifera assemblages were identified from each of the three drilling samples. Furthermore, the distribution of toxic element concentrations in the horizontal and vertical directions of the same samples were investigated. While the upper levels of the drilling samples represent the current period, they represent the old periods towards the bottom. In the study, a wide range of foraminifer species (*Adelosina duthiersi*, *Adelosina mediterraneensis*, *Ammonia compacta*, *Ammonia tepida*, *Amphistegina lobiferan*, *Ammonia tepida*, *Ammonia* sp., *Cibicidoides cicatricococ*, *Criboelphidium bartletti*, *Cycloforina contorta*, *Elphidium complanatum*, *E. charlottense*, *E. crispum*, *Eponides concameratus*, *Eponides concameratus*, *Lachlanella carinata*, *Massilina secans*, *Peneroplis arietinus*, *Planorbulina mediterraneensis*, *Pseudotriloculina subgranulata*, *Rosalina brodyi*, *Spiroloculina angulosa*, *Spiroloculina antillarum*, *Spiroloculina dilatata*, *Spiroloculina or-*

nata, *Triloculina rotunda*) have been identified. Amphistegina lobifera species from the foraminifera described are of Indo-Pacific origin. It has been concluded that these species were transported to the Mediterranean by means of bilge and balancing waters. The fact that amphistegina lobifera species were detected at the highest levels of the drilling cores and not at deeper levels is seen as an important proof that these forms are of foreign origin. The shells of the foraminifera species offer a color characteristic from black to gray. In the upper levels of the drilling, it is also possible to find the yellowish brown shell structures. Surface element analysis was performed by Scanning Electron Microscope (SEM) in *Miliolinella subratunda* shells which color change was observed (Figure 6,7). The color changes of Arsuz SK-2 samples were determined as sulfur (S), iron (Fe), manganese (Mn), magnesium (Mg) and potassium (K). In addition, carbon (C), Oxygen (O), Magnesium (Mg), Potassium (K), Calcium (Ca) were detected in the structure of the shells with calcium carbonate composition. Sediment samples were examined by ICP-OS and concentrations of 15 elements (As, Cr, Zn, Ni, Pb, Cu, S, Cd, Hg, Co, Fe, Al, K, Mg, and Mn) were determined. When these results were compared with the results of the surface element analysis, Fe, Mn, S, K and Mg values were higher in upper levels in both of them. Morphological changes are observed in some foraminiferal shells with discoloration. These higher levels of drilling where element concentrations are high represent the current environment. The color changes in the foraminifera defined at these levels are higher than the changes in the lower levels. It is thought that the main cause of pollution-forming element densities at the upper levels representing the current environment is agricultural activities, ship traffic and industrial wastes.

Contribution

I would like to thank my dear students Lecture Melike ÖNCE and environmental engineer Sevinç YÜMÜN for their contributions during the laboratory preparation of the samples and for the removal of Foraminifer shells by granulometric analysis. I would like to thank Yümün Engineering Company for their contributions.

REFERENCES

- Akça, L., Tunçsiper, B., & Yinanç, A. (2003). Scientific basis of nonpoint source pollution control in reservoir catchments by constructed wetland systems. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 15-18.
- Apaydın, G., Vercep, B., Mutlu, C., Yandı, İ., Serdar, O., & Tıraşoğlu, E. (2005). Grown rainbow trout in sea cages (*Oncorhynchus mykiss*) in the element analysis (Rize, Turkey). *Turkish Journal of Aquatic Life*, 3(1), 530-535.
- Aslaner, M. (1973). Geology and petrography of ophiolites in Iskenderun-Kirikhan region. *Mineral Research and Exploration Publications*, 150, 78.
- Atan, O. R. (1969). Geology of the Amanos Mountains between Eğribucak-Karacaören (Hassa) and Ceylanlı-Dazevleri (Kırıkhan). *Mineral Research and Exploration Publications*, 139, 85.
- Aydın, D., & Coşkun, Ö. F. (2013). Concentrations of some heavy metals in water, sediment, and some living organisms from the Zamanti River in Turkey. *International Journal of Natural & Engineering Sciences*, 7(3), 56-62.
- Blumenthal, M. (1938). Die Grenzzone zwischen syrischer Tafel und Tauriden in der Gegend des Amanos. *Eclog. Geol. Helvet.*, 31, 381-383.
- Bayrak, K., Kam, E., Yümün, Z. Ü., & Önce, M. (2022). Investigation of heavy metal concentrations in the Gulf of Izmit (Marmara Sea), Altinova Shipyard region. *Journal of the Turkish Chemical Society*, 9(4), 1263–1274.
- Dean, W. T., & Krummenacher, R. (1961). Cambrian trilobites from the Amanos mountains, Turkey. *Paleontology*, 4(1), 71-81.

- Dean, W. T., & Monod, O. (1985). A new interpretation of the Ordovician stratigraphy of Bahçe area (Northern Amanos Mountains, Turkey). *Geological Magazine*, 122(1), 15-25.
- Dinçer, A. R., Yümün, S., Önce, M., & Yümün, Z. Ü. (2019). Investigation of inland pollution using total carbon (TC), total organic carbon (TOC), inorganic carbon (IC), total nitrogen (TN), and TOC/TN ratios. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(6), 14751-14765.
- Dökmeci, A. H. (2005). *Investigation of heavy metal pollution in water resources feeding Lake Gala and Lake*. (Master's thesis). Trakya University, Institute of Science and Technology.
- Forstner, U., & Wittmann, G. T. W. (1979). *Metal pollution in the aquatic environment*. Berlin: Springer-Verlag.
- Kam, E., & Önce, M. (2016). Pollution potential of heavy metals in the current sea sediments between Bandırma (Balıkesir) and Lâpseki (Çanakkale) in the Marmara Sea. *Journal of Engineering Technology and Applied Sciences*, 1(3), 141-148.
- Kam, E., Yümün, Z. Ü., & Önce, M. (2016). Gamma dose rate values in the Kulakçayırı natural lake and its vicinity (Arnavutköy, İstanbul). *Journal of Engineering Technology and Applied Sciences*, 1(1), 29-33.
- Kam, E., Önce, M., & Yümün, S. (2017). The origin of the gross alpha and beta radiation values of the waters of Çanakkale Strait (Çanakkale, Turkey). *Journal of the Turkish Chemical Society*, 4(3), 729-738.

- Kır, S., Tekin Özkan, S., & Tuncay, Y. (2007). Seasonal variation of some heavy metals in water and sediment of Kovada Lake. *Ege University Aquaculture Journal*, 24(1-2), 155-158.
- Kozlu, H. (1982). Iskenderun Basin geology and oil facilities. (Unpublished report). TPAO Report No. 1921.
- Meriç, E., Avşar, N., Nazik, A., Alpar, B., Yokeş, B., Barut, İ. F., & Ünlü, S. (2005). Sedimological, hydrochemical, and biochemical properties of the region with morphological abnormalities of Foraminifera, Ostracod, and Mollusca in Gemlik Bay surface sediments. *Mineral Research and Exploration Magazine*, 131, 21-48.
- Meriç, E., Avşar, N., Nazik, A., Yokeş, B., Barut, İ. F., Eryılmaz, M., Kam, E., & Taşkın, H. (2009). Ilıca Dark (Çeşme-İzmir) alien foraminifers and abnormal individuals in the Pacific Ocean and Red Sea origin of the benthic foraminiferal-ostracod communities. *Journal of Mineral Research and Exploration*, 145, 62-78.
- Selçuk, H. (1981). *Étude géologique de la partie méridionale du Hatay (Turquie)*. (Unpublished doctoral dissertation). Université de Genève.
- Stoneley, R. (1975). On the origins of ophiolite complexes in the southern Tethys region. *Tectonophysics*, 25, 303-322.
- Tekin-Özkan, S., & Kır, İ. (2005). Comparative study on the accumulation of heavy metals in different organs of tench (*Tinca tinca* L., 1758) and plerocercoids of its endoparasite *Ligula intestinalis*. *Parasitology Research*, 97, 156-159.

- Tekeli, O., & Erendil, M. (1985). Geology and petrology of Kızıldağ ophiolite (Hatay). General Directorate of Mineral Research and Exploration, *Department of Geological Studies*, 33-51.
- Türkmen, A., Türkmen, M., & Tepe, Y. (2005). Biomonitoring of heavy metals from Iskenderun Bay using two bivalve species *Chama pacifica* Broderip, 1834, and *Ostrea stentina* Payraudeau, 1826. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 5, 107-111.
- Yaşar, D., Aksu, A. E., & Uslu, O. (2001). Anthropogenic pollution in Izmit Gulf: Heavy metal concentrations in surface sediments. *Turkish Journal of Engineering Environmental Science*, 25, 299-313.
- Yinanç, A. (2022a). *Çevre sorunlarına genel bakış*. In H. Sağlıker (Ed.), *Fen Bilimleri ve Matematik Alanında Yeni Trendler* (pp. 17-34). İzmir: Duvar Yayınları.
- Yinanç, A. (2022b). *Marmara Denizi İstanbul-Tekirdağ hattında sedimentteki kentsel ve sanayi kaynaklı ağır metal ve organik madde kirliliğinin araştırılması ve önlemler*. In B. Kılıç & G. Başyigit Kılıç (Eds.), *Mühendislik Bilimleri Alanında Yeni Trendler* (pp. 249-268). İzmir: Duvar Yayınları.
- Yümün, Z. Ü. (2016). The effects of heavy metals concentrations in the Çanakkale Strait (Turkey): Morphological differences in the Holocene foraminiferal assemblages. *Journal of Engineering Technology and Applied Sciences*, 1(2), 77-88.
- Yümün, Z. Ü. (2017). The effect of heavy metal pollution on foraminifera in the Western Marmara Sea (Turkey). *Journal of African Earth Sciences*, 129, 346-365.

- Yümün, Z. Ü., & Kam, E. (2017). Effects of radionuclides on the recent foraminifera from the clastic sediments of the Çanakkale Strait, Turkey. *Journal of African Earth Sciences*, 131, 179-182.
- Yümün, Z. Ü., & Önce, M. (2017). Monitoring heavy metal pollution in foraminifera from the Gulf of Edremit (Northeastern Aegean Sea) between Izmir, Balıkesir, and Çanakkale (Turkey). *Journal of African Earth Sciences*, 130, 110-124.
- Yümün, Z. Ü., Kam, E., & Önce, M. (2019). Analysis of toxic elements with ICP-OES and LIBS methods in marine sediments around the Sea of Marmara in Kapıdağ Peninsula. *Journal of Engineering Technology and Applied Sciences*, 4(1), 43-50.
- Yümün, Z. Ü., Kam, E., Dinçer, A., Önce, M., & Yümün, S. (2021). The investigation of toxic element pollution and radioactivity analyses of marine sediments in the Gulf of Gemlik (Bursa, Turkey). *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(6), 14751-14765.
- Yümün, Z. Ü., Aslıyüksek, H., Yentür, M. M., & Önce, M. (2022). Measurement of heavy metal concentrations of marine sediments in Yalova section of Marmara Sea by LIBS method and evaluation of pollution by principal component analysis. *Journal of Cihannuma Technology Engineering and Natural Sciences Academy*, 1(1), 101-117.

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ ETKİSİNDE ELEKTRİK ENERJİSİ ÜRETİMİ¹

Sercan Köçer²

Gülbin Feridun³

1. GİRİŞ

Endüstrileşme, nüfus ve tüketim oranlarının artışı ile birlikte sürdürülebilirlik kavramı çok fazla önem kazanmıştır ve sanayi devrimi sonrasında artan hammadde ihtiyacı ve hızla artan dünya nüfusu arasındaki bağıntı ile birlikte değerlendirilmektedir.

İklim değişikliğine yönelik yapılan çalışmaların temeli, sebep-sonuç ilişkisine dayanmaktadır. Bu bağlamda yapılan bilimsel araştırmalar neticesinde, sera gazları ve bunların salınımının, iklim değişikliğine en fazla etkiyi gerçekleştiren kaynaklar olduğu görülmüştür [1].

World Research Institute tarafından yapılan araştırmada, 2016 verilerine göre enerji sektörünün, toplam küresel sera gazı salınımlarının %73,2'sinden sorumlu olduğu tespit edilmiştir. Ancak bu miktar, rafinasyon gibi diğer enerji faaliyetlerini de kapsamaktadır. Yalnızca elektrik enerjisi üretim ve iletimi için bu oran %41,7 olarak hesaplanmıştır. Bunun üzerine elektrik üretimi için kullanılan doğalgaz ve kömür gibi yakıt türevlerinin çıkarılması sırasında salınan dolaylı emisyon miktarının eklenmesiyle oran daha da büyümektedir [2].

Elektrik enerjisi üretiminde temelde yenilenebilir ve konvansiyonel kaynaklar olarak değerlendirilen fosil yakıtların kullanıldığı yöntemlerden yararlanılmaktadır. Fosil yakıt kullanımında ise, mutlak sera gazı emisyonu oluşumuna dair katkı

¹ Bu çalışma yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

² Sercan KÖÇER

³ Gülbin FERİDUN

bakımından kömür ve türevleri ile doğalgaz kullanımı ilk sıralarda gelmektedir [3].

Bu çalışmada, sürdürülebilirlik kavramıyla bağlantılı olarak iklim değişikliğine sebep olan etkenleri, Elektrik Enerjisi Üretim faaliyeti özelinde değerlendirerek durum tespitinin yapılması, ülkemizde ve dünyada enerji sektörünün iklim değişikliğine karşı yaklaşımlarının (fosil yakıtların bırakılması, düşük karbonlu enerji vb.) değerlendirilmesi ve bu kapsamda gerçekleştirilebilecek uygulamaların ele alınması hususları araştırılmıştır. Bu doğrultuda Birleşmiş Milletler, Avrupa Birliği, Avrupa Çevre Ajansı, Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı gibi resmi kurum ve kuruluşlar ile Uluslararası Çevre Ajansı gibi büyük ölçekli örgütlerin önümüzdeki dönem için geliştirdikleri iklim eylemleri ve önerileri incelenmiş ve iklim değişikliği ile buna bağlı olarak karbonsuzlaştırma ve sürdürülebilirlik yaklaşımlarının ülkemiz elektrik enerjisi üretiminde uygulanabilirliği araştırılmıştır. Buna bağlı olarak, iklim değişikliğine karşı yöntemlerin mevcut koşullar altında uygulanabilirliğine dair öneri ve öngörülerde bulunulmuştur.

İklim değişikliğine doğrudan etki gösteren sektörler arasında, fosil yakıt kullanımı kaynaklı olarak elektrik enerjisi üretimi en büyük sorumlu olarak kabul edilmektedir. Bunun yanında, son yıllarda elektrik enerjisi üretimi için tercih edilen kaynakların değerlendirilmesi ve fizibilitesinin yapılması noktasında, iklim değişikliğinin oluşturduğu etkiler önemli değerlendirme kriterlerinden birisi olmaya başlamıştır. Bunun temel sebebi, iklim değişikliği sonucunda oluşan mikro ve makro ölçekte atmosferik, hidrolojik ve meteorolojik değişimlerdir.

Tipik termik santrallerde elektrik enerjisi üretimi temelde suyun doğrudan buhar fazına geçirilmesi sonucu türbinlerin harekete geçirilmesi ve buradan alternatör ve jeneratörler yardımıyla mekanik enerjinin elektrik enerjisine çevrimi vasıtasıyla

gerçekleştirilir. Burada ihtiyaç duyulan buhar, tesisin bulunduğu bölgede yer alan su kaynaklarından temin edilir. Benzer şekilde sistemin soğutulması için hava ile birlikte su da en çok kullanılan kaynaklar arasındadır [4].

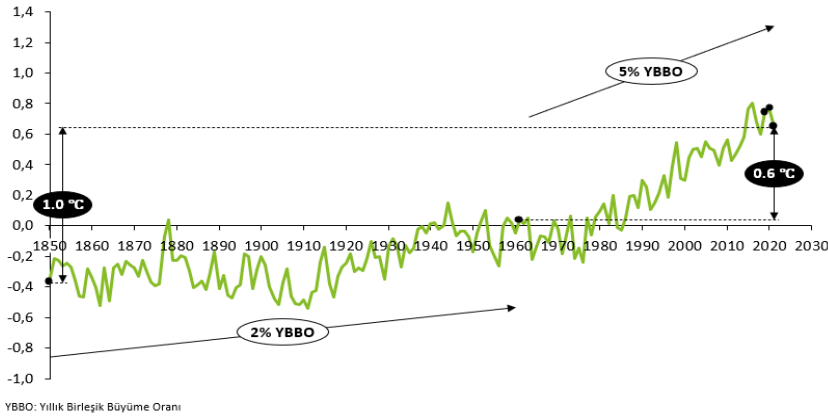
Yenilenebilir olarak değerlendirilen hidroelektrik santrallerin temel kaynağı sudur. İklim değişikliği sonucu, su kaynaklarını doğrudan etkileyen hidrolojik çevrimdeki sistemler ve süreçler arasındaki mevcut denge de olumsuz olarak etkilenecektir. Bu olumsuz etki neticesinde de yağış buharlaşma ve akış gibi süreçler üzerinde yer ve zamandan bağımsız olarak hem uzun hem de orta ve kısa vadeli değişimler gözlenmeye başlamaktadır. Dolayısıyla iklim değişikliği, yenilenebilir enerji kaynaklarından hidroelektrik santraller üzerinde doğrudan etki gösterebilmekte ve zincirleme olarak su kaynaklarına negatif etki gösterecek biçimde rol oynamaktadır [5].

Atmosferde artan sera gazı konsantrasyonu ile birlikte yükselen küresel ortalama sıcaklıklar sebebiyle kuzey kutbu, alt enlemlere göre daha fazla ısınmakta ve bunun sonucunda orta enlemler ile kutup bölgeleri arasındaki sıcaklık farkı azalmaktadır. Bu durum da kuzey yarımküredeki jet akımının yolunu değiştirerek kuzeye ve güneye doğru hareket etmesine sebep olmaktadır. Atmosfer ısınmaya devam ettikçe jet akışının yavaşlamasına, hatta tıkanmasına neden olacağı öngörülmektedir. Böylece, herhangi bir bölgede normal kabul edilenden çok daha uzun süre devam eden farklı hava durumu sistemlerinin oluşmasına sebep olmaktadır. Bu sistemler de dünyada uzun yıllardır süregelen rüzgar akışlarının farklılaşmasına etki etmektedir [6].

2. KARBONSUZLAŞTIRMA

2.1. Karbonsuzlaştırmanın Gerekliliği

1850'den bu yana yaşanan küresel ortalama sıcaklık artışının neredeyse tamamı, insan kaynaklı faaliyetlerden ileri gelen emisyonlara bağlanabilir. Ekonomik büyüme ve nüfus artışı ile buna bağlı olarak yürütülen faaliyetlerdeki yükseliş eğilimi, gezegenimizin küresel ölçekte ortalama sıcaklığında artışa neden olan emisyonun ana etkenleri olarak görülmektedir [7].



Şekil 2.1. 1961-1990 ortalamasına göre ortalama sıcaklık anomalisi [7]

Şekil 2.1.'de yer alan grafikte, 1961-1990 yılları arasındaki ortalama sıcaklık anomalisi görülmektedir. Burada dikkate alınan modelleme, İngiltere Meteoroloji Ofisi, Hadley Merkezince hazırlanan ve küresel sıcaklık anomalilerinin bir veri kümesini temsil eden HadCRUT4 üzerinden oluşturulmuştur.

Sanayi öncesi dönemde sıcaklık artışında yıllık %2'lik bileşik büyüme oranı yaşanırken, bu oran son 60 yılda iki katından fazla artarak %5'civarlarına ulaşmıştır. Küresel ortalama sıcaklıklar 1961-1990 yıllarının temel alındığı tarih aralığına göre 0,6 °C yükselirken, sanayi öncesi dönemlere kıyasla 1 °C artış göstermiştir [7].

IPCC tarafından yayımlanan 6. Değerlendirme Raporu (AR6) içerisinde iklim değişikliğinin ne şekilde olumsuzluklara yol açtığı ve açacağı detaylarıyla ifade edilmiştir. Şimdiden 1,1 °C küresel sıcaklık artışıyla birlikte, iklim sisteminde oluşan ve eşi benzeri olmayan değişikliklerin, yükselen deniz seviyelerinden, daha aşırı hava olaylarına ve hızla yok olan okyanus buzullarına kadar dünyanın her bölgesinde meydana getirdiği etkileri ortaya koymaktadır [8].

Günümüzde emisyon salımını azaltmak için enerji verimliliği, alternatif yakıt kullanımı gibi çeşitli yöntemlerden faydalanılan çalışmaları da içeren karbonsuzlaştırma faaliyetleri de hız kazanmıştır.

Karbonsuzlaştırma ya da bazı kaynaklarda geçen şekliyle dekarbonizasyon, atmosfere karbondioksit (CO₂) çıkışının giderilmesi veya azaltılması için kullanılan terimdir. Düşük karbonlu enerji kaynaklarının kullanımına geçilmesiyle dekarbonizasyon sağlanabilmektedir. Öte yandan karbon yakalama, karbonun farklı kaynaklarda hammadde olarak kullanımı gibi çeşitli şekillerde karbonsuzlaştırma süreçleri de uygulanabilmektedir [9].

2.2. Karbonsuzlaştırma Yöntemleri

Özellikle elektrik enerjisi üretiminden ileri gelen yüksek miktarda sera gazı salımı sebebiyle, enerji sektöründe mevcut karbon emisyonlarını aşağı çekmek ve ilerleyen dönemlerde ise sıfırlayabilmek adına çalışmalar yapılmaktadır.

Bu çalışmalar, temelde üç ayrı türden karbonsuzlaştırma metodu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunlar;

- 1- Yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş,
- 2- Alternatif enerji yatırımları (Hidrojen vb.),
- 3- Karbon yakalama ve değerlendirme teknolojileri

Karbonsuzlaştırma süreçlerinde hem sektör özelinde, hem de genel anlamda bu üç yöntem bir arada kullanılacağı gibi, günümüzde daha çok tercih edildiği üzere yenilenebilir kaynaklara geçiş yapılarak emisyon yoğunluğunun azaltılması da tercih edilmektedir.

2.2.1. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Geçiş

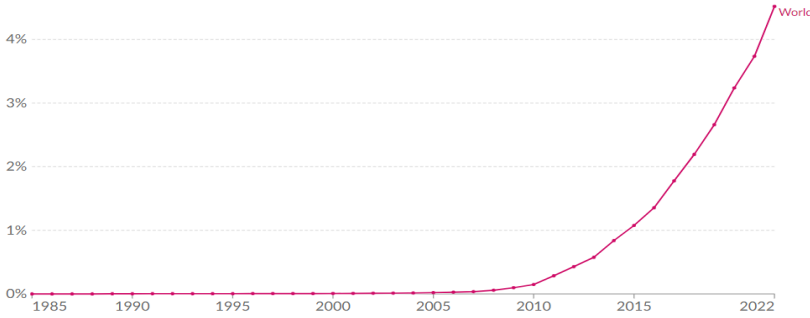
Hem fosil yakıtların yaratmış olduğu ve iklim üzerinde olumsuzluklar meydana getiren etkilerden uzaklaşmak hem de yenilenebilir yeşil enerji dönüşümüne katkı sağlayabilmek amacıyla, elektrik enerjisi üretiminde yenilenebilir kaynakların kullanımı son yıllarda hızla artmaya başlamıştır. Hem kurulu güç, hem de toplam üretimdeki pay bakımından yıldan yıla artan bir oranda yenilenebilir kaynaklar tercih edilmeye başlanmıştır.

Yenilenebilir kaynaklar güneş, rüzgar ve hidroelektrik enerjisinin jeotermal, biyogaz, alg tabanlı yakıt ve deniz (su) üstü rüzgar santralleri şeklindedir.

Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, fosil yakıtların kullanımının azaltılması amacıyla ilk başvuru yenilenebilir enerji kaynaklarından birisidir. Ancak verimlilik ve ilk yatırım maliyeti açısından, son 10 yıla kadar sınırlı şekilde faydalanılabilen bir kaynak olmuştur.

Son yıllarda hem maliyetlerdeki düşüş hem de verimlilik artışı sebebiyle güneş enerjisinden elde edilen elektriğin payı sürekli bir artış trendine girmiş ve 2022 itibarıyla %4,5'in üzerine çıkmıştır [10].



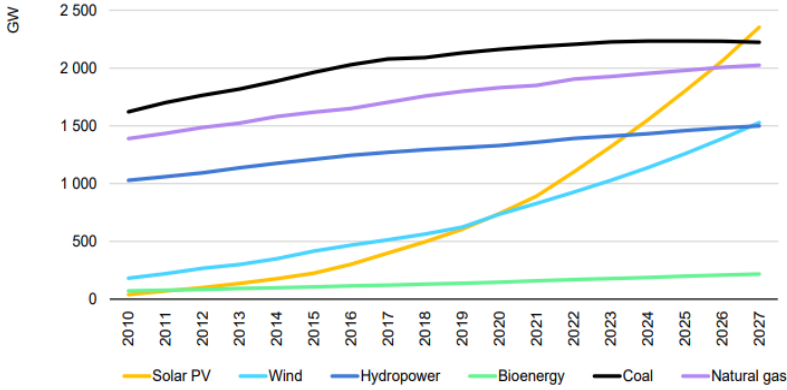
Şekil 2.2. Güneş enerjisinin toplam küresel elektrik üretimindeki payı [10]

Yıldan yıla artan verimlilik de güneş enerjisi kullanımını artıran en önemli etkidir. Sürekli artan ve yenilenen teknolojik gelişmeler ve araştırma-geliştirme çalışmalarıyla birlikte, güneş panellerinde yer alan fotovoltaik hücrelerin verimlilik miktarları da artmıştır. 2022 yılı itibariyle elektrik enerjisi eldesi için kullanılan fotovoltaik hücrelerin verimliliğini ifade eden dönüşüm faktörleri %47'ye kadar ulaşmıştır. Bu durum, daha küçük alan üzerinde, daha fazla miktarda güneş ışığından faydalanılarak, daha yüksek miktarda enerji eldesini ifade etmektedir [11].

IEA'ya göre güneş enerjisi, 2027 yılına kadar elektrik üretiminde kömür kullanımını aşarak en büyük paya sahip olacaktır. Bununla birlikte, şu an için emtia fiyatlarının yüksek seyretmesi nedeniyle ilk yatırım maliyetlerinin de fazla olmasına rağmen güneş enerjisi, dünyadaki pek çok ülke için elektrik üretiminde en az maliyetli seçenek olmaya başlayacaktır. Öte yandan güneş enerjisinden elektrik eldesi için çatı üstü gibi çeşitli alanlardan faydalanılabilmesi de, yenilenebilir enerji içerisinde güneşin payının giderek artmasına katkı sağlamaktadır [12].

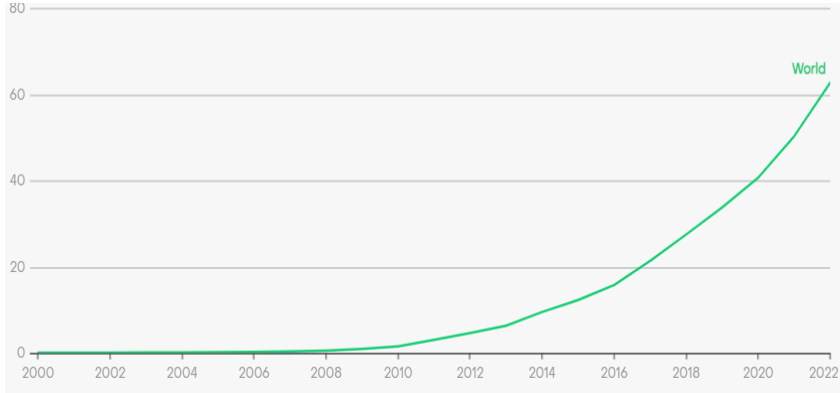
Son dönemde güneş enerjisine artan talebin en somut örneği olarak; Avrupa ülkelerinin fosil yakıtlara bağımlılığını ortadan kaldırmayı ve 2030 yılıyla birlikte toplam kapasitenin %69'unun yenilenebilir kaynaklardan elde edilmesi için başlatı-

lan RePowerEU inisiyatifi ile birlikte, 2030 yılı ile birlikte AB ülkelerinin 592 GW güneş kaynaklı kurulu güce ulaşması amaçlanmaktadır. Bu aynı zamanda 2022-2027 arası için yıllık 39 GW'lık bir büyümeye ihtiyaç duyulduğu anlamını taşımaktadır [12].



Şekil 2.3. IEA'ya göre kaynak türüne göre elektrik enerjisi üretimi öngörülleri [12]

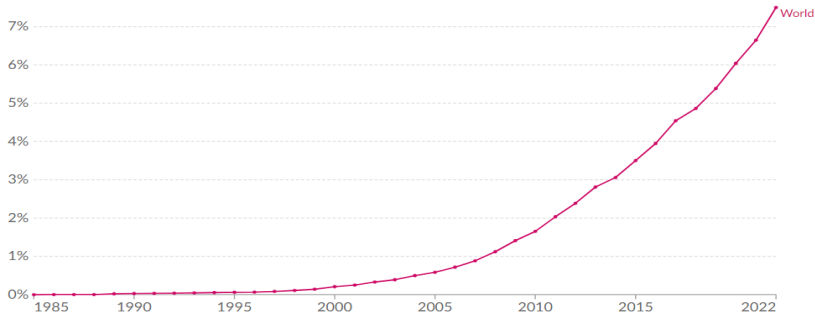
Bununla birlikte güneş enerjisi birim alandan elde edilen enerji yoğunluğu hala düşük seviyede olan bir enerji çeşididir. Kömür yakıtlı bir santral alansal olarak oranlandığında 500 kW/m² enerji yoğunluğuna sahipken, güneş enerjisi için bu miktar 0,25 kW/m² civarındadır [13].



Şekil 2.4. Güneş enerjisi kaynaklı doğrudan ya da dolaylı toplam salınan emisyon [14]

Rüzgar Enerjisi

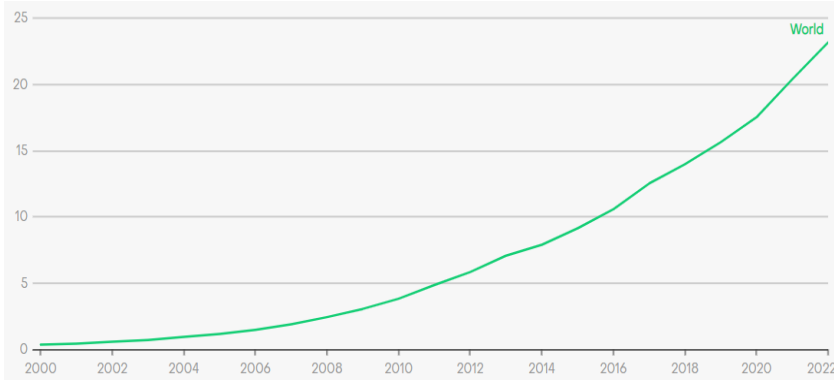
Yenilenebilir kaynakların en önemli çeşitlerinden olan rüzgar enerjisi, güneş enerjisine benzer şekilde ancak daha erken bir zaman diliminden itibaren toplam küresel elektrik üretimindeki payını sürekli artırma eğiliminde olmuştur. 2022 verilerine göre küresel elektrik üretiminin %7,5'inin üzerinde bir kısmı rüzgar kaynaklı olarak gerçekleşmiştir [15].



Şekil 2.5. Rüzgar enerjisinin toplam küresel elektrik üretimindeki payı [10]

Rüzgar türbinleri rüzgarın kinetik enerjisini toplamak için kanatlar kullanmaktadır. Rüzgar, kanatların üzerinden geçerek kaldırma kuvveti oluşturarak (uçak kanatlarındaki etkiye benzer şekilde) kanatların dönmesine neden olmaktadır. Bıçaklar, elektrik üreten (üreten) bir elektrik jeneratörünü döndüren bir tahrik miline bağlanır. Buradan elde edilen mekanik enerji ise sonrasında alternatör gibi yardımcı ekipmanlar ile elektrik enerjisine çevrilmektedir.

Rüzgar enerjisi de tıpkı güneş enerjisinde olduğu gibi temiz ve doğrudan emisyon salımına sebep olmayan bir enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Bu sebeple, karbonsuzlaştırma yolunda kullanılan önemli bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. [16].



Şekil 2.6. Rüzgar enerjisi kaynaklı doğrudan ya da dolaylı toplam salınan emisyon [14]

Rüzgar türbinlerinin en önemli katkısı iklim değişikliği ile mücadelede çok düşük emisyon yoğunluğu ile enerji üretebilme potansiyelidir. 2015 yılında yapılan bir araştırmaya göre, 2050 yılına kadar ABD elektriğinin %35'i rüzgardan üretilmiş olması durumunda, elektrik sektöründen ileri gelen sera gazı emisyonlarının %23 oranında azalacağı, yıllık 510 milyar kg CO₂ emisyonu veya 2013'e göre kümülatif olarak 12,3 trilyon kg

CO₂ emisyonunun ortadan kaldırılacağı ve ayrı olarak su kullanımını da %15 azaltmış olacağı bulunmuştur [17]

Öte yandan rüzgar türbinleri, biyoçeşitliliğe etki anlamında kuş ölümlerine ve ayrıca gürültü oluşumuna sebebiyet vermesinden dolayı negatif çevresel etkilere de neden olabilmektedir. Ancak, inşaat öncesi dönemde gerçekleştirilen çevresel etki değerlendirme çalışmalarının bir kazancı olarak, rüzgar türbinleri sebebiyle yılda ölen kuş sayısı aşağılara çekilebilmektedir. Zira bu aşamada türbinler kuş göç yolları gibi parametreler dikkate alınarak reloke edilebilmektedir.

Ortalama bir rüzgar enerji çiftliği 350 metre ötesinde 35-45 dB arasında bir gürültü seviyesi oluşturmaktadır. Ancak bu miktarın insan sağlığına bir etkisi olmadığı farklı çalışmalarca ortaya konulmuştur [16].

Hidroelektrik Enerji

Rüzgar ve güneşe göre daha uzun sürelerdir faydalanılan bir yenilenebilir enerji türü olan hidroelektrik santraller, artan güneş ve rüzgar enerjisi kapasitesine rağmen hala en büyük yenilenebilir enerji kaynağı olmayı devam ettirmektedir. 2022 yılı itibarıyla küresel elektrik tüketiminin %15'lik kısmı hidroelektrik kaynaklardan karşılanmıştır [10].

Hidroelektrik, küresel elektrik üretim portföyünde önemli bir role sahiptir. Şu anda yalnızca en büyük temiz enerji kaynağı olmakla kalmamakta, aynı zamanda büyük rüzgar ve güneş enerji sistemlerindeki emrehamdelik gerekliliklerini karşılamaya yardımcı olacak esnekliği de sağlamaktadır. Bu sebeple, dünyanın yeni hidroelektrik santrallerine ihtiyacı olsa da, birçok bölgede hidro kaynaklar halihazırda maksimum düzeyde inşa edilmiş ve operasyona geçirilmiştir. Bununla birlikte, potansiyelin olduğu diğer bölgelerde yeni projelerin ekolojik ve sosyal maliyetinin çok yüksek olacağı öngörülmekte, bu da yeni hidroelekt-

rik santraller özelinde bundan sonrası için en büyük kısıtı oluşturmaktadır [15].

Hidroelektrik santraller, yenilenebilir üretim tesisleri içerisindeki payıyla doğru orantılı olarak, iklim değişikliği ile mücadelede önemli bir etki göstermektedir. IEA, 2030 itibarıyla toplam hidroelektrik üretim kapasitesinin %17'nin üzerinde artarak 1555 GW'nin bir miktar üzerine çıkmasını öngörmektedir [60]. Yine de bu miktar, IEA'nın 2050 net sıfır senaryosu içerisinde değerlendirdiği durumlara ulaşılabilmesi açısından yeterli gelmemektedir. Buna göre hidroelektrik kapasitesinin 2030 yılında öngörülenden %45 daha fazla olması gerektiği hesaplanmaktadır.

Tüm bunlara rağmen, IEA'nın net sıfır emisyon dünyasında hidroelektrik, küresel elektrik güvenliğinin omurgası olarak değerlendirilmekte ve 2050 yılına kadar en uygun maliyetli, dağıtılabilir ve esnek düşük karbonlu elektrik teknolojisi seçeneği olduğu düşünülmektedir.

2.2.2. Diğer Yenilenebilir Kaynaklar

Jeotermal enerji, biyogaz, biyokütle gibi farklı yenilenebilir enerji kaynakları olarak değerlendirilse de, bu türler sahip oldukları farklı sınırlayıcı durumlar nedeniyle; rüzgar, güneş ve hidroelektrik kaynakları kadar uygulama alanı bulamamış ve yaygınlaşamamıştır. Örneğin jeotermal enerji, 2019 yılı itibarıyla dünyanın toplam üretiminde %0,5'lik bir paya sahiptir. Biyoenerji gibi diğer yenilenebilir yakıtlar ise bu oranın bir miktar üzerinde olsa da yine de düşük paylara sahiptirler [18]. Bununla birlikte, iklim değişikliği ile mücadele kapsamında ele alındığında, Jeotermal enerji santralleri elektrik üretmek için yakıt yakmamalarına rağmen, az miktarda kükürt dioksit ve karbondioksit açığa çıkarabilirler. Bu durum, onların diğer yenilenebilir kaynaklara göre iklim değişikliği ve yeşil enerji bağlamında dezavantajı olmaktadır. Yine de Jeotermal enerji santralleri,

benzer büyüklükteki fosil yakıtlı enerji santrallerine kıyasla %97 daha az kükürt bileşikleri ve yaklaşık %99 daha az karbondioksit yaymaktadır [19].

Biyogaz çeşitli atıkların (hayvansal ya da bitkisel) oksijensiz ortamda ayrışması sonucu ortaya çıkan bir gaz karışımıdır. Bileşiminde % 60-70 metan (CH_4), % 30-40 karbondioksit (CO_2), % 0-2 hidrojen sülfür (H_2S) ile çok az miktarda azot (N_2) ve hidrojen (H_2) bulunur [20]. Biyogaz işlemde geçirilerek biyometan elde edilmektedir. Ham biyogazın bu saflaştırılmış formu, doğal gaz yerine de kullanılabilir. Biyometan üretimi sırasında CO_2 , H_2O , H_2S ve diğer safsızlıklar giderilir ve geriye yüksek kalorili, saf bir gaz kalmaktadır. Bu yönüyle biyogaz ya da biyometan, fosil kaynak kullanımının olduğu doğal gaz yakıtlı santraller için de bir seçenek olabilmektedir. Bununla birlikte, büyük miktarlarda biyogaz eldesi için gerekli teknolojik gelişmeler hala olgunluğa erişmemiştir. Ancak, yeterli miktarda biyogaz ya da biyometan eldesi olması durumunda, bu yakıt, mevcut hatlar üzerinden halihazırda kurulu bulunan türbinlere iletilerek yüksek maliyetli yatırımlar yapılmadan mevcut teknolojilerin kullanılabilmesine olanak sağlaması bakımından avantajlıdır.

2.2.3. Alternatif Enerji Yatırımları

Karbonsuzlaştıma ve iklim değişikliğinin bertarafı amacıyla elektrik enerjisinin yenilenebilir kaynaklardan eldesi en önemli ve üzerinde yoğunlaşılan süreç olsa da, mevcut enerji kaynaklarının ötesinde alternatif kaynakların da elde edilmesi ve kullanılması için çalışmalar küresel ölçekte devam etmektedir. Bu alternatiflerin en önemlisi ise hidrojen eldesidir.

Hidrojen, düşük emisyonlu elektrik enerjisi üretimi ile birlikte asıl olarak dekarbonizasyon emisyon salımlarının azaltılmasına yardımcı olabilecek bir yakıt olarak değerlendirilmektedir. Bu bakımdan günümüzde çoğunlukla petrol rafinasyonun-

da ve gübre üretiminde kullanılan hidrojenin, temiz enerji geçişine önemli bir katkı sağlaması için ulaşım, bina ve enerji üretimi gibi şu anda neredeyse hiç bulunmadığı sektörlerde de benimsenebilecek potansiyelde olduğu değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, günümüzde düşük karbonlu enerji kaynaklarından hidrojen üretimi maliyetlidir. Bu sebeple hali hazırda hidrojen üretimi için zorunlu olarak fosil yakıtlar tercih edilmekte ve bu da sürdürülebilirlik ve yeşil enerji yaklaşımı adına çelişki oluşturmaktadır. Benzer şekilde hidrojen kullanımı için gerekli alt-yapı kurulumu için geliştirmelerin hızı düşük devam etmektedir [21].

Hidrojen uzun dönemlerden bu yana bir enerji kaynağı olarak kullanılsa da, 2010'lu yılların sonundan itibaren, sürdürülebilirlik ve iklim değişikliğine karşı verilen mücadelenin etkisiyle dikkat çekmeye başlamıştır. Daha geniş ifade etmek gerekirse, hidrojenin iki şekilde daha sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak kullanılabileceği düşünülmektedir. Buna göre;

- 1- Mevcut hidrojen kullanan uygulamalar için daha temiz ve alternatif hidrojen üretim metodlarının geliştirilmesi,
- 2- Hali hazırda yakıtı ihtiyaç duyan uygulama alanları için yeni bir seçenek olarak değerlendirilmesi, bu durumda hidrojenin saf haliyle ve yakıt hücresine dönüştürülerek kullanılabileceği ön görülmektedir.

Öte yandan hidrojen üretimi ile birlikte, yakıt hücresi biçiminde değerlendirilebileceğinden, yenilenebilir enerji kaynaklarının da uygulamalarda kullanılabilmesi daha olası hale gelecektir. Dolayısıyla hidrojen aslında bir enerji kaynağından çok enerji taşıyıcısı rolünü almaktadır [21].

Yeşil Hidrojen

Yeşil hidrojen, suyu elektroliz etmek için, güneş veya rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen temiz elektriğin kullanılmasıyla elde edilmektedir. Elektrolizi-

zörler, suyu hidrojen ve oksijen bileşenlerine ayırmak için elektrokimyasal bir reaksiyon kullanır ve bu süreçte karbon salımı gerçekleşmez.

Günümüzde üretilen hidrojenin oldukça küçük bir miktarı yeşil hidrojendir, zira üretimi için yalnızca yenilenebilir kaynakların kullanımı sebebiyle maliyetlidir. Ancak, önümüzdeki dönemde rüzgar ya da güneş enerjisinden elde edilen enerjinin fiyatının düşmesiyle, yeşil hidrojenin maliyetinin de makul seviyelere geleceği öngörülmektedir. Öte yandan yeşil hidrojen, iklim değişikliği ile mücadele anlamında en önemli hidrojen türü olarak kabul görmektedir [22].

Mavi Hidrojen

Mavi hidrojen, doğal gaz ile ısıtılmış suyu buhar formunda bir araya getiren özel bir işlem kullanılarak temelde doğal gazdan üretilmektedir. Bu işlem sonucu asıl çıktı hidrojen olmakla birlikte yan ürün olarak karbondioksit de üretilir. Dolayısıyla mavi hidrojenin tanımı, bu karbonu yakalamak ve depolamak için karbon yakalama ve depolamanın (CCS) kullanımını da içermektedir. Bu özelliğinden dolayı mavi hidrojen, bazen 'düşük karbonlu hidrojen' olarak da tanımlanabilmektedir. Çünkü elde edildiği işlem sürecinde aslında sera gazlarının oluşumunu tamamen engelleyemez [22]:

Gri Hidrojen

Gri hidrojen, hidrojen üretiminin en yaygın şeklidir. Doğal gazdan veya metandan, buhar metan reformasyonu işlemi kullanılarak elde edilir ancak bu işlem esnasında oluşan sera gazları yakalanmadan salımı gerçekleşir. Dolayısıyla esasında gri hidrojen ve mavi hidrojen aynıdır ancak gri hidrojeninde karbon yakalama ve depolama kullanılmaz. Dolayısıyla elde edilen hidrojenin iklim değişikliği ile mücadele ve sürdürülebilirlik bağlamında yeterince katkısı olmamaktadır [22].

Buhar metan reformasyonu (SMR), doğal gazın ana bileşeni olan metandan ve diğer hidrojen içeren kimyasallardan hidrojen üretme yöntemidir. SMR, hidrojen gazı, karbon monoksit ve karbon dioksit üretmek için metanın bir katalizör varlığında buharla reaksiyonu şeklinde gerçekleşmektedir.

Diğer bir hidrojen elde etme yöntemi ise elektrolizdir. Suyu elektrik kullanarak hidrojen ve oksijene ayırma işlemine elektroliz denilmektedir. Alkali elektroliz, polimer elektrolit membran (PEM) ve katı oksit elektroliz hücreleri (SOEC'ler), elektroliz teknolojilerinin örnekleri olarak sayılabilmektedir.

Genel olarak elektroliz, özellikle yenilenebilir enerji kaynakları ile entegre biçimde uygulamaya konulduğunda umut verici bir hidrojen üretim sürecidir. Bununla birlikte, elektroliz ekipmanının maliyeti ve verimliliği, hidrojenin sürdürülebilir bir enerji taşıyıcısı olarak yaygın şekilde kullanılabilmesi için aşılması gereken temel engeller olmaya devam etmektedir, bu sebeple de yenilenebilir enerji maliyetlerinin düşmesi ve teknolojinin yaygınlaşması ile birlikte, hidrojen üretim maliyetleri de azalacak ve böylece daha fazla kullanım alanı bulunabilecektir.

Hidrojen eldesinin biyolojik olarak ilerletilmesi de mümkündür ve bu yöntem, sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji çözümleri sunmaktadır. Organik substratların veya suyun hidrojen gazına dönüştürüldüğü proseslerde farklı mikroorganizmalar kullanılmaktadır. Ancak bu süreçler hala araştırma ve geliştirme aşamasındadır ve büyük ölçekli hidrojen üretimi için ekonomik olarak uygun hale getirilmeye henüz çok uzak bulunmaktadırlar. Hidrojen üretimine yönelik biyolojik teknikler büyük umutlar vaat etse de, organik materyallerin düşük hidrojen verimi ve kontaminasyon gibi çeşitli problemlerin ve sınırların, bunların hayata geçirilmesinden önce çözülmesi gerekmektedir [23].

Tüm bu bilgiler ışığında, iklim değişikliği ile mücadele ve sürdürülebilir enerji anlamında hidrojenin, hidrojeni potansi-

yel olarak kullanabilecek sektörlerin karbonsuzlaşma adımları için değerli bir kaynak olacağı açıktır. Bununla birlikte, farklı türde hidrojen üretim teknikleri göz önüne alındığında, özellikle karbonsuzlaşma hedefleriyle paralel biçimde yeşil hidrojen üretimine yoğunlaşılacağı beklenebilir. Fakat, mevcut durumda üretim maliyetlerinin yüksek olması sebebiyle kullanım potansiyelini yeterince sergileyemeyen hidrojen için, iklim taahhütlerinin de baskısıyla önümüzdeki dönemin çok daha parlak geçeceği açık şekilde görülebilmektedir.

2.2.4. Karbon Yakalama ve Değerlendirme Teknolojileri

Yenilenebilir enerji sistemleri, hidrojen gibi alternatif yakıtların eldesi ve kullanımı gibi, sürdürülebilirlik ve iklim değişikliği bağlamında fayda getirecek uygulamalar olsa da, pek çok durumda bu uygulamalar sera gazı salımını sıfırlamakta yetersiz kalabilmektedir. Bu sebeple, iklim değişikliğinin etkilerinin azaltılması ya da giderilmesine yönelik uygulamalar için salınan karbonun yakalanması ve mümkünse değerlendirilebilmesi de iklim değişikliğine yönelik sürdürülebilirlik yaklaşımı açısından önemlidir. Sera gazlarının oluşturduğu emisyonlarla ilgili olarak karbon yakalama ve karbondioksitin uzaklaştırılması terimlerinin iki farklı yaklaşım olduğunu vurgulamak gerekmektedir.

Burada karbon yakalama denildiğinde bahsi geçen karbon salımı, endüstriyel prosesler ya da benzeri gerekçelerle salınan CO₂'yi temel almaktadır. Ancak karbondioksitin uzaklaştırılması ya da giderilmesi, kaynağından bağımsız olarak atmosferde hali hazırda var olan CO₂'yi ifade eder. Dolayısıyla her iki kavram birbirinden farklıdır [24].

CCS (Carbon Capture and Storage), CO₂ emisyonlarını “nokta kaynaklardan”, yani fosil yakıt kullanımından veya endüstriyel proseslerden doğrudan yakalayan ve CO₂'nin daha sonra uzun bir süre boyunca depolandığı prosesleri ifade etmekte-

dir. CCU (Carbon Capture and Utilization), CO₂'yi yakaladıktan sonra sentetik yakıtlar, kimyasallar ve malzemeler gibi ikincil işlemlerde kullanan süreçleri göstermektedir [25].

Karbon yakalama, kullanma ve depolama (CCUS), küresel enerji ve iklim hedeflerine ulaşmada önemli ve çeşitli rol oynayabilecek bir dizi teknolojiyi ifade etmektedir. CCUS, yakıt olarak fosil yakıtlar veya biyokütle kullanan enerji üretimi veya endüstriyel tesisler de dahil olmak üzere büyük kaynaklarda gerçekleşen proseslerden ileri gelen CO₂'nin yakalanmasını içermektedir. Bunun ötesinde, CO₂ doğrudan atmosferden de yakalanabilmektedir. Elde edilen CO₂ yerinde kullanılmayacaksa; sıkıştırılmakta ve boru hattı, gemi, demiryolu veya kamyon gibi farklı iletim araçlarıyla çeşitli uygulamalarda kullanılmak üzere taşınabilmektedir. Ancak kullanımı yapılmayacaksa, kalıcı olarak depolanabilmesi adına derin jeolojik oluşumlara (tükenmiş petrol ve gaz rezervuarları veya tuz oluşumları gibi) enjekte edilebilmektedir [26].

Karbondioksitin Yakalanması

Sera gazlarının en büyük kısmını oluşturan karbondioksitin yakalanabilmesi için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar, yanma süreçlerinin öncesinde ya da sonrasında kullanılabilirler. Özetle ifade etmek gerekirse, yanma sonrasında ortaya çıkan karbondioksitin tutulması için solventler gibi bazı kimyasallardan yararlanılmaktadır. Yanma öncesinde ise yakıt gazlaştırılarak beslenir ve benzer şekilde kimyasallar yardımıyla CO₂ giderimi yapılabilir. Öte yandan, yanma sırasında fazlaca oksijen beslemesi yapılarak CO₂ emisyon akışının daha kolay yakalanabilir hale getirilmesi de uygulanan yöntemlerdendir [24].

CO₂ yakalama, çeşitli endüstriyel proseslerin parçası haline gelmiş ve buna bağlı olarak, CO₂'yi baca gazı akışlarından ayırmaya veya yakalamaya yönelik teknolojiler, onlarca yıldır mevcut şekilleriyle ticari olarak da değerlendirilmektedirler. En

gelişmiş ve yaygın olarak benimsenen yakalama teknolojileri, kimyasal emilim ve fiziksel ayırmadır; diğer teknolojiler arasında membranlar ve kimyasal döngü veya kalsiyum döngüsü gibi alternatifler de yer almaktadır [26].

Çizelge 2.1. Bazı CO₂ yakalama teknikleri [26]

Yöntem	Açıklaması
Kimyasal Absorbsiyon	CO ₂ ile kimyasal bir çözücü (etanolamin bileşikler gibi) arasındaki reaksiyona dayanan işlemdir. En gelişmiş CO ₂ ayırma tekniğidir.
Fiziksel Ayırma	Fiziksel adsorpsiyon katı bir yüzeyden (örneğin aktif karbon, alümina, metalik oksitler veya zeolitler) yararlanırken, fiziksel absorpsiyon sıvı bir çözücünden (örneğin Selexol veya Rectisol) yararlanır. Bir adsorban aracılığıyla yakalandıktan sonra CO ₂ , artan sıcaklık veya basınç yoluyla ayrıştırılır.
Membran Ayırma	CO ₂ 'nin geçmesine izin veren ancak diğer gazları gaz akışında tutmak için bariyer görevi gören, yüksek CO ₂ seçiciliğine sahip polimerik veya inorganik membranlar ile gerçekleştirilir.

Kalsiyum Döngüsü	İki ana reaktör kullanarak yüksek sıcaklıkta CO ₂ yakalamayı içerir. Birinci reaktörde kireç (CaO), kalsiyum karbonat (CaCO ₃) oluşturmak üzere bir gaz akışından CO ₂ 'yi yakalamak için sorbent olarak kullanılır. CaCO ₃ daha sonra yeniden üretildiği ikinci reaktöre taşınır, böylece kireç ve saf bir CO ₂ akışı elde edilir. Kireç daha sonra ilk reaktöre geri gönderilir.
------------------	--

Karbondioksitin Taşınması, Kullanılması ve Depolanması

Karbondioksit, yakalanmasının ardından yeniden değerlendirileceği veya depolamasının yapılacağı yere doğru taşınmak zorundadır. Bunun için farklı alternatifler olsa da büyük ölçekte taşıma yapılabilmesi için boru hattı ya da gemilerle taşımacılık yapılabileceği gibi, daha küçük ölçekler için karayolu ya da demiryolu da kullanılabilir.

CO₂'nin gemiyle taşınması, boru hatlarına göre daha kullanışlı bir seçenek olabilmektedir. Gemiyle taşıma durumunda elde edilecek esneklik aynı zamanda CO₂ hacimleri büyüdükçe daha sonra bağlanabilecek veya daha kalıcı bir boru hattı ağına dönüştürülebilecek CO₂ yakalama merkezlerinin gelişimini de kolaylaştırabilmektedir.

Bir diğer seçenek olan depolama konusunda ise, karbondioksitin yeniden kullanımı gibi geniş alternatifler bulunmamaktadır. Karbondioksit depolanması için kullanılacak alanın gazı

hapsedebilecek bir tabaka ile kaplı jeolojik rezervuarlardan oluşması gerekmektedir. Bu rezervuar türleri, derin tuz oluşumları, tükenen petrol ya da gaz rezervuarları olabilir. CO₂, depolanmak üzere bir yere doldurulduğunda genellikle öncesinde sıvılaştırılır ve sonrasında enjeksiyon işlemi yapılır. Bu sebeple karbondioksitin sıvı formda kalabilmesi için 800 metreden daha büyük derinliklerde depolanması önemlidir [26].

2.3. Günümüzde Karbonsuzlaştırma Yöntemlerinin Kullanımı

Yenilenebilir enerji kullanımı, alternatif yakıtlar ve karbon tutma sistemleri gibi metodlarla iklim değişimine yönelik çevresel sürdürülebilirlik yaklaşımlarının uygulama alanları, gün geçtikçe daha fazla yer bulmaya başlamış ve uygulama alanları da genişlemiştir. Bunun en önemli etkisi, karbon yoğun sektör olan enerji sektörü ve bilhassa elektrik enerjisi üretimidir.

Özellikle Paris iklim anlaşması sonrasında gündeme gelen net sıfır hedefleri ve görece kısa vadeli terminler, emisyon salımının azaltılması, mevcut emisyon yoğunluğunun düşürülmesi ve en nihayetinde sıfır emisyonlu faaliyetlere geçişi kapsamaktadır. Bununla birlikte, halihazırda bu geçiş sürecinde zamana ihtiyaç duyan alanlar ve konular için de karbon yakalama ve depolama sistemleri bir alternatif oluşturmaktadır. Ancak, CO₂ yakalama çözümleri, özellikle çimento, çelik ve kimya endüstrileri için ve negatif emisyonlar (daha önce salınan emisyonların giderimi) sağlamak için gerekli olsa da, ancak ilerlemesi gereken hızın çok altındadır. Fakat, özellikle yenilenebilir enerjiye geçiş konusunda hızlı bir iyileşme olduğu açıktır. Zira 2000 yılı ile kıyaslandığında rüzgar, güneş, biyoenerji ve hidroelektrik üretimi dikkate alınırsa, küresel yenilenebilir enerji kullanımında büyük ilerleme olduğu görülebilir. 2000 yılında toplam 16,96 GWh'lik bir kurulu güce sahip olan rüzgar enerjisi, 2022 yılı sonu itibarıyla 900 GWh'ye yaklaşan miktara ulaşmıştır. Benzer

şekilde 2000 yılında yalnızca 1,23 GWh'lik kurulu güce sahip olan güneş enerjisi de, 2022 yılı itibariyle 1062 GWh'lik bir kurulu güce ulaşmıştır [14]. Fosil yakıtlarda ise durum tersidir. Küresel boyutta ele alındığında, kömür yakıtlı elektrik enerjisi üretim santrallerinin 2000 yılında toplam kurulu gücü 1085 GWh iken, 2022 sonu itibariyle 2 katından daha az bir artış ile 2108 GWh'ye ulaşmıştır [14]. Dolayısıyla yenilenebilir kaynakların payı, bu geçiş dönemi içerisinde artarak devam ederken, artan enerji talebine rağmen, kömür santrallerinin payındaki artış oldukça sınırlı kalmıştır. Bununla ilgili olarak enerji şirketlerinin büyük çoğunluğu, önümüzdeki dönemde fosil yakıt temelli teknolojilere yatırım yapmaktan kaçınarak, yalnızca yenilenebilir kaynaklardan oluşan bir yatırım stratejisi benimsemişlerdir. Bu durumun, mevcut ve yürürlüğe girecek pek çok mevzuatın da etkisiyle birlikte ivmelenerek artacağı ön görülebilir. Ülkemizde de benzer şekilde pek çok farklı enerji üretim şirketi, gelecek yıllarda yapacağı yatırımlar için yenilenebilir enerji kaynaklarını tercih edeceklerini beyan etmişlerdir.

Alternatif yakıtlara bakıldığında ise, karbon yakalama ve kullanma sistemlerine benzer şekilde sınırlı bir miktar göze çarpmaktadır. Özellikle hidrojenin değerlendirilmesi bu noktada önemli olmakla birlikte, küresel hidrojen kullanımı 2022 yılında bir önceki yıla nazaran %3'lük bir artışla 95 milyon ton civarına ulaşmıştır [25]. Henüz elektrik enerjisi üretimi için yeterince faydalanılamasa da, özellikle 2050 yılı itibariyle toplam hidrojen kullanımının 74 milyon tondan fazla bir miktarının yalnızca elektrik üretimi için tüketileceği değerlendirilmektedir. Bunun karşılığı olarak, küresel enerji ihtiyacının %1'lik kısmının hidrojen ile elde edileceği ön görülmektedir [27].

Karbon yakalama ve değerlendirme yöntemlerine bakıldığında ise, 2022 yılı itibariyle toplam 45 milyon ton CO₂'nin yakalandığı, ancak bunun yalnızca 1 milyon tonluk kısmının elektrik enerjisi üretiminden ileri geldiği tespit edilmiştir. Bu

yöntem, daha ağırlıklı olarak diğer endüstriyel faaliyetlerde kullanılmakla birlikte, önümüzdeki yıllar içinde elektrik enerjisi üretiminden ileri gelen CO₂ yakalama miktarının artacağı düşünülmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı öngörülerine göre 2030 yılı itibariyle toplam yakalanacak CO₂'nin 1 milyar tonu aşması, bunun %18'lik kısmının elektrik enerjisi üretimi için faaliyet gösteren tesislerden oluşacağı tahmin edilmektedir [26].

3. BULGU VE TARTIŞMA

Çalışma boyunca elde edilen veriler eşliğinde, çevresel sürdürülebilirlik açısından elektrik enerjisi üretimine ait sektör temsilcilerinin, farklı alternatiflerle beraber karbonsuzlaştırma çalışmalarını hızlandırmasının ve geçiş dönemi için bir yol haritası oluşturarak, önceliklendirme değerlendirmesini yapmalarının gerektiği bir gerçektir. Ülkemizde ve dünyada enerji, diğer sektörlerden farklı olarak, hem temel ihtiyaç hem de zaruri olarak arzının aksamadan gerçekleştirilebilmesi gerekli bir kaynak olması sebebiyle, çeşitli kurum ve kuruluşlar ile karar alma mekanizmalarının bir arada yönlendirerek kontrol ettiği bir kaynaktır.

Bu bakımdan elektrik enerjisi üretimi için de gelecek öngörüsü içerisinde hareket edilirken, farklı mekanizmalar ve kısıtların ele alınarak değerlendirme yapılması gerekmektedir. Hem ulusal hem de uluslararası koşulların bir arada sağlanması gerektiği unutulmadan, stratejiler bu doğrultuda belirlenmelidir. Zira elektrik enerjisi üretimi, diğer sektörler için de temel kaynaktır. Bu sebeple, sektörün etkilenmesine neden olacak herhangi bir etken, dolaylı da olsa, diğer sektörleri de etkileyecektir.

Bu sebeplerden dolayı, çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması adına, iklim değişikliğine yönelik alınacak tedbirler özelinde, elektrik enerjisi üretimine temelde etki edecek iki mekanizma olduğu söylenebilir. Bunlar:

1. Yasal düzenlemeler,
2. Teknolojik gelişmelerdir.

Türkiye, 2023 yılında, 26. Taraflar Konferansı'nda Tarafların Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) ve Paris Anlaşması'na ek olarak kabul ettiği Glasgow İklim Mutabakatı bağlamında güncellenmiş Birinci Ulusal Katkı Beyanı'nı açıklamıştır [28]. Buna göre, 2012 yılı referans alınarak, 2053 yılında ülkemizin net sıfır karbon salımına sahip olacağını tahhüt etmiştir. Bu doğrultuda, pek çok politika belgesi yayımlanmış ve mevzuat düzenlemeleri gerçekleştirilmiştir. Bunların en önemlileri aşağıda sıralanmıştır;

- On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023)
- Çevre Kanunu (1983)
- Enerji Verimliliği Kanunu (2007)
- Florlu Sera Gazlarına İlişkin Yönetmelik (2022)
- Ozon Tabakasını İncelten Maddelere İlişkin Yönetmelik (2017)
- Sera Gazı Emisyonlarının Takibi Hakkında Yönetmelik (2014)
- Stratejik Çevresel Değerlendirme Yönetmeliği (2017)
- Sera Gazı Emisyonlarının İzlenmesi ve Raporlanması Hakkında Tebliğ (2014)
- Sera Gazı Emisyon Raporlarının Doğrulanması ve Doğrulama Kuruluşlarının Akreditasyonu Hakkında Tebliğ (2017)
- Orta Vadeli Program (2023-2025)
- Ulusal İklim Değişikliği Stratejisi (2010-2023) ve Eylem Planı (2011-2023) (güncellenmekte)

- Ulusal İklim Değişikliği Uyum Stratejisi ve Eylem Planı (2011-2023) (güncellenmekte)
- Enerji Verimliliği Stratejisi ve Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı (2017-2023)
- Ulusal Ulaştırma ve Lojistik Ana Planı (2053)
- Türkiye Yeşil Mutabakat Eylem Planı (2021)
- Türkiye Ulusal Enerji Planı (2020 - 2035)
- İklim Şûrası Kararları (2022)
- Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası (2023)

Ayrıca, Uzun Vadeli Düşük Emisyonlu Kalkınma Stratejisi (Uzun Vadeli Strateji), İklim Kanunu, Yerel İklim Değişikliği Eylem Planı Yönetmeliği, Uzun Vadeli İklim Değişikliği Stratejisi, Döngüsel Ekonomi Stratejisi ve Eylem Planı, Sürdürülebilir Tüketim ve Üretim Stratejisi, Sürdürülebilir ve Akıllı Hareketlilik Stratejisi ve Eylem Planı gibi plan ve mevzuatların da yakın zamanda yürürlüğe koyulması hedeflemektedir.

Yasal düzenlemeler dikkate alındığında, elektrik enerjisi üretiminin arz sürekliliğini sağlamak adına iklim risklerine karşı ve aynı zamanda karbonsuzlaştırma amacıyla olumsuz iklim etkilerini en aza indirecek düzenlemelerle faaliyette bulunması için, bir denge stratejisinin güdülmesi gerektiği bir gerçektir. Nitekim, ülkemiz de, dünyadakine benzer biçimde, bu denge stratejisi ile hareket etmekte ve fosil yakıtlardan çıkılması yolunda, geçiş dönemi süresince yenilenebilir kaynakları teşvik etmektedir [28].

Bununla ilgili olarak, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destek Mekanizması (YEKDEM) ve Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları (YEKA) Yönetmeliği ile birlikte güneş ve rüzgar enerjisi öncelikli olmak üzere, yenilenebilir enerji yatırımlarına

hız verilmesi için başlatılmış uygulamalardır [29]. Diğer taraftan, ihracat pazarlarımızdan olan Avrupa Birliği de iklim değişikliği ve çevresel sürdürülebilirlik adına önemli mevzuatsal düzenlemelere gitmektedir. Bu durum, mevzuata uyum için ülkemizdeki yasal düzenlemeleri de etkilemektedir. Teknolojik gelişmeler ele alındığında ise çevresel sürdürülebilirlik ve iklim değişikliği etkilerinin azaltılması adına son yıllarda önemli ilerlemelerin olduğu açıktır.

Fosil yakıtlardan çıkmak için ihtiyaç duyulan süre boyunca devam edecek olan geçiş döneminde, yenilenebilir enerji kaynaklarının ve hidrojen gibi alternatif enerji kaynaklarının ilk kurulum ve operasyonel maliyetlerinde iyileşmeler dikkat çekmektedir. IRENA ve IEA gibi otorite raporlarından görüldüğü üzere, güneş temelli elektrik enerjisi için ihtiyaç duyulan fotovoltaik panel fiyatları, 2010 yılından bu yana %80 civarında düşüş göstermiştir. Benzer şekilde, panellerde kullanılan hücre verimlilikleri de 2000 yılındaki ortalama %32’lik değerden, %47’nin üzerine çıkmıştır [11]. Dolayısıyla güneş temelli elektrik enerjisi üretimi için hem maliyet avantajı hem de verimlilik artışının ortaya çıkmış olduğu görülmektedir. Rüzgar enerjisi için de benzer bir seyir görülmektedir. Avrupa için 2010 yılında rüzgar santrallerinden tedarik edilen elektriğin ortalama birim maliyeti 0,137 \$/KWh iken, 2022 yılında bu değer 0,045 \$/kWh’ye kadar gerilemiştir [30]. Buna en büyük etki, rüzgar türbini alanında görülen teknolojik gelişmelerdir. Teknolojik gelişmelerle birlikte rüzgar türbinlerinin üretim güçleri de artmış, 2023 yılı ortasında Çin’de devreye giren enerji tesisinde yer alan türbinler 16 MW kapasiteye kadar ulaşmışlardır [75]. Yalnızca 10 yıl öncesine kadar benzer bir kapasite için en az dört farklı türbin ihtiyacı olduğu göz önüne alındığında, ilerlemenin ne kadar hızlı olduğu da açıkça ortaya çıkmaktadır. Diğer yenilenebilir kaynaklarda da, maliyet anlamında aşağı yönlü eğilimler görülmektedir. Bu maliyet düşüşü tıpkı rüzgar ve güneş te-

melli üretimlerde olduğu gibi, sürekli iyileşen ve olgunlaşan teknolojilerden ileri gelmektedir.

Hidrojen gibi alternatif yakıtların da gelişmesiyle çevresel sürdürülebilirlik özelinde önemli adımlar atılmaktadır. 2022 yılı itibariyle küresel ölçekte 95 milyon tonluk hidrojen kullanımını gerçekleştirmiş olsa da, bunun çok az miktarı elektrik enerjisi üretimine katkı sağlayabilmiştir. Yine de hidrojen elektrik üretimi için kullanılan gaz türbinlerinde, doğalgaz gibi diğer yakıtlarla karıştırılarak kullanılmaya başlanmıştır. 2023 yılında Güney Kore’de 80 MW kapasiteye sahip gaz türbini için %60’lık hidrojen karışımı kullanılarak üretim yapılabilmektedir [27]. Hidrojenin kömür ve doğalgaz kullanan elektrik üretim tesislerinde ana yakıtla birlikte kullanılmasıyla emisyon salımlarında önemli azalış meydana getireceği açıktır. Ancak, yeşil hidrojen üzerinden değerlendirildiğinde, enerji sektörü genelinde hidrojenin fayda-maliyet seviyelerinin makul düzeylere gelmesi zaman alacaktır.

Hidroelektrik santraller, potansiyelin değerlendirilmesi noktasında diğer yenilenebilir teknolojilere nazaran daha olgun seviyede bulunmaktadırlar. Öte yandan, teknolojik gelişmelerle birlikte kapasitelerinde artışlarının olabileceği değerlendirilebilir. Ancak, hidroelektrik santrallerin sürdürülebilirlik kapsamında sosyal ve biyoçeşitlilik etkisi, diğer yenilenebilir teknolojilere göre daha yüksektir ve bu onlar için bir dezavantaj da oluşturmaktadır.

Karbon yakalama ve değerlendirme teknolojileri henüz gelişme aşamasında olsa da, önümüzdeki dönemde seragazlarının azaltılması için önemli araçlardan birisi haline geleceği beklenmektedir. IEA raporları da halihazırdaki 45 milyon ton CO₂ yakalama kapasitesinin, küresel ölçekte 300 milyon ton CO₂ değerini aşacağını ön görmektedir. Ayrıca yakalanan CO₂’nin farklı sektörlerle hammadde girdisi olarak değerlendirilmesi,

sürdürülebilirlik kavramı için önemli bir konu olan döngüsellğe katkı sağlayacaktır. Elektrik enerjisi üretimi sonucu ortaya çıkan karbon salınımının, karbon yakalama teknolojileri yardımıyla tutularak farklı sektörler için hammadde olarak kullanımı mümkündür. Bu durum yalnızca çevresel sürdürülebilirlik ya da iklim değişikliği için değil, sürdürülebilirliğin finansal ve yönetim kısımları için de faydalı olabilecektir.

Dolayısıyla, tüm dünyada ve ülkemizde, çevresel sürdürülebilirlik ve iklim etkilerini en aza indirme amacıyla bir yol haritası ortaya konulmuş, bu doğrultuda yasal düzenlemeler yapılmaya başlanmıştır. Aynı zamanda, ortaya çıkan teknolojik gelişmeler ve yeni teknolojiler ile birlikte, elektrik enerjisi üretiminden kaynaklı sera gazlarının en önemli sebebi olan fosil yakıtlardan çıkış için çalışmalar hız kazanmıştır.

Bu dönüşüm sürecinde, fizibilite, piyasa koşulları ve enerji güvenliğini gözeterek, enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji potansiyelinin mümkün olan en üst düzeyde kullanılması önem arz etmektedir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, büyük bir kümeyi temsil eden enerji sektörü içerisindeki elektrik enerjisi üretim faaliyeti ile, iklim değişimine yönelik çevresel sürdürülebilirlik çalışmaları arasındaki ilişki, birbirleriyle olan bağlantılar ve sektör bazlı olarak iklim değişikliğine yönelik pozitif katkı sağlayabilecek uygulamalar, farklı kaynaklardan elde edilen veriler ve istatistiki bulgular eşliğinde incelenmiştir.

Hem ülkemizde hem de dünyada, elektrik enerjisi üretiminde fosil yakıtların payının giderek azaldığı, buna karşın düşük emisyonlu üretim temelinde yenilenebilir kaynaklardan elektrik enerjisi üretiminin hız kazandığı görülmektedir. Buna rağmen fosil yakıtların payının hala yenilenebilir kaynakların üzerinde olduğu da bir gerçektir. Bu durum, elektrik enerjisi

üretimi özelinde iklim değişikliğinin olumsuz etkilerine karşı gösterilen çaba karşısında en büyük engeli oluşturmakla kalmayıp, sürecin çözümüne ulaşmayı daha da zorlaştırmaktadır. Çalışma içinde çeşitli kaynaklardan derlenen bilgilerden de görüldüğü üzere, fosil yakıtlar seragazlarının en büyük müsebbibi olmakla birlikte, sera gazları da iklim değişikliğine etki eden en önemli girdidir.

Paris iklim anlaşması gibi uluslararası regülatif temeller, kısa-orta dönemde seragazlarının azaltılmasına yönelik gösterilen çabanın en büyük destekçileridir. Zira, yerel ve bölgesel mevzuatların düzenlenmesinde, ülkeler üzeri anlaşmalar yol gösterici ve hedef belirleyici olmaktadır. Bu doğrultuda, Paris İklim Anlaşması'nın hedeflerini yerine getirmek üzere ülkeler kendi stratejilerini belirleyerek uygulamaya geçirmek durumunda kalmışlardır. Ancak burada önemli olan, yapılacak uygulamaların terminleri ve alacağı süredir. Bu sebeple seragazlarının azaltılması hususunda ülkelerin bir an önce harekete geçmesi önemlidir.

Regülatif düzenlemelerden öte, teknolojik iyileştirmeler, yenilenebilir kaynaklara geçiş gibi inovatif ve sistematik değişiklikleri düşünerek, iklim değişikliğine karşı geniş bir perspektifle hareket edilmesi doğru olacaktır. Henüz gelişme aşamasında bulunan karbon yakalama ve depolama çözümlerinin orta vadede göstereceği gelişim de, kısa vadede enerji portföyünün yenilenebilir kaynaklara dönüştürülmesi kadar önemlidir.

Bu noktada, elde edilecek karbon türevlerinin, farklı biçimlerde ham madde olarak değerlendirilebilir olması da, sürdürülebilirlik perspektifinin döngüsellik kısmında yer alacak, iklim değişikliğine karşı katkı sağlanırken, yeni problemlerin yaratılmasının da önüne geçilecektir.

Arz-talep dengesinin önem arz ettiği ve regülatif hassasiyetin yüksek olduğu sektörde, karbonsuz üretime geçiş döne-

minde optimum noktanın yakalanması ve stratejik yol haritasının belirlenerek uygulamaya konulması elzemdir. Sürdürülebilirlik kavramı da göz önünde bulundurulduğunda, elektrik enerjisinin hem arz güvenliği hem de çıktısının diğer sektörlerde daimi olarak kullanılması gerekliliği, sistemin işleyişini mümkün olan en kesintisiz biçimde gerçekleştirilmesini gerektirmektedir. Bu da, temelde kaynakların korunması ve asgari iklim etkisi ile mümkün olabilecektir.

Günümüzde çok daha bağlı hale geldiğimiz ve rutin yaşam alışkınlarımızda daha fazla yer alan elektrik enerjisinin temiz ve sürdürülebilir kaynaklardan elde edilmesinin önemi tekrar vurgulanmalıdır. Öte yandan, karbon yakalama teknolojilerinden elde edilecek olan CO₂'nin, ihtiyaç duyulan sektörlerde değerlendirilmesi, döngüsellik anlamında katkı sağlayacağı gibi, sektörler arasındaki sinerjinin de artmasına etki edecektir. Önümüzdeki dönemde devreye girmiş ve girecek olan emisyon ticaret sistemleri üzerinden, bir emtia olarak işlem görecektir CO₂'nin önemi daha da artacaktır.

Sonuç olarak, iklim değişikliğine karşı öncelikli olarak elektrik enerjisi elde edilen kaynaklar yeniden değerlendirilmeli, kısa vadede yapılabilecekler arasında yer alan yenilenebilir kaynaklara geçiş hızlandırılmalı; orta vadede karbon yakalama ve alternatif enerji kaynaklarına olan ilgi daha da yükseltilerek, uygulanabilirlikleri, maliyet perspektifi de göz önünde bulundurularak arttırılmalıdır. Sürdürülebilirlik kavramı kapsamında arzın devamlılığı, döngüsel ekonomiye katkı anlamında, sektörün önünde yer alan potansiyellerin değerlendirilmesi ve diğer sektörler ile sinerjisinin de bu bağlamda yükselmesi hedeflenerek planlamalar yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

- IPCC. (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- İnternet: Ritchie. H., Rosado, P., and Roser, M. (2020). Emissions by Sector. URL: <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector> , Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.
- İnternet: IEA. (2022). Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021. IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021-2>, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023
- İnternet: Engie. Thermal Electricity. URL: <https://www.engie.com/en/activities/thermal-energy/thermal-powerstations#:~:text=Traditional%20thermal%20power%20plants%3A%20also,an%20alterna-tor%20to%20produce%20electricity>, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.
- Karaman, S., Gökalp, Z. (2010). Küresel Isınma ve İklim Değişikliğinin Su Kaynakları Üzerine Etkileri. Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi, 3 (1), 59-66

İnternet: University of California. Understanding Global Change, URL: <https://ugc.berkeley.edu/backgroundcontent/wind/#:~:text=As%20the%20atmosphere%20continues%20to,normal%20over%20any%20particular%20region>, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

İnternet: Met Office. What is Climate Change, URL: <https://www.metoffice.gov.uk/weather/climate-change/what-is-climate-change>, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

IPCC. (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Switzerland. 184 s.

İnternet: Deloitte. What is Decarbonisation? URL: <https://www2.deloitte.com/nl/nl/pages/energy-resources-industrials/articles/what-isdecarbonisation.html> , Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

İnternet: Ritchie. H., Rosado, P. (2020). Electricity Mix. URL: <https://ourworldindata.org/electricity-mix>, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

İnternet: NREL. Interactive Best Research-Cell Efficiency Chart. URL: <https://www.nrel.gov/pv/interactive-cell-efficiency.html>, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

IEA. (2023). Renewables 2022 – Analysis and Forecast to 2027. IEA

Lakatos, L., Hevessy, G., and Kovacs, J. (2011). Advantages and Disadvantages of Solar Energy and Wind-Power Utilization. World Futures, 67:6, 395-408

İnternet: EMBER. Electricity Data Explorer. URL: <https://ember-climate.org/data/datatools/data-explorer/>, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023

EMBER. (2023). Global Electricity Review 2023. Ember. 163 s
Center for Sustainable Systems, (2023). Wind Energy Factsheet. University of Michigan, CSS07-09

Department of Energy, (2015). Wind Vision: A New Era for Wind Power in the United States, 58 s.

IEA. (2021). Electricity Information: Overview, IEA, Paris

İnternet: EİA. Geothermal Explained. URL: <https://www.eia.gov/energyexplained/geothermal/geothermal-energy-and-theenvironment.php> , Son Erişim Tarihi: 17.11.2023

Bilgin, N. (2003). Biyogaz Nedir? Tarım ve Köyişleri Bakanlığı, Ankara.

IEA. (2019). The Future of Hydrogen. IEA, Fransa.

İnternet: National Grid. Energy Explained. URL: <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/hydrogen-colour-spectrum>, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023

Le, T. T., Sharma, P., Bora, B. J., et. al (2023). Fueling the Future: A Comprehensive Review of Hydrogen Energy Systems and Their Challenges. International Journal of Hydrogen Energy, Elsevier

EDF (2022). Understanding the Differences Between Carbon Capture & Carbondioxide Removal. EDF

Lyons, M., Durrant, P., and Kochhar, K. (2021). Reaching Zero with Renewables – Capturing Carbon. Technical Paper 4/2021, IRENA.

IEA. (2021). About CCUS. IEA, Fransa.

IEA. (2023). Hydrogen. IEA, Fransa.

İnternet: Republic of Türkiye Updated First Nationally Determined Contribution. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2023-04/TÜRKİYE_UPDATED%201st%20NDC_EN.pdf,
Son Erişim Tarihi: 17.11.2023

İnternet: Yenilenebilir Enerji Sektöründe YEKDEM, YEKA ve YEK nedir? URL: <https://www.incitas.com.tr/bilgi-merkezi/blog/yenilenebilir-enerji-sektorunde-yekdemyeka-ve-yek-nedir>,
Son Erişim Tarihi: 17.11.2023

IRENA. (2023). Renewable Power Generation Costs in 2022. IRENA, Abu Dabi.

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA YENİLİKÇİ UYGULAMALARDA KULLANILAN GAZ KROMATOGRAFI-KÜTLE SPEKTROMETRİSİ (GC-MS)

Cihan PALOLUOĞLU¹

1. GİRİŞ

Gaz Kromatografi-Kütle Spektrometrisi (GC-MS), iki farklı spektrometreyi birleştirip analiz işlemlerinde çok düşük konsantrasyonları bile tesbit edebilme kapasitesi sunan bir kromatografi yöntemidir. Aynı zamanda GC-MS iki tekniğin tek bir yöntemle çalıştırılmış halide diyebiliriz. İklim değişikliğinin yoğun bir şekilde yaşandığı çağımızda atmosferik, toprak ve su gibi çevresel numunelerin analizlenmesinde kullanılabilen en doğru kromatografik sistemlerinden biridir diyebiliriz. Hem nicel hem de nitel ölçümler yapabilen GC-MS cihazı genellikle Uçucu ya da yarı uçucu gibi Organik bileşiklerin analizlenmesinde de yüksek oranda başarılar sağlamaktadır. Böylece GC-MS cihazı sayesinde gaz fazındaki uçucu bileşenlerin ayrıştırılıp analizlenmesi başarılı bir şekilde yapılabilmektedir. Cihazın başlıca analiz yaptığı alanlar ise; uçucu bileşikler, yarı uçucu bileşikler, yağlar, petrol türevleri, Aromatikler, çevresel analizler, ilaç kimyasının tesbiti, bilimsel çalışmalarda bilinmeyen örneklerin araştırılması hatta bazı resmi kurumlarda uyuşturucu madde analizleri gibi bilinmeyen kimyasalların belirlenmesi gibi oldukça geniş bir alanda kullanılmaktadır. Ayrıca analizi yapılan oldukça düşük konsantrasyonlardaki eser elementlerin tesbiti de bu cihaz sayesinde yapılabilmektedir. Özellikle organik bileşiklerden olan PAH, PCB ve uçucu diğer organiklerin eser miktar-

¹ Dr. Öğretim Üyesi, Bayburt Üniversitesi, Sanat ve Tasarım Fakültesi, İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü, ² Bayburt Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı (BUMER), Müdürü, cpaloluoglu@bayburt.edu.tr, ORCID: 0000-0002-8635-8315.

larının tesbitinde çoğunlukla kullanılmaktadır. Aynı zamanda Gaz Kromatografi-Kütle Spektrometresi, çevre mühendisliğinde özellikle organik kirleticilerin (PAH, PCB, Pestisit, vb.) Kütüphane taraması (library search) ile tesbit edilerek konsantrasyonlarının da ppm ($\mu\text{g m}^{-3}$) seviyesinde belirlenmesinde kullanılabilmektedir. GC-MS, bilimsel çalışmalarda organik bileşenlerin tespit edilmesi ve miktarlarının belirlenmesinde oldukça etkilidir. GC-MS, bileşenleri birleştirerek kompleks örneklerdeki bileşenlerin ayrılması ve tanımlanmasını sağlar. Bu bağlamda, GC-MS'in kalibrasyon yöntemleri, çalışma prensibi ve analiz süreçleri üzerinde ayrıntılı bilgi vermek, çevre mühendisliği çalışmalarında bu tekniğin daha verimli kullanılabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bölümde GC-MS'nin çalışma prensipleri ayrı ayrı anlatılarak numunenin GC'ye enjektresinden başlanarak MS'de nihai konsantrasyon hesaplamalarına kadar geçecek olan enstrümantasyon çalışması, metod uygulamaları, avantajlı ve dezavantajlı kısımlardan da bahsedilerek raporlanacaktır.

2. ÇALIŞMA İÇERİĞİ

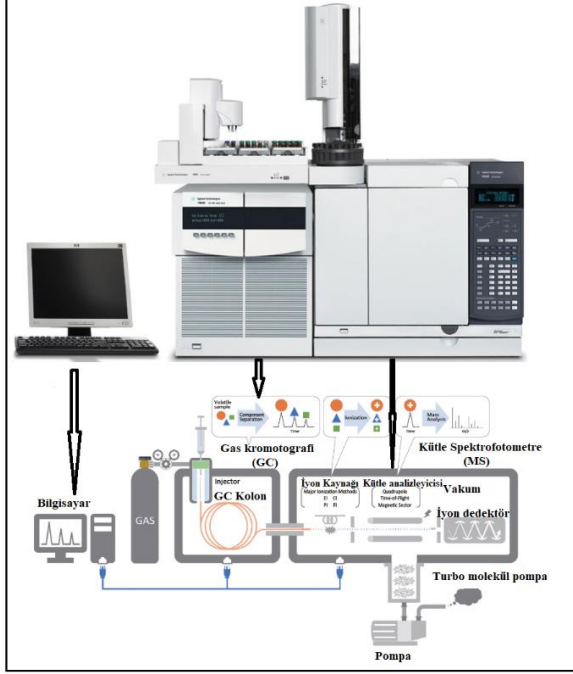
2.1. GAZ KROMATOĞRAFI-KÜTLE SPEKTROMETRESİNİN (GC-MS) YAPISI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ

2.1.1 Gaz Kromatografi (GC)

GC-MS, uçucu ve yarı uçucu bileşenleri ayırarak, kimyasal yapılarını analiz etmek için kullanılan hassas bir enstrümantal tekniktir. Bu sistem, özellikle kompleks karışımların ayrıştırılmasında ve bileşenlerinin tanımlanmasında yaygın olarak kullanılır (Mondello, ve ark. 2008; Luosujarvi, ve ark., 2011; Akande, 2012; Paloluoğlu ve Bayraktar, 2019a). GC-MS sisteminin iki ana bileşeni olan Gaz Kromatografisi (GC) ve Kütle Spektrometresi (MS) sırasıyla bileşenlerin ayrıştırılmasında ve kimyasal analizinde kritik roller üstlenir (Şekil 1). Gaz Kroma-

tografisinin çalışma prensibinde karışımındaki bileşenleri ayırma sürecinin ilk aşamasıdır. Bu cihazda, bileşenlerin ayrımı bir taşıyıcı gaz (genellikle helyum veya azot gibi inert gazlar) yardımıyla yapılır (Chauhan, 2014; Guo, 2014; Paloluoğlu ve Bayraktar, 2019b). Taşıyıcı gaz, örneği kromatografi kolonuna taşır ve bileşenlerin kolon boyunca hareket etmesini sağlar. Kolon, iç yüzeyine kaplanmış özel bir sıvı veya polimerik madde ile kaplanmış uzun ve ince bir tüpten oluşur. Kolon sıcaklığı, bileşenlerin ayrılmasını optimize etmek için sıcaklık programlaması ile ayarlanır. GC’de taşıyıcı gaz, analitin kolondan geçiş hızını ve dolayısıyla ayrılma sürecini etkiler. Yüksek saflıkta ve inert bir taşıyıcı gaz kullanılması, adsorpsiyon ve reaksiyon riski olmadan kolon boyunca taşınmasını sağlar (Kataria, ve ark., 2011; Chauhan, 2014). GC’de Kolonun rolü ise Kolon içindeki sabit faz, bileşenlerin kolonda tutulmasını sağlar. Uçuculuğu farklı olan bileşenler kolonda farklı hızlarda hareket eder ve böylece birbirlerinden ayrılır. Düşük kaynama noktasına sahip uçucu bileşenler kolondan daha hızlı geçerken, daha az uçucu olanlar daha yavaş hareket eder (Liu ve Phillips, 1991; Pena-Abaurrea, ve ark., 2011). GC’de örneğin ayrıştırılma sürecinde örnek, bir enjeksiyon portundan enjekte edilerek taşıyıcı gaz akışıyla birlikte kolona girer. Kolon sıcaklığı, bileşenlerin buharlaşmasını ve sabit faz ile hareketli faz arasındaki dengeyi ayarlayarak bileşenlerin ayrılmasını sağlar. Ayrıştırma işlemi şu adımları içerir; Buharlaşma: Örnek, enjeksiyon portuna enjekte edildikten sonra hızlı bir şekilde buharlaştırılır ve taşıyıcı gazla birlikte kolona taşınır. Diğer bir adım Kolondan Geçiş: Kolon içindeki sabit faz, bileşenlerin hareketini farklı hızlarda yavaşlatarak bileşenlerin farklı zamanda kolondan çıkmasını sağlar. Bu ayırım, molekülün polaritesi, uçuculuğu ve kolon sıcaklığı gibi faktörlere bağlıdır. Bir diğer adım olan Dedektöre Aktarım: Kolondan ayrılan bileşenler dedektöre iletilir. GC-MS sisteminde dedektör genellikle kütle spektrometresidir, burada ayrılan her bileşen iyonlaştırılır

ve kütle/yük oranlarına göre analiz edilir (Sneddon, ve ark., 2007; Tranchida, ve ark., 2016).



Şekil 1. GC-MS

2.1.2. Kütle Spektrometri (MS)

GC ile ayrılan her bir bileşen, MS dedektörüne aktarılarak iyonlaştırılır. İyonlaştırma, moleküllerin pozitif veya negatif yüklü iyonlara dönüşmesini sağlar (Sneddan, ve ark., 2007; Fernandes, ve ark., 2014). Bu iyonlar, manyetik veya elektrik alanlar aracılığıyla kütleye göre ayrılır ve tespit edilir. MS, her bileşenin kütle spektrumunu oluşturarak yapısal analizini sağlar. Elde edilen spektrum, kütüphanelerle karşılaştırılarak bileşenlerin kimyasal kimliği belirlenir. Gaz Kromatografisi, bileşenleri kolon içindeki etkileşimlerine göre ayırırken; Kütle Spektrometresi, her bileşenin kütle-spektral analizini gerçekleştirir (Şekil 1). Kolon sıcaklığı, taşıyıcı gaz türü ve akış hızı gibi parametreler ayrışma sürecini doğrudan etkiler ve bu parametrelerin opti-

mizasyonu, analiz hassasiyeti ve doğruluğu için kritiktir. Kütle Spektrometrede gerçekleşen aşamalarda ise; Gaz Kromatografi tarafından ayrılan bileşenlerin iyonize edilerek analiz edildiği bölümdür. Bu aşama, bileşenlerin yapısal özelliklerinin incelenmesini ve tanımlanmasını sağlar. Kütle spektrometresi, her bileşenin kütle/yük oranını (m/z) ölçerek kimyasal bileşimi hakkında bilgi verir (Mondello, ve ark., 2008). MS’de meydana gelen olaylar daha iyi anlaşılması için aşağıda detaylandırılmıştır:

2.1.2.1. İyonizasyon Süreci ve İyonizasyon Türleri

Kütle spektrometresi, gaz kromatografiden gelen bileşenleri iyonlaştırarak analiz etmeye başlar. İyonizasyon, nötr moleküllerin elektriksel yük kazandırılarak iyonlara dönüştürülmesini ifade eder. Bu adım, bileşenlerin kütle analizine uygun hale gelmesini sağlar. Kütle spektrometresinde yaygın olarak kullanılan iyonizasyon türleri şunlardır: Elektron İyonizasyonu (EI); GC-MS sistemlerinde en sık kullanılan iyonizasyon tekniğidir. Bileşenler bir iyon kaynağına girer ve burada yüksek enerjili elektronlarla bombardımana tutulur. Bu elektronlar, moleküllerin elektronlarını kopararak pozitif yüklü iyonlar oluşturur. EI yöntemi, molekülün parçalanmasına yol açar ve bileşiğe özgü bir parçalanma deseni (fragmentasyon) oluşturur. Bu desen, bileşenlerin yapısal analizine olanak sağlar. Kimyasal İyonizasyon (CI): Elektron iyonizasyonuna göre daha yumuşak bir iyonizasyon tekniğidir. İyon kaynağına bir reaktif gaz (örneğin metan, amonyak) eklenir. Bu gaz, önce elektronlarla iyonize olur ve daha sonra örnek molekülleriyle reaksiyona girerek proton eklenmiş veya çıkarılmış iyonlar oluşturur (Mondello, ve ark., 2008; Xue, ve ark., 2015). CI, bileşenlerin parçalanma olasılığını azaltır ve molekül iyonu sinyalini korur, bu da molekül ağırlığının belirlenmesinde avantaj sağlar (Şekil 2).

2.1.2.2. İyonların Kütle/Yük Oranına Göre Ayrılması

İyonlaştırılan bileşenler, kütle spektrometresinin analizör bölümüne girer. Analizör, iyonları kütle/yük oranlarına göre ayırır ve dedektöre ileterek her iyonun m/z oranını ve bolluğunu kaydeder. GC-MS cihazlarında kullanılan yaygın analizörler ve ayrılma süreçleri şu şekildedir: İlki; Dört Kutup (Quadrupole) Analizör: Dört metal çubuk kullanılarak elektriksel bir alan oluşturulur. İyonlar bu çubuklardan geçerken elektrik alanı, yalnızca belirli bir kütle/yük oranına sahip iyonların dedektöre ulaşmasına izin verir. Dört kutuplu analizörler, m/z oranına göre iyonları hızlı bir şekilde ayırabilir ve tarama yapabilir. Bir diğeri; İyon Tuzakları: İyonları bir elektromanyetik alan içinde hapsederek belirli bir m/z oranına göre serbest bırakır. İyonlar sırayla serbest bırakılarak dedektörde tespit edilir. İyon tuzakları, hassasiyetleri yüksek olan ve yapı analizi için uygun cihazlardır. Bir diğeri; Uçuş Zamanı (Time-of-Flight, TOF) Analizör: İyonları bir elektrik alanla hızlandırarak dedektöre gönderir. İyonların kütlesine bağlı olarak hızları değişir; daha hafif iyonlar daha hızlı, daha ağır iyonlar ise daha yavaş hareket eder. TOF analizörler geniş bir kütle aralığını hızlı bir şekilde tarayabilir ve yüksek çözünürlüklü veri sağlar (Pena-Abaurrea, ve ark., 2011; Sparkman, ve ark., 2011; Xue, ve ark., 2015).

2.1.2.3. Spektrum Oluşumu ve Veri Analizi

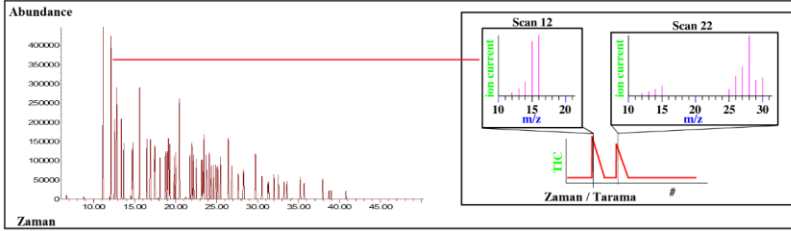
İyonların dedektöre ulaşmasıyla birlikte, her iyonun sinyali bir spektrum olarak kaydedilir. Bu spektrumda, x ekseninde m/z oranı ve y ekseninde her iyonun yoğunluğu bulunur. Elde edilen kütle spektrumu, her bileşen için bir “parmak izi” görevi görür ve bileşenlerin yapısal analizi ve tanımlanmasında kullanılır. İyonizasyon sırasında oluşan molekül iyonları ve parçalanma ürünleri, kütüphanelerdeki referans spektrumlarla karşılaştırılarak bileşenlerin tanımlanmasını sağlar. Kısaca özetlenecek olursa; Kütle spektrometresi, bileşenlerin iyonlaştırılması ve küt-

le/yük oranlarına göre ayrılmasıyla kimyasal yapılar hakkında bilgi sağlar. İyonizasyon türü (EI veya CI gibi) bileşenlerin molekül ağırlığının ve yapısının tanımlanmasında belirleyici olurken, analizörlerin seçimi de ölçüm doğruluğunu ve çözünürlüğünü etkiler (Akande, 2012; Xue, ve ark., 2015).

GC-MS sayesinde kompleks karışımların bileşenleri yüksek hassasiyetle analiz edilebilir. GC-MS cihazında, Gaz Kromatografi aşamasında ayrılan bileşenler, Kütle Spektrometresi aşamasına iletilerek burada iyonize edilir ve kimyasal yapıları analiz edilir (Şekil 1). Kütle spektrometrisi, bileşenlerin kütle/yük (m/z) oranına göre ayrılmasını sağlayarak her bir bileşenin yapısını tanımlar. İyonların Kütle/Yük (m/z) oranına göre ayrılmasında; İyonize edilmiş bileşenler, kütle spektrometresinde elektrik veya manyetik alanlardan geçirilerek kütle/yük oranına (m/z) göre ayrılır. Bu ayırım, her bir iyonun kütlesine ve yüküne göre gerçekleşir, dolayısıyla daha küçük m/z oranına sahip iyonlar dedektöre önce ulaşırken, daha büyük m/z oranına sahip iyonlar daha sonra ulaşır. Bu süreç birkaç aşamada gerçekleşir. Birincisi İyon Kaynağı: İyonlar burada üretilir ve hızlandırılır. Hızlandırılan iyonlar, elektrik veya manyetik alanlarla yönlendirilir. Diğeri; Kütle Analizörü: Hızlandırılmış iyonlar, manyetik veya elektrik alanlardan geçerek m/z oranlarına göre ayrılır. Yaygın kütle analizörleri arasında dört kutuplu analizörler, uçuş zamanı analizörleri (TOF) ve manyetik analizörler bulunur. Her biri iyonları m/z oranlarına göre ayırmak için farklı prensiplerle çalışır. Bir diğeri; Dört Kutuplu Analizör: Dört metal çubuğun oluşturduğu bir elektrik alanında iyonlar, yalnızca belirli m/z oranına sahip iyonların dedektöre ulaşmasını sağlar. Bir diğeri; Uçuş Zamanı (TOF) Analizörü: İyonlar belirli bir hızda hareket eder ve dedektöre ulaşma sürelerine göre ayrılır. Hafif iyonlar daha hızlı hareket ederken, daha ağır iyonlar daha yavaş hareket eder. Bir diğeri; Dedektör: İyonlar m/z oranına göre ayrıldıktan sonra dedektöre ulaşır ve burada her bir iyonun yoğun-

luğu ölçülerek bir sinyal oluşturulur. Bu sinyaller, analiz edilen bileşenin kütle spektrumunu oluşturur. Kütle Spektrumunun Analizinde Kütle spektrometresi, m/z oranlarına göre ayrılan iyonların yoğunluğunu ölçerek bir kütle spektrumu oluşturur. Bu spektrumda, her bir bileşen farklı bir m/z oranında zirve (peak) verir. Zirve konumları, bileşenlerin yapısal özellikleri hakkında bilgi verirken; zirve yükseklikleri, her bir iyonun miktarı hakkında bilgi sağlar. Kütle spektrumu, kütüphanelerdeki bilinen spektrumlarla karşılaştırılarak bileşenlerin tanımlanmasına olanak tanır (Hobart, ve ark., 2011; Chauhan, 2014) (Şekil 4). Buraya kadar anlatılanların kısa bir özet şeklinde sunmak gerekirse; Kütle spektrometresinin iyonizasyon aşaması, bileşenlerin pozitif veya negatif iyonlara dönüştürülerek kütle/yük oranlarına göre analiz edilmesini sağlar. Elektron iyonizasyonu gibi yüksek enerjili yöntemler molekülleri parçalayarak ayrıntılı bilgi sağlarken, kimyasal iyonizasyon gibi yumuşak yöntemler molekülleri daha az parçalayarak moleküler yapıyı korur. Bu yöntemler, GC-MS'in yüksek hassasiyetle ayrıştırma ve tanımlama kapasitesini artırır. Sonuç olarak; GC-MS sistemlerinin hassas ve bütünleşik bir yapı içinde çalışması sayesinde karmaşık karışımlardaki bileşenlerin ayrıştırılması ve kimyasal yapı analizini bir arada gerçekleştirir. Bu cihazda, ilk olarak GC birimi, örneği kolon içerisinde bileşenlerine ayırarak her bir bileşenin çıkış zamanını belirler. Kolondan çıkan her bir bileşen MS ünitesine aktarılır ve burada iyonize edilip kütle/yük (m/z) oranına göre ayrılarak analiz edilir. Bu şekilde, bileşenlerin sırasıyla ayrılması ve kimyasal spektrumlarının incelenmesi, her bir bileşenin kimliğini doğru ve hızlı bir biçimde ortaya çıkarır. GC-MS'in entegre yapısı çevre mühendisliği uygulamalarında benzersiz avantajlar sunar (Şekil 2). Örneğin, bu sistem endüstriyel atıklar, hava örnekleri veya toprak numunelerindeki uçucu organik bileşenlerin (VOC) hassas bir şekilde tespit edilmesini sağlar. GC-MS'in yüksek hassasiyeti sayesinde düşük konsantrasyondaki kirleticiler bile doğru ve hızlı şekilde analiz edilebilir,

bu da çevresel izleme, su kalitesinin korunması ve toprak kirliliği tespiti gibi alanlarda kritik önem taşır. Ayrıca, GC-MS'in hızlı analiz kapasitesi sayesinde, çevresel olaylara zamanında müdahale edilmesine ve risk değerlendirmelerinin hızlı bir şekilde yapılmasına imkan tanır. Bu nedenle GC-MS, çevre mühendisliğinde izleme ve analiz süreçlerinde sıkça tercih edilen ve verimliliği artıran bir sistem haline gelmiştir (Sneddan, ve ark., 2007; Guo, 2014).



Şekil 2. Örnek bir kromotogramın Kütle/Yük (m/z) hesabı

2.2. KALİBRASYON

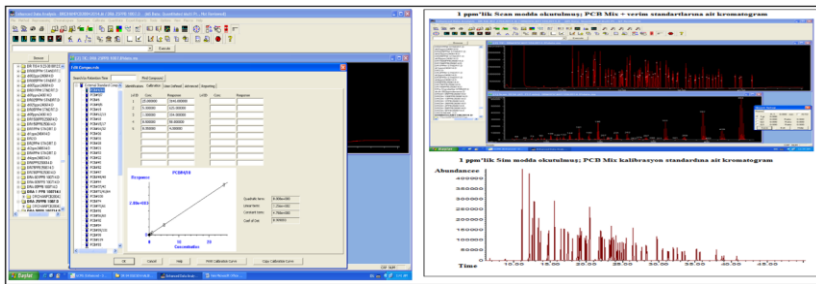
GC-MS cihazında kalibrasyon, analitik sonuçların doğruluğunu ve güvenilirliğini sağlamak için hayati bir adımdır. Kalibrasyon, cihazın her bir bileşeninin ve ölçüm sisteminin doğru bir şekilde çalıştığını ve belirli bir standartla uyumlu olduğunu doğrular. Kalibrasyonda başlıca olamsı gereken adımlardan birincisi; Doğru Ölçüm: Kalibrasyon, GC-MS'in belirli bileşenlerin konsantrasyonunu doğru bir şekilde ölçmesini sağlar. Böylece elde edilen verilerin güvenilir olmasını sağlar. Diğer; Tekrar Edilebilirlik: Kalibrasyon süreci, cihazın her kullanımda benzer sonuçlar vermesini garanti eder, bu da deneylerin tekrar edilebilirliğini artırır. Bir diğer; Hata Ayıklama: Düzenli kalibrasyon, cihazda meydana gelebilecek hataları erkenden tespit ederek düzeltme imkanı sunar. Böylece, daha tutarlı ve güvenilir sonuçlar elde edilmesine yardımcı olur. Bir diğer; Yasal Uyum: Kalibrasyon, analitik laboratuvarların standartlara uygun çalışmasını sağlar ve yasal düzenlemelere uyum göstermeyi kolaylaştırır. Bir diğer; Analiz Güvenilirliği: Kalibrasyon, laboratuvar

sonuçlarının doğruluğunu artırarak, araştırmaların ve endüstriyel uygulamaların güvenilirliğini artırır (Kashyap, ve ark., 2005; Paloluoğlu ve Bayraktar, 2019a,b). Bu nedenlerle, GC-MS cihazlarının düzenli olarak kalibre edilmesi, analitik kimya ve ilgili alanlarda kaliteli ve güvenilir veri elde etmek için kritik öneme sahiptir.

2.2.1. Kalibrasyon Yöntemleri:

İç Standart Yöntemi: GC-MS cihazında kullanılan iç standart yöntemi, kalibrasyon doğruluğunu artırmak için örneklerle belirli bir konsantrasyonda bilinen bir bileşik eklenmesini içerir. Bu yöntem, her örnekte aynı şekilde davranan bir referans madde ile çalışarak, sistematik hataları en aza indirir ve sonuçların hassasiyetini artırır. Ölçüm Tutarlılığında; İç standart, örnekteki bileşenlerin sinyallerine kıyasla referans bir sinyal sağlar, böylece cihaz kaynaklı varyasyonlar veya numune kayıpları ölçüm sonuçlarını etkilemez. Konsantrasyon Değişimlerinin Telafisinde; Analiz sırasında, örnek hazırlığı veya enjekte edilen miktardaki küçük farklılıklar iç standartla telafi edilerek analizde daha güvenilir sonuçlar elde edilmesi sağlanır. Veri Doğruluğu açısından iç standartlar, özellikle düşük konsantrasyondaki bileşiklerin analizinde sinyal yoğunluğunu artırarak ölçümde sapmaların minimize edilmesini sağlar. Bu aşamadaki Süreç; örnek hazırlığı aşamasında, belirlenen miktarda iç standart örneğe eklenir ve analiz boyunca örnekteki bileşenlerle birlikte cihazdan geçirilir. Bu sayede, iç standart miktarı sabit kalırken, diğer bileşiklerin sinyalleri de ona göre değerlendirilir. Bu yöntem, özellikle kompleks matrislerdeki hedef bileşiklerin doğru bir şekilde tanımlanmasını sağlar ve GC-MS analizlerinin hem güvenilirliğini hem de doğruluğunu artırır (Luosujarvi, ve ark., 2008; Paloluoğlu ve Bayraktar, 2019a; Paloluoğlu ve Bayraktar, 2019b).

Dış Standart Yöntemi: GC-MS cihazında dış standart yöntemi ile kalibrasyon, cihazın analitik doğruluğunu sağlamak için hedef bileşiklerin belirli konsantrasyonlarda çözeltisinin hazırlanması ve analiz edilmesi sürecini içerir. Dış standartlar, doğrudan örneğe eklenmez; bunun yerine cihazda ayrı olarak analiz edilerek kalibrasyon eğrisinin oluşturulmasında kullanılır. Standart çözelti hazırlığında dış standart çözeltisi, hedef bileşiğin çeşitli, bilinen konsantrasyonlarda hazırlanarak elde edilir. Bu çözeltinin hassas ve doğru bir şekilde hazırlanması için genellikle saf çözücüler ve analitik saflıkta referans maddeler kullanılır. Farklı konsantrasyon seviyelerinde hazırlanan standart çözelti, cihazın hedef bileşiğe olan tepkisini farklı yoğunluklarda gözlemlemeyi sağlar. Kalibrasyon eğrisi oluşturmada ise dış standart çözelti cihazda analiz edilerek, her bir konsantrasyona karşılık gelen sinyal yoğunlukları kaydedilir. Bu sinyal yoğunlukları, hedef bileşiğin konsantrasyonuna göre bir kalibrasyon eğrisi oluşturmak için kullanılır. Elde edilen eğri, bilinmeyen örneklerin analizinde referans alınarak örnekteki bileşiklerin miktarlarının belirlenmesini sağlar. Şekil 3'te Paloluoğlu'nun 2016 da Organik kirleticilerden PCB'lerin atmosferik konsantrasyonlarını hesaplamasında yaptığı bir çalışmadan elde edilen GC-MS kalibrasyon eğrisi ve 1 PPM lik PCB mix standartının okutulmuş şekli sunulmuştur (Paloluoğlu, 2016).



Şekil 3. GC-MS'de Örnek Kalibrasyon ve Mix Standart Okutulması

Analiz ve Hesaplama: Bilinmeyen örnekler GC-MS cihazında analiz edildikten sonra, elde edilen sinyal yoğunlukları kalibrasyon eğrisi ile karşılaştırılarak örnekteki hedef bileşiğin konsantrasyonu hesaplanır. Bu süreç, sistematik hataları en aza indirerek analiz sonuçlarının doğruluğunu sağlar. **Güvenilirlik ve Doğruluk:** Dış standart yöntemi, farklı numuneler arasında tutarlı sonuçlar elde edilmesini sağlarken, özellikle daha az karmaşık matrislerde güvenilir analiz verileri sunar. Ancak cihazdaki olası sapmalar nedeniyle düzenli kalibrasyon ve doğrulama gerektirir. Dış standart yöntemi, örnekler arasında karışım riski olmadan güvenilir kalibrasyon yapmayı mümkün kılar, böylece GC-MS cihazının yüksek hassasiyetle çalışmasını destekler. **Kalibrasyon Eğrisi Oluşturma:** Gaz kromatografi kütle spektrometresi (GC-MS) cihazında kalibrasyon eğrisi oluşturmak, cihazın hassasiyetini belirlemek ve ölçüm doğruluğunu artırmak için farklı derişimlerde standart çözeltiler hazırlanarak yapılır. Bu süreç, analitik doğruluğun sağlanması ve bilinmeyen örneklerdeki bileşiklerin doğru miktarda ölçülebilmesi için kritik öneme sahiptir. **Analiz ve Sinyal Kaydı:** Hazırlanan her bir standart çözeltili GC-MS cihazına enjekte edilerek analiz edilir. Cihaz, her derişime karşılık gelen sinyal yoğunluklarını kaydeder. Bu sinyal yoğunlukları, standart çözeltilerin derişimleri ile bir grafik üzerinde eşleştirilir. **Kalibrasyon Eğrisi Oluşturma:** Elde edilen sinyal yoğunlukları ve derişim değerleri grafikte işaretlenerek bir kalibrasyon eğrisi oluşturulur. Genellikle doğrusal (lineer) bir eğri çizilir, ancak analiz edilen bileşik ve cihazın tepkisine göre doğrusal olmayan (non-lineer) bir eğri de kullanılabilir. Eğri, cihazın hassasiyet aralığını göstererek, bilinmeyen örneklerde hedef bileşiğin miktarını tahmin etmeyi sağlar. **Regresyon Analizi ile Doğruluk Değerlendirmesi:** Kalibrasyon eğrisinin doğruluğunu değerlendirmek için regresyon analizi uygulanır. Bu analiz, eğrinin veri noktalarına uyumunu ve eğrinin güvenilirliğini değerlendiren bir istatistiksel yöntemdir. Regresyon katsayısı (R^2) yüksekse, eğrinin doğruluğu ve cihazın ölçüm

hassasiyeti de yüksek kabul edilir. Örneğin, R^2 değeri 0.99 veya üzerinde olduğunda eğri oldukça güvenilir olarak değerlendirilir. Sonuçların Geçerliliği: Regresyon analizleri, kalibrasyon eğrisinin geçerliliğini doğrular ve cihazın hassasiyetinin sabit olup olmadığını test eder. Eğri doğruluğu, bilinmeyen örneklerde hedef bileşiğin güvenilir ve doğru miktarda tespit edilmesine olanak tanır. Bu süreçte elde edilen kalibrasyon eğrisi, GC-MS cihazının farklı konsantrasyon aralıklarında hassas bir şekilde çalışmasını sağlar ve ölçümlerin doğruluğunu artırır (Kashyap, ve ark., 2005; Hobart, ve ark., 2011; Akande, 2012; Chauhan, 2014; Fernandes, ve ark., 2014).

2.3. ÖRNEK HAZIRLAMA YÖNTEMLERİ

Örnek Hazırlama oldukça önemli bir basamaktır. Bu kapsamda GC-MS analizinde örnek hazırlama, çevresel örneklerde organik kirleticilerin doğru ve güvenilir şekilde tespit edilebilmesi için kritik bir adımdır (Paloluoglu, 2008; Saparkman, ve ark., 2011; Xue, ve ark., 2015). Örnek hazırlama işlemi, hem analiz edilecek bileşiklerin verimli bir şekilde izole edilmesini sağlar hem de cihazın performansını ve sonuçların doğruluğunu doğrudan etkiler. Analiz Hassasiyeti ve Doğruluğu açısından: Çevresel örneklerde bulunan kirleticiler genellikle çok düşük konsantrasyonlarda bulunur. Bu nedenle, örneğin doğru şekilde hazırlanması, GC-MS cihazının hassas bir şekilde çalışmasını ve organik kirleticilerin doğru miktarda tespit edilmesini sağlar. Yanlış hazırlanan örneklerde, hedef kirleticilerin kaybı veya örnekteki diğer maddelerle etkileşimi sonucu hatalı analiz sonuçları ortaya çıkabilir. Kompleks Matrislerin Temizlenmesi açısından: Çevresel örnekler (toprak, su, hava) genellikle karmaşık matrislere sahiptir ve organik kirleticiler diğer bileşiklerle karışmış halde bulunabilir. Örnek hazırlama sürecinde, bu kompleks matrislerden gereksiz bileşiklerin uzaklaştırılması, sadece hedef kirleticilerin saf bir şekilde analiz edilmesini sağlar. Böylece GC-MS cihazı, hedef bileşiklerin sinyallerini daha

net algılar ve analiz hassasiyeti artar. Örnek Stabilitesi ve Kirletici Kayıplarının Önlenmesi açısından: Organik kirleticilerin stabilitesi, örnek hazırlama süresince dikkat edilmesi gereken bir diğer faktördür. Yanlış hazırlama veya saklama koşulları, hedef kirleticilerin parçalanmasına ya da uçmasına yol açabilir. Örnek hazırlama işlemi, bu bileşiklerin korunmasını ve ölçüm sırasında doğru miktarda tespit edilmesini sağlar. Kontaminasyon Riskinin Azaltılması açısından: Çevresel örneklerde organik kirleticilerin tespiti sırasında, örnek hazırlama sürecinde kontaminasyon riski her zaman mevcuttur. Dikkatli bir örnek hazırlama, cihazda veya kullanılan ekipmanda kontaminasyonu minimize eder ve analizlerin güvenilirliğini artırır. Bu, özellikle çevresel toksinlerin tespitinde hayati önem taşır. Yasal ve Çevresel Düzenlemelere Uyum açısından: Çevresel analizlerde doğru sonuçlar elde etmek, yasal standartlara uyum sağlamak için gereklidir. Örnek hazırlama adımının doğru yapılması, yasal düzenlemelerin gerektirdiği hassasiyette sonuçlar elde edilmesine katkıda bulunur ve çevresel kirleticilerin doğru tespiti ile koruyucu önlemler alınmasını sağlar. Bu nedenlerle, GC-MS cihazında çevresel örneklerin doğru şekilde hazırlanması, hem organik kirleticilerin güvenilir bir şekilde tespiti için gerekli hassasiyeti sağlar hem de cihazın uzun vadeli performansını destekler (Schiewek, ve ark., 2007; Luosujarvi, ve ark., 2008; Fernande, ve ark., 2014; Paloluoglu ve Bayraktar, 2019b). Örnek Ekstraksiyonu ve Temizleme Teknikleri açısından: GC-MS cihazında çevre mühendisliğinde kullanılan örnek hazırlama yöntemleri, özellikle örnek ekstraksiyonu ve temizleme teknikleri, çevresel örneklerden hedef bileşikleri seçici bir şekilde ayırmak ve ölçüme hazır hale getirmek için kritik öneme sahiptir. Sıvı-sıvı ekstraksiyon ve katı-faz ekstraksiyonu, örneklerin verimli bir şekilde hazırlanmasını sağlayan en yaygın yöntemlerdir (Zhang ve Rhind, 2011; Xue, ve ark., 2015).

2.3.1. Sıvı-Sıvı Faz Ekstraksiyon (LLE)

Sıvı-sıvı ekstraksiyon (LLE), çözücüler yardımıyla, analiz edilecek bileşiklerin çevresel örnekten ayrılması işlemidir. Bu yöntem, özellikle suda çözünen organik kirleticilerin tespiti için sıkça kullanılır. Bu ekstraksiyon yöntemindeki Süreç: Çevresel örnek (genellikle su) hidrofobik bir organik çözücü (örneğin, diklorometan veya hekzan) ile karıştırılır. Hedef bileşik, su fazından organik çözücüye geçer. Daha sonra katman oluşumu işlemi ise: Karışımın durulmasının ardından su ve organik çözücü, yoğunluk farkından dolayı iki ayrı katman olarak ayrılır. Organik çözücü katmanına geçen kirleticiler, bu kısımdan toplanır. Bu yöntemin avantajları ve dezavantajları ise: Sıvı-sıvı ekstraksiyon, hızlı ve kolay bir yöntemdir ancak büyük miktarda çözücü kullanımı gerektirebilir ve bazı durumlarda düşük verimlilik gösterir (Zhang ve Rhind, 2011).

2.3.2. Katı-Sıvı Faz Ekstraksiyonu (SPE)

Katı-faz ekstraksiyonu (SPE), katı bir adsorban kullanarak örnekteki kirleticilerin temizlenmesi ve seçici olarak toplanmasını sağlayan bir tekniktir. Bu yöntem, toprak, su veya hava örneklerinden organik kirleticilerin ayrılması ve konsantre edilmesinde oldukça etkilidir. Bu yöntemdeki Süreç: Örnek, özel bir SPE kartuşu ya da kolonu içerisine geçirilir. Kartuş içindeki adsorban, örnekteki istenen bileşikler yüzeyinde tutarken, diğer bileşiklerin geçişine izin verir. Örneğin, ters fazlı SPE kartuşları hidrofobik kirleticileri tutmak için kullanılır. Daha sonra Elüsyon işlemi: Hedef bileşikler, uygun bir çözücü yardımıyla kartuş veya kolondan elüe edilir (çözücü ile çözülerek çıkarılır), ardından GC-MS cihazında analiz edilmeye hazır hale getirilir. Bu yöntemin avantajları ve dezavantajları ise: SPE, LLE'ye göre daha az çözücü gerektirir, daha verimlidir ve daha yüksek hassasiyet sunar. Ancak, uygun adsorban seçimi

gereklidir ve bazen daha fazla hazırlık süresi gerekebilir (Paloluğlu ve Bayraktar, 2019b).

2.3.3. Gaz-Sıvı Faz Ekstraksiyonu (GPE)

Genellikle Poliüretan Köpüklerde (PUF) tutulan gaz faz uçucu organiklerin sokshlet denen bir ekstraktör sayesinde sıvı (Organik çözücüye) faz ortamına aktarım işlemidir. Burada PUF örnekleyici özellikle gaz fazı bileşenleri tuttuğu için saklama kabı ve taşıma kabı uygun özellikte olması gerekmektedir. Aksi durumda kayıplar gözlemlenmektedir. Bu yöntemdeki Süreç: Genelde atmosferik ortamda gaz fazındaki uçucu ya da yarı uçucu bileşiklerin aktif örnekleme yöntemi ile PUF'larda tutulması ile gaz faz örnekler yakalanmış olur. Ardından laboratuvar ortamında sokshlet ekstraktörü ile gaz fazı sıvı çözücü faza aktarım işlemi yaklaşık 24 saatlik yıkma işlemi ile gerçekleştirilir. Bu yöntemin avantajları ve dezavantajları ise: GPE, LLE'ye ve SPE'ye göre daha fazla çözücü gerektirir, daha az verimlidir ve daha yüksek hassasiyet sunar. 24 saatlik gibi en az ekstrakte süresi gerekebilir (Zhang ve Rhind, 2011; Paloluğlu ve Bayraktar, 2019b).

Ekstraksiyon işlemlerinin Çevre Mühendisliğinde Uygulamaları ise; Çevre mühendisliğinde, sıvı-sıvı faz ekstraksiyon, gaz-sıvı faz Ekstraksiyonu ve katı-sıvı faz ekstraksiyonu gibi yöntemler, sudaki pestisitler, topraktaki poliaromatik hidrokarbonlar (PAH) ve diğer toksik organik bileşiklerin tespit edilmesi için yaygın olarak kullanılır. Her iki teknik de numunedeki hedef kirleticiyi diğer bileşiklerden ayırarak GC-MS analizine uygun hale getirir ve çevresel kirliliğin doğru şekilde değerlendirilmesini sağlar. Bu örnek hazırlama teknikleri, GC-MS cihazının hassasiyetini ve doğruluğunu koruyarak çevresel örneklerde bulunan kirleticilerin güvenilir bir şekilde analiz edilmesini sağlar (Sneddan, ve ark. 2007; Schiewek, ve ark., 2007; Vizcaino, ve ark., 2009; Tranchiade, ve ark., 2016).

2.4. GC-MS ANALİZ SÜRECİ

Analizin başlatılması ve parametrelerin ayarlanmasında; GC-MS cihazında analiz sürecini başlatmadan önce kolon sıcaklığı, taşıyıcı gaz akış hızı ve enjektör sıcaklığı gibi kritik parametrelerin dikkatli bir şekilde ayarlanması gerekir. Bu parametreler, cihazın hassasiyetini ve analiz doğruluğunu doğrudan etkiler. Aşağıda her bir parametrenin ayarlanma süreci ve önemi sunulmuştur:

2.4.1. Kolon sıcaklığı

Uçucu Bileşiklerin buharlaşma ve ayrışma hızını doğrudan etkiler ve bu nedenle her bileşiğin kaynama noktasına uygun olarak ayarlanmalıdır. Bu aşamada ilk olarak; Programlanabilir Sıcaklık: GC-MS analizinde, genellikle sıcaklık programlaması kullanılır. İlk sıcaklık daha düşük bir seviyede başlatılır ve analiz boyunca belirli bir hızda yükseltilir. Örneğin, 40°C'den başlayıp her dakika 10°C arttırarak 250°C'ye kadar ulaşmak gibi bir program uygulanabilir. Diğer ayarlanabilir sıcaklık olan Sabit Sıcaklık: Bazı analizlerde, kolon sıcaklığı sabit tutulur. Örneğin, belirli bir uçucu bileşik analizinde kolon sıcaklığı 120 °C'de sabitlenebilir. Ancak bu durumda kolonun yalnızca belirli bileşenleri ayırabilmesi mümkündür. Bir diğer sıcaklık Optimum Sıcaklık Seçimi; Kolon sıcaklığı, analiz edilen bileşiklerin polaritesine, kaynama noktalarına ve kolondaki ayrışma performansına göre belirlenir. Yüksek sıcaklıklar ayrışmayı hızlandırırken düşük sıcaklıklar daha iyi ayırım sağlar (Hobart, ve ark., 2011; Paloluoğlu, 2016).

2.4.2. Taşıyıcı Gaz ve Akış Hızı

Taşıyıcı gaz, örneğin kolon içinde taşınmasını sağlar ve akış hızı, ayrışmanın verimliliğini etkileyen önemli bir parametredir. Taşıyıcı gazda en önemli parametrelerden biri olan Gaz Seçimidir; Taşıyıcı gaz olarak genellikle helyum, azot veya hidrojen kullanılır. Helyum, GC-MS için en yaygın kullanılan gaz-

dır çünkü inert ve güvenlidir. Hidrojen daha hızlı analiz sağlar ancak yanıcıdır ve dikkat gerektirir. Diğer bir önemli parametre olan Akış Hızının Ayarlanması; Taşıyıcı gazın akış hızı, kolonun iç çapına ve analiz edilecek bileşiklerin özelliklerine göre optimize edilmelidir. Genellikle 1-3 mL/dakika arasında bir hız kullanılır. Düşük akış hızı daha iyi bir ayrışma sağlarken, yüksek akış hızı analiz süresini kısaltır. Diğer bir parametre olan Doğru Ayar ise; Akış hızının doğru ayarlanması, bileşiklerin kolon içinde homojen bir şekilde ayrılmasını sağlar. Örneğin, yüksek polariteye sahip bileşiklerde akış hızı düşük seçilebilir (Mondello, ve ark., 2008; Akande, 2012).

2.4.3. Enjektör Sıcaklığı

Enjektör sıcaklığı, örneğin buharlaşarak gaz fazına geçmesi için ayarlanır ve doğru ayarlanması, numunenin homojen bir şekilde enjekte edilmesini sağlar. Burada Uygun Sıcaklık Seçimi; Enjektör sıcaklığı, örnekteki bileşiklerin kaynama noktalarına göre belirlenir. Uçucu organik bileşikler için genellikle 200-250 °C civarında bir sıcaklık yeterlidir. Daha yüksek kaynama noktasına sahip bileşikler için ise sıcaklık 300 °C'ye kadar çıkarılabilir. Dikkat edilmesi gereken önemli konulardan birisi de Bozulma ve Parçalanmayı Önleme; Sıcaklık çok yüksekse, termal olarak kararsız bileşikler parçalanabilir. Bu nedenle, enjektör sıcaklığını belirlerken analiz edilen bileşiklerin termal dayanıklılığı göz önünde bulundurulmalıdır (Paloluoğlu ve Bayraktar, 2019b).

2.4.4. Diğer Parametreler

Diğer yardımcı parametreler de analiz verimliliğini artırmak için ayarlanabilir. Bunlardan birincisi İyonizasyon Kaynağı Sıcaklığı: Kütle spektrometresinde iyonizasyon kaynağının sıcaklığı ayarlanarak, iyonizasyon sürecinin verimi artırılabilir. Genellikle 150-300 °C aralığında seçilir. Diğer bir parametre ise Ayrım Oranı (Split Ratio): Numune miktarını ayarlamak için

kullanılan split oranı, özellikle yoğun numunelerde daha düşük tutulabilir veya splitless modda çalışılabilir. Bu parametrelerin dikkatli bir şekilde ayarlanması, GC-MS cihazının hassasiyetini ve doğruluğunu sağlar, böylece hedef bileşiklerin doğru ve güvenilir şekilde analiz edilmesi mümkün olur. Diğer bir parametrede Örnek Enjeksiyonu: GC-MS cihazında örnek enjeksiyonu, analiz sürecinin başlangıç adımlarından biridir ve örneğin kolona doğru miktarda, homojen bir şekilde aktarılmasını sağlar. Örnek enjeksiyonu otomatik enjeksiyon sistemleri veya manuel enjeksiyon yoluyla yapılabilir ve her iki yöntemin de kendine özgü avantajları ve zorlukları vardır.

2.4.4.1. Otomatik Enjeksiyon Sistemleri

Otomatik enjeksiyon sistemleri, GC-MS analizinde yüksek doğruluk, tekrar edilebilirlik ve kolaylık sağlayan modern cihazlardır. Bu sistemler özellikle laboratuvarlarda seri analiz yapılması gerektiğinde zaman kazandırır. Çalışma Süreci olarak: Otomatik enjeksiyon sistemleri, önceden programlanmış bir protokol dahilinde, örneğin belirli bir hacimde (örneğin 1-2 mikrolitre) hassas bir şekilde enjekte edilmesini sağlar. Bu cihazlar, numuneyi enjektörün ucuna alır ve yüksek hassasiyetle GC-MS sistemine enjekte eder. Program, her örneğin belirli bir süre sonra otomatik olarak enjekte edilmesine olanak tanır, bu da seri analizlerin daha hızlı yapılmasını sağlar. Başlıca Avantajları ise: Otomatik enjeksiyon sistemleriyle yapılan enjeksiyonlar, insan kaynaklı hataları ve değişkenlikleri ortadan kaldırır. Aynı zamanda her enjeksiyon arasında cihazın kendi kendini temizleme işlemi yapabilmesi, kontaminasyonu azaltır ve örneklerin birbirinden bağımsız olarak doğru şekilde analiz edilmesini sağlar. Başlıca kullanım alanları: Büyük hacimli numunelerin rutin analizlerinde, çevresel analizlerde ve kalite kontrol laboratuvarlarında otomatik enjeksiyon sistemleri tercih edilir. Ayrıca aynı anda birçok numunenin işlenmesi gerektiğinde ideal bir yöntemdir (Sparkman, ve ark., 2011; Xue, ve ark., 2015).

2.4.4.2. Manuel Enjeksiyon

Manuel enjeksiyon, operatörün bir şırınga yardımıyla numuneyi GC-MS cihazının enjektörüne el ile enjekte ettiği bir yöntemdir. Bu işlem, deneyimli bir operatör tarafından yapılması durumunda bile oldukça dikkat ve özen gerektirir. Çalışma Süreci: Manuel enjeksiyonda, operatör özel bir mikrolitre şırınga kullanarak örnekten belirli bir hacimde çeker ve enjektör portuna doğrudan enjekte eder. Enjekte edilen hacim çok küçük olduğundan (genellikle 1-2 mikrolitre), operatörün dikkatli olması ve hızlı davranması önemlidir. Bu yöntemin Avantajları ve Dezavantajları ise: Manuel enjeksiyon daha esnek bir yöntemdir ve otomatik sistemlerin olmadığı veya küçük örnek serilerinde kullanılır. Ancak operatör hatalarına daha açıktır, çünkü örneğin enjekte edilme hızı ve miktarı tam olarak kontrol edilemeyebilir. Ayrıca manuel enjeksiyonlarda enjeksiyon noktası ve şırınga kontaminasyon riski de daha yüksektir. Bu yöntemin Uygulama Alanları ise: Özellikle sınırlı sayıda örneğin analiz edileceği durumlarda veya hızlı bir analiz gerektiğinde tercih edilir. Manuel enjeksiyon, aynı zamanda yeni bileşiklerin test edilmesinde veya geçici analizlerde esnekliği nedeniyle kullanışlı olabilir.

2.5. GC-MS CİHAZININ ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİNDE UYGULAMA ALANLARI

Çevre mühendisliğinde, kütle spektrumlarının yorumu çeşitli organik kirleticilerin tespiti ve izlenmesi için önemlidir. Örneğin Hidrokarbonlar: Petrol ve benzeri kirleticilerin analizinde, hidrokarbonların kütle spektrumları, genellikle C_{10} ile C_{20} arasında değişen m/z değerleri gösterir. Bu değerler, farklı zincir uzunluklarına sahip bileşenlerin tanımlanmasına yardımcı olur. Bir diğer grup olan Pestisitler ve Herbisitler: Organik kirleticilerin (örneğin, DDT, atrazin) analizi, kütle spektrumlarındaki karakteristik fragmentasyon paternleri ile gerçekleştirilir. Bu tür bileşiklerin kütle spektrumları, belirli fragmentlere sahip oldu-

ğundan, bu fragmentlerin varlığı ile tespit edilebilir. Bir diğer grup olan Çözgenler ise: Organik çözücüler, genellikle düşük m/z değerlerine sahip fragmentlerle parçalanır. Bu durumda, kütle spektrumundaki düşük m/z değerlerinin varlığı, bu tür kirleticilerin varlığını gösterebilir (Schiewek, ve ark. 2007; Vizcaino, ve ark., 2009).

2.5.1. Veri Tabanları ve Karşılaştırma

Kütle spektrumları, çevre mühendisliğinde sıkça kullanılan veri tabanları ile karşılaştırılarak yorumlanabilir. Bu veri tabanları, bilinen bileşiklerin spektrumlarını içerir ve kullanıcıların örneklerinden elde ettikleri spektrumlarla karşılaştırmalar yapmasına olanak tanır. İlk olarak Kütle Spektrumu Kütüphaneleri incelenir ise; NIST veya Wiley gibi uluslararası kütüphaneler, kullanıcıların elde ettikleri spektrumları belirlemek için yaygın olarak kullanılır. Bu kütüphaneler, bilinen bileşiklerin spektrumları ile karşılaştırılarak analiz edilen örnekteki bileşenlerin kimliklendirilmesine yardımcı olur. Bu kısımda araştırılan Yüksek Uyumluluk: Elde edilen spektrum, referans spektrumları ile yüksek oranda eşleşiyorsa, bu durum bileşiğin varlığını destekler ve güvenilir bir sonuç elde edilmesini sağlar.

Yukarıda bahsedilen konu ile ilgili bir Örnek Uygulama yapılacak olursa; Örneğin, bir su örneğinde tespit edilen bir organik kirletici, elde edilen kütle spektrumuna göre kimliklendirilir. Moleküler iyonun m/z değeri belirlenir ve bu değer, spektrumda görülen diğer fragmentlerle birlikte analiz edilerek, kirleticinin yapısı hakkında bilgi sağlanır. Elde edilen spektrum, referans kütüphanelerle karşılaştırılarak, tespit edilen bileşiğin güvenilirliği artırılır. Sonuç olarak; GC-MS ile elde edilen kütle spektrumları, çevre mühendisliğinde organik kirleticilerin tespiti ve değerlendirilmesi açısından kritik bir rol oynamaktadır. Kütle/yük oranlarının analizi ve fragmentasyon paternlerinin yorumlanması, bileşiklerin kimliklendirilmesi ve çevresel izleme

süreçlerinde önemli veriler sağlar. Bu süreçler, çevre koruma çalışmalarında kirleticilerin izlenmesi ve yönetimi için gereklidir. Burada Kütüphane Arama ve Bileşen Kimliklendirmede ise; GC-MS, organik bileşiklerin tanımlanması ve analizinde önemli bir rol oynar. Bu süreçte, elde edilen kütle spektrumları, kütüphane arama yöntemleri kullanılarak belirli bileşenlerin kimliklendirilmesinde kritik bir araç olarak kullanılır. NIST gibi kütüphane veri tabanları, bu tür analizlerde yaygın olarak başvuru kaynaklarıdır (Şekil 4). Ayrıca Kütüphane çalışması ile ilgili yapılacaklar aşağıda maddeler halinde açıklanmıştır;

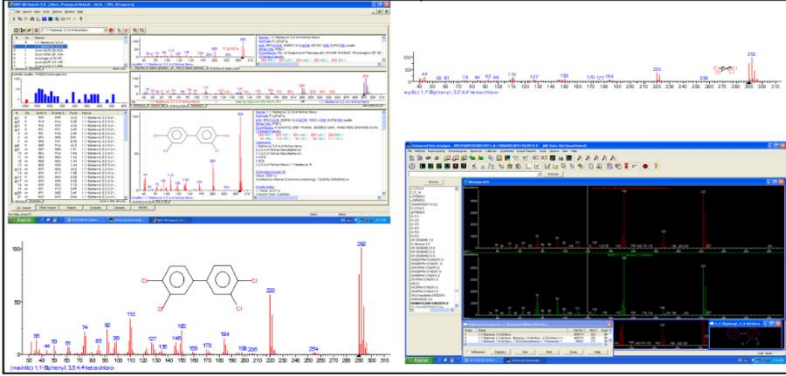
2.5.1.1. Kütüphane Veritabanlarının Önemi

Kütüphane veritabanları, çeşitli bileşiklerin kütle spektrumlarını içeren geniş bir veri seti sunar. Bu veri tabanları, kullanıcıların elde ettikleri kütle spektrumlarını karşılaştırarak bileşenleri tanımlamalarına yardımcı olur. NIST (National Institute of Standards and Technology) gibi prestijli kütüphaneler, dünya genelinde araştırmacılar tarafından güvenilir ve doğrulanmış spektrumlar sunar.

2.5.1.2. Kütüphane Arama Süreci

Kütüphane arama süreci, GC-MS analizi sırasında elde edilen spektrumların tanımlanması için sistematik bir yöntem izler. Burada Spektrum Elde Edilmesi: GC-MS cihazında analiz edilen örnek, ayrıışan bileşenlerin kütle spektrumlarını üretir. Bu spektrumlar, her bileşiğin kütle/yük (m/z) oranlarına göre düzenlenmiş piklerden oluşur. Veri Tabanı Seçimi: Elde edilen spektrumlar, NIST veya diğer veri tabanlarıyla karşılaştırmak üzere uygun bir kütüphane veri tabanı seçilir. Bu veri tabanları, genellikle organik bileşiklerin geniş bir yelpazesini kapsar. Spektrum Karşılaştırması: Kullanıcı, elde edilen spektrumu veri tabanındaki spektrumlarla karşılaştırır. Bu karşılaştırma, iki spektrum arasındaki benzerlik ve farklılıkları değerlendirerek yapılır. En Yakın Eşleşme: Veri tabanında yer alan spektrumlar-

la yapılan karşılaştırmalarda, en yakın eşleşmeyi bulmak için belirli algoritmalar ve yazılımlar kullanılır (Mondello, ve ark., 2008; Paloluğlu, 2016). Genellikle, kütle spektrumunun piki ile veri tabanındaki spektrumun piki arasındaki benzerlik, bir eşleşme skoru ile belirlenir (Şekil 4).



Şekil 4. GC-MS’de Kütüphane Taraması

2.5.1.3. Uygulama Örnekleri

Çevre mühendisliğinde, çeşitli kirleticilerin tespiti için GC-MS analizi yapılırken, NIST gibi veri tabanları kullanılarak yapılan kimliklendirme işlemleri yaygın bir uygulamadır. Örneğin: Pestisit Analizi: Bir su örneğinde bulunabilecek pestisitlerin analizinde, elde edilen kütle spektrumları NIST veritabanındaki bilinen pestisit spektrumlarıyla karşılaştırılarak kimliklendirme yapılabilir. Endüstriyel Kirleticiler: Sanayi atıklarında bulunan kimyasalların tanımlanması için kütüphane arama kullanılarak, belirli kirleticilerin varlığı ve türü tespit edilebilir. Sonuç olarak; NIST gibi kütüphane veri tabanları, GC-MS analizi sırasında elde edilen spektrumların doğru bir şekilde kimliklendirilmesi için kritik bir kaynak sağlar. Kütüphane arama süreçleri, kullanıcıların bileşenleri güvenilir bir şekilde tanımlamasına olanak tanırken, çevre mühendisliği uygulamalarında organik kirleticilerin izlenmesi ve kontrol edilmesi açısından önemli bir rol oy-

nar. Bu sayede, çevre koruma ve sağlık alanlarında etkin müdahaleler sağlanabilir.

2.6. ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Kalite Kontrol ve Veri Doğruluğu açısından GC-MS, çevre mühendisliği, gıda güvenliği ve kimya alanlarında organik bileşenlerin analizi için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Bu analizlerin güvenilirliği ve doğruluğu, alınan sonuçların geçerliliği için kritik öneme sahiptir (Kashyap, ve ark., 2005; Hajslova ve Cajka, 2007; Hobart, ve ark., 2011). Kalite kontrol ve veri doğruluğu, bu bağlamda önemli bir rol oynamaktadır. Aşağıda, GC-MS analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde kalite kontrol uygulamaları ve veri doğruluğunun sağlanmasıyla ilgili özgün bilgiler sunulmaktadır.

2.6.1. Analiz Sonuçlarının Doğruluğu

Analiz sonuçlarının doğruluğunu sağlamak için başlıca izlenecek adımlardan ilki Kalibrasyon: GC-MS cihazı, düzenli olarak kalibre edilmeli ve doğrulanmalıdır. Kalibrasyon, cihazın ölçüm doğruluğunu sağlamak için kritik bir adımdır. Dış standart ve iç standart yöntemleriyle kalibrasyon eğrileri oluşturularak, analizin kesinliği artırılır. Bir diğeri Kontrol Örnekleri: Analiz sürecinde kontrol örnekleri (quality control samples) kullanmak, sonuçların doğruluğunu değerlendirmek için önemlidir. Bu örnekler, bilinen konsantrasyonlara sahip olan ve analiz edilen örnekler ile birlikte test edilen referans örneklerdir. Kontrol örnekleri, her analiz serisinde dahil edilmeli ve sonuçlar bu örnekler ile karşılaştırılmalıdır.

2.6.2. Kontrol Örnekleri ve Tekrarlanabilirlik

Kontrol örnekleri ve tekrarlanabilirlik analizi, sonuçların güvenilirliğini sağlamada kritik unsurlardır. Bu aşamada Kontrol Örneklerinin Hazırlanması: Kontrol örnekleri, bilinen konsantrasyon değerlerine sahip çözeltiler olarak hazırlanır. Bu örnek-

ler, hedef bileşenlerin analiz edilen örneklerde beklenen seviyelerde bulunmasını simüle eder. Analiz Sıklığı: Kontrol örnekleri, her analiz serisinde, tipik olarak her 10 örnekte bir analiz edilmelidir. Bu, elde edilen sonuçların kalitesini değerlendirmek için düzenli bir kontrol sağlar. Tekrarlanabilirlik Analizleri: Tekrarlanabilirlik, aynı koşullar altında yapılan birden fazla analizden elde edilen sonuçların tutarlılığını ifade eder. Bu, analizin güvenilirliğini artırır. Tekrarlanabilirliği değerlendirmek için Tekrar Analiz: Aynı örnek birden fazla kez analiz edilir ve sonuçlar karşılaştırılır. Uygun bir tekrarlanabilirlik düzeyi sağlandığında, sonuçlar güvenilir kabul edilir. Nihai olarak İstatistiksel Değerlendirme: Elde edilen sonuçlar üzerinde istatistiksel analizler (örneğin, standart sapma, varyans analizi) yapılarak, analizlerin tutarlılığı ve doğruluğu değerlendirilir.

2.6.3. Kalite Kontrol Prosedürleri

Kalite kontrol prosedürleri, GC-MS analizlerinin her aşamasında uygulanmalıdır: İlk olarak Analiz Öncesi Kontroller yapılmalıdır. Burada Cihazın performansı ve analiz şartları kontrol edilmelidir. Cihazın çalışma sıcaklıkları, gaz akış hızları ve enjektör sıcaklıkları gibi parametreler doğrulanmalıdır. Ardından Analiz Sırasında Kontroller yapılmalıdır. Her analizde kontrol örnekleri kullanılmalı ve analiz sırasında herhangi bir sapma olup olmadığı gözlemlenmelidir. Eğer kontrol örnekleri beklenmeyen sonuçlar veriyorsa, analiz tekrar gözden geçirilmelidir. Daha sonrada sonuç değerlendirmesi yapılmalıdır. Analiz sonuçları, kontrol örnekleri ile karşılaştırılarak değerlendirilmelidir. Kontrol örneklerinin sonuçları ile hedef değerler arasında anlamlı bir fark varsa, analiz sonuçları yeniden gözden geçirilmelidir.

2.6.4. Sonuçların Raporlanması

GC-MS analiz sonuçları, doğruluğunu ve güvenilirliğini yansıtacak şekilde raporlanmalıdır. Raporlama aşamasında şun-

lara dikkat edilmelidir; Sonuçların Açıklığı: Elde edilen sonuçlar, kontrol örneklerinin sonuçları ile birlikte açıklanmalıdır. Bu, sonuçların güvenilirliğini artırır. Ardından Hata Analizi yapılmalıdır. Sonuçların hangi koşullarda elde edildiği, analizdeki olası hatalar ve bunların sonuçlara etkisi belirtilmelidir. Böylece sonuçların yorumlanmasında şeffaflık sağlanır. Sonuç olarak GC-MS analiz sonuçlarının doğruluğu ve güvenilirliği, kalite kontrol uygulamaları ve sistematik değerlendirme süreçleri ile sağlanır. Kontrol örnekleri ve tekrarlanabilirlik analizi, elde edilen verilerin kalitesini artırarak, çevre mühendisliği, gıda güvenliği ve diğer alanlarda güvenilir sonuçlar elde edilmesine olanak tanır. Bu süreçlerin etkin bir şekilde uygulanması, analizlerin güvenilirliğini artırır ve sonuçların geçerliliğini sağlamlaştırır.

2.6.5. Veri Analizi ve Raporlama:

GC-MS analiz sonuçlarının değerlendirilmesi, çevre mühendisliğinde elde edilen verilerin anlamlı bir şekilde yorumlanmasını ve raporlanmasını içerir. Bu süreçte, veri analizi yöntemleri ve etkili raporlama teknikleri kritik öneme sahiptir. Aşağıda, GC-MS analiz verilerinin değerlendirilmesinde kullanılan yöntemler ve raporlama süreçleri hakkında özgün bilgiler sunulmaktadır.

2.6.5.1. Veri Analizi Yöntemleri

Veri analizi, GC-MS ile elde edilen kütle spektrumlarının ve kromatogramların incelenmesini içerir. Çevre mühendisliğinde kullanılan başlıca veri analizi yöntemleri şunlardır; Kromatogram Analizi: Pik Tanımlama: Kromatogramda görülen piklerin tanımlanması, hangi bileşenlerin bulunduğunu belirlemek için önemlidir. Piklerin yüksekliği, bileşenlerin konsantrasyonu hakkında bilgi verir. Zamanlama: Piklerin gölgelenmesi ve zamanlama, bileşenlerin ayrılma süreleri ile ilişkilidir. Zamanlama analizi, bileşenlerin kimliğini belirlemede yardımcı olur. İstatistiksel Analiz: Ortalama ve Standart Sapma: Elde edilen

konsantrasyon değerlerinin ortalaması ve standart sapması hesaplanarak, verinin dağılımı ve güvenilirliği değerlendirilebilir. Varyans Analizi (ANOVA): Farklı örnek grupları arasında istatistiksel anlamlılık testi yapmak için kullanılır. Özellikle farklı kaynaklardan elde edilen verilerin karşılaştırılmasında önemlidir. Kalibrasyon Eğrisi: Dış ve İç Standart Yöntemleri: Kalibrasyon eğrisi oluşturmak için dış veya iç standart yöntemleri kullanılır. Kalibrasyon eğrisi, elde edilen konsantrasyonların pik alanı ile ilişkisini tanımlar. Regresyon Analizi: Kalibrasyon eğrisi üzerinden regresyon analizi yapılarak, elde edilen verilerin doğruluğu ve güvenilirliği artırılır. Kütüphane Arama: Spektrum Eşleştirme: Elde edilen kütle spektrumları, NIST gibi veri tabanları ile karşılaştırılarak bileşenlerin kimliklendirilmesi sağlanır. Uygun eşleşme skoru ile bileşenler tanımlanır (Mondello, ve ark. 2008; Akande, 2012; Chauhan, 2014).

2.6.5.2. Veri Raporlama

GC-MS analiz sonuçlarının raporlanması, elde edilen verilerin anlaşılır ve güvenilir bir şekilde sunulmasını sağlar. Raporlama sürecinde dikkat edilmesi gereken unsurlar şunlardır: Rapor Formatı; Başlık ve Tanıtım: Raporun başında projenin adı, tarih ve analizin amacı açıkça belirtilmelidir. Yöntemler: Kullanılan GC-MS yöntemleri ve analiz prosedürleri detaylı bir şekilde açıklanmalıdır. Sonuçların Sunumu; Tablolar ve Grafikler: Elde edilen veriler, tablolar ve grafikler aracılığıyla açıkça sunulmalıdır. Örneğin, piklerin konsantrasyonlarını gösteren bir tablo ve kalibrasyon eğrisinin grafiksel gösterimi. Kromatogramlar: Örneklerin kromatogramları ve spektrumları raporda yer almalıdır. Her bir pik ve bileşen için yorum yapılarak, analizin sonucu desteklenmelidir. Tartışma ve Değerlendirme: Sonuçların Yorumlanması: Elde edilen sonuçların anlamı, çevresel bağlamda yorumlanmalı ve önceki çalışmalarla karşılaştırılmalıdır. Hatalar ve Belirsizlikler: Analiz sürecindeki olası hatalar, belir-

sizlikler ve bunların sonuçlara etkisi açıkça belirtilmelidir (Paloğlu ve Bayraktar 2019a,b).

2.6.5.3. Örnek Veri Analizi

Diyelim ki, bir su örneğinde bulunan organik kirleticilerin analizi yapılmıştır ve aşağıdaki veriler elde edilmiştir:

Pik 1: $m/z = 150$, alan = 1200 (Bileşik A); **Pik 2:** $m/z = 200$, alan = 800 (Bileşik B); **Pik 3:** $m/z = 250$, alan = 600 (Bileşik C)

Kalibrasyon Eğrisi Oluşturma: Öncelikle, belirli derişimlerde (örneğin, 1, 5, 10 ppm) standart çözeltiler hazırlanır ve bu çözeltiler analiz edilerek kalibrasyon eğrisi oluşturulur. Pik alanları ile konsantrasyonları arasındaki ilişki grafik üzerinde gösterilir. İstatistiksel Değerlendirme: Elde edilen verilerin ortalaması ve standart sapması hesaplanarak, her bileşenin analizi için güvenilirlik sağlanır. Örneğin, Bileşik A'nın üç farklı analizde elde edilen değerleri üzerinden standart sapma hesaplanır. Raporlama: Sonuçlar şu şekilde raporlanabilir. Tablo: Aşağıdaki tablo, her bir bileşenin konsantrasyonu ve analiz sonuçları ile birlikte sunulabilir.

Bileşik	m/z	Pik Alanı	Konsantrasyon (ppm)
A	150	1200	10
B	200	800	5
C	250	600	3

Grafik: Kalibrasyon eğrisi, analizin doğruluğunu göstermek için grafikte sunulmalıdır. Kromatogram: Bileşenlerin ayrışmasını ve elde edilen piklerin yorumunu gösteren kromatogram eklenmelidir.

3. SONUÇ

GC-MS analiz sonuçlarının değerlendirilmesi, veri analizi yöntemleri ile elde edilen bilgilerin anlamlı bir şekilde yorumlanmasını gerektirir. Elde edilen verilerin düzenli bir şekilde raporlanması, çevre mühendisliği çalışmalarında elde edilen sonuçların geçerliliğini artırır. Raporlamada dikkat edilmesi gereken unsurlar, analizlerin kalitesini ve güvenilirliğini yansıtır. Bu süreçler, çevresel kirleticilerin izlenmesi ve kontrolü açısından kritik öneme sahiptir. Ayrıca GC-MS ile çalışmanın zorlukları ve sınırlamaları, analitik süreçlerin doğruluğunu etkileyebilir. Ancak, kullanıcısı tarafından alınabilecek önlemler ve çözümler, bu zorlukların üstesinden gelinmesine yardımcı olur. Etkili örnek hazırlama, doğru kalibrasyon, hızlı analiz yöntemleri ve matriks etkilerinin azaltılması gibi stratejiler, GC-MS analizlerinin güvenilirliğini artırmak ve daha doğru sonuçlar elde etmek için kritik öneme sahiptir. Bu önlemler, çevresel izleme ve analitik uygulamalar için sürdürülebilir bir yaklaşım sağlar.

3.1. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Gaz kromatografi kütle spektrometresi, çevre mühendisliği alanında organik kirleticilerin analizinde son derece önemli bir rol oynamaktadır. Bu teknik, karmaşık örnek matrislerinde bileşenlerin ayrıştırılmasını ve nitelendirilmesini sağlarken, yüksek hassasiyet ve seçicilik sunarak çevresel izleme ve değerlendirme süreçlerini güçlendirmektedir.

3.1.1. GC-MS'in Çevre Mühendisliğindeki Yeri

GC-MS, özellikle su, hava ve toprak örneklerinde bulunan organik kirleticilerin tespitinde standart bir yöntem haline gelmiştir. Bu cihaz, birçok analitin düşük derişimlerde bile bileşenlerin hassas bir şekilde analiz edilmesine olanak tanır. Ayrıca, bu teknik sayesinde çevresel izleme programları kapsamında kirletici kaynaklarının belirlenmesi ve izlenmesi sağlanarak, insan sağlığı ve ekosistem üzerindeki olumsuz etkilerinin önüne

geçilmeye çalışılmaktadır. Başlıca Avantajları; Yüksek Hassasiyet ve Seçicilik: GC-MS, analitlerin düşük konsantrasyonlarda dahi güvenilir bir şekilde tespit edilmesine imkan tanır. Bu, çevresel örneklerdeki kirleticilerin izlenmesi açısından büyük bir avantajdır. Karmaşık Matrislerin Analizi: GC-MS, çoklu bileşenlerin aynı anda analiz edilmesine olanak tanır. Bu, özellikle endüstriyel atıklar ve kirlenmiş alanlar gibi karmaşık örneklerde oldukça önemlidir. Veri Zenginliği açısından: GC-MS analizi, bileşenlerin kütle spektrumları ile birlikte ayrıntılı bilgi sunarak, bileşen kimliklendirmesinde güçlü bir temel sağlar.

3.1.2. Gelecekteki Uygulama Alanları

GC-MS'in gelecekteki uygulama alanları, sürekli gelişen teknolojik yenilikler ve çevresel ihtiyaçlarla paralel olarak genişlemektedir. Öne çıkan bazı alanlar şunlardır: Gelişmiş İzleme Sistemleri: Otomatik örnekleme ve analiz sistemlerinin entegrasyonu ile çevresel izleme süreçlerinin daha da hızlandırılması ve etkinleştirilmesi mümkün olacaktır. Nanoteknoloji ve Biyomühendislik açısından: Organik kirleticilerin analizinde nanoteknolojinin kullanımı, analitik süreçlerin hassasiyetini artırabilir. Ayrıca, biyomühendislik uygulamaları ile çevresel temizleme süreçleri daha etkili hale getirilebilir. Atık Yönetimi ve Sürdürülebilirlik açısından: GC-MS, atık yönetimi stratejilerinin geliştirilmesinde kritik bir araç olarak kullanılabilir. Özellikle, geri dönüşüm süreçlerinde organik kirleticilerin izlenmesi, sürdürülebilir atık yönetimi uygulamalarını destekleyecektir.

3.1.3. Çevre Yönetimi ve Sürdürülebilirlik Açısından Katkıları

GC-MS analizi, çevre yönetimi stratejilerinin temelini oluşturarak, insan sağlığına yönelik risklerin değerlendirilmesinde ve çevresel sürdürülebilirliğin sağlanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu teknik, kirleticilerin kaynaklarını belirleyerek, yönetim politikalarının geliştirilmesine katkıda bulunur.

Ayrıca, kirletici yüklerinin azaltılmasına yönelik önlemlerin alınmasını destekleyerek, sürdürülebilir çevre politikalarının uygulanmasına yardımcı olur. Sonuç olarak GC-MS, çevre mühendisliğinde organik kirleticilerin analizinde vazgeçilmez bir araçtır. Bu teknik, çevresel izleme, kirletici tespiti ve yönetim stratejilerinin geliştirilmesinde önemli avantajlar sunmakta ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada kritik bir rol oynamaktadır. Gelecekte, GC-MS teknolojisinin evrimi ve yeni uygulama alanlarının keşfi, çevre yönetimi ve koruma süreçlerine katkıda bulunmaya devam edecektir.

3.1.3.1. Çevre Mühendisliği Açısından Önemi

GC-MS, çevre mühendisliğinde organik kirleticilerin izlenmesi, tespiti ve yönetilmesi açısından önemli bir rol oynamaktadır. Örnekler üzerinden bu önemi detaylandırmak gerekir ise; Su Kalitesi Analizleri: Kirlenmiş su kaynaklarında bulunan organik kirleticilerin izlenmesi için GC-MS kullanılır. Örneğin, tarımda kullanılan pestisitlerin suya karışması durumunda, bu bileşenlerin konsantrasyonları GC-MS ile analiz edilerek, su kalitesinin değerlendirilmesine olanak tanır. Grafik Önerisi olarak: Kirletici konsantrasyonları zamanla değişimini gösteren bir zaman serisi grafiği. Bu grafik, belirli bir su kaynağındaki pestisit düzeylerinin ölçümlerini gösterir. Hava Kalitesi İzlemesi açısından: Hava kirliliği, insan sağlığı ve çevre üzerinde ciddi etkiler yaratır. GC-MS, havadaki uçucu organik bileşenlerin (VOC'ler) analizinde kullanılır. Örneğin, sanayi tesislerinin emisyonları ve trafik kaynaklı kirleticilerin tespiti. Grafik Önerisi olarak: Havadaki VOC konsantrasyonlarının gün içinde değişimlerini gösteren bir çubuk grafiği. Bu grafik, farklı saat dilimlerindeki VOC düzeylerini karşılaştırabilir. Toprak Kontaminasyonu açısından: Toprak örneklerinde bulunan kirleticilerin tespiti için GC-MS analizi yapılır. Örneğin, endüstriyel faaliyetlerden kaynaklanan ağır metaller veya organik kirleticilerin analizi. Grafik Önerisi olarak: Farklı toprak derinliklerindeki kirletici

konsantrasyonlarını gösteren bir dairesel grafik. Bu, derinlikle birlikte kirletici konsantrasyonunun nasıl değiştiğini görselleştirir. Sonuç olarak; GC-MS, çevre mühendisliğinde organik kirleticilerin analizinde kritik bir rol oynamaktadır. Yüksek hassasiyeti ve seçiciliği sayesinde, çevresel izleme programlarında etkili bir araç olarak öne çıkar. GC-MS, su, hava ve toprak kalitesinin değerlendirilmesinde sağladığı katkılarla, çevre yönetimi ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada önemli bir adım teşkil etmektedir.

KAYNAKÇA

- Akande, W. G. (2012). A review of experimental procedures of gas chromatography- mass spectrometry (gc-ms) and possible sources of analytical errors. *Earth Science*, 1(1), 1–9.
- Chauhan, A. (2014). GC-MS Technique and its Analytical Applications in Science and Technology. *Journal of Analytical & Bioanalytical Techniques*, 5(6). doi:10.4172/2155-9872.1000222
- Fernandes, V. C., Lehotay, S. J., Geis-Asteggianti, L., Kwon, H., Mol, H. G. J., van der Kamp, H., ... Delerue-Matos, C. (2014). Analysis of pesticide residues in strawberries and soils by GC-MS/MS, LC-MS/MS and two-dimensional GC-time-of-flight MS comparing organic and integrated pest management farming. *Food Additives & Contaminants. Part A, Chemistry, Analysis, Control, Exposure & Risk Assessment*, 31(2), 262–270. doi:10.1080/19440049.2013.865842
- Guo, X. (2014). Advances in Gas Chromatography. In *Stashenko E, Jairo RM. Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (Vol. 1). InTech Publisher.
- Hajslova, J., & Cajka, T. (2007). *Gas chromatography- mass spectrometry (GC-MS). Food Toxicants Analysis*. Elsevier BV.
- Hobart, H. W., & Lynne, L. M. (2011). *Instrumental Methods of Analysis* (Vol. 6). CBS Publishers & Distributors.
- Kashyap, S. M., Pandya, G. H., Wachasunder, S. D., & Kondawar, V. K. (2005). QA/QC aspects of GC-MS analytical instrument for environmental analysis. *Indian J ChemTechnol*, 12, 477–487.

- Kataria, S., Beniwal, P., Middha, A., Sandhu, P., & Rathore, D. (2011). Gas Chromatography- Mass Spectrometry: Applications. *Applications. International Journal of Pharmaceutical & Biological Archives*, 2(6), 1544–1560.
- Liu, Z., & Phillips, J. B. (1991). Comprehensive two-dimensional gas chromatography using an on-column thermal modulator interface. *Journal of Chromatographic Science*, 29(6), 227–231. doi:10.1093/chromsci/29.6.227
- Luosujarvi, L., Karikko, M.-M., Haapala, M., Saarela, V., Huh-tala, S., Franssila, S., ... Kauppila, T. J. (2008). Gas chromatography/mass spectrometry of polychlorinated biphenyls using atmospheric pressure chemical ionization and atmospheric pressure photoionization microchips. *Rapid Communications in Mass Spectrometry: RCM*, 22(4), 425–431. doi:10.1002/rcm.3379
- Mondello, L., Tranchida, P. Q., Dugo, P., & Dugo, G. (2008). Comprehensive two-dimensional gas chromatography-mass spectrometry: a review. *Mass Spectrometry Reviews*, 27(2), 101–124. doi:10.1002/mas.20158
- Paloluoğlu, C. (2008). *Spatial distribution of concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Erzurum city center*. Erzurum, Turkey.
- Paloluoğlu, C. (2016). *Determination of Concentrations of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Different Environments Using Various Sampling Methods in Erzurum*. Erzurum, Turkey.
- Paloluoğlu, C., & Bayraktar, H. (2019a). Atmosferik Poliklorlu Bifeniller (PCB'ler); Örnekleme, Ekstraksiyon ve Analiz. *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(2), 205–224.

- Paloluoğlu, C., & Bayraktar, H. (2019b). Atmosferik Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar (PAH'lar); Örnekleme, Ekst-raksiyon ve Analiz. *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(2), 266–285.
- Pena-Abaurrea, M., Covaci, A., & Ramos, L. (2011). Compre-hensive two-dimensional gas chromatography-time-of-flight mass spectrometry for the identification of orga-nobrominated compounds in bluefin tuna. *Journal of Chromatography A*, 1218(39), 6995–7002. doi:10.1016/j.chroma.2011.08.031
- Schiewek, R., Schellenträger, M., Mönnikes, R., Lorenz, M., Giese, R., Brockmann, K. J., ... Schmitz, O. J. (2007). Ultrasensitive determination of polycyclic aromatic compounds with atmospheric-pressure laser ionization as an interface for GC/MS. *Analytical Chemistry*, 79(11), 4135–4140. doi:10.1021/ac0700631
- Sneddon, J., Masuram, S., & Richert, J. C. (2007). Gas chroma-tography-mass spectrometry-basic principles, instrumen-tation and selected applications for detection of organic compounds. *Analytical Letters*, 40(6), 1003–1012. doi:10.1080/00032710701300648
- Sparkman, D., Penton, Z., & Fulton, G. (2011). *Gas Chroma-tography and Mass Spectrometry: A Practical Guide*. Academic Press.
- Tranchida, P. Q., Franchina, F. A., Dugo, P., & Mondello, L. (2016). Comprehensive two-dimensional gas chromatog-raphy-mass spectrometry: Recent evolution and current trends. *Mass Spectrometry Reviews*, 35(4), 524–534. doi:10.1002/mas.21443

- Vizcaino, E., Arellano, L., Fernandez, P., & Grimalt, J. O. (2009). Analysis of whole congener mixtures of polybromodiphenyl ethers by gas chromatography-mass spectrometry in both environmental and biological samples at femtogram levels. *Journal of Chromatography A*, 1216(25), 5045–5051. doi:10.1016/j.chroma.2009.04.049
- Xue, Z., Duan, L. X., & Qi, X. (2015). *Gas Chromatography Mass Spectrometry Coupling Techniques. Plant Metabolomics*. Chemical Industry Press.
- Zhang, Z., & Rhind, S. M. (2011). Optimized determination of polybrominated diphenyl ethers and polychlorinated biphenyls in sheep serum by solid-phase extraction-gas chromatography-mass spectrometry. *Talanta*, 84(2), 487–493. doi:10.1016/j.talanta.2011.01.042

CEVİZ KABUĞU VE PİRİNA ATIKLARININ FARKLI DİSİPLİNLERDE KULLANIMLARINA YÖNELİK GELİŞMELER

Muvahhid KILIÇARSLAN¹

Muhammed BIYIKLI²

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun hızla artması, tüketim dengesizlikleri gıda güvenliğini ve çevresel sürdürülebilirlik konularının önemini gözler önüne sermektedir. Birleşmiş Milletler'in 2019 değerlendirmelerine göre, dünya nüfusunun 2050 yılında 9,7 milyara ulaşması beklenmektedir. Bu durum özellikle insan beslenmesine yönelik telaşları doğuracak ve tarımsal üretimin artırılmasını kaçınılmaz kılacaktır. Ancak, bu artışın çevre ve ekosistemlere zarar vermeden sağlanması gerekmektedir. Hem bugünkü nüfusun hem de gelecekteki nesillerin ihtiyaçlarını karşılayacak bir üretim modeli oluşturmak, çağımızın en büyük zorluklarından biridir (Türkyılmaz vd., 2024).

Artan nüfusla birlikte, tüketimde artmakta ve dolayısıyla atık miktarı da artmaktadır. Özellikle organik atıklar, günlük hayatın bir parçası haline gelmiş ve büyük bir çevresel tehdit olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak organik atıkların doğru şekilde yönetilmesi durumunda, geri dönüşümü mümkün olan bu atıklar, ekonomik fayda sağlamanın yanı sıra çevreye de olumlu etkiler sunmaktadır. Atıkların geri dönüşümü, kirliliği azaltır, doğal kaynakların korunmasına katkı sağlar ve enerji tasarrufu yaratır. Bu bağlamda, çevre kirliliğinin önlenmesi,

¹ Arş. Gör. Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Ziraat Fakültesi Toprak Bilimi Ve Bitki Besleme Bölümü muwahhidkilicarslan@isparta.edu.tr 0000-0002-4883-9054

² Arş. Gör. Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri muhammedbiyikli@isparta.edu.tr 0000-0001-8032-925X

canlı sağlığının korunması ve enerji bağımsızlığının sağlanması adına atık yönetimi büyük bir öneme sahiptir. Nüfus artışıyla paralel olarak artan atık miktarını etkili bir şekilde yönetmek, sürdürülebilir bir gelecek için kritik bir adımdır (Dönmez, 2024)

Atıkların büyük çoğunluğunu, organik atıklar meydana getirmektedir. Doğru yönetildiği sürece organik atıkların tamamı geri dönüştürülebilir. Geri dönüşüm, sürdürülebilirliğin temel taşlarından biridir ve organik tarım ürünlerinin geri dönüşüme dahil edilmesi, gıda güvenliği açısından büyük önem arz etmektedir. Dünya genelinde her yıl üretilen organik tarım ürünlerinin büyük bir kısmı kayba uğrayarak çevresel ve ekonomik kayıpları oluşturmaktadır. Bu kayıplar, toprak ve su gibi kaynakların israf edilmesiyle birlikte sera gazı emisyonlarını artırmakta ve büyük çöp yığınlarına sebep olmaktadır (Kök, 2021).

Dünya genelinde artan atık miktarı, sektörel gelişmeler ve insan faaliyetlerinden kaynaklanmaktadır. Tarımsal atıkların arıtılması ve geri kazanımı ise yetersiz kalmaktadır. Bu doğrultuda, Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi 12, 2030 yılına kadar sürdürülebilir tüketim ve üretim süreçlerini teşvik ederek atıkların önlenmesi, azaltılması, geri dönüştürülmesi ve yeniden kullanımı üzerinde durmaktadır (United Nations, 2015).

Birçok ülke, artan nüfusa karşın azalan doğal kaynakları korumak için geri dönüşüme büyük yatırımlar yapmaktadır. Almanya, Avustralya, Güney Kore, Galler ve İsviçre, en yüksek geri dönüşüm oranlarına sahip ülkeler arasında yer almaktadır. Geri dönüşümle kâğıt, plastik, cam ve organik gıdalar gibi ürünler yeniden kullanılabilir hale getirilmektedir. Özellikle Galler, küçük bir ülke olmasına rağmen dikkat çekici bir başarı göstermektedir (Dönmez, 2024).

Atık israfı ve çevre kirliliğinin önüne geçmek için birçok ülke, özellikle Avrupa'da, geri dönüşüm endüstrilerine yatırım yaparak yeni yöntemler geliştirmiştir. Bu yöntemlerden biri,

atıkların açık alanlarda biriktirildiği geleneksel çöp sahalarının oluşturulmasıdır. Bunun yanı sıra, kentsel alanlarda bulunan büyük miktardaki atıkların düzenli olarak depolandığı arazi doldurma uygulamaları da yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Daha modern bir yaklaşım ise, hijyenik depolama yöntemidir. Bu yöntemde, atıklar çevresel ve sağlık açısından daha güvenli bir şekilde bertaraf edilmektedir. Alternatif bir yöntem olarak, büyük ölçekli fırınlarda atıkların yakılmasıyla enerji elde edilmesi de uygulanmaktadır. Bu yöntem, hem atıkların azaltılmasını sağlar hem de enerji üretimi gibi ek bir fayda sunar (Bayraktar, 2006).

Atıklar katı atıklar, tehlikeli atıklar, klinik atıklar, evsel tehlikeli atıklar ve diğer atıklar olarak sınıflandırılmakta olup bunların dışında sınıflandırılan ve tanımlanan diğer atık türlerinden biri ise tarımsal faaliyetler sonucu oluşan atıklardır (Aktepe, 2021). Tarımda sürdürülebilirlik ve halk sağlığını tehdit eden birçok tarımsal atık bulunmaktadır. Bunlar arasında ürün artıkları, hayvansal atıklar, kümes hayvanı atıkları, mezbaha atıkları, tarım endüstrisi atıkları ve sucul ürün atıkları yer almaktadır. Ürün artıkları, yaprak döküntüleri, tohum kapsülleri, saman ve otlar gibi unsurları içerirken, hayvansal atıklar idrar, gübre ve atık yemleri kapsar. Kümes hayvanı atıkları ise dökülen yem, tüyler ve dışkıları içerir. Ayrıca mezbaha atıkları, kemik, kan ve deriler gibi unsurlar oluşturur. Tarım endüstrisi atıkları ise meyve püreleri, yağlı tohum kekleri ve kabuklar gibi organik maddelerden oluşur. Son olarak, sucul ürün atıkları, yenmeyen yem ve dışkı atıkları gibi unsurlar çevreye zarar verebilir (Seidavi vd., 2019).

1.1. Ceviz posasının değerlendirilmesi

(*Juglans regia* L.) bilindiği üzere *Juglandaceae* familyası ve *Juglans* cinsinde yer alan juglon boyarmaddesini içeren (Strugstad,2013), mordansız boya yapılabilen meyvesinden, yaprağından, kabuk ve gövdesinden yeşil kahverengi renkler elde edilen bir boya bitkisidir. Bunların arasında en yaygın olarak kullanılan haslık derecesi en yüksek olan meyve kabuklarıdır (Karadağ, 2007). Türkiye ceviz üretimi 2009 yılı verilerine göre 177.298 tondur(TUİK,2012). Türkiye’de üretilen cevizlerin ortalama kabuk oranının %48.422 (85.847 ton kabuk) olduğu kabul edilirse,kabuğunun değerlendirilmesi durumunda yaklaşık 4.7 Milyar TL’lik katma değer elde edilebileceği öne sürülmüştür (Yaman, 2012). Ceviz kabuk soyma makinasından çıkan ceviz posası da bu gruba dahil edilirse değerlendirilmediği takdirde çevreye verdiği zarar azımsanamayacak derecede önemlidir.

1.1.1. Tarımda kullanımı

Tarım alanında, ceviz kabukları ve kabuk dış kısımları, organik gübreler ve toprak düzenleyicileri olarak değerlendirilmektedir. Toprağa besin ekleyerek, nem tutma kapasitesini artıran ve toprağın yapısını iyileştiren bu maddeler, aynı zamanda tarımda zararlı organizmalar ve hastalıklarla mücadele etmek için de kullanılmaktadır.

1.1.2. Tıpta kullanımı

Bıyıklı vd, 2024 tarafından yapılan bir araştırmada , ceviz kabuğu özütü eklenerek (0%, 25%, 50%) hazırlanan kremlerin sıçanlarda yara iyileşmesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Histopatolojik ve histokimyasal analizler sonucunda Kremlerle tedavi edilen sıçanlarda, yara çapı sırasıyla %25 ve %50 özüt içeren kremlerle 420.28 ± 37.46 mm ve 336.28 ± 21.66 mm'ye düşmüştür. Kontrol grubuna (578.85 ± 27.23 mm) kıyasla bu değerler, özütün yara kapanma özelliğini doz bağımlı olarak artır-

dığını göstermektedir. Sonuç olarak, %50 özüt içeren krem, yara iyileşmesinde en etkili uygulama olarak belirlenmiştir. Bu çalışma, hem atıkların değerlendirilmesi hem de geleneksel tıptaki bilgilerin bilimsel olarak karakterize edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

1.1.3. Kozmetikte kullanımı

Sentetik saç boyalarının uzun süreli kullanımı, birçok ciddi sağlık problemine neden olmuştur. Erken saç beyazlaması, alerjik reaksiyonlar ve bazı durumlarda kanser gibi ciddi hastalıklar, bu boyaların kullanımını daha da riskli hale getirmiştir. Bu endişeler, insanların doğal alternatiflere yönelmesine sebep olmuştur. Henna gibi geleneksel bitkisel boyaların yanı sıra, Bhringraj, Shikakai ve Reetha gibi çeşitli bitkisel malzemeler de doğal saç boyaları olarak popülerlik kazanmıştır. Ancak, bu doğal boyaların bazı dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin, bu boyaların durulama özellikleri genellikle zayıf olup, saçlara istenmeyen bakır-kızıl tonlar verebilmektedir. Bu nedenle, araştırmacılar daha etkili ve doğal sonuçlar sunabilecek yeni alternatifler aramaya devam etmektedir.

Ceviz kabuğu, bu bağlamda umut verici bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. İçerdiği Juglone adlı bileşik sayesinde, saçları doğal bir şekilde sarımsı kahverengiden koyu kahverengiye kadar boyayabilmektedir. Juglone, saçın rengini koyulaştıran doğal bir bileşiktir ve bu da ceviz kabuğunu çekici bir seçenek haline getirmektedir. Ayrıca, ceviz kabuğunun ekstraksiyon yöntemleri incelenmiş ve bu süreçlerin kimyasal bileşimler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Testler, ceviz kabuğu ekstraktlarının saç boyamada ne kadar etkili olduğunu ve elde edilen rengin kalitesini değerlendiren çeşitli parametrelerle test edilmiştir.

Başarılı bir saç boyama işlemi, renk dayanıklılığı, renk yoğunluğu, solma oranı ve boyanın kalıcılığı gibi faktörlere bağlıdır. Yapılan araştırmalar, ceviz kabuğu kullanılarak elde edilen

boyaların bu kriterlerde oldukça iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir. Özellikle, boyanın solma oranının düşük olması ve renk yoğunluğunun tatmin edici seviyede olması dikkat çekicidir. Ayrıca, ceviz kabuğunun boyama gücünü artırmak için fiksatif kullanımı da önerilmektedir. FeSO_4 (demir sülfat) gibi maddeler, ceviz kabuğu boyasının rengini daha belirgin hale getirerek, daha kalıcı sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Bu yöntem, ceviz kabuğunun doğal bir saç boyası olarak etkinliğini artırmakta ve kullanıcılara daha iyi sonuçlar sunmaktadır.

Sonuç olarak, ceviz kabuğu, sentetik ve bitkisel boyalara kıyasla daha güvenli ve etkili bir alternatif sunmaktadır. İçerdiği doğal bileşikler sayesinde, saçlara sağlıklı, estetik ve kalıcı renkler kazandırabilir. Sentetik kimyasalların ve alerjik reaksiyonların neden olduğu sağlık sorunları göz önüne alındığında, ceviz kabuğunun doğal bir saç boyası olarak kullanımı, gelecekte daha fazla tercih edilebilecek bir seçenek olabilir (Sarode, 2023).

1.1.4. Çevresel uygulamalarda kullanımı

Özellikle su arıtma işlemlerinde ağır metaller ve organik kirleticiler için etkili adsorbanlar olarak öne çıkmaktadırlar. Bu maddelerin sahip olduğu adsorpsiyon özellikleri, çevre kirliliğinin önüne geçmektedir. Ayrıca, ceviz kabukları biyoyakıtlar ve biyokompozitler gibi yenilenebilir enerji ve malzeme üretiminde de kullanılmaktadır. Bu ürünler, inşaat, otomotiv ve ambalaj sektörlerinde geleneksel sentetik malzemelere alternatif olarak öne çıkmaktadır.

Tarım alanında, ceviz kabukları ve kabuk dış kısımları, organik gübreler ve toprak düzenleyicileri olarak değerlendirilmektedir. Toprağa besin ekleyerek, nem tutma kapasitesini artıran ve toprağın yapısını iyileştiren bu maddeler, aynı zamanda tarımda zararlı organizmalar ve hastalıklarla mücadele etmek için de kullanılmaktadır. Bunların dışında gıda sektöründe elsanatları, mobilya dekorasyonları ve tekstilde kullanılmaktadır.

1.2. Pirina atıklarının değerlendirilmesi

Gıda endüstrileri hem çevresel hem de ekonomik açıdan ciddi bir sorun teşkil eden büyük miktarda yan ürün ve atık üretir. Bu nedenle, araştırmacılar atık ve yan ürünlere daha fazla dikkat etmektedir çünkü bunlar yalnızca potansiyel bir enerji kaynağı değil, aynı zamanda biyoaktif moleküllerin de kaynağıdır. Bu biyoaktif moleküller, gıdalarda katkı maddesi olarak kullanılabilir veya belirteç görevi görerek gıdanın gerçekliğini garanti altına almak için kullanılabilir (Goldsmith vd., 2018).

Sızma zeytinyağı üretim süreci, yan ürünler (zeytin posası ve atık su) ve atıklar (zeytin yaprakları ve odun) üretir. Bu yan ürünler ve atıklar, büyük miktarlarda ve kısa sürede üretildikleri için Akdeniz bölgelerinde önemli bir çevre sorunu teşkil eder (Dermeche vd., 2013).

1.2.1. Tarımda Kullanımı

Her yıl binlerce ton pirina üretilmektedir. Bir çalışmada, pirinanın bitki büyümesinde kullanıma olanakları araştırılmıştır. Sıcak ve ılıman bölgelerde yaygın olarak ekilen Bermuda çimi, yengeçotu, karaçim ve köpek dişi ayrığı gibi bitkilere farklı oranlarda pirina uygulanmış ve bitki gelişimi ile besin elementi miktarına (azot ve fosfor) etkisi incelenmiştir. Çalışmada, ½ oranında kum ve zeytin pirinası karışımının kullanıldığı yetiştirme ortamında, en yüksek azot değeri 5225 mg/l ile köpek dişi ayrığı bitkisinde, en yüksek fosfor değeri ise 96.5 mg/l ile yine köpek dişi ayrığı bitkisinde görülmüştür. Bu sonuçlar, pirinanın tarımda kullanımının faydalı olabileceğini göstermektedir (Öcal, 2005).

1.2.2. Hayvan Yemi olarak Kullanımı

Zeytin atığının hayvan yemi olarak kullanımı üzerine yapılan çalışmalarda, pirinanın yem olarak kullanılabilmesi için bazı işlemlerden geçmesi gerektiği ve bu işlemlerin zor ve uğraştırıcı olduğu görülmüştür. Pirina, yem sektöründe patates kabuğu ve pancar küspesi gibi diğer organik atıklar kadar yaygın kullanılmamaktadır. Pirinanın kullanılmasında karşılaşılan sorunlar arasında düşük protein içeriği, yüksek enerji kaynağı olmasına rağmen hayvanların toplam yem tüketimini azaltması ve hayvanlar için zararlı fitosteroller içermesi bulunmaktadır. Zeytin yaprakları, sindirilebilirliği düşük olduğu için ruminantlarda kaba yem olarak kullanılabilir. Zeytin tanesinden zeytinyağı eldesinden sonra geriye kalan kabuk, posa ve çekirdekten oluşan zeytin küspesi, yüksek selüloz, tanen ve fenolik bileşikler içerir. Bu bileşikler, rumende selülitik mikroorganizmalara zarar verebilir, ancak performansa zarar vermeden sınırlı düzeylerde alternatif yem olarak kullanılabilir. Ruminant hayvanlarda rasyonun %15'ine kadar kullanılabileceği ve süt rasyonlarında kullanıldığında sütte yağ oranı ve kalitesini artırdığı bildirilmektedir (Alcaide vd., 2003).

Pirinanın kanatlı hayvan yemi olarak kullanılabilmesi için lignin ve selüloz miktarının düşürülmesi, yani zeytin çekirdeklerinin ayıklanması gerekmektedir (Amici vd., 1991). Çalışmalar, zeytin pirinasının Akdeniz iklim bölgelerinde, meranın az olduğu kurak ve yarı kurak alanlarda sadece ana ürüne destek olarak verilebileceğini göstermektedir (Keser ve Bilal, 2010). Bu nedenle, pirinanın hayvan yemi olarak kullanılmasının önemli bir verim artışına sebep olmadığı görülmektedir. Pirina, yüksek enerji içeriğine sahip olmasına rağmen, düşük protein içeriği ve hayvanların toplam yem tüketimini azaltması gibi dezavantajlara sahiptir. Ayrıca, pirina içerisinde hayvanlar için zararlı olabilecek fitosteroller bulunmaktadır. Bu nedenle, piri-

nanın yem olarak kullanımı sınırlıdır ve genellikle diğer yem maddeleri kadar yaygın değildir (Amici vd., 1991).

Pirina, zeytin sıkıldıktan sonra geriye kalan posadır ve çeşitli kullanım alanlarına sahiptir. Özellikle Ege bölgesinde katı yakıt (pelet pirina) olarak kullanılmakta olup, ekolojik olması, yüksek kalorifik değeri (5000 kcal/kg) ve düşük kül içeriği nedeniyle tercih edilmektedir. Hayvan yemi olarak da kullanılabilen pirina, doğrudan kullanımı için bazı işlemler gerektirir ve diğer organik atıklar kadar yaygın değildir. Yüksek enerji içeriğine rağmen düşük protein içeriği ve fitosterol varlığı nedeniyle sınırlı kullanımı vardır. Pirina, kompozit gübre üretiminde de kullanılmakta olup, organik madde içeriği sayesinde toprağın verimliliğini artırabilir. Ayrıca, ikinci bir ekstraksiyon işlemi ile pirina yağı üretiminde de kullanılır. Bu yağ, yemeklik ve kıyartmalık olarak değerlendirilebilir ve yüksek duman noktası (240°C) nedeniyle kıyartmalarda tercih edilir. Sabun ve bazı kozmetik ürünlerin üretiminde de kullanılan pirina, içerdiği yağ ve diğer bileşenler sayesinde bu ürünlerin üretiminde faydalıdır. Pirina ayrıca biyogaz üretiminde de kullanılabilir. Organik atıkların anaerobik sindirimi yoluyla biyogaz üretimi, enerji üretimi ve atık yönetimi açısından önemli bir yöntemdir. Pirina, yüksek organik madde içeriği sayesinde biyogaz üretiminde verimli bir hammadde olarak değerlendirilebilir (Toparlak vd., 2022).

Zeytin yaprakları, protein bağlayan kondanse tanin içeriği nedeniyle çeşitli şekillerde kurutularak hayvan beslemede kullanılmıştır. Kurutma işlemleri, tanin içeriğini azaltırken, içerdiği besin maddelerinin sindirilebilirliğini de olumlu yönde etkilemiştir (Dalkılıç, 2018). Zeytin yaprakları, zeytin ağaçlarının budanması ve zeytinlerin yağının çıkarılmasından önceki temizleme ve harmanlama işlemleri sırasında elde edilen bir yan üründür (Dalkılıç, 2018).

Türkiye'de büyükbaş ve küçükbaş hayvan sayıları ile bunların beslenmesi için gerekli olan ortalama kaba yem miktarları dikkate alındığında, ciddi bir kaba yem açığının bulunduğu görülmektedir. Bu açığı kapatmak ve yem maliyetlerini düşürmek amacıyla pirina gibi yan ürünlerin kullanımı önemli bir alternatif olarak düşünülmektedir. Ancak, zeytin hasadı ve dolaşısıyla pirina üretimi yılda bir kez ve belirli aylarda yapılmaktadır. Bu nedenle, pirinanın yıl boyunca hayvan beslemede kaba yem kaynağı olarak kullanılabilmesi için, yağı alındıktan sonra kısa sürede silaj yapılması veya uygun silolama teknikleri kullanılarak saklanması gerekmektedir (Boğa, 2017).

Zeytin küspesi (pirina), düşük kaliteli yemleri daha iyi değerlendirebilen küçükbaş hayvanların beslenmesinde, yüksek gereksinimleri olan süt ineklerine göre daha uygundur. Chiofalo ve arkadaşları (2004), pirinayı tek başına ve E vitamini ile kombine ederek süt rasyonlarında kullanmış ve süt verimi, süt bileşimi, yağ asidi kompozisyonu ve pıhtılaşma özelliklerine etkisini incelemişlerdir. 15 günlük periyotlarla aldıkları örneklerin analiz sonuçlarına göre, en yüksek protein ve kazein yüzdeleri kontrol örneklerinde bulunmuştur. Pirina ilavesi, süt veriminin yanı sıra sütteki yağ oranı ve kalitesini artırmış, E vitaminli pirina grubunun pıhtılaşma süresini azaltmıştır. Böylece, atık bir ürün geri kazanılmış ve rasyon maliyeti düşürülmüştür (Chiofalo vd., 2004).

Başka bir çalışmada, konsantre yeme %35 oranında çekirdeği alınmış pirina ilavesiyle 40 gün boyunca beslenen kuzuların etinde çoklu doymamış yağ asitleri ve vitamin E düzeylerinin yanı sıra etin oksidatif stabilitesi ve raf ömrünün arttığı bildirilmiştir (Luciano ve arkadaşları, 2013). İki farklı konsantrasyonda (%15 ve %30) pirina içeren yemlerle 50 gün boyunca beslenen kuzularda yapılan çalışmada, %15 pirina ilavesinin günlük canlı ağırlık artışı ve karkas ağırlığına olumsuz bir etkisi olmadığı görülmüştür (Boğa, 2017).

1.2.3. Yakıt Olarak Kullanımı

Dünyada zeytinyağı üretimi yan ürünlerinin değerlendirilmesine yönelik çalışmalar, çeşitli alanlarda dikkat çekmektedir. Bu çalışmalar arasında biyodizel, biyogaz, biyoetanol, biyohidrojen ve pelet gibi alternatif enerji üretimi; hayvan beslemede yem ve yem katkı maddesi olarak kullanımı; tarım arazilerinde toprak düzenleyici, gübre ve kompost olarak kullanımı; gıda alanında jelleştirici ve fonksiyonel gıda üretiminde zenginleştirici katkı maddesi olarak kullanımı bulunmaktadır. Ayrıca, ilaç, nutrasötik ve kozmetik alanında koruyucu madde ve doğal nemlendirici olarak kullanımı ile biyoteknolojik uygulamalar (biyoplastik, biyopolimer, biyolojik yüzey aktif madde ve lipaz üretimi gibi) da dikkat çekmektedir. Son yıllarda, biyoaktif maddelerin geri kazanımı ile nutrasötik maddeler, gıda ve kozmetik ürünleri üretimine yönelik araştırmalar artmış olup, bu çalışmalar çevresel, sosyal, ekonomik ve sağlık açısından önemli görülmektedir. Zeytin yaprağı, pirina ve karasuyun gıda ve yem sektörlerinde değerlendirilmesi üzerine yapılan araştırmalar, bu yan ürünlerin doğru kullanıldığında çevre kirliliğini önleme ve ekonomiye katkı sağlama potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir (Seçmeler ve Üstündağ, 2016).

2. SONUÇ

Ceviz kabuğu ve pirina atıklarının farklı disiplinlerde kullanımına yönelik yeni gelişmeler oldukça geniş bir yelpazeye yayılmaktadır. Bu atıklar, biyoyakıt üretiminde önemli biyokütle kaynakları olarak kullanılabilir. Özellikle ceviz kabuğu, yüksek enerji içeriği sayesinde biyoyakıt üretiminde verimli bir hammadde olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, ceviz kabuğu atıkları su arıtma süreçlerinde de kullanılmaktadır. Polianilin/ceviz kabuğu kompozitleri, atık sulardan metilen mavisi gibi organik kirleticilerin gideriminde etkili adsorbanlar olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem, çevre dostu ve ekonomik bir çözüm sunmaktadır. Ceviz

kabuğu ve pirina atıkları, biyokompozit malzemelerin üretiminde dolgu maddesi olarak da değerlendirilmektedir. Bu kompozitler, epoksi reçine gibi polimer matrislerle birleştirilerek mekanik ve termal özellikleri iyileştirilmiş malzemeler elde edilmektedir. Bu tür biyokompozitler, inşaat ve otomotiv gibi sektörlerde kullanılabilir. Tarım alanında ise ceviz kabuğu ve pirina atıkları, organik gübre ve toprak düzenleyici olarak kullanılmaktadır. Bu atıklar, toprağın besin içeriğini artırarak bitki büyümesini destekler ve toprağın su tutma kapasitesini iyileştirir. Ayrıca, zararlı organizmalarla mücadelede de etkili olabilirler. Çevresel uygulamalarda ceviz kabuğu, ağır metallerin ve diğer kirleticilerin adsorpsiyonunda kullanılabilir. Bu özellikleri sayesinde, çevre kirliliğinin azaltılmasında önemli bir rol oynar. Bu bilgiler ışığında, ceviz kabuğu ve pirina atıklarının geri dönüştürülmesi ve çeşitli alanlarda kullanılması, hem ekonomik fayda sağlamakta hem de çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunmaktadır. Bu nedenle, bu atıkların daha geniş çapta kullanımı teşvik edilmeli ve bu alandaki araştırmalar desteklenmelidir.

KAYNAKLAR

- Amici, A., Verna, M., & Martillotti, F. (1991). Olive by-products in animal feeding: Improvement and utilization. *Options Méditerranéennes*, 16, 149-152.
- Bayraktar, F. S. (2006). Social responsibility projects as a marketing strategy: A recycling approach from the consumer's perspective (Yüksek lisans tezi, T.C. Marmara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme A.B.D. Üretim Yönetimi ve Pazarlama (İng). Bilim Dalı, İstanbul).
- Bıyıklı, M., Erdoğan, Ü., Özmen, Ö., Akcan, E. P., Karadoğan, T., & Baydar, H. (2023). Ceviz posası atıklarının ratlarda yara iyileştirici etkisinin belirlenmesi. II. *Uluslararası Edirne Kırmızısı Sempozyumu*, Ekim 2, Isparta.
- Boğa, M. (2017). Zeytinyağı yan ürünlerinin ruminant beslemede kullanım olanakları. *Türk Tarım - Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(5), 451-458.
- Chiofalo, B., Liotta, L., Zumbo, A., & Chiofalo, V. (2004). Administration of olive cake for ewe feeding: Effect on milk yield and composition. *Small Ruminant Research*, 55(1-3), 169-176. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2003.12.011>
- Dalkılıç, B. (2018). Zeytinyağı endüstrisi yan ürünlerinin hayvan besleme alanında değerlendirilme olanakları. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 5(3), 904-913. <https://doi.org/10.31202/ecjse.433078>
- Dermeche, S., Nadour, M., Larroche, C., Moulti-Mati, F., & Michaud, P. (2013). Olive mill wastes: Biochemical characterizations and valorization strategies. *Process Biochemistry*, 48(10), 1532-1552.

- Dönmez, Ö. (2024). Organik tarım ürünlerinin geri dönüşümü ve geri kazanım yöntemleri. *Journal of Social, Humanities and Administrative Sciences (JOSHAS)*, 7(38), 424-438.
- Goldsmith, C. D., Vuong, Q. V., Stathopoulos, C. E., Roach, P. D., & Scarlett, C. J. (2018). Ultrasound increases the aqueous extraction of phenolic compounds with high antioxidant activity from olive pomace. *LWT - Food Science and Technology*, 89, 284-290.
- Karadağ, R. (2007). *Doğal boyamacılık*. Dösım.
- Kök, F. (2021). Organik atıkların yönetimi, geri dönüşümü ve uygulamaları. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 4(2), 99-108.
- Sarode, S. S., Goswami, A., & Kulkarni, S. J. (2023). A comprehensive review on the use of walnut husk extract as a natural hair dye. *Intelligent Engineering Applications and Applied Sciences for Sustainability*, 351-366.
- Seçmeler, Ö., & Üstündağ Güçlü, Ö. (2016). Zeytinyağı sektörü atık ve yan ürünlerindeki biyoaktif maddelerin değerlendirilmesi. *Dünya Gıda Dergisi*, May 2015.
- Seidavi, A. R., Zaker-Esteghamati, H., & Scanes, C. G. (2019). Present and potential impacts of waste from poultry production on the environment. *World's Poultry Science Journal*, 75(1), 29-42.
- Strugstad, M., & Despotovski, S. (2013). A summary of extraction, synthesis, properties, and potential uses of juglone: A literature review. *Journal of Ecosystems and Management*, 13(3).

- Toparlak, E., & Kola, K. O. (2022). Zeytin yaprağı, pirina ve karasuyu gıda ve yem sektörlerinde değerlendirme çalışmaları. *Gıda ve Yem Bilimi Teknolojisi Dergisi*, 28, 1-17.
- TÜİK. (2012). Resmi web sitesi. www.tuik.gov.tr, Ankara.
- Türkyılmaz, Ö. Ü. Ü. D. (2024). Hayvan atıklarının geri dönüşümü ve tarımsal kullanımı. *Toprak Altı Hazinesi*, 109.
- United Nations. (2015). Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development, A/RES/70/1.
- Yaman, K. (2012). Bitkisel atıkların değerlendirilmesi ve ekonomik önemi. *Journal of Forestry Faculty of Kastamonu University*, 12(2).

**ÇEVRE BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİNDE İLERİ
ARAŞTIRMALAR**

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com