

ADVANCES IN ANALYTICAL CHEMISTRY AND MATERIALS SCIENCE:

ENVIRONMENTAL AND INDUSTRIAL APPLICATIONS



Editor: **FERDA ESER**



BİDGE Yayınları

**Advances in Analytical Chemistry and Materials Science:
Environmental And Industrial Applications**

Editor: FERDA ESER

ISBN: 978-625-8995-50-3

1st Edition

Page Layout By: G zde Y CEL

Publication Date: 2026-03-25

BİDGE Yayınları

All rights reserved. No part of this work may be reproduced in any form or by any means, except for brief quotations for promotional purposes with proper source attribution, without the written permission of the publisher and the editor.

Certificate No: 71374

All rights reserved   BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. şti.

G zeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9  ankaya /
Ankara



CONTENTS

PLANT SECONDARY METABOLITES AND HPLC ANALYTICAL APPROACHES	1
<i>GİZEM YILDIRIM BAŞTEMUR, SABRİYE PERÇİN ÖZKORUCUKLU</i>	
INTERNATIONAL APPROACHES TO THE ANALYTICAL DETERMINATION OF EMERGING CONTAMINANTS	19
<i>MELİKE BÜŞRA BAYRAMOĞLU KARŞI</i>	
POLİMERİK YAPIŞTIRICILAR VE KOMPOZİT MATERYALLER	42
<i>ŞAHİN ÖZEL</i>	
METAL YANGINLARI	106
<i>ZEHRA YILDIZ</i>	
KARBONDİOKSİT YAKALAMA VE DEPOLAMA: MİNERAL KARBONATLAMA	127
<i>MUHAMMED KÜRŞAT AYDEMİR, TUFAN KIYAK, BAHAA ALYOSİF</i>	

CHAPTER 1

PLANT SECONDARY METABOLITES AND HPLC ANALYTICAL APPROACHES

**GİZEM YILDIRIM BAŞTEMUR¹
SABRİYE PERÇİN ÖZKORUCUKLU²**

INTRODUCTION

Natural products of plant origin are increasingly evaluated not only based on traditional knowledge but also through scientifically validated chemical characterization and biological activity studies. Secondary metabolites synthesized by plants are at the center of natural product research; thanks to their chemical diversity, they offer broad application potential in pharmaceutical, food, cosmetic and biotechnological fields (Ciumărnean et al., 2020; Dias et al., 2021; Jha & Sit 2022). However, the distribution and concentration of secondary metabolites in plant tissues vary considerably depending on species, plant organ environmental

¹Lecturer Dr., Istanbul University, Faculty of Science, Department of Molecular Biology and Genetics, Orcid: 0000-0002-4634-4525

²Prof. Dr., Istanbul University, Faculty of Science, Department of Molecular Biology and Genetics,, Orcid: 0000-0001-9778-2034

factors and cultivation conditions (Baştemur et al., 2024). This variability represents one of the major challenges in achieving scientific comparability, reproducibility, and standardization of plant-derived materials.

Reliable identification and quantitative determination of secondary metabolites are essential not only for compound profiling but also for quality control, standardization, and regulatory evaluation of plant-based products. Therefore, the selection of analytical approaches should be made considering the multi-component and complex structure of plant samples. Modern chromatographic techniques have become fundamental tools in secondary metabolite analysis, particularly due to their high separation capacity and reproducibility (Akpınar et al., 2024). This section addresses the chemical properties and analytical requirements of secondary metabolites; HPLC approaches and application examples in the determination of these compounds are evaluated.

DIVERSITY AND IMPORTANCE OF SECONDARY METABOLITES IN PLANTS

Plants are responsible for synthesizing many organic components to survive. These components are generally divided into two groups: primary and secondary metabolites. While primary metabolites play a direct role in the basic physiological processes of plants such as growth, development, and reproduction, secondary metabolites are compounds that perform specific biological and ecological functions in plants. Secondary metabolites are biosynthesized from primary metabolic intermediates and are typically present in low concentrations, often in response to specific ecological or physiological stimuli (Erb & Kliebenstein, 2020).

Secondary metabolites obtained from plants have been an important resource for human health from the past to the present and

have been frequently used in traditional medicine systems. Today, plant-derived compounds still have great importance in global health practices thanks to their nutritional and healing properties (Sumner, 2000). In many countries that are members of the World Health Organization, medicinal plants are at the center of traditional medicine practices, and products based on these plants hold an important place in the global pharmaceutical and health market. However, the increasing use of plant-based products has necessitated a reliable assessment of factors such as pharmacological efficacy, toxicity, and phytochemical consistency. Plants produce a variety of secondary metabolites thanks to their rich metabolic capacities, and these compounds offer significant potential for pharmaceutical, biomaterial, and biotechnological applications (Ramakrishna et al., 2024). However, despite the thousands of plant species known to have medicinal value, only a limited number of these plants have had their phytochemical profiles studied in detail. This highlights the need for systematic and robust analytical approaches to reliably assess the chemical diversity and biological potential of plant secondary metabolites.

SECONDARY METABOLITES

Plant secondary metabolites are organic compounds produced by plants through specific metabolic pathways and not directly involved in primary metabolism. However, these substances play extremely important roles in plant health, environmental adaptation, and interactions within the ecosystem (Kusmann et al., 2023; Hilal et al., 2024). These metabolites are biosynthesized according to ecological roles such as defense mechanisms, competition, and symbiosis, and are classified into three main groups based on their metabolic origins: alkaloids, terpenoids, and phenolic compounds. These metabolite groups exhibit significant differences in terms of their chemical structures, biological effects, and areas of use. This diversity offers ecological benefits for plants, while also

being of great importance for economic systems based on these compounds and for human societies (Kandar, 2020; Bano et al., 2023).

Alkaloids

Alkaloids are an important group of components, characterized by their nitrogen-containing structures and offering a rich chemical diversity among plant secondary metabolites (Chaachouay & Zidane, 2024). Plants often contain multiple alkaloids together, frequently in complex mixtures where a particular alkaloid is dominant. The biosynthetic origins of alkaloids are primarily based on amino acids, and their structural classification is based on heterocyclic ring systems such as indole, quinoline, isoquinoline, tropane, and imidazole (Hurkul et al., 2024). However, approaches to classifying alkaloids vary in the literature (Heinrich et al., 2021). In current studies, alkaloids are generally classified into three main groups based on their biosynthetic origin: true alkaloids, protoalkaloids, and pseudoalkaloids.

Although alkaloids are not essential metabolites for plants, their toxic and biologically active properties give them important functions in defense, competition, and ecological interactions (Kingston & Cassera, 2022). Their ability to deter herbivores, insects, and microorganisms has led to these compounds playing a significant role in plant defense systems (Singh et al., 2024). Alkaloids are known to possess a broad spectrum of biological activity, including antiproliferative, antibacterial, and antioxidant activities. Because of these properties, they have been prominent in pharmacology and therapeutic fields for many years (Dey et al., 2020; Bhambhani et al., 2021).

Terpenoids

Terpenoids (isoprenoids) represent the largest and most structurally diverse class of plant secondary metabolites, with over

50,000 identified compounds (Hurkul et al., 2024). These compounds are biosynthesized from five-carbon isoprene (C_5H_8) units via the mevalonate (MVA) and methylerythritol phosphate (MPE) pathways. The number and arrangement of isoprene units play a significant role in the classification of these compounds (Ludwiczuk et al., 2017). Based on the number of isoprene units they contain, terpenoids are classified as monoterpenes, sesquiterpenes, diterpenes, triterpenes, and tetraterpenes. Chemically, terpenoids, which are called non-saponifiable lipids because they do not participate in fatty acid biosynthesis, are generally obtained from plants and are widely found in nature.

Terpenoids have various biological functions in plants, affecting both primary and secondary metabolism. Terpenoids play a role in fundamental biological processes in plants, such as electron transport, regulation of growth and development, structure of photosynthetic pigments, and maintenance of cell membrane integrity (Maswal et al., 2023). In addition, they function as defense compounds, toxic substances, nutritional inhibitors, and signaling molecules involved in ecological interactions, making significant contributions to plant adaptation to environmental conditions (Rehman & Akash, 2026). From a pharmacological perspective, the structural variability and broad biological activity profiles of terpenoids demonstrate their importance in therapeutic fields and practical applications (Singh et al., 2024).

Phenolic Compounds

Phenolic compounds are defined as aromatic structures containing one or more hydroxyl substituents attached directly to the aromatic ring. These compounds are one of the most common classes of secondary metabolites in plants (Rudrapal et al., 2022). To date, more than 8,000 phenolic structures have been identified, ranging from simple phenolic acids to highly polymerized tannins

(Eseberri et al., 2022). Phenolic compounds are primarily synthesized via the shikimate and phenylpropanoid biosynthetic pathways and have a wide distribution in the plant kingdom (El-Azaz & Maeda, 2025). Based on their chemical structure, phenolic compounds are divided into various subgroups including phenolic acids, flavonoids, tannins, lignans, coumarins, and stilbenes (Alara et al., 2021). This structural diversity plays a significant role in the differentiation of the biological activities and functional properties of phenolic compounds (Joshi et al., 2024).

Phenolic compounds perform various biological functions in plants, such as color formation, protection against ultraviolet (UV) radiation, and defense against environmental stress conditions (Cosme et al., 2020). Due to their widespread presence in different organs of plants, phenolic compounds are also important components of human nutrition. Plant-based foods such as fruits, vegetables, grains, legumes, and olives, as well as beverages such as tea, coffee, beer, and wine, are rich in phenolic compounds, which contribute to the taste, aroma, and color characteristics of these products (Kumar et al., 2020). Because of their strong antioxidant capacities and broad biological activity profiles, phenolic compounds continue to be extensively researched in natural product chemistry for their potential health benefits and pharmacological effects (de la Rosa et al., 2019).

ANALYTICAL EVALUATION OF SECONDARY METABOLITES

The structural diversity, low concentration levels, and potential instability of plant secondary metabolites necessitate the use of highly sensitive and selective analytical approaches. Alkaloids, terpenoids, and phenolic compounds exhibit significant differences in polarity, molecular weight, and chemical stability. This necessitates optimization for each method in the analytical

processes. Furthermore, the complex structure of plants, simultaneously extracted components, and matrix effects are significant factors that make obtaining reliable results difficult (Zhao et al., 2021).

Both qualitative identification and quantitative determination are of great importance in the analytical evaluation of secondary metabolites. Analytical methods are expected to meet requirements such as high resolving power, sufficient sensitivity, reproducibility, and selectivity in multi-component systems. The literature emphasizes the importance of chromatographic techniques for the accurate and reliable analysis of secondary metabolites in plant matrices (Xu & Wang, 2025; Yıldırım Baştemur et al., 2024).

From this perspective, chromatographic techniques are among the most common and reliable methods for the analysis of plant secondary metabolites. Liquid chromatography-based techniques stand out due to their high separation capacity, compatibility with various detection systems, and the ability to simultaneously analyze many compounds. Many studies have indicated the effective use of liquid chromatography methods for the analysis of phenolic compounds, flavonoids, anthraquinones, and alkaloids in plant samples (Akpınar et al., 2024; Hussein, 2025). High-performance liquid chromatography (HPLC), one of these methods, is considered an important and widely used technique in the analytical investigation of plant secondary metabolites.

ANALYSIS OF SECONDARY METABOLITES BY HPLC

High-performance liquid chromatography (HPLC) remains one of the most widely applied techniques for the qualitative and quantitative analysis of plant secondary metabolites due to its high separation efficiency, versatility, and compatibility with various detection systems. In HPLC-based analyses, variables such as sample matrix properties, target analyte group, column type used,

mobile phase composition, elution program, and detector parameters directly affect the performance of the method. Many different chromatographic conditions have been reported in the literature for the analysis of alkaloids, terpenoids, phenolic acids, flavonoids, and other secondary metabolite groups. Therefore, a systematic evaluation of existing research constitutes an important reference for method selection and optimization. HPLC methods and detection parameters for various plant samples reported in the literature are shown in Table 1.

Table 1. Literature data on the analysis of secondary metabolites by HPLC

Sample	Target analytes	Column	HPLC conditions	Detector parameters	Reference
<i>Forsythiae Fructus</i>	Lignans	Diamonsil C18 column (250×4.6 mm, 5 µm)	Methanol and double distilled water (80:20, v/v), Isocratic elution, Flow rate:1.0 mL/min	294 nm	Qin et al, 2023
<i>Saururus chinensis</i>	Lignans	TSK gel ODS-100Z column (250 ×4.6 mm, 5 µm)	A. 0.4 % (v/v) acetic acid in water B. Acetonitril, Gradient elution, Flow rate: 1.0 mL/min	280 nm	Chen et al., 2019
<i>Lycopersicon lycopersicum</i>	Phenolic acids	Eclipse XDB-C18 column (250×4.6 mm, 5 µm)	3 % acetic acid (A) and methanol (B), Gradient elution, Flow rate: 0.8 mL/min	278 nm	Baltacıoğlu et al., 2021
<i>Prunus spinosa</i> L.	Phenolic acids, flavonoids	C18 Ascentis® Express	A (0.5 % water solution of	280 nm for flavan-3-ols and	Marchelak et al., 2020

		column (2.7 μ m, 150 mm $\times$ 4.6 mm)	orthophosphoric acid, w/v), B (acetonitrile) and solvent C (tetrahydrofuran), Gradient elution, Flow rate: 1.09 mL/min	proanthocyanidins, 310 nm for p-coumaric acid, 325 nm for caffeic acid derivatives, and 350 nm for flavonols	
Six categories of vegetables	Phenolic acids	Spherisorb (Phenomenex) reverse-phased C18 column (3.5 μ m, 2.1 mm $\times$ 100 mm)	Acetonitrile (solvent A) and 0.1% (v/v) aqueous formic acid (solvent B), Gradient elution, Flow rate: 0.25 mL/min	MS detector	Zhang et al., 2019
<i>Geissospermum vellosii</i>	Alkaloids	The Gemini® NX-C18 column (150 $\times$ 2.0 mm, dp 3.0 μ m)	A: aqueous formic acid (0.01%) or alternatively aqueous heptafluorobutyric acid 5.0 mM, B acetonitrile and 0.01% formic acid or 5.0 mM heptafluorobutyric acid, Flow rate: 0.25 mL/min	MS detector	Aigotti et al., 2022
<i>Crinum</i> root	Alkaloid, Phenolic acids	Hiber C18 column (5 mm, 250 $\times$ 4.6 mm)	Water: acetonitrile: glacial acetic acid (90:5:5), Isocratic elution, Flow rate: 0.9 mL/min	280 nm	Lekhak et al., 2022
<i>Ginkgo biloba</i> leaves	Flavonoids, terpenoids	ZORBAX SB-C18	Different acetonitrile-	MS detector	Zhou et al., 2025

		column (4.6×250 mm, 1.8 µm)	aqueous formic acid ratios, Flow rate: 1.0 mL/min		
<i>Eriobotrya japonica</i> Lindl.	Terpenoids	Phenomene x (4.6×250 mm)	0.1% phosphoric acid (A) and 100% acetonitrile (B). Gradient elution, Flow rate: 0.75 mL/min	210 nm	Lü et al., 2020
<i>Triticum aestivum</i> L.	Phenolic acids, flavonoids	X-Terra C18 column (250×4.6 mm, 5 µm)	Deionized water containing 0.1% orthophosph oric acid (phase A) and ethanol (phase B). Gradient elution, Flow rate: 0.85 mL/min	230 nm	Demirag et al., 2026
<i>Daucus carota</i> ssp. <i>sativus</i> var. <i>atrorubens</i> <i>Alef</i>	Anthocyanin	Supelcosil LC-18 (25 cmx4.6 mm)	Deionized water with 0.5% orthophosph oric acid (A) and methanol (B), Gradient elution, Flow rate: 1.0 mL/min	520 nm	Odabasi et al., 2025

CONCLUSION

Plant secondary metabolites have become a focal point of natural product research and applied sciences due to their wide chemical diversity and varied biological activities. Alkaloids,

terpenoids, and phenolic compounds, while differing in their structural properties, biosynthetic sources, and biological effects, stand out as fundamental components in determining the pharmaceutical and functional value of plant materials. The variability of these compounds depending on the plant species, organ differences, environmental factors, and processing methods increases the importance of reliable analytical approaches.

High-performance liquid chromatography (HPLC) is an important technique in the analytical evaluation of secondary metabolites due to its high separation capacity, sensitivity, and applicability to multi-component systems. Many optimized HPLC methods have been developed in the literature for various plant matrices and metabolite groups. The differences in column selection, mobile phase composition, elution program, and detector systems of these methods indicate that the analytical strategy must be carefully planned depending on the target compound and sample matrix.

In conclusion, comprehensive and validated HPLC methodologies are indispensable for the accurate characterization, quality control, and standardization of plant secondary metabolites. In this context, the proper planning of HPLC-based methods and the meticulous determination of target compound-specific parameters are critical for the reliability of analytical results. Given the complex structure of plant matrices, analytical strategies require a holistic approach. This approach will significantly contribute to the scientifically comparable and standardizable evaluation of secondary metabolites.

REFERENCES

Aigotti, R., Santoro, V., Gastaldi, D., Zorzi, M., Dal Bello, F., Grandi, M., & Baiocchi, C. (2022). Characterization of alkaloids in bark extracts of *Geissospermum vellosii* by HPLC-UV-diode array-

multistage high-resolution mass spectrometry. *Journal of Chromatography B*, 1203, 123307.

Akpınar, R., Yıldırım Baştemur, G., Bıçak, B., Sanlı, N. O., Mertoğlu Kamalı, E., Pekmez, M., Perçin Özkorucuklu, S. (2024). Phytochemical profiling, in vitro biological activities, and in silico (molecular docking and absorption, distribution, metabolism, excretion, toxicity) studies of *Polygonum cognatum* Meissn. *Journal of Separation Science*, 47(1), 2300750.

Alara, O. R., Abdurahman, N. H., & Ukaegbu, C. I. (2021). Extraction of phenolic compounds: A review. *Current Research in Food Science*, 4, 200–214. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.03.011>

Baltacıoğlu, H., Baltacıoğlu, C., Okur, I., Tanrıvermiş, A., & Yalıcı, M. (2021). Optimization of microwave-assisted extraction of phenolic compounds from tomato: Characterization by FTIR and HPLC and comparison with conventional solvent extraction. *Vibrational Spectroscopy*, 113, 103204.

Bano, A., Qadri, T. A., Mahnoor, & Khan, N. (2023). Bioactive metabolites of plants and microbes and their role in agricultural sustainability and mitigation of plant stress. *South African Journal of Botany*, 159, 98–109. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.05.049>

Baştemur, G. Y., Akpınar, R., Kır, E., & Özkorucuklu, S. P. (2024). Development and validation of the HPLC-DAD method for the simultaneous determination of anthraquinones in *Rumex crispus* L. and *Rumex acetosella* L. plants and evaluation of their antioxidant capacities. *Journal of Analytical Chemistry*, 79(2), 180-190.

Bhambhani, S., Kondhare, K. R., & Giri, A. P. (2021). Diversity in chemical structures and biological properties of plant

alkaloids. *Molecules*, 26, 3374.
<https://doi.org/10.3390/molecules26113374>

Ciumărnean, L., Milaciu, M. V., Runcan, O., Vesa, S. C., Răchisan, A. L., Negrean, V., Perné, M. G., Donca, V. I., Alexescu, T. G., Para, I., & Dogaru, G. (2020). The effects of flavonoids in cardiovascular diseases. *Molecules*, 25, 4320.
<https://doi.org/10.3390/molecules25184320>

Chaachouay, N., & Zidane, L. (2024). Plant-derived natural products: A source for drug discovery and development. *Drugs and Drug Candidates*, 3(1), 184–207.
<https://doi.org/10.3390/ddc3010011>

Chen, H., Ji, T., Chen, J., & Li, X. (2019). Matrix solid-phase dispersion combined with HPLC-DAD for simultaneous determination of nine lignans in *Saururus chinensis*. *Journal of Chromatographic Science*, 57(2), 186–193.

Cosme, P., Rodríguez, A. B., Espino, J., & Garrido, M. (2020). Plant phenolics: Bioavailability as a key determinant of their potential health-promoting applications. *Antioxidants*, 9, 1263.
<https://doi.org/10.3390/antiox9121263>

de la Rosa, L. A., Moreno-Escamilla, J. O., Rodrigo-García, J., & Alvarez-Parrilla, E. (2019). Phenolic compounds. In *Phenolic compounds* (pp. xx–xx). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813278-4.00012-9>

Demirag, A. D., Bicak, B., Akpinar, R., Akman, G., Bastemur, G. Y., Ozkorucuklu, S. P., & Yildirim, M. (2026). Phytochemical, in silico, and in vitro studies of wheatgrass (*Triticum aestivum* L.) juice powder. *Scientific Reports*, 16, Article number: 6279

Dey, P., Kundu, A., Kumar, A., Gupta, M., Lee, B. M., Bhakta, T., Dash, S., & Kim, H. S. (2020). Analysis of alkaloids

(indole alkaloids, isoquinoline alkaloids, tropane alkaloids). In *Recent advances in natural products analysis* (pp. 505–567). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816455-6.00015-9>

Dias, M. C., Pinto, D. C. G. A., & Silva, A. M. S. (2021). Plant flavonoids: Chemical characteristics and biological activity. *Molecules*, 26, 5377. <https://doi.org/10.3390/molecules26175377>

El-Azaz, J., & Maeda, H. A. (2025). The multilayered regulation of aromatic amino acid biosynthesis in plants. *Trends in Biochemical Sciences*, 50(12), 1051–1071.

Erb, M., & Kliebenstein, D. J. (2020). Plant secondary metabolites as defenses, regulators, and primary metabolites: The blurred functional trichotomy. *Plant Physiology*, 184, 39–52.

Eseberri, I., Trepiana, J., Léniz, A., Gómez-García, I., Carr-Ugarte, H., González, M., & Portillo, M. P. (2022). Variability in the beneficial effects of phenolic compounds: A review. *Nutrients*, 14, 1925. <https://doi.org/10.3390/nu14091925>

Heinrich, M., Mah, J., & Amirkia, V. (2021). Alkaloids used as medicines: Structural phytochemistry meets biodiversity—An update and forward look. *Molecules*, 26(7), 1836. <https://doi.org/10.3390/molecules26071836>

Hilal, B., Khan, M. M., & Fariduddin, Q. (2024). Recent advancements in deciphering the therapeutic properties of plant secondary metabolites: Phenolics, terpenes, and alkaloids. *Plant Physiology and Biochemistry*, 211, 108674. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108674>

Hurkul, M. M., Cetinkaya, A., Yayla, S., & Ozkan, S. A. (2024). Advanced sample preparation and chromatographic techniques for analyzing plant-based bioactive chemicals in nutraceuticals. *Journal of Chromatography Open*, 5, 100131.

Hussein, J. (2025). Principles and applications of high-performance liquid chromatography (HPLC): A review. *Biomedical and Pharmacology Journal*, 18(2), 1085–1089.

Jha, A. K., & Sit, N. (2022). Extraction of bioactive compounds from plant materials using combination of various novel methods: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 119, 579–591. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.11.019>

Joshi, V., Bachhar, V., Mishra, S. S., Shukla, R. K., Gangal, A., & Duseja, M. (2024). GC–MS fingerprinting, nutritional composition, in vitro pharmacological activities and molecular docking studies of *Piper chaba* from Uttarakhand region. *3 Biotech*, 14(6), 158.

Kandar, C. C. (2020). Secondary metabolites from plant sources. In *Secondary metabolites from plant sources* (pp. 329–377). Cham, Switzerland: Springer Science and Business Media. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54027-2_10

Kingston, D. G. I., & Cassera, M. B. (2022). Antimalarial natural products. In A. D. Kinghorn, H. Falk, S. Gibbons, Y. Asakawa, J. K. Liu, & V. M. Dirsch (Eds.), *Antimalarial natural products* (pp. 1–106). Berlin/Heidelberg, Germany: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89873-1_1

Kumar, S., Abedin, M. M., Singh, A. K., & Das, S. (2020). Role of phenolic compounds in plant-defensive mechanisms. In *Plant phenolics in sustainable agriculture* (pp. 517–532). Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4890-1_22

Kussmann, M., Abe Cunha, D. H., & Berciano, S. (2023). Bioactive compounds for human and planetary health. *Frontiers in Nutrition*, 10, 1193848. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1193848>

Lekhak, M. M., Patel, S. B., Otari, S. S., Lekhak, U. M., & Ghane, S. G. (2022). Bioactive potential and RP-HPLC detection of

phenolics and alkaloids (lycorine and galanthamine) from ultrasonic-assisted extracts of *Crinum* roots. *South African Journal of Botany*, 149, 923–936.

Lü, H., Lee, R. P., Huang, J., Chen, J., Go, V. L. W., Li, Z., & Lu, Q. Y. (2020). A new HPLC–UV method for the quantification of terpenoids and antioxidant activity of commercial loquat leaf tea and preparation. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14(2), 1085–1091.

Ludwiczuk, A., Skalicka-Woźniak, K., & Georgiev, M. I. (2017). Terpenoids. In *Pharmacognosy: Fundamentals, applications and strategy* (pp. 233–266). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802104-0.00011-1>

Marchelak, A., Olszewska, M. A., & Owczarek, A. (2020). Simultaneous quantification of thirty polyphenols in blackthorn flowers and dry extracts prepared thereof: HPLC-PDA method development and validation for quality control. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 184, 113121.

Maswal, M., Pandita, M., & Bashir, S. (2023). Terpenes, terpenoids and steroids: Properties, biosynthesis and functions. In A. H. Banday (Ed.), *Steroids and their medicinal potential* (pp. 1–38). Sharjah, United Arab Emirates: Bentham Science Publishers. <https://doi.org/10.2174/789815049336123010003>

Odabasi, B., Sebikbay, S., Üner, A., Yildirim-Bastemur, G., Pekmez, M., Perçin-Özkorucuklu, S., & Çakır, Ö. (2025). Anthocyanin Accumulation And Gene Expression Analysis In Black Carrot Calli Under Salt And Salicylic Acid Stresses. *JAPS: Journal of Animal & Plant Sciences*, 35(2).

Qin, Y., Wang, R. Q., Xing, R. R., Yang, L., Chen, X., & Hu, S. (2023). Dispersive liquid–liquid microextraction based on a supramolecular solvent followed by high-performance liquid

chromatographic analysis of lignans in *Forsythiae Fructus*. *Journal of Separation Science*, 46(5), 2200719.

Ramakrishna, K., Chakravarthi, G., Rai, S., Singh, P., Mishra, S., Mishra, D., ... Tiwari, N. (2024). Biochemical characterization of plant secondary metabolites. In *Secondary metabolites and biotherapeutics* (pp. 39–61). London, UK: Academic Press.

Rehman, K., & Akash, M. S. H. (2026). Sources and extraction techniques for secondary metabolites. In *Biochemical and molecular mechanisms of secondary metabolites in metabolic diseases* (pp. 71–109). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.

Rudrapal, M., Khairnar, S. J., Khan, J., BinDukhyil, A., Ansari, M. A., Alomary, M. N., Alshabrimi, F. M., Palai, S., Deb, P. K., & Devi, R. (2022). Dietary polyphenols and their role in oxidative stress-induced human diseases: Insights into protective effects, antioxidant potentials and mechanisms of action. *Frontiers in Pharmacology*, 13, 806470. <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.806470>

Singh, D., Verma, S. K., & Shyam, P. (2024). Identification and purification of plant secondary metabolite as medicinal raw materials. In *Secondary metabolites and biotherapeutics* (pp. 9–38). London, UK: Academic Press.

Sumner, J. (2000). *The natural history of medicinal plants*. Portland, OR: Timber Press.

Xu, L., & Wang, X. (2025). A comprehensive review of phenolic compounds in horticultural plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(12), 5767.

Yıldırım Baştemur, G., Akpınar, R., Kültür, Ş., & Perçin Özkorucuklu, S. (2024). Evaluation of phenolic and anthraquinone profiles of Polygonaceae family from Turkey. *Sylwan*, 168.

Zhang, L., Li, Y., Liang, Y., Liang, K., Zhang, F., Xu, T., ... Lu, B. (2019). Determination of phenolic acid profiles by HPLC-MS in vegetables commonly consumed in China. *Food Chemistry*, 276, 538–546.

Zhao, Y., Lu, H., Wang, Q., Liu, H., Shen, H., Xu, W., et al. (2021). Rapid qualitative profiling and quantitative analysis of phenolics in *Ribes meyeri* leaves and their antioxidant and antidiabetic activities by HPLC-QTOF-MS/MS and UHPLC-MS/MS. *Journal of Separation Science*, 44, 1404–1420.

Zhou, G., Zhang, Z., Mahmood, S., Tang, J., & Yao, S. (2025). Combined use of ionic liquid micelles and natural carbon dots@deep eutectic solvent (CDs@DES) to extract and separate flavonoids and terpenoids from *Ginkgo biloba* leaves. *Journal of Chromatography A*, 466553.

CHAPTER 2

INTERNATIONAL APPROACHES TO THE ANALYTICAL DETERMINATION OF EMERGING CONTAMINANTS

MELİKE BÜŞRA BAYRAMOĞLU KARŞI¹

Introduction

In recent years, numerous chemical compounds detected in environmental media, food matrices and biological samples but not systematically monitored within conventional surveillance programs have been defined as “emerging contaminants” (Geissen et al., 2015). This group of pollutants includes a wide chemical diversity such as per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS), pharmaceuticals and personal care products (PPCPs), endocrine-disrupting compounds and microplastics (Lapworth et al., 2012). Although these compounds are present at low concentrations in environmental media, they pose an increasing risk to ecosystems and human health due to their persistence, bioaccumulation potential and potential toxic effects (Richardson & Kimura, 2017).

¹Dr., Innovative Food Technologies Development Application and Research Center (YENİGİDAM), Bolu Abant İzzet Baysal University, Bolu, Türkiye, 0000-0003-3162-8119

One of the most important characteristics of emerging contaminants from the perspective of analytical chemistry is that a large proportion of them are not regulated in existing environmental legislation and therefore remain outside monitoring programs (Petrovic et al., 2018). This situation limits analytical methods mostly to the target analysis approach and may lead to the omission of unidentified or unexpected compounds in the literature (Hollender et al., 2017). In particular, the reliable determination of ultra-trace level contaminants present in complex environmental matrices necessitates the use of advanced instrumental techniques requiring high sensitivity and selectivity beyond classical analytical approaches (Hernández et al., 2014).

Liquid chromatography–tandem mass spectrometry (LC-MS/MS) systems are widely used in the targeted analysis of emerging contaminants and offer significant advantages especially in the determination of polar and thermally unstable compounds (Petrovic et al., 2006). However, in recent years, high-resolution mass spectrometry (HRMS) based non-target screening and suspect screening approaches have led to a major methodological and conceptual transformation in analytical chemistry, enabling the identification of previously unreported compounds in environmental samples (Krauss et al., 2010; Schymanski et al., 2014). Through these approaches, it has become possible to evaluate not only predefined target analytes but also potentially hundreds or even thousands of compounds within a single analytical run (Hollender et al., 2017).

One of the main challenges in the analytical determination of emerging contaminants is matrix effects. Organic matter and coexisting compounds present in complex matrices such as wastewater, surface water, sediments and biological samples may cause ion suppression or signal enhancement, thereby negatively affecting analytical accuracy (Trufelli et al., 2011). Therefore, the

development of appropriate sample preparation and preconcentration strategies is of great importance to obtain reliable results (Mester et al., 2001). In particular, solid phase extraction (SPE) and microextraction-based approaches are widely preferred for the determination of emerging contaminants present at trace levels in environmental samples (Płotka-Wasyłka et al., 2015).

At the international scale, monitoring and regulatory efforts regarding emerging contaminants have accelerated in many countries, particularly in the European Union and the United States (European Commission, 2020; United States Environmental Protection Agency [EPA], 2021). However, the limited availability of standardized analytical methods for the determination of these compounds complicates data comparability and leads to uncertainties in risk assessment studies (Hernández et al., 2014). In this context, the harmonization and validation of newly developed analytical methods at the international level has emerged as a critical requirement for the effectiveness of environmental monitoring programs (Subasini et al., 2022).

In this section, international approaches for the determination of emerging contaminants in analytical chemistry are discussed within the framework of modern instrumental techniques and methodological trends; current limitations and future research needs are also examined.

Emerging Contaminant Classes

Emerging contaminants represent a highly heterogeneous group in terms of chemical structure, usage areas and environmental behavior (Geissen et al., 2015). The common characteristic of these pollutants is that, although they are present at low concentrations in environmental media, they can have long-term effects on ecosystems and human health due to their bioaccumulation and toxicity potential (Richardson & Kimura, 2017). From the perspective of analytical

chemistry, most of these compounds cannot be reliably detected using classical methods because of properties such as high polarity, low environmental concentrations and occurrence in complex matrices (Hollender et al., 2017). In this section, major emerging contaminant classes such as PFAS, pharmaceuticals and personal care products, and microplastics, along with their analytical challenges, are discussed.

Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS)

Per- and polyfluoroalkyl substances are environmentally highly persistent due to the high chemical stability of carbon–fluorine bonds and are widely used in various industrial and consumer products (Buck et al., 2011). PFAS compounds consist of synthetic surfactants commonly used in fire-fighting foams, textile surface coatings, food packaging and water- and oil-repellent materials used in the electronics industry (Giesy and Kannan, 2001). This widespread use has led to the global detection of PFAS compounds in water, soil and biological samples (Rahman et al., 2014).

From an analytical perspective, LC-MS/MS systems are widely used for the determination of PFAS compounds, while their analysis using other classical methods is limited due to high polarity and thermal instability. In addition, the fact that the PFAS group consists of a large number of different compounds and that only a limited number of analytes have commercially available reference standards restricts targeted analysis approaches (Schymanski et al., 2014). Since Teflon-based laboratory materials may also cause PFAS contamination, careful attention should be paid during analytical procedures (Ahrens et al., 2010).

Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs)

Pharmaceuticals and personal care products constitute a broad group of chemical compounds that continuously enter

environmental media due to their intended use for human health and hygiene, encompassing antibiotics, analgesics, hormones and cosmetic ingredients (Daughton and Ternes, 1999). A significant portion of these compounds reaches wastewater treatment plants either unmetabolized or partially transformed and cannot be completely removed by conventional treatment processes; consequently, PPCP compounds can be detected at trace levels in surface waters, groundwater and even drinking water (Lapworth et al., 2012).

From an analytical perspective, the diverse physicochemical properties of PPCP compounds make it difficult for a single analytical method to cover all compounds, necessitating the implementation of multiple analytical strategies (Petrovic et al., 2006). The analysis of polar and thermally unstable compounds, in particular, is carried out using LC-MS/MS and HRMS-based methods that provide high sensitivity and selectivity (Hernández et al., 2014). The transformation of PPCP compounds into metabolites through biotic and abiotic processes in environmental media may cause targeted analyses focusing only on the parent compounds to underestimate the total pollutant load (Celiz et al., 2009). In this context, the application of appropriate sample preparation and preconcentration approaches is critical for obtaining reliable quantitative results (Mester et al., 2001; Płotka-Wasyłka et al., 2015).

Microplastics and Related Additives

Microplastics are defined as plastic particles smaller than 5 mm and are dispersed into environmental media from primary or secondary sources (Cole et al., 2011). Nanoplastics, which constitute the smaller-sized fraction of microplastics, have emerged as a pollutant group with higher potential for interaction with biological systems as particle size decreases (Koelmans et al., 2015). In

addition, not only microplastics themselves but also organic pollutants adsorbed on their surfaces and additives incorporated during production represent additional sources of environmental exposure risk (Rochman et al., 2013).

From an analytical perspective, the detection and characterization of microplastics involve a complex process that includes significant challenges at each stage of sampling, separation and identification. In this context, visual sorting combined with vibrational spectroscopy techniques such as FTIR and Raman spectroscopy has been widely adopted (Hidalgo-Ruz et al., 2012; Löder and Gerdts, 2015). However, the limited availability of standardized methods for the analytical determination of nanoplastics still negatively affects data reliability and inter-study comparability (Gigault et al., 2018). Furthermore, long and multi-step sample preparation protocols may depend on operator practice, leading to method-related variability among results reported by different research groups.

Matrix-Based Analytical Challenges

The reliable determination of emerging contaminants in environmental and biological samples is closely associated not only with the sensitivity of analytical instruments but also with the physicochemical properties of the sample matrix being analyzed. Different environmental and biological matrices such as water, soil, sediment and food are prone to analytical interference due to their high organic matter content, dissolved salts, suspended solids, and components such as lipids and proteins, which complicate the detection of target analytes (Niessen, 2006; Krue et al., 2008). This situation may lead both to quantitative errors such as signal suppression or enhancement and to false negative results where trace-level contaminants are overlooked. Therefore, accurate identification of matrix-related challenges and the development of

appropriate sample preparation strategies are critically important for the reliable monitoring of emerging contaminants in analytical chemistry.

Aquatic Media (Drinking Water, Surface Water and Wastewater)

Aquatic environments constitute one of the most important components of the environmental circulation of emerging contaminants. Drinking water, surface water and particularly wastewater are complex matrices in which many pollutant classes such as pharmaceuticals, personal care products, PFAS compounds and industrial chemicals may coexist (Lapworth et al., 2012; Schwarzenbach et al., 2006). Wastewater samples are considered the most problematic aqueous matrix in analytical terms due to their high levels of dissolved organic matter, surfactants and inorganic ions. These components may cause ion suppression in LC-MS/MS and HRMS-based analyses, significantly affecting measurement accuracy (Kruve et al., 2008).

The presence of emerging contaminants at trace levels in aquatic environments usually necessitates a preconcentration step. Although solid phase extraction (SPE) is a commonly used approach for environmental water samples, it is often difficult to simultaneously isolate pollutant classes with different physicochemical properties with high recovery under a single protocol (Petrovic et al., 2006). In addition, humic substances and natural organic matter fractions in the water matrix may be co-extracted with target analytes, complicating chromatographic separation and causing interference in analytical signals. Therefore, systematic evaluation of matrix effects and the use of isotopically labeled internal standards are critical to ensure the reliability and accuracy of quantitative analyses performed in aquatic environments.

Soil and Sediment

Soil and sediment are important accumulation and long-term exposure media for emerging contaminants. These matrices contain multiple interaction parameters such as mineral components, organic matter fractions, clay minerals and microorganisms, which directly influence the binding, transport and transformation processes of pollutants (Cornelissen et al., 2005). In particular, hydrophobic contaminants tend to strongly adsorb onto the organic matter content of soil and sediment, which may lead to reduced analytical recovery.

The main analytical challenges in soil and sediment samples include heterogeneous structure and sampling representativeness. Drying, grinding and extraction steps applied during sample preparation are critical processes that directly affect analyte recovery and measurement uncertainty. Although methods such as accelerated solvent extraction (ASE), ultrasonic extraction and QuEChERS are commonly used, each method exhibits varying efficiency for different contaminant classes (Reemtsma et al., 2013). In addition, high levels of co-extracted matrix components in soil and sediment extracts may cause significant matrix effects, particularly in LC-MS-based analyses. In this context, optimization of clean-up procedures and matrix-based method validation are mandatory to ensure the reliability of obtained results.

Food and Biological Samples

Food and biological samples are among the most critical matrices for assessing human exposure pathways to emerging contaminants. These samples are highly complex matrices from an analytical perspective due to their high lipid, protein and carbohydrate content. In particular, fatty foods and biological tissues pose a risk for the accumulation of lipophilic contaminants and may lead to intensive matrix interference in crude extracts obtained after extraction (Mol et al., 2008).

The analysis of emerging contaminants in food and biological samples generally requires multi-stage sample preparation processes. Although QuEChERS-based methods are commonly preferred due to their practicality and suitability for multi-residue analysis, they may not provide sufficient selectivity for each compound group (Anastassiades et al., 2003). In particular, the extraction efficiencies of compounds such as pharmaceuticals and hormones with high protein-binding affinity may vary significantly depending on matrix composition. Furthermore, the presence of metabolites and transformation products in biological samples makes it difficult for targeted analysis approaches to fully reflect real exposure levels. Therefore, in analytical studies conducted on food and biological samples, it is recommended that method validation processes be performed specifically for each matrix and that non-targeted screening approaches be included in the analytical framework whenever possible.

Modern Analytical Approaches and Instrumental Techniques

LC-MS/MS-Based Targeted Analysis

One of the most widely used approaches for the determination of emerging contaminants in analytical chemistry is the targeted analysis method based on the combined use of liquid chromatography and tandem mass spectrometry (LC-MS/MS) (Petrovic et al., 2006). This technique enables the quantitative determination of predefined analytes with high selectivity and sensitivity (Hernández et al., 2014). In particular, LC-MS/MS methods offer significant advantages over gas chromatography-based approaches in the analysis of polar, non-volatile and thermally unstable compounds (Reemtsma et al., 2013).

The occurrence of emerging contaminants in environmental samples generally at ng/L–µg/L levels necessitates the use of analytical methods with low limits of detection (Lapworth et al.,

2012). Operating triple quadrupole detectors in selected ion monitoring modes contributes to the reduction of matrix interferences and enables reliable quantitative results at low concentrations (Niessen, 2006). However, the main limitation of LC-MS/MS-based targeted analysis is that only predefined compounds can be analyzed, making it impossible to detect unknown or unexpected contaminants that may be present in environmental samples (Hollender et al., 2017)..

High-Resolution Mass Spectrometry (HRMS) and Non-Target Approaches

One of the significant developments in analytical chemistry in recent years is the widespread use of high-resolution mass spectrometry (HRMS)-based approaches in environmental analysis (Krauss et al., 2010). HRMS systems enable the simultaneous screening of numerous compounds present in environmental samples thanks to their high mass accuracy and isotopic pattern information (Schymanski et al., 2014). This capability has facilitated the development of non-target screening and suspect screening approaches that allow the detection of compounds not previously defined, unlike targeted analyses (Hollender et al., 2017).

HRMS-based non-target approaches have considerable potential, particularly for revealing the true diversity of emerging contaminants in environmental media (Hernández et al., 2014). However, the processing of large datasets, reliable identification of compounds and elimination of false positive results involve significant methodological challenges (Schymanski et al., 2014). Therefore, the widespread application of HRMS-based analyses necessitates the development of robust data processing algorithms, library-based verification strategies and standardized confidence level approaches for compound identification (Krauss et al., 2010).

FTIR and Raman-Based Microplastic Analysis

Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) and Raman spectroscopy are among the most widely used methods for the analytical identification of microplastics (Hidalgo-Ruz et al., 2012). These techniques enable the chemical characterization of microplastic particles through characteristic spectral fingerprints based on the molecular vibrations of polymer types (Löder and Gerdts, 2015). In particular, micro-FTIR and micro-Raman systems allow individual analysis of micrometer-scale plastic particles present in environmental samples (Koelmans et al., 2015). In the analytical identification of nanoplastics, the resolution limits of current spectroscopic techniques are insufficient, and the lack of standardized methods in this field represents a significant source of uncertainty regarding data reliability (Gigault et al., 2018).

Current Trends in Sample Preparation and Preconcentration Techniques (SPE and Microextraction Approaches)

The presence of emerging contaminants in environmental and biological matrices mostly at ultra-trace levels prevents direct instrumental analysis from providing sufficient sensitivity, making sample preparation and preconcentration steps a critical component of the analytical process (Mester et al., 2001). Solid phase extraction is one of the most widely used preconcentration techniques due to its ability to efficiently isolate compounds with a wide polarity range from environmental samples (Płotka-Wasyłka et al., 2015)

In recent years, microextraction-based approaches aiming to reduce solvent consumption in accordance with green chemistry principles have gained prominence in analytical chemistry (Płotka-Wasyłka et al., 2015). Techniques such as solid phase microextraction and dispersive liquid–liquid microextraction offer advantages including shorter preparation time, lower solvent usage and portability, allowing adaptation to field-based applications (Mester et al., 2001). However, the lack of standardized sample

preparation protocols developed for different matrices represents an important methodological limitation that restricts the comparability of analytical results obtained across different studies (Trufelli et al., 2011).

International Standards, Guideline Documents and Regulatory Trends

The widespread detection of emerging contaminants in environmental matrices has made the scope and adequacy of existing environmental regulations a subject of debate. The European Union and the United States have taken significant steps toward monitoring and establishing threshold limits for these contaminants, whereas the regulatory framework in Türkiye remains largely limited to classical pollutants (heavy metals, nutrient salts and basic organic compounds).eni ortaya çıkan kirleticilerin çevresel matrislerde yaygın tespiti, mevcut çevre mevzuatlarının kapsam ve yeterliliğini tartışmalı hâle getirmiştir

European Union

In the European Union, the Water Framework Directive (WFD; 2000/60/EC), which forms the basis of water policies, and the related Environmental Quality Standards Directive (2013/39/EU) have designated PFOS (perfluorooctanesulfonic acid) as a “priority hazardous substance” and established environmental quality standards for surface waters (European Commission, 2013). The updated Drinking Water Directive (2020/2184/EU) sets parameter values of 0.10 µg/L for total PFAS (ΣPFAS) and 0.50 µg/L for all individual PFAS in drinking water (European Union, 2020). For food matrices, the European Commission has established tolerable weekly intake (TWI) values for PFOS, PFOA (perfluorooctanoic acid), PFHxS (perfluorohexanesulfonic acid) and PFNA (perfluorononanoic acid) (EFSA, 2020).

Regarding soil and sediments, binding numerical threshold values at the EU level are not yet available. However, the EU Soil Health and Monitoring Regulation Draft foresees the systematic monitoring of emerging contaminants, including PFAS, and mandates risk-based assessments (European Commission, 2023).

United States (United States Environmental Protection Agency Approaches)

United States Environmental Protection Agency declared binding Maximum Contaminant Levels (MCLs) of 4 ng/L for PFOA and PFOS in drinking water in 2024 (U.S. EPA, 2024a). Although there are no federally binding environmental quality standards for PFAS in surface waters, widespread monitoring of PFAS species has been mandated under the Fifth Unregulated Contaminant Monitoring Rule (UCMR-5) (U.S. EPA, 2022).

In terms of soil and biosolids, federal-level limit values in the United States are limited; however, some states, such as Michigan and New York, have established restrictive threshold values for land application practices for PFOS and PFOA (Michigan Department of Environment, Great Lakes, and Energy, 2022). For the air environment, there are no binding PFAS-specific limit values, and regulatory control is mainly conducted through classical pollutants such as PM_{2.5} and PM₁₀ (U.S. EPA, 2024b).

Current Situation in Türkiye

Environmental quality standards in Türkiye are largely determined within the framework of the Surface Water Quality Regulation, the Regulation on the Control of Soil Pollution and Contaminated Sites with Point Sources, and the Regulation on Air Quality Assessment and Management. However, these regulations do not include specific threshold values for emerging contaminants such as PFAS, pharmaceuticals and micro/nanoplastics (Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change (Türkiye), 2021).

This situation indicates a significant gap between analytical monitoring studies and legislation in Türkiye.

Deficiencies in Analytical Method Standards and the Need for Standardization

International and national regulations have gradually expanded the scope of monitoring emerging contaminants; however, they contain significant practical limitations due to deficiencies in the standardization of analytical methods. In particular, revision studies aimed at adding PFAS and pharmaceuticals to the priority substances list under the European Union Water Framework Directive (WFD) clearly demonstrate the need for harmonized analytical method standards to obtain comparable and reliable data across different laboratories (European Commission, 2022).

Similarly, the threshold values proposed and subsequently made binding for PFAS compounds by the United States Environmental Protection Agency require the integration of high-sensitivity analytical methods into routine monitoring programs from an infrastructure perspective. However, detection limits, matrix effects and validation procedures of existing methods may vary significantly among laboratories (U.S. EPA, 2024).

In Türkiye, although the Surface Water Quality Regulation and related environmental legislation define monitoring obligations, they do not include specific analytical measurement protocols or binding limit values for emerging contaminants such as PFAS, pharmaceuticals and micro/nanoplastics (Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change (Türkiye), 2021). This situation limits the comparability of national monitoring data with international datasets and creates scientific uncertainty in policy development processes.

In this context, both the expansion of monitoring coverage required by international regulations and the development of

harmonized analytical methods in national practices emerge as a critical necessity for the reliable detection of environmental contaminants and the strengthening of risk-based management approaches.

Standardization Needs and Future Trends

The process of adopting new regulations in international legislation inevitably necessitates the standardization of analytical methods. Revision drafts of the Water Framework Directive of the European Commission foresee the inclusion of PFAS and pharmaceuticals in the monitoring list and emphasize the need to develop reference methods and strengthen interlaboratory quality assurance mechanisms for monitoring these compounds in environmental media.

Analytical methods such as EPA Method 537.1 and 533 published by the United States Environmental Protection Agency enable measurement at ultra-low concentrations in drinking water; however, globally standardized and universally accepted methods remain limited for different matrices such as surface water, sediment, soil and biota.

From the perspective of Türkiye, there is a significant gap in harmonizing national monitoring programs with EU and US regulations, updating existing water, soil and air quality legislation to cover emerging contaminants, and standardizing analytical methodologies. In the coming period, strengthening accreditation processes, developing reference materials and expanding the use of advanced analytical techniques are considered fundamental trends that will enhance the scientific reliability of environmental monitoring studies.

Conclusion

The findings presented in this section demonstrate that the prevalence and potential risks of emerging contaminants in environmental media are directly associated with methodological advances in analytical chemistry (Geissen et al., 2015). It is emphasized that contaminant classes such as PFAS, pharmaceuticals and personal care products, and microplastics may produce long-term effects on environmental and biological systems even at low concentrations, thereby increasing the need for reliable analytical monitoring approaches (Richardson & Kimura, 2017). In this context, the combined use of targeted analysis, non-target screening and high-resolution mass spectrometry-based approaches significantly expands the scientific scope of environmental monitoring studies (Hollender et al., 2017).

Analytical chemistry plays a critical role not only in the quantitative determination of environmental contaminants but also in providing a scientific foundation for policy-making processes (Hernández et al., 2014). Therefore, the integration of methods developed particularly in academic laboratories into field-based monitoring programs is important not only from a technical perspective but also for institutional capacity development. The fact that international and national regulations are largely based on analytical measurement data places the accuracy and reliability of analytical methods at the center of environmental quality standard determination (Trufelli et al., 2011). In particular, the applicability of threshold values developed in the areas of water, soil and food safety is directly related to the sensitivity of analytical methods and interlaboratory comparability (Schymanski et al., 2014). This situation reveals that analytical chemistry operates within a bidirectional interaction with environmental management policies and that regulatory frameworks should be developed in parallel with scientific capacity (Petrovic et al., 2006).

The global spread of emerging contaminants makes it difficult to conduct effective analytical studies in this field without international cooperation (Lapworth et al., 2012). In particular, sharing non-target screening databases, developing reference spectral libraries and harmonizing methodological protocols necessitate international scientific collaboration (Krauss et al., 2010). Joint evaluation of monitoring programs conducted in the European Union, the United States and other regions within a common analytical framework enables the production of globally comparable data and contributes to a more holistic assessment of environmental risks (Hollender et al., 2017).

In conclusion, international approaches to the analytical determination of emerging contaminants represent not only a field of technical advancement but also provide a scientific infrastructure that is decisive in shaping environmental policies. In the future, the role of analytical chemistry as a bridge between policymakers, environmental authorities and academic research networks is considered a critical requirement for preventing environmental risks and achieving sustainable environmental management goals (Richardson & Kimura, 2017).

References

Ahrens, L., Gerwinski, W., Theobald, N., & Ebinghaus, R. (2010). Sources of polyfluoroalkyl compounds in the North Sea, Baltic Sea and Norwegian Sea: Evidence from their spatial distribution in surface water. *Marine Pollution Bulletin*, 60(2), 255–260.

Anastassiades, M., Lehotay, S. J., Štajnbaher, D., & Schenck, F. J. (2003). Fast and easy multiresidue method employing acetonitrile extraction/partitioning and “dispersive solid-phase extraction” for the determination of pesticide residues in produce. *Journal of AOAC International*, 86(2), 412–431.

European Commission. (2020, October 14). Chemicals strategy for sustainability towards a toxic-free environment. Retrieved February 3, 2026, from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0667>

European Commission. (2013). Directive 2013/39/EU amending Directives 2000/60/EC and 2008/105/EC. Retrieved February 2, 2026, from <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2013/oj>

European Commission. (2022). Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directives 2000/60/EC and 2008/105/EC as regards priority substances in the field of water policy. Retrieved February 2, 2026, from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52011PC0876>

European Union. (2020). Directive (EU) 2020/2184 on the quality of water intended for human consumption. Retrieved February 2, 2026, from <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj/eng>

Buck, R. C., Franklin, J., Berger, U., Conder, J. M., Cousins, I. T., De Voogt, P., et al. (2011). Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment: terminology, classification, and

origins. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 7(4), 513–541.

Celiz, M. D., Tso, J., & Aga, D. S. (2009). Pharmaceutical metabolites in the environment: analytical challenges and ecological risks. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 28(12), 2473–2484.

Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. S. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: a review. *Marine Pollution Bulletin*, 62(12), 2588–2597.

Cornelissen, G., Gustafsson, Ö., Bucheli, T. D., Jonker, M. T., Koelmans, A. A., & van Noort, P. C. (2005). Extensive sorption of organic compounds to black carbon, coal, and kerogen in sediments and soils: mechanisms and consequences for distribution, bioaccumulation, and biodegradation. *Environmental Science & Technology*, 39(18), 6881–6895.

Daughton, C. G., & Ternes, T. A. (1999). Pharmaceuticals and personal care products in the environment: agents of subtle change? *Environmental Health Perspectives*, 107(Suppl 6), 907–938.

EFSA CONTAM Panel (2020). Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food. *EFSA Journal*, 18(9), e06223.

Geissen, V., Mol, H., Klumpp, E., Umlauf, G., Nadal, M., Van Der Ploeg, M., et al. (2015). Emerging pollutants in the environment: a challenge for water resource management. *International Soil and Water Conservation Research*, 3(1), 57–65.

Giesy, J. P., & Kannan, K. (2001). Global distribution of perfluorooctane sulfonate in wildlife. *Environmental Science & Technology*, 35(7), 1339–1342.

Gigault, J., Ter Halle, A., Baudrimont, M., Pascal, P. Y., Gauffre, F., Phi, T. L., et al. (2018). Current opinion: What is a nanoplastic? *Environmental Pollution*, 235, 1030–1034.

Hernandez, F., Ibáñez, M., Bade, R., Bijlsma, L., & Sancho, J. V. (2014). Investigation of pharmaceuticals and illicit drugs in waters by liquid chromatography-high-resolution mass spectrometry. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 63, 140–157.

Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R. C., & Thiel, M. (2012). Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification. *Environmental Science & Technology*, 46(6), 3060–3075.

Hollender, J., Schymanski, E. L., Singer, H. P., & Ferguson, P. L. (2017). Nontarget screening with high resolution mass spectrometry in the environment: ready to go?

Koelmans, A. A., Besseling, E., & Shim, W. J. (2015). Nanoplastics in the aquatic environment. Critical review. *Marine Anthropogenic Litter*, 325–340.

Krauss, M., Singer, H., & Hollender, J. (2010). LC–high resolution MS in environmental analysis: from target screening to the identification of unknowns. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 397(3), 943–951.

Kruve, A., Künnapas, A., Herodes, K., & Leito, I. (2008). Matrix effects in pesticide multi-residue analysis by liquid chromatography–mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1187(1–2), 58–66.

Lapworth, D. J., Baran, N., Stuart, M. E., & Ward, R. S. (2012). Emerging organic contaminants in groundwater: a review of sources, fate and occurrence. *Environmental Pollution*, 163, 287–303.

Löder, M. G., & Gerdts, M. (2015). Methodology used for the detection and identification of microplastics—a critical appraisal. *Marine Anthropogenic Litter*, 201–227.

Mester, Z., Sturgeon, R., & Pawliszyn, J. (2001). Solid phase microextraction as a tool for trace element speciation. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 56(3), 233–260.

Michigan Department of Environment, Great Lakes, and Energy (EGLE). (2022). PFAS in biosolids guidance. Retrieved February 2, 2026, from <https://www.michigan.gov/egle>

Mol, H. G., Plaza-Bolaños, P., Zomer, P., de Rijk, T. C., Stolker, A. A., & Mulder, P. P. (2008). Toward a generic extraction method for simultaneous determination of pesticides, mycotoxins, plant toxins, and veterinary drugs in feed and food matrices. *Analytical Chemistry*, 80(24), 9450–9459.

Niessen, W. M. (2006). *Liquid chromatography–mass spectrometry*. CRC Press.

Petrovic, M., Gros, M., & Barcelo, D. (2006). Multi-residue analysis of pharmaceuticals in wastewater by ultra-performance liquid chromatography–quadrupole–time-of-flight mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1124(1–2), 68–81.

Plotka-Wasyłka, J., Szczepańska, N., de la Guardia, M., & Namieśnik, J. (2015). Miniaturized solid-phase extraction techniques. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 73, 19–38.

Rahman, M. F., Peldszus, S., & Anderson, W. B. (2014). Behaviour and fate of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in drinking water treatment: A review. *Water Research*, 50, 318–340.

Reemtsma, T., Alder, L., & Banasiak, U. (2013). A multimethod for the determination of 150 pesticide metabolites in surface water and groundwater using direct injection liquid

chromatography–mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1271(1–2), 95–104.

Richardson, S. D., & Kimura, S. Y. (2017). Emerging environmental contaminants: Challenges facing our next generation and potential engineering solutions. *Environmental Technology & Innovation*, 8, 40–56.

Rochman, C. M., Hoh, E., Hentschel, B. T., & Kaye, E. (2013). Long-term field measurement of sorption of organic contaminants to five types of plastic pellets: implications for plastic marine debris. *Environmental Science & Technology*, 47(3), 1646–1654.

Schwarzenbach, R. P., Escher, B. I., Fenner, K., Hofstetter, T. B., Johnson, C. A., von Gunten, U., & Wehrli, U. (2006). The challenge of micropollutants in aquatic systems. *Science*, 313(5790), 1072–1077.

Schymanski, E. L., Jeon, J., Gulde, R., Fenner, K., Ruff, M., Singer, H. P., & Hollender, J. (2014). Identifying small molecules via high resolution mass spectrometry: communicating confidence.

Subasini, S., Christy, E. J. S., Amalraj, A., & Pius, A. (2022). Applications of HRMS in Environmental Impact Assessment. In *High-Resolution Mass Spectrometry and Its Diverse Applications* (pp. 161–180). Apple Academic Press.

Turkish Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change. (2021). Surface water quality regulation. Retrieved February 2, 2026, from <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=16806&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>

Trufelli, H., Palma, P., Famiglini, G., & Cappiello, A. (2011). An overview of matrix effects in liquid chromatography–mass spectrometry. *Mass Spectrometry Reviews*, 30(3), 491–509.

United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA). (2021, October 18). PFAS Strategic Roadmap: EPA's commitments to action 2021–2024. Retrieved February 2, 2026, from <https://www.epa.gov/pfas/pfas-strategic-roadmap-epas-commitments-action-2021-2024>

U.S. Environmental Protection Agency. (2022). Fifth Unregulated Contaminant Monitoring Rule (UCMR 5). Retrieved February 2, 2026, from <https://www.epa.gov/dwucmr/fifth-unregulated-contaminant-monitoring-rule>

U.S. Environmental Protection Agency. (2024a). Final PFAS National Primary Drinking Water Regulation. Retrieved February 2, 2026, from <https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-04/drinking-water-utilities-and-professionals-technical-overview-of-pfas-npdwr.pdf>

U.S. Environmental Protection Agency. (2024b). National Ambient Air Quality Standards (NAAQS). Retrieved February 2, 2026, from <https://www.epa.gov/naaqs>

U.S. Environmental Protection Agency. (2024). Final National Primary Drinking Water Regulation for six PFAS. Retrieved February 2, 2026, from <https://www.epa.gov/sdwa/and-polyfluoroalkyl-substances-pfas>

CHAPTER 3

POLİMERİK YAPIŞTIRICILAR VE KOMPOZİT MATERYALLER

1. (ŞAHİN ÖZEL) ¹

Giriş

Sanayi devriminden günümüze kadar geçen süreçte malzeme teknolojilerinde yaşanan gelişmeler, birleştirme yöntemlerinin de önemli ölçüde değişim geçirmesine neden olmuştur. Geleneksel birleştirme teknikleri arasında yer alan kaynak, perçinleme ve mekanik bağlantı elemanları uzun yıllar boyunca metal ve alaşımların birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılmıştır. Ancak bu yöntemler; yüksek sıcaklık gereksinimi, artık gerilme oluşumu, ağırlık artışı ve ince kesitli malzemelerde deformasyon gibi çeşitli dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Bu sınırlılıklar özellikle hafiflik, yüksek mukavemet ve çoklu malzeme kombinasyonlarının ön plana çıktığı modern mühendislik uygulamalarında alternatif teknolojilere olan ihtiyacı artırmıştır. Bu bağlamda polimerik yapıştırıcı teknolojileri, son yıllarda hızla gelişerek birçok endüstriyel uygulamada geleneksel birleştirme yöntemlerinin yerini almaya başlamıştır (Ebnesajjad & Landrock, 2014; Lee, 1981). Yapıştırıcılar; farklı malzeme türlerini bir araya getirebilme

¹ Araş. Gör. Dr., Bursa Uludağ Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Orcid: 0000-0002-3886-4432

kabiliyeti, yükü geniş bir yüzey alanına dağıtması, titreşim sönümleme özellikleri ve estetik avantajları sayesinde özellikle otomotiv, havacılık, savunma ve elektronik sektörlerinde kritik bir rol üstlenmektedir. Ayrıca yapıştırma işlemi sırasında delik açma gibi ilave işlemlere ihtiyaç duyulmaması, malzeme bütünlüğünün korunmasına katkı sağlamaktadır. Kompozit malzemelerin mühendislik uygulamalarında yaygınlaşması, yapıştırıcı teknolojilerinin önemini daha da artırmıştır. Fiber takviyeli polimerler, partikül katkılı sistemler ve nano kompozit yapılar; yüksek özgül mukavemet ve korozyon direnci gibi üstün özellikler sunarken, bu malzemelerin güvenilir şekilde birleştirilmesi için uygun yapıştırıcı sistemlerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır (Silva, Öchsner, & Adams, 2011).

Yapıştırıcılar; farklı malzeme türlerini bir araya getirebilme kabiliyeti, yükü geniş bir yüzey alanına dağıtması, titreşim sönümleme özellikleri ve estetik avantajları sayesinde özellikle otomotiv, havacılık, savunma ve elektronik sektörlerinde kritik bir rol üstlenmektedir (Edward M Petrie, 2000). Ayrıca yapıştırma işlemi sırasında delik açma gibi ilave işlemlere ihtiyaç duyulmaması, malzeme bütünlüğünün korunmasına katkı sağlamaktadır. Kompozit malzemelerin mühendislik uygulamalarında yaygınlaşması, yapıştırıcı teknolojilerinin önemini daha da artırmıştır. Fiber takviyeli polimerler, partikül katkılı sistemler ve nano kompozit yapılar; yüksek özgül mukavemet ve korozyon direnci gibi üstün özellikler sunarken, bu malzemelerin güvenilir şekilde birleştirilmesi için uygun yapıştırıcı sistemlerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır (E M Petrie, 1996). Özellikle metal-metal, metal-kompozit ve kompozit-kompozit bağlantılarda yapıştırıcılar vazgeçilmez bir çözüm haline gelmiştir. Polimerik yapıştırıcıların performansı yalnızca kimyasal yapıya değil; aynı zamanda ara yüzey etkileşimlerine, yüzey hazırlama yöntemlerine, kürlenme koşullarına ve çevresel faktörlere de bağlıdır. Bu nedenle yapıştırıcı teknolojileri; polimer kimyası, yüzey bilimi, mekanik mühendisliği

ve malzeme biliminin kesişiminde yer alan disiplinler arası bir araştırma alanı olarak değerlendirilmektedir(Kellar, 2011).

Bu kitap bölümünde, polimerik yapıştırıcı teknolojilerinin temel prensiplerinden başlayarak kompozit materyallerle olan etkileşimleri, katkı maddelerinin rolü, karakterizasyon teknikleri ve endüstriyel uygulamaları kapsamlı biçimde ele alınacaktır. Böylece hem akademik araştırmalar hem de mühendislik uygulamaları için bütüncül bir bakış açısı sunulması amaçlanmaktadır.



1. Yapıştırma Teknolojilerinin Tarihsel Gelişimi

Yapıştırma teknolojilerinin kökeni insanlık tarihinin en erken dönemlerine kadar uzanmaktadır(Lubin, 2013). İlk yapıştırıcı uygulamaları; doğal reçineler, bitkisel özler, hayvansal tutkal ve balmumu gibi biyolojik kökenli malzemelerle gerçekleştirilmiştir (Athavale, 2018). Antik Mısır’da ahşap mobilya üretiminde hayvansal tutkal kullanıldığı, Mezopotamya’da zift ve doğal asfaltın su yalıtımı amacıyla uygulandığı bilinmektedir. Bu erken dönem uygulamaları, yapıştırmanın temel prensiplerinin sezgisel olarak keşfedildiğini göstermektedir (Lubin, 2013). Sanayi devrimi ile kimya biliminin gelişmesi, sentetik polimerlerin üretimini mümkün kılmış ve yapıştırıcı teknolojilerinde önemli bir sıçrama yaşanmıştır. 20. yüzyılın ortalarında fenolik reçineler, epoksiler ve poliüretan sistemlerin geliştirilmesi; yüksek mukavemetli, çevresel dayanımı yüksek yapıştırıcıların ortaya çıkmasını sağlamıştır.

Özellikle II. Dünya Savaşı sırasında havacılık sektöründe hafif ve dayanıklı bağlantı ihtiyacı, yapıştırıcı AR-GE çalışmalarını hızlandırmıştır. Günümüzde ise nano katkılı, akıllı, kendini onaran ve çevre dostu yapıştırıcı sistemler üzerine yoğunlaşmaktadır. Modern yapıştırıcı teknolojileri; polimer kimyası, yüzey bilimi ve nanoteknolojinin kesişiminde gelişimini sürdürmektedir (Rudawska, 2017). Çeşitli yapıştırıcı ve sızdırmazlık malzemelerinin ilk ne zaman geliştirildiği veya belirli bir uygulamada ilk kez ne zaman kullanıldığı konusunda literatürde sınırlı bir görüş birliği bulunmaktadır. Bunun başlıca nedeni, dünyanın birçok bölgesinde eş zamanlı gelişmelerin yaşanması ve literatürde yer alan kaynakların büyük ölçüde yalnızca daha gelişmiş ülkelerden gelmesidir. Tablo 1, Delmonte’nin çalışmasının yayımlandığı tarihe kadar yapıştırıcı teknolojilerinin gelişim sürecine ilişkin kronolojik bir bakış açısı sunmaktadır. (Delmonte, 1947). Gelişmeler ister patent yoluyla ister teknik literatürde atıf yoluyla olsun, ilk kez kamuya açıklanmalarına göre tablolastırılmıştır.

Tablo 1. Yapıştırıcı gelişimine yönelik tarihsel perspektifi

Yıl	Malzeme / Gelişme
1814	Hayvan kemiklerinden elde edilen tutkal (patent)
1872	Balık tutkallarının yerli üretimi
1874	ABD’de ilk balık tutkalı patenti
1875	İnce ahşap kaplamaların laminasyonu ticari önem kazandı
1909	Manyok unundan bitkisel yapıştırıcılar (F. G. Perkins)
1912	Kontrplak için fenolik reçine kullanımı (Baekeland–ThurLOW)
1915	Ahşap yapıştırıcılarında kan albümini kullanımı (Haskelite Co.)
1917	Uçak yapımında kazein tutkalları
1920–1930	Selüloz ester ve alkid reçine esaslı yapıştırıcılarda gelişmeler
1927	Yapıştırıcılarda siklize (halkalı) kauçuk kullanımı (Fischer–Goodrich Co.)
1928	Kloropren esaslı yapıştırıcılar (McDonald – B.B. Chemical Co.)
1928–1930	Soya fasulyesi esaslı yapıştırıcılar (I. F. Laucks Co.)
1930	Üre–formaldehit reçine yapıştırıcılar
1930–1935	Özel basınca duyarlı bantlar: kauçuk esaslı (Drew – Minnesota Mining & Manufacturing Co.)
1935	Fenolik reçine yapıştırıcı filmler (Resinous Products & Chemical Co.)
1939	Poli(vinil asetat) yapıştırıcılar (Carbide & Carbon Chemicals Co.)
1940	Klorlanmış kauçuk yapıştırıcılar
1941	Melamin–formaldehit reçine yapıştırıcılar (American Cyanamid Corp.) ve Redux (de Bruyne – Aero Research Ltd.)
1942	Cycleweld metal yapıştırıcıları (Saunders–Chrysler Co.)
1943	Rezorsinol–formaldehit yapıştırıcılar (Penn. Coal Products Co.)
1944	Metal bağlayıcı yapıştırıcılar (Havens, Consolidated Vultee Aircraft Corp.)

1945	Furan reçine yapıştırıcılar (Delmonte, Plastics Institute) ve Pliobond (Goodyear Tire & Rubber Co.)
------	---

(Ebnesajjad & Landrock, 2014)

2. Geleneksel Birleştirme Yöntemlerinin Sınırlılıkları ve Polimerik Yapıştırıcıların Avantajları

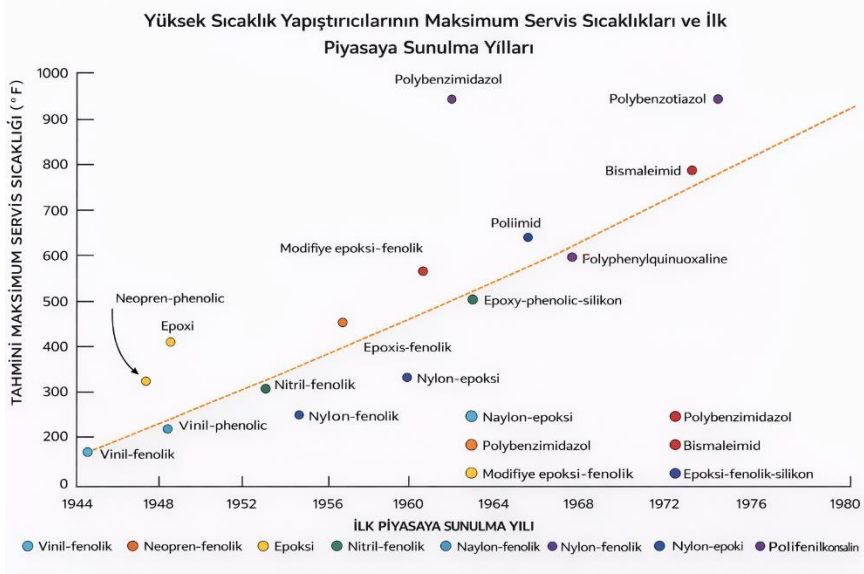
Geleneksel birleştirme yöntemleri arasında kaynak, lehimleme, perçinleme, cıvatalama ve mekanik kitleme teknikleri yer almaktadır. Bu yöntemler özellikle metalik malzemelerin birleştirilmesinde uzun yıllar boyunca güvenilir çözümler sunmuştur. Ancak bu tekniklerin çeşitli yapısal ve operasyonel sınırlılıkları bulunmaktadır. Kaynak işlemleri yüksek sıcaklık gerektirdiğinden, ısıdan etkilenen bölgelerde mikroyapısal değişimler ve artık gerilmeler oluşabilmektedir. Bu durum malzemenin yorulma ömrünü olumsuz etkileyebilir.

Mekanik bağlantı elemanları ise delik açma gereksinimi nedeniyle kesit zayıflamasına yol açmakta ve ilave ağırlık oluşturmaktadır. Ayrıca farklı malzeme türlerinin (metal-polimer, metal-kompozit vb.) birleştirilmesinde geleneksel yöntemler çoğu zaman yetersiz kalmaktadır. Polimerik yapıştırıcılar ise yükü geniş bir yüzeye dağıtarak gerilme yığılmalarını azaltmakta, titreşim sönümleme sağlamaktadır. Ayrıca ince kesitli ve hafif yapıların birleştirilmesine olanak tanıyarak modern mühendislik tasarımlarına önemli avantajlar sunmaktadır (Ebnesajjad & Ebnesajjad, 2013).

Şekil 1, yapıştırıcıların yaklaşık maksimum servis sıcaklıklarını ve yaklaşık piyasaya sunulma yıllarını göstermektedir. En yüksek sıcaklığa dayanıklı yapıştırıcıların maksimum servis sıcaklıkları, bu sıcaklıklarda uzun süreli kullanıma uygun olduklarını göstermemekte; ancak belirli uygulamalar için bu tür sistemlerin mevcut olduğunu ortaya koymaktadır. Bu yapıştırıcılar, genellikle tok (tough) yapıdan ziyade gevrek (brittle) karakterdedir ve düşük sıcaklık sistemlerine kıyasla uygulanmaları çoğunlukla daha zordur.

Daha yeni geliştirilen diğer yapıştırıcılar ise genellikle seri üretim sistemlerinden ziyade deneysel sistemler olarak değerlendirilmektedir.

Şekil 1. Isıya dayanıklı yapıştırıcıların gelişim sıralaması.



(First, 2003)

3. Polimerik Yapıştırıcıların Endüstrideki Önemi

Polimerik yapıştırıcılar günümüzde birçok endüstriyel sektörde kritik bir birleştirme teknolojisi haline gelmiştir. Otomotiv sektöründe araç ağırlığını azaltmak ve yakıt verimliliğini artırmak amacıyla kaynak yerine yapıştırıcı kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Kaporta panelleri, yapısal takviyeler ve kompozit parçalar çoğunlukla epoksi veya poliüretan esaslı yapıştırıcılarla birleştirilmektedir. Havacılık ve savunma sanayinde ise yüksek özgül mukavemet ve yorulma dayanımı gereksinimleri, yapıştırıcı kullanımını zorunlu kılmaktadır. Fiber takviyeli kompozit gövde panelleri, bal peteği sandviç yapılar ve radar ekipmanları yapıştırıcı teknolojileri ile monte edilmektedir.

Elektronik endüstrisinde mikro montaj uygulamalarında iletken yapıştırıcılar, ısıya dayanıklı epoksiler ve silikon bazlı sistemler kullanılmaktadır. Ayrıca inşaat, denizcilik, rüzgâr türbini ve biyomedikal alanlarda da yapıştırıcıların kullanım alanı hızla genişlemektedir (Adams, 2021). Bu yaygın kullanım, yapıştırıcıların yalnızca yardımcı bir malzeme olmanın ötesine geçerek mühendislik tasarımının temel bileşenlerinden biri haline geldiğini Şekil 2’de ortaya koymaktadır.

Şekil 2. Yapıştırıcıların Mühendislik Tasarımındaki Stratejik Rolü



(Adams, 2021; Adams, Comyn, & Wake, 1997; Kinloch, 1980)

Havacılık ve uzay endüstrisinde, yüksek mukavemet/ağırlık oranı sağlayan yapısal yapıştırıcılar; bal peteği (honeycomb) paneller, kompozit gövde elemanları ve sandviç yapılar gibi kritik bileşenlerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektronik sektöründe ise mikro ölçekte bileşen montajı, titreşim sönümleme ve elektriksel yalıtım özellikleri nedeniyle yapıştırıcılar tercih edilmektedir. Bunun yanı sıra, inşaat, denizcilik, savunma ve yenilenebilir enerji sektörlerinde de polimerik yapıştırıcılar;

sızdırmazlık, darbe dayanımı, korozyon direnci ve yorulma performansı gibi avantajları sayesinde önemli bir rol oynamaktadır. Tüm bu özellikler, polimerik yapıştırıcıların yalnızca bir birleştirme malzemesi değil, aynı zamanda yapısal performansı artıran mühendislik bileşenleri olarak değerlendirilmesini sağlamaktadır (Kinloch, 1980).

4. Kompozit Malzemeler ile Entegrasyonun Gerekliliği

Kompozit malzemeler; iki veya daha fazla farklı fazın makro ölçekte bir araya getirilmesiyle elde edilen, üstün mekanik ve fiziksel özellikler sergileyen mühendislik malzemeleridir. Fiber takviyeli polimerler, partikül katkılı sistemler ve nano kompozitler; hafiflik, korozyon direnci ve yüksek özgül dayanım gibi avantajlar sunmaktadır. Bu malzemelerin endüstride yaygınlaşması, güvenilir birleştirme teknolojilerine olan ihtiyacı artırmıştır. Kompozitlerin delinmesi veya kaynaklanması çoğu zaman mümkün olmadığından, yapıştırıcılar en uygun bağlantı çözümü olarak öne çıkmaktadır.

Özellikle metal-kompozit hibrit yapılar, otomotiv ve havacılık sektörlerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Kompozit yapılarda ara yüzey bağlanması, bağlantı performansını belirleyen en kritik parametrelerden biridir. Bu nedenle yapıştırıcı formülasyonlarının; kompozit matris ile kimyasal uyumlu, fiber yüzeyleri ile etkileşime girebilir ve yük transferini optimize edebilir özellikte tasarlanması gerekmektedir.

Son yıllarda nanopartikül katkılı yapıştırıcılar, fonksiyonel yüzey modifikasyonları ve hibrit bağlanma teknikleri; kompozit entegrasyonunda performansı artıran yenilikçi yaklaşımlar olarak öne çıkmaktadır. Bu gelişmelerin uygulama alanları ve etki mekanizmaları Şekil 3'te şematik olarak sunulmuştur.(Balasubramanian, 2014).

Şekil 3. Kompozit Entegrasyonunda Yenilikçi Yapıştırma Yaklaşımları



(Machado, Marques, & da Silva, 2018; Edward M Petrie, 2000)

5- Yapıştırma Olgusunun Bilimsel Temelleri

Yapıştırma olgusu, birçok bilimsel ve teknolojik alanla ilişkili olup son yıllarda önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Yapışmanın en temel uygulaması, yapıştırıcılar aracılığıyla gerçekleştirilen birleştirme işlemidir. Bu teknik; cıvatalama ve perçinleme gibi geleneksel mekanik birleştirme yöntemlerinin yerini kısmen almıştır. Yapıştırıcı ile birleştirmenin rekabetçi kabul edilmesinin başlıca nedenleri; ağırlık tasarrufu sağlaması, gerilmenin daha homojen dağılmasına imkân vermesi ve yapıştırma hattının neredeyse görünmez olması sayesinde estetik avantaj sunmasıdır. Bu nedenle havacılık-uzay, otomotiv ve elektronik gibi ileri teknoloji sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca diş hekimliği ve cerrahi gibi alanlarda da uygulama bulmuştur (Lubin, 2013).

Bununla birlikte yapışma yalnızca yapıştırıcı bağlantılarla sınırlı değildir. Kaplamalar, boyalar ve vernikler; çok katmanlı sandviç yapılar, polimer karışımları, dolgu maddeli polimerler ve

kompozit malzemeler gibi, katı yüzeylerin temas ettiği tüm sistemlerde yapışma rol oynamaktadır.

Bu çok bileşenli malzemelerin performansı büyük ölçüde ara yüzey kalitesine bağlı olduğundan, yapışma mekanizmasının iyi anlaşılması pratik uygulamalar açısından kritik öneme sahiptir. Polimerik yapıştırıcıların performansını belirleyen en kritik unsurların başında adhezyon (adhesion) ve kohezyon (cohesion) mekanizmaları gelmektedir. Adhezyon, yapıştırıcı ile yapıştırılan (aderent) yüzey arasında oluşan etkileşimleri ifade ederken; kohezyon, yapıştırıcının kendi iç mukavemetini tanımlamaktadır. Başarılı bir yapıştırma bağlantısında hem yüksek adhezyon hem de yeterli kohezyon dayanımı gereklidir. Aksi takdirde bağlantı, ara yüzeyden ayrılma (adhesive failure) veya yapıştırıcı içinde kırılma (cohesive failure) şeklinde hasara uğrayabilir. Yapışma mekanizmasını açıklamak amacıyla literatürde çeşitli teoriler geliştirilmiştir.

Sonuç olarak polimerik yapıştırıcıların performansı; kimyasal yapı, yüzey özellikleri, uygulama parametreleri ve servis koşullarının birlikte değerlendirilmesini gerektiren çok parametrelili bir sistemdir. Bu temel prensiplerin anlaşılması, yüksek performanslı yapıştırıcı ve kompozit bağlantı tasarımının temelini oluşturmaktadır (Scarponi & Pizzinelli, 2009).

1. Adhezyon ve Kohezyon Mekanizmaları ve Yapışma (Adhesion) Olgusu

Yapışma olgusu, birçok bilimsel ve teknolojik alanla ilişkili olup son yıllarda önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Yapışmanın en temel uygulaması, yapıştırıcılar aracılığıyla gerçekleştirilen birleştirme işlemidir. Bu teknik; cıvatalama ve perçinleme gibi geleneksel mekanik birleştirme yöntemlerinin yerini kısmen almıştır. Yapıştırıcı ile birleştirmenin rekabetçi kabul edilmesinin başlıca nedenleri; ağırlık tasarrufu sağlaması, gerilmenin daha homojen dağılmasına imkân vermesi ve yapıştırma

hattının neredeyse görünmez olması sayesinde estetik avantaj sunmasıdır.

Bu nedenle havacılık-uzay, otomotiv ve elektronik gibi ileri teknoloji sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca diş hekimliği ve cerrahi gibi alanlarda da uygulama bulmuştur. Yapışma, yapıştırıcı ile yapıştırılan yüzey arasında oluşan fiziksel ve/veya kimyasal etkileşimleri ifade ederken; kohezyon, yapıştırıcının kendi iç mukavemetini tanımlar. Güçlü bir yapıştırma bağlantısı, yüksek adhezyon ve yeterli kohezyon dayanımının birlikte sağlanmasıyla mümkündür. Yapışma, bilimsel çevrelerde yaklaşık son 60 yılda bağımsız bir araştırma alanı olarak gelişmiştir. Ancak günümüzde dahi ampirik bilgi ve teknolojik uygulamalar, kuramsal açıklamaların bir miktar önündedir.

Yapışma kavramı; moleküler, mikroskobik ve makroskobik ölçekte farklı şekillerde ele alınabildiği gibi, ara yüzey oluşumu veya kırılma davranışı açısından da farklı anlamlar taşıyabilmektedir. Bu nedenle hem ara yüzey bağlantısının oluşumu hem de birleştirilmiş yapının kopması için gereken mekanik yükü ifade etmektedir (Belnoue & Hallett, 2016). Yapışma mekanizmalarının incelenmesindeki temel zorluklardan biri, konunun makromolekül bilimi, yüzey ve ara yüzey fiziği-kimyası, malzeme bilimi, kırılma mekaniği ve reoloji gibi birçok disiplinin kesişiminde yer almasıdır. Bu çok disiplinli yapı nedeniyle farklı teorik modeller geliştirilmiştir. Başlıca yapışma teorileri şunlardır:

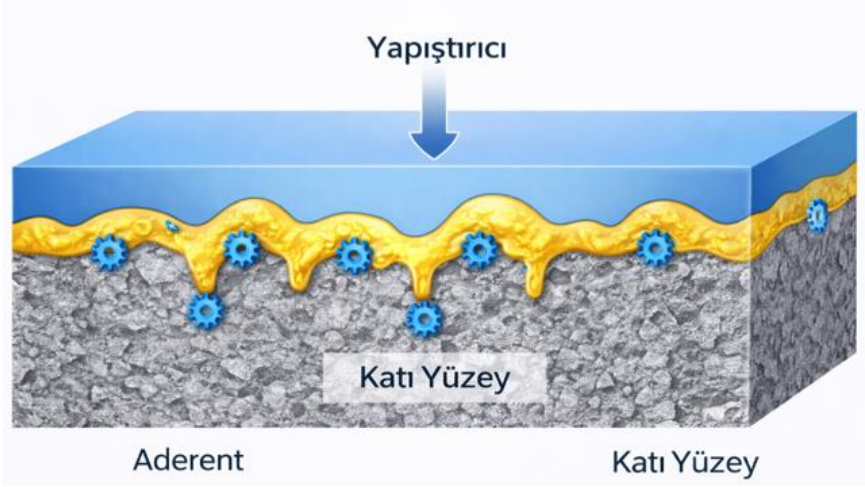
1. Mekanik kilitlenme teorisi
2. Elektronik teori
3. Sınır tabakası veya ara faz teorisi
4. Adsorpsiyon (termodinamik) teorisi
5. Difüzyon teorisi
6. Kimyasal bağlanma teorisi

- **Mekanik Kilitlenme Teorisi**

Bu teoriye göre yapıştırıcı, yüzeydeki mikroskobik boşluk ve pürüzlere nüfuz ederek fiziksel bir kenetlenme oluşturur. Yüzey pürüzlülüğünün artırılması, mekanik kilitlenme etkisini güçlendirir. 1925 yılında MacBain ve Hopkins tarafından önerilen mekanik kilitlenme modeli, yapışma dayanımının temel belirleyicisinin, yapıştırıcının katı yüzeydeki boşluklara, gözeneklere ve yüzey pürüzlerine mekanik olarak tutunması (anahtarlanması) olduğunu ileri sürmektedir.

Bu modele göre yapıştırıcı, yüzey düzensizliklerine nüfuz ederek fiziksel bir kilitlenme oluşturur ve bu durum bağlantı mukavemetini artırır (McBain & Hopkins, 2002). Mekanik bağlantının katkısını gösteren en tutarlı örneklerden biri, Borroff ve Wake'in kauçuk ile tekstil kumaşları arasındaki yapışmayı inceledikleri çalışmadır. Araştırmacılar, kumaştaki çıkıntılı lif uçlarının kauçuk içerisine nüfuz etmesinin, yapışma dayanımını belirleyen en önemli parametre olduğunu açıkça ortaya koymuşlardır. Bununla birlikte, tamamen düzgün (pürüzsüz) yüzeyler arasında da güçlü yapışmanın sağlanabilmesi, mekanik kilitlenme teorisinin evrensel bir açıklama olarak kabul edilemeyeceğini göstermektedir (Jenkins, 2013).

Şekil 4. Mekanik kilitlenme ve yapıştırıcı etkileşimi



(Buchwalter, 1990)

- **Elektronik teori**

Yapışmanın elektronik teorisi, 1948 yılında Deryaguin ve çalışma arkadaşları tarafından ortaya konmuştur. Bu teoriye göre, farklı elektronik bant yapılarına sahip yapıştırıcı ve yapıştırılan (altlık) yüzey arasında Fermi seviyelerini dengelemek amacıyla bir elektron transferi gerçekleşebilmektedir. Bu elektron alışverişi sonucunda ara yüzeyde bir **çift elektriksel tabaka** oluştuğu öne sürülmektedir. Deryaguin ve arkadaşları, bu çift tabakadan kaynaklanan elektrostatik çekim kuvvetlerinin yapışma dayanımına önemli ölçüde katkı sağlayabileceğini belirtmişlerdir (Vasenin, 1969).

Bu yaklaşıma göre yapıştırıcı-altlık ara yüzeyi bir **kondansatör (kapasitör)** gibi analiz edilebilir. Ara yüzeyde ayrılma (kopma) meydana geldiğinde, kondansatörün iki levhasının birbirinden uzaklaşmasına benzer şekilde potansiyel farkı artar ve belirli bir noktada elektriksel boşalma gerçekleşir. Dolayısıyla yapışma dayanımının, elektriksel çift tabaka boyunca etkili olan elektrostatik çekim kuvvetlerinden kaynaklandığı kabul

edilmektedir. Elektriksel çift tabaka oluşumu ve ara yüzeydeki yük dağılımı şematik olarak **Şekil 5'te** gösterilmektedir.

Şekil 5. Elektriksel çift tabaka diyagramı



(Bao et al., 1999)

- **Sınır tabakası ve ara faz teorisi**

Günümüzde, yapıştırıcı ve/veya yapıştırılan materyalde meydana gelen değişim ve modifikasyonların ara yüzey yakınında farklı özellikler gösteren bir ara yüzey bölgesi (interfacial zone) oluşumuna yol açtığı iyi bilinmektedir. Bu bölge, yığın (bulk) malzemelerden farklı özelliklere sahip olabilmektedir. Bikerman, zayıf sınır tabakasının (Weak Boundary Layer – WBL) kohezyon dayanımının, yapışma seviyesini belirleyen temel faktör olduğunu ileri sürmüştür.

Bu varsayıma göre yapışma enerjisi (G), her zaman ara yüzeydeki daha zayıf tabakanın kohezyon enerjisine G_c (WBL) eşittir. Teori, olasılık temelli bir yaklaşıma dayanmaktadır. Buna göre kırılmanın yalnızca yapıştırıcı–yapıştırılan ara yüzeyi boyunca ilerlemesi istatistiksel olarak beklenen bir durum değildir; bunun

yerine ara yüzeye yakın daha zayıf malzeme içerisinde kohezyonel kırılma meydana gelmesi daha olasıdır.

Bunlar arasında ara yüzeyde bulunan safsızlıklar, düşük molekül ağırlıklı (kısa zincirli) polimerler veya zayıf bağlı tabakalar sonucu oluşan sınır tabakaları yer almaktadır (Bikerman, 2013). Ara yüzeyde oluşan zayıf sınır tabakasının yapısı ve bağ dayanımına etkisi şematik olarak **Şekil 6'da** gösterilmektedir.

Şekil 6. Zayıf sınır tabakası diyagramı



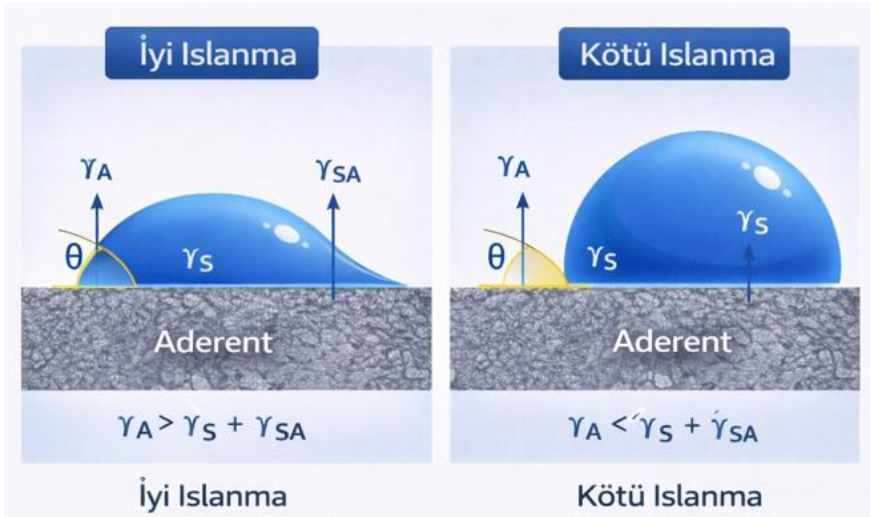
(Edward M Petrie, 2000)

- **Adsorpsiyon (termodinamik) teorisi**

Yapışmanın termodinamik modeli, genel olarak Sharpe ve Schonhorn'a atfedilmekte olup günümüzde yapışma bilimi alanında en yaygın kullanılan yaklaşımlardan biridir. Bu teoriye göre yapıştırıcının altlık yüzeye tutunması, ara yüzeyde oluşan atomlar arası ve moleküller arası etkileşim kuvvetlerinden kaynaklanmaktadır. Ancak bu etkileşimlerin etkili olabilmesi için yapıştırıcı ile yapıştırılan arasında **yakın ve tam temas** sağlanması gerekmektedir. Ara yüzeydeki başlıca etkileşim kuvvetleri; **van der**

Waals kuvvetleri ve Lewis asit–baz etkileşimleri gibi fizikokimyasal temelli kuvvetlerdir. Bu kuvvetlerin büyüklüğü, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemenin **yüzey serbest enerjileri** gibi temel termodinamik parametrelerle ilişkilendirilebilmektedir. Genellikle bir yapıştırma bağlantısının oluşumu, sıvı–katı temas aşamasından geçmektedir. Bu nedenle iyi bir yapışma için gerekli kriterler büyük ölçüde **iyi ıslanma (wetting)** koşulları ile örtüşmektedir. Bununla birlikte iyi ıslanma, güçlü yapışma için gerekli olmakla birlikte tek başına yeterli bir koşul değildir (Wake, 1978). Yüzey enerjisi ile temas açısı arasındaki ilişki şematik olarak **Şekil 7’de** gösterilmektedir.

Şekil 7. Yüzey enerjisi ve temas açısı



(E M Petrie, 1996)

- **Difüzyon teorisi**

Yapışmanın difüzyon teorisi, polimerlerin kendi aralarında (otoadhezyon) veya farklı polimerler arasında oluşan yapışma dayanımının, ara yüzey boyunca makromoleküllerin karşılıklı difüzyonu (interdifüzyon) sonucu meydana geldiği varsayımına

Difüzyon mekanizmasının etkili olduğu durumlarda bağlantı dayanımının; temas süresi, sıcaklık, polimerlerin kimyasal yapısı, molekül ağırlığı gibi birçok parametreye bağlı olması beklenir. Nitekim bu tür parametreler, pek çok polimer-polimer ara yüzeyinde deneysel olarak gözlemlenmiştir (VOYUTSKII, 1983). Polimer zincirlerinin ara yüzey boyunca karşılıklı difüzyonu şematik olarak **Şekil 8'de** gösterilmektedir.

The diagram shows a cross-section of a material with a horizontal phase boundary. Above the boundary is a blue region labeled 'Polimer A'. Below the boundary is an orange region labeled 'Polimer B'. A dashed horizontal line separates the two regions. A blue arrow labeled 'Difüzyon' points from the blue region down to the orange region. In the orange region, a blue wavy line representing a polymer chain is shown extending from the boundary. A label 'Ara Faz' is placed near the boundary. At the bottom, a label 'Ara yüzey' points to the boundary line. The label 'Polimer B' appears twice in the orange region, once on the left and once on the right, with arrows pointing to the orange polymer chains.

Kimyasal bağlanma teorisine göre, yapıştırıcı ile yapıştırılan yüzey arasında oluşan kimyasal bağlar, yapışma dayanımına önemli ölçüde katkı sağlamaktadır. Ara yüzey boyunca oluşan bu bağlar, fiziksel etkileşimlere kıyasla çok daha güçlü kabul edilmektedir. Bu

bağlar genellikle **birincil bağlar (primary bonds)** olarak adlandırılırken; van der Waals kuvvetleri gibi fiziksel kökenli etkileşimler **ikincil bağlar (secondary interactions)** olarak tanımlanmaktadır. Birincil ve ikincil ayrımı, bağların göreceli dayanımı ve bağ enerjilerine dayanmaktadır.

Örneğin kovalent bağların tipik bağ enerjisi yaklaşık **100–1000 kJ/mol** mertebesindeyken; van der Waals etkileşimleri ve hidrojen bağlarının enerjileri genellikle **50 kJ/mol’ü aşmamaktadır**. Bu nedenle kimyasal bağ oluşumunun söz konusu olduğu yapıştırma sistemlerinde çok daha yüksek yapışma dayanımları elde edilebilmektedir (Pethrick, 2015). Ara yüzeyde meydana gelen fiziksel ve kimyasal bağ oluşum mekanizmaları şematik olarak **Şekil 9’da** gösterilmektedir.

Şekil 9. Ara yüzeyde fiziksel ve kimyasal bağ oluşumu



6. Polimerik Yapıştırıcılar ve Sınıflandırılması

Polimerler, sahip oldukları kimyasal yapı, moleküler mimari ve makroskopik özelliklere bağlı olarak çok farklı davranışlar sergileyebilen geniş bir malzeme grubunu oluşturmaktadır. Bu nedenle polimerik malzemelerin doğru şekilde tanımlanabilmesi, uygulama alanlarının belirlenmesi ve performanslarının öngörülebilmesi için sistematik bir sınıflandırmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

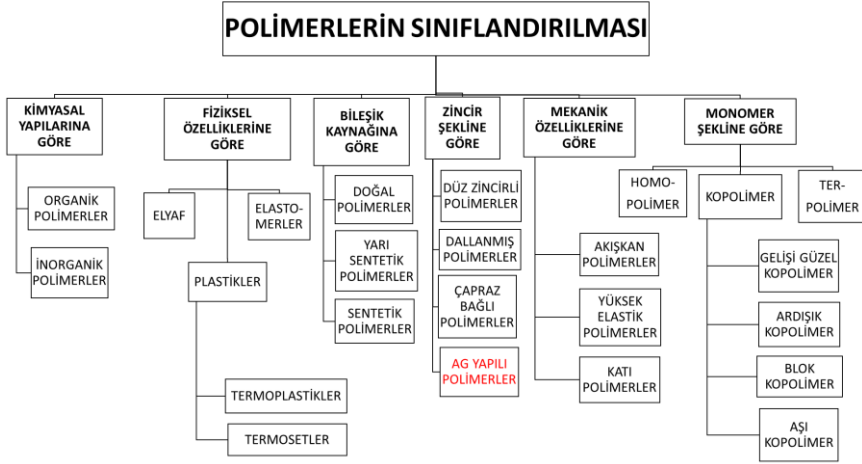
Bu kapsamda polimerler; **kimyasal yapılarına, fiziksel özelliklerine, bileşik kaynaklarına, zincir şekillerine, mekanik**

özelliklerine ve **monomer dizilimlerine** göre farklı alt gruplar altında incelenebilmektedir. Kimyasal yapı esaslı sınıflandırmada organik ve inorganik polimerler ayrımı yapılırken; fiziksel özelliklere göre elyaflar, plastikler ve elastomerler öne çıkmaktadır. Benzer şekilde bileşik kaynağına göre doğal, yarı sentetik ve sentetik polimerler tanımlanmakta; zincir mimarisine göre düz zincirli, dallanmış, çapraz bağlı ve ağ yapılı polimer yapıları ayırt edilmektedir. Mekanik davranış temelinde akışkan, elastik ve katı polimer ayrımı yapılırken; monomer dizilimine göre homopolimer, kopolimer ve ter polimer sistemleri sınıflandırılmaktadır.

Polimerlerin çok yönlü bu sınıflandırma yaklaşımı, malzeme seçimi, üretim yöntemi belirleme ve mühendislik tasarım süreçlerinde kritik rol oynamaktadır. Polimerik yapının mikro ölçekteki düzeni ile makro ölçekteki performansı arasındaki ilişkiyi ortaya koyması açısından da büyük önem taşımaktadır.

Bu çok parametrelili sınıflandırma sistemi şematik olarak **Tablo 2’de** verilmiştir. Şekilde, polimerlerin farklı kriterlere göre dallanarak alt sınıflara ayrıldığı bütüncül yapı görsel olarak sunulmaktadır. Böylece polimer malzemelerin yapısal ve fonksiyonel çeşitliliği sistematik bir çerçevede değerlendirilebilmektedir.

Tablo 2. Polimerlerin genel sınıflandırma şeması.

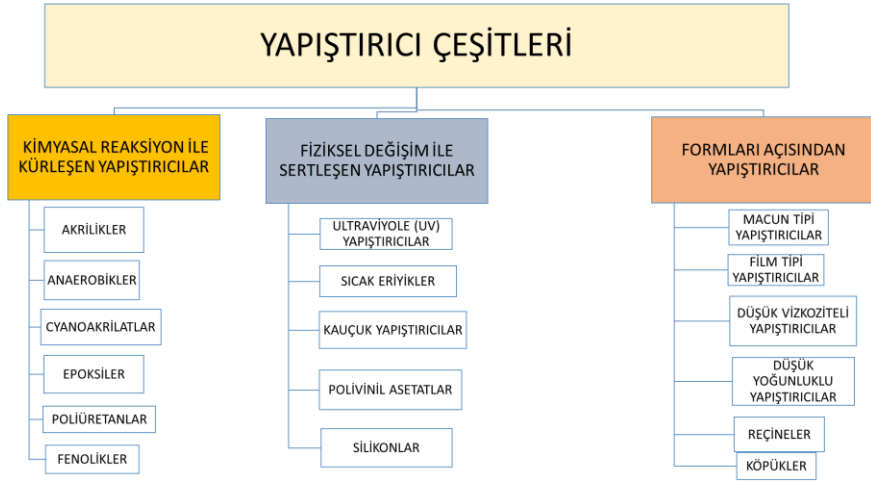


Polimerik yapıştırıcılar; kimyasal yapılarına, kurlenme mekanizmalarına ve uygulama alanlarına bağlı olarak farklı sınıflara ayrılmaktadır. Her bir yapıştırıcı türü; mekanik dayanım, esneklik, kimyasal direnç ve servis sıcaklığı gibi performans kriterleri açısından farklı avantajlar sunmaktadır. Bu nedenle uygun yapıştırıcı seçimi, kullanılacağı malzeme türüne, servis koşullarına ve yükleme tipine bağlı olarak yapılmaktadır. Yapıştırıcılar kökenlerine göre doğal ve sentetik olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Doğal yapıştırıcılar; nişasta, kazein ve kolajen gibi hayvansal veya bitkisel kaynaklardan elde edilen sistemlerdir.

Düşük maliyetli ve çevre dostu olmalarına rağmen suya ve neme karşı dayanımlarının zayıf olması nedeniyle günümüzde sınırlı uygulama alanına sahiptirler. Sentetik yapıştırıcılar ise modern endüstride yaygın olarak kullanılan, sentetik polimer esaslı sistemlerdir ve termoplastik, termoset ve elastomerik olarak üç alt sınıfta incelenmektedir. Termoplastik yapıştırıcılar ısıyla yumuşayıp soğuyunca sertleşir ve genellikle ambalaj gibi düşük yük uygulamalarında kullanılır. Termoset yapıştırıcılar kurlenme sırasında çapraz bağ oluşturarak yüksek mekanik dayanım ve

sıcaklık direnci sağlar; bu nedenle yapısal uygulamalarda tercih edilir. Elastomerik yapıştırıcılar ise yüksek esneklik ve darbe sönümlleme özellikleri sayesinde sızdırmazlık ve titreşimli bağlantılarda kullanılmaktadır. Yapıştırıcılar; kurlenme mekanizmaları ve fiziksel formları dikkate alınarak sınıflandırılabilmekte olup bu sınıflandırma Tablo 3’te gösterilmiştir.

Tablo 3. Yapıştırıcıların sınıflandırılması



a) Kimyasal Reaksiyon ile Kürleşen Yapıştırıcılar

Bu grupta sertleşme (kürlenme), yalnızca fiziksel bir değişimle değil, kimyasal reaksiyon ve çapraz bağ oluşumu ile gerçekleşir. Kürlenme geri dönüşümsüzdür ve genellikle yüksek mekanik dayanım sağlar.

- **Akrilikler:** Hızlı kürlenir, metal ve plastiklerde etkilidir.
- **Anaerobikler:** Oksijensiz ortamda kürlenir (vida sabitleme vb.).
- **Cyanoakrilatlar:** Çok hızlı yapışan “japon” tipi yapıştırıcılardır.

- **Epoksiler:** Yüksek mekanik dayanım ve kimyasal direnç sunar.
- **Poliüretanlar:** Esnek ve darbe dayanımı yüksektir.
- **Fenolikler:** Yüksek sıcaklık ve kimyasal direnç sunar (**Baroncini, Kumar Yadav, Palmese, & Stanzione III, 2016**).

b) Fiziksel Değişim ile Sertleşen Yapıştırıcılar

Bu yapıştırıcılarda sertleşme, kimyasal reaksiyon olmadan, çözücü buharlaşması, soğuma veya ışık etkisi gibi fiziksel süreçlerle gerçekleşir.

- **UV Yapıştırıcılar:** Ultraviyole ışıkla sertleşir.
- **Sıcak Eriyikler (Hot-melt):** Isıtılınca erir, soğuyunca katılaşır.
- **Kauçuk Yapıştırıcılar:** Elastomer esaslıdır, esneklik sağlar.
- **Silikonlar:** Yüksek esneklik ve sıcaklık dayanımı sağlar.
- **Polivinilasetatlar:** Su bazlı, hızlı kurur ve özellikle ahşap ile kâğıt uygulamalarında kullanılır (**Aradhana, Mohanty, & Nayak, 2018**).

c) Formları Açısından Yapıştırıcılar

Bu sınıflandırma, yapıştırıcının uygulama fiziksel formuna dayanır.

- **Macun Tipi:** Boşluk doldurma ve montaj uygulamaları.
- **Film Tipi:** Kompozit ve havacılık laminasyonları.
- **Düşük Viskoziteli:** İnce boşluklara nüfuz eder.
- **Düşük Yoğunluklu:** Hafif yapı uygulamaları.
- **Reçineler:** Yapısal bağlayıcı matrisler.
- **Köpükler:** Dolgu ve yalıtım amaçlı (Aradhana et al., 2018).

7. Yapıştırıcıların Sentez Yöntemleri ve Formülasyonda Yer Alan Kimyasal Türler

Polimerik yapıştırıcıların performansı; kullanılan monomer türü, polimerizasyon yöntemi, çapraz bağlanma yoğunluğu ve katkı maddeleri gibi formülasyon parametrelerine doğrudan bağlıdır. Bu nedenle sentez ve formülasyon süreçleri, yapıştırıcının nihai mekanik, termal ve kimyasal özelliklerini belirleyen en kritik aşamalardır. Polimer sentezi, monomer adı verilen küçük moleküllerin kimyasal reaksiyonlar sonucunda bir araya gelerek yüksek molekül ağırlıklı makromolekülleri oluşturması sürecidir. Polimerizasyon reaksiyonları temel olarak iki ana grupta incelenmektedir: **zincir (ilave/katılma) polimerizasyonu** ve **yoğunlaşma (kondenzasyon/basamak) polimerizasyonu**.

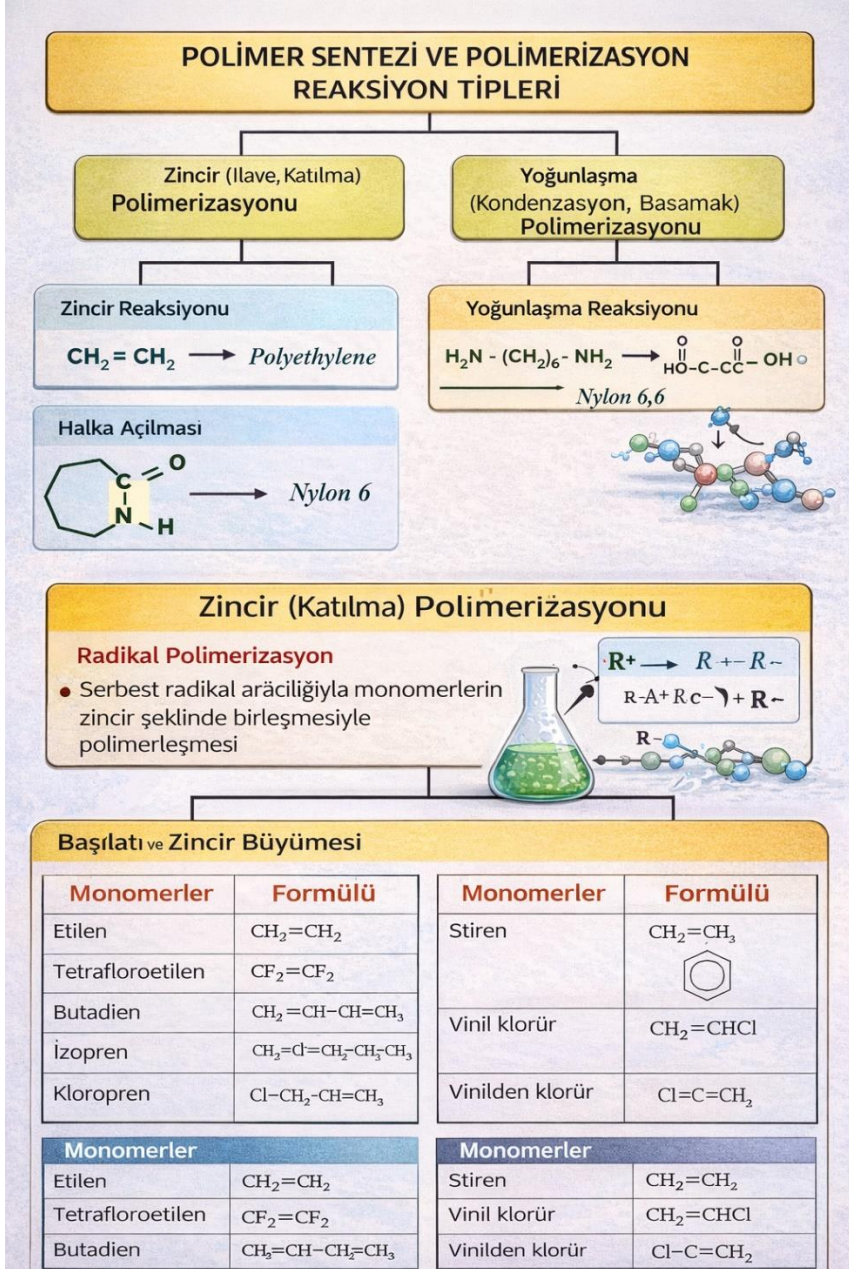
Zincir (katılma) polimerizasyonunda monomerler, aktif bir merkez aracılığıyla ardışık şekilde eklenerek uzun polimer zincirleri oluşturur. Bu mekanizmada reaksiyon başlatma, zincir büyümesi ve sonlanma basamakları bulunur. Örneğin etilen monomerinin çift bağının açılmasıyla polietilen oluşumu zincir reaksiyonuna tipik bir örnektir. Zincir polimerizasyonu ayrıca halka açılması mekanizması ile de gerçekleşebilir; kaprolaktamdan Nylon-6 sentezi bu duruma örnek verilebilir.

Yoğunlaşma (kondenzasyon) polimerizasyonunda ise iki farklı fonksiyonel gruba sahip monomerler reaksiyona girerken su, metanol gibi küçük moleküller açığa çıkar. Bu reaksiyonlar basamaklı ilerler ve zincir büyümesi adım adım gerçekleşir. Hekzametilen diammin ile adipik asidin reaksiyonundan Nylon-6,6 oluşumu bu mekanizmanın klasik bir örneğidir.

Serbest radikal polimerizasyonunda, eşleşmemiş elektron içeren serbest radikaller aracılığıyla yürür. Başlatıcılar tarafından oluşturulan radikaller vinil monomerlerin çift bağını açarak zincir

büyümesini başlatır ve karbon atomları doymuş tek bağ yapısına dönüşür. Sonuç olarak polimer sentez yönteminin seçimi; monomer yapısı, hedeflenen molekül ağırlığı, zincir mimarisi ve nihai malzeme özelliklerine bağlı olarak belirlenmektedir. Zincir polimerizasyonu hızlı ve yüksek molekül ağırlıklı ürünler verirken, yoğunlaşma polimerizasyonu daha kontrollü ancak kademeli bir büyüme mekanizmasına sahiptir (Hadjichristidis, Iatrou, Pitsikalis, & Mays, 2006).

Şekil 10. Polimer sentezi ve reaksiyon tipleri



Bir yapıştırıcı formülasyonu; baz polimer/monomer sistemi ile performansı belirleyen çeşitli kimyasal katkı maddelerinden oluşmaktadır. Bu bileşenlerin seçimi; uyumluluk, uygulama gereksinimleri ve hedeflenen nihai mekanik, termal ve kimyasal özelliklere bağlıdır. Yapıştırıcı formülasyonunda kullanılan kimyasal türler ve işlevleri **Tablo 4’te** verilmiştir.

Tablo 4. Yapıştırıcı Formülasyonunda Kullanılan Kimyasal Türler

Kimyasal Tür	Temel Fonksiyonu	Özellikleri / Etkileri	Örnekler
Baz Monomer / Polimer	Ana matris yapıyı oluşturur	Mekanik dayanım, esneklik ve kimyasal direnci belirler	Epoksi, akrilat, poliüretan
Hidrokarbon Reçineler	Yapışmayı artırır	Renk, koku ve stabiliteyi etkiler	C5, C9 reçineler
Hızlandırıcılar	Kürlenme reaksiyonunu hızlandırır	Reaksiyon sıcaklığını düşürür, kinetiği düzenler	Tiyazoller, sülfonamidler
Aktivatörler	Hızlandırıcıları etkinleştirir	Kürlenme oranını artırır	İnorganik/organik aktivatörler
Başlatıcılar	Polimerizasyonu başlatır	Aktif merkez oluşturarak zincir büyümesini başlatır	AIBN, benzoyl peroxide
Yüzey Aktif Maddeler	Islanma ve akışı iyileştirir	Yüzey gerilimini düşürür, dispersiyonu artırır	Emülgatörler, köpük kesiciler
Viskozlaştırıcılar	Tack ve soyulma direncini artırır	Basınca duyarlı özellik kazandırır	Reçine esterleri, terpenler
Kürleme Maddeleri	Çapraz bağ oluşturur	Sertlik ve termal dayanımı artırır	Aminler, izosiyanatlar
Katkı Maddeleri	Performansı optimize eder	Dolgu, plastikleştirici, antioksidan etkisi	Silika, alev geciktiriciler

(Harito, Bavykin, Yuliarto, Dipojono, & Walsh, 2019)

8. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması ve Yapıştırıcı Tabanlı Kompozit Sistem Tasarımları

Kompozit malzemeler, birbirleri içerisinde çözünmeden iki veya daha fazla farklı fazın bir araya getirilmesiyle elde edilen ve bileşenlerinin tek başına sahip oldukları özelliklerden daha üstün performans sergileyen mühendislik malzemeleridir. Hafiflik, yüksek özgül dayanım, korozyon direnci ve tasarım esnekliği gibi avantajları nedeniyle birçok ileri mühendislik uygulamasında tercih edilmektedir. Bu malzemeler genel olarak üç ana bileşenden oluşmaktadır: **matris, takviye ve katkı fazı**.

Matris fazı; kompozit yapının sürekli fazını oluşturmakta ve takviye elemanlarını bir arada tutarak yük transferini sağlamaktadır. Matris malzemesi olarak metal, seramik veya polimer esaslı sistemler kullanılabilir. Polimerik matris malzemelere polyester, vinil ester, bisfenol, epoksi ve fenolik reçineler ile poliamid, polipropilen, polietilen, polibütlen, tereftalat, polietereeterketon ve polietersülfon gibi termoplastikler örnek verilebilir.

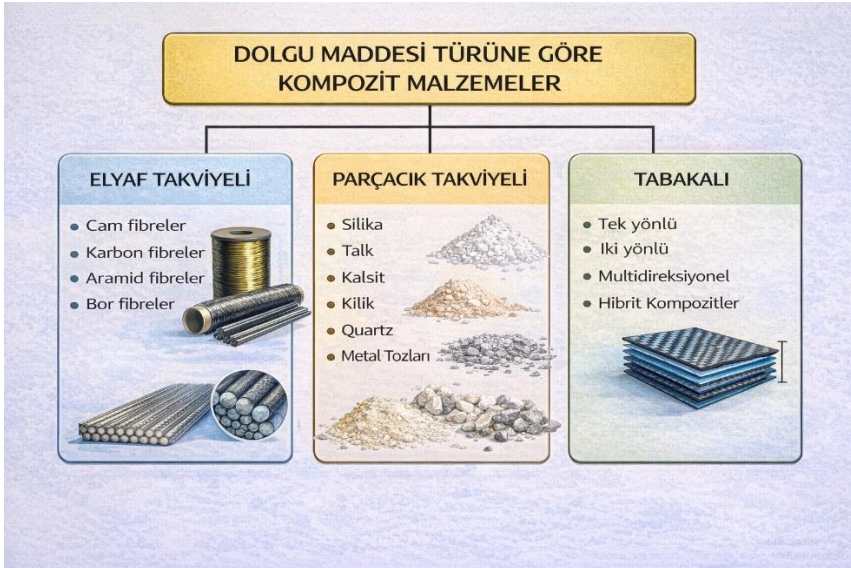
Takviye fazı; kompozit malzemenin mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştiren ve genellikle matris fazına kıyasla daha sert ve dayanımlı olan bileşendir. Takviye malzemesinin geometrik şekli, kompozitin performansını belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Bu doğrultuda kompozitler; **elyaf takviyeli, parçacık takviyeli, tabakalı (laminat) kompozitler** ve bunların kombinasyonlarından oluşan hibrit kompozitler olarak sınıflandırılabilir (Balasubramanian, 2014). Kompozit malzemelerin kullanımının yaygınlaşmasının temel nedeni sundukları avantajlardır.

Bu malzemeler düşük yoğunlukları sayesinde hafif yapı uygulamalarına olanak sağlamakta, yüksek çekme ve eğilme dayanımı gösterebilmekte ve yorulma dirençleri yüksek olmaktadır. Ayrıca korozyona ve birçok kimyasal ortama karşı dirençli olmaları,

yüksek sıcaklık ortamlarında kullanılabilmeleri ve kompleks geometrili parçaların üretimine imkân tanımaları önemli üstünlüklerindendir. Bununla birlikte kompozit malzemelerin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Matris malzemelerinin maliyetinin yüksek olması üretim giderlerini artırabilmektedir. Ayrıca kırılmalıklarının fazla olması, aynı malzemede farklı yükleme türleri altında değişken mekanik davranışlar gözlenmesi ve üretim sırasında oluşabilen hava boşluklarının (porozite) malzeme kalitesini olumsuz etkileyebilmesi başlıca sınırlayıcı faktörler arasında yer almaktadır.

Yapıştırıcı esaslı kompozit sistemler, polimer matrisli yapıştırıcıların çeşitli takviye elemanları ile modifiye edilmesi sonucu elde edilen çok fazlı malzeme yapılarıdır. Bu sistemlerde amaç; yapıştırıcının mekanik dayanımı, termal kararlılığı, tokluk özellikleri ve ara yüzey performansının artırılmasıdır (Lubin, 2013). Takviye türüne göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması şematik olarak **Şekil 11**'de gösterilmektedir.

Şekil 11. Takviye türüne göre kompozitler



- **Partikül Takviyeli Yapıştırıcılar**

Partikül takviyeli yapıştırıcılar, mikro veya nano boyutlu dolgu maddelerinin polimer matris içine dağıtılmasıyla elde edilmektedir. Metal oksitler, seramik partiküller ve mineral dolgular; sertlik, aşınma direnci ve mekanik dayanımın artırılmasında etkili rol oynamaktadır.

- **Fiber Takviyeli Yapıştırıcı Sistemleri**

Fiber takviyeli sistemlerde cam, karbon veya aramid fiberler yapıştırıcı matris içinde yük taşıyıcı faz olarak görev yapar. Bu yapı, özellikle yüksek yük taşıyan yapısal bağlantılarda dayanımı önemli ölçüde artırmaktadır.

- **Hibrit (Tabakalı) Takviye Sistemleri**

Hibrit kompozit yapıştırıcılarda birden fazla takviye türü birlikte kullanılmaktadır. Fiber ve partikül kombinasyonları, sinerjik etki oluşturarak hem rijitlik hem de tokluk özelliklerinin optimize edilmesine olanak tanır (Matykiewicz, 2020).

9. Dolgu (Katkı) Maddelerinin Mekanik Özelliklere Etkisi

Dolgu maddeleri, polimerik yapıştırıcıların mekanik, termal ve fiziksel özelliklerini geliştirmek amacıyla formülasyona ilave edilen takviye bileşenleridir. Dolgu türü, partikül boyutu, yüzey kimyası ve katkı oranı; yapıştırıcının performansını doğrudan belirleyen temel parametrelerdir (Zhao et al., 2022). Dolgu miktarı, yapıştırıcının rijitlik ve dayanımını artırırken aşırı oranlarda kullanımı kırılganlığı yükseltebilir. Bu nedenle optimum katkı oranının belirlenmesi, performans dengesi açısından kritik öneme sahiptir.

- **Metal Oksit Katkılar (Fe_3O_4 , Al_2O_3 vb.)**

Metal oksit esaslı dolgular, yapıştırıcıların sertlik, elastik modül ve termal dayanımını artırmaktadır. Manyetik özellikli Fe_3O_4 ve yüksek sertlik sunan Al_2O_3 partikülleri, yapısal yapıştırıcı sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

- **Seramik ve Mineral Dolgular**

Silika, kalsit ve kil mineralleri gibi seramik/mineral katkıları; aşınma direnci, boyutsal kararlılık ve maliyet optimizasyonu sağlamaktadır. Ayrıca termal genleşmenin kontrol edilmesine katkıda bulunurlar.

- **Karbon Tabanlı Nanomalzemeler**

Karbon nanotüp, grafen ve karbon siyahı gibi nanomalzemeler; yüksek yüzey alanları sayesinde mekanik dayanım, elektriksel iletkenlik ve termal iletkenlik özelliklerini iyileştirmektedir.

- **Bor Türevleri ve Fonksiyonel Katkılar**

Borik asit, bor oksit ve üleksit gibi bor türevleri; alev geciktiricilik, termal kararlılık ve ara yüzey etkileşimlerinin geliştirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Ayrıca yapıştırıcı matris ile kimyasal etkileşim kurarak bağlanma performansını artırabilirler.

10. Yapışma Özelliklerine Etki Eden Faktörler

Yapıştırma işlemi; yapıştırıcı malzemenin yapısı, yüzey özellikleri ve işlem koşullarına bağlı olarak gerçekleşen fiziksel ve kimyasal etkileşimlerin sonucudur. Yapıştırıcı içerisindeki polimerik maddeler, yapıştırılan yüzeyler arasında bağ oluşumunu sağlayarak yapışmayı mümkün kılar. Yapışma performansı; tek bir faktörden ziyade, birden fazla parametrenin tekil veya birlikte etkisiyle

belirlenir ve her yapıştırıcı sistemi için bu faktörlerin etki düzeyi farklılık gösterebilir.

- **Yüzey Pürüzlülüğü**

Yüzey morfolojisi, yapıştırma mukavemetini doğrudan etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Literatürde, etkin bir yapışma için optimum yüzey pürüzlülüğünün yaklaşık $Ra = 1-3 \mu m$ aralığında olması gerektiği belirtilmektedir. Çok parlak ve düzgün yüzeylerde yapıştırıcının tutunması zorlaşırken, aşırı kaba yüzeylerde ($Ra > 5 \mu m$) ise tam ıslanma ve adezyon sağlanamadığından mukavemet düşmektedir.

- **Yapıştırma Kalınlığı**

Bağ hattı kalınlığı, yük transfer mekanizmasını etkileyerek yapışma dayanımını belirler. Literatürde optimum yapıştırma kalınlığının yaklaşık 0,1–0,3 mm aralığında olması önerilmektedir. Daha ince veya daha kalın bağ hatlarında gerilme dağılımı olumsuz etkilenebilir.

- **Zaman (Kürlenme Süresi)**

Yapıştırıcının kürleşerek nihai mekanik özelliklerine ulaşabilmesi için belirli bir süre gereklidir. Bu süre birkaç saniyeden birkaç güne kadar değişebilir. Kürlenme süresi, yapıştırıcının aktif hale gelme süresi olup sıcaklık ve basınç gibi parametrelerle kısaltılabilir.

- **Sıcaklık**

Sıcaklık, yapıştırma reaksiyon kinetiğini belirleyen kritik bir faktördür. Çoğu yapıştırıcı oda sıcaklığında kürleşebilse de, yüksek sıcaklıklarda reaksiyon hızı artar ve yapışma süresi kısalır. Ancak sıcaklığın kontrolsüz artırılması, yapıştırıcıyı oluşturan polimerik yapının bozulmasına ve performans kaybına yol açabilir (Silva et al.,

2011). Sonuç olarak yüzey pürüzlülüğü, bağ hattı kalınlığı, kürlenme süresi ve sıcaklık gibi faktörlerin uygun şekilde optimize edilmesi, yapıştırma dayanımının artırılmasında kritik rol oynamaktadır. Bu parametrelerin dengeli kontrolü, yapıştırıcı sistemlerin servis performansını doğrudan belirler.

11. Yapıştırılacak Yüzeylerin Hazırlanması

Yüzey hazırlama, yapıştırma işleminin en kritik aşamalarından biridir. Çünkü yapışmanın gerçekleştiği yer doğrudan yüzeydir ve bağlantı dayanımı büyük ölçüde yüzey durumuna bağlıdır. Bu nedenle yüzey hazırlama, güçlü ve uzun ömürlü bir yapıştırma bağlantısı elde etmek için zorunlu bir işlemdir. Yüzey hazırlamanın temel amacı; yapıştırılacak malzeme yüzeylerini, yüksek dayanımlı ve sürekli bir yapışma sağlayacak şekilde uygun hale getirmektir. Yapıştırma dayanımının yüksek olması için olası hasar durumları minimize edilmeli, ayrıca oluşabilecek hasarın beklenen tipte gerçekleşmesi için kontrollü ve özenli bir yüzey hazırlama protokolü uygulanmalıdır. Pratikte her zaman kolay olmasa da yapıştırılacak yüzeylerin oksit, boya, krom, fosfor gibi ara tabakalar içermeyen doğrudan yapıştırıcı ile temas etmesi istenir. Bu tür ara fazlar “zayıf sınır tabakalar” olarak adlandırılır ve yapışma dayanımını düşürür.

Ayrıca yüzey hazırlama yöntemleri belirlenirken servis koşulları, ortam şartları ve istenen dayanım özellikleri mutlaka dikkate alınmalıdır. Yapıştırma öncesi uygulanan yüzey hazırlama yöntemleri şematik olarak **Şekil 12’de** gösterilmektedir.

Şekil 12. Yüzey hazırlama yöntemleri



(Edward M Petrie, 2000)

12. Mekanik, Termal ve Kimyasal Karakterizasyon

Polimerik yapıştırıcı ve kompozit bağlantıların performansının belirlenmesinde mekanik ve termal karakterizasyon testleri kritik rol oynamaktadır. Bu testler, yapıştırıcıların servis koşullarındaki dayanımını ve yapısal kararlılığını ortaya koymaktadır.

• Çekme ve Kayma Dayanımı Testleri

Çekme ve kayma testleri, yapıştırıcı bağlantıların yük taşıma kapasitesini belirlemek amacıyla uygulanmaktadır. Özellikle tek bindirme bağlantılarda kayma dayanımı en yaygın değerlendirilen parametrelerden biridir.

• ASTM D1002 Tek Bindirme Testi

ASTM D1002 standardı, metal-metal yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımını belirlemek için kullanılan temel

test yöntemidir. Bağlantı performansının karşılaştırılabilir şekilde değerlendirilmesini sağlar.

- **Young Modülü Ölçümleri**

Young modülü, yapıştırıcı veya kompozit sistemin elastik rijitliğini ifade eder. Yük altında deformasyon davranışının anlaşılmasında önemli bir mekanik parametredir.

- **Darbe Dayanımı**

Darbe testleri, yapıştırıcı bağlantıların ani yüklemeler altındaki enerji sönümleme kapasitesini belirlemek amacıyla uygulanır. Tokluk ve kırılma direnci hakkında bilgi sağlar.

- **DSC ve TGA Analizleri**

Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) ve Termogravimetrik Analiz (TGA), yapıştırıcıların cam geçiş sıcaklığı, bozunma davranışı ve termal kararlılığı hakkında bilgi verir. Bu analizler, servis sıcaklığı limitlerinin belirlenmesinde kullanılır. Polimerik yapıştırıcı ve kompozit sistemlerin yapısal, morfolojik ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesinde mikroyapısal ve spektroskopik analiz teknikleri önemli rol oynamaktadır. Bu karakterizasyon yöntemleri, sentez başarısının doğrulanması ve ara yüzey etkileşimlerinin anlaşılması açısından kritik veriler sunmaktadır.

- **FT-IR Analizi**

Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR), polimer yapısındaki fonksiyonel grupların belirlenmesinde kullanılmaktadır. Kimyasal bağ oluşumları ve çapraz bağlanma reaksiyonları bu teknikle doğrulanabilmektedir.

- **NMR Spektroskopisi**

Nükleer Manyetik Rezonans (NMR) analizi, monomer ve polimer yapısının moleküler düzeyde aydınlatılmasını sağlar. Kopolimer kompozisyonu ve zincir yapısı hakkında detaylı bilgi sunar.

- **SEM Görüntüleme**

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), yüzey morfolojisi, kırılma yüzeyleri ve dolgu dağılımının incelenmesinde kullanılmaktadır. Ara yüzey aderansı ve hasar mekanizmaları SEM ile değerlendirilebilmektedir.

- **XRD Analizi**

X-Işını Kırınımı (XRD), kristal yapı ve faz analizlerinin belirlenmesini sağlar. Özellikle inorganik dolgu maddelerinin yapısal karakterizasyonunda önemli bir tekniktir.

- **EDX Elementel Analiz**

Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDX), kompozit yapı içerisindeki elementel dağılımın belirlenmesinde kullanılmaktadır. Dolgu maddelerinin matris içindeki homojenliği bu yöntemle analiz edilebilir (Shirai, Watanabe, Fuji, & Takahashi, 2009).

13. Yapıştırma Bağlantı Tasarımları ve Bağlantıların Maruz Kaldığı Kuvvetler

Yapıştırma bağlantı tasarımları; birleştirilecek yüzey geometrisi, bindirme mesafesi, yapıştırıcı kalınlığı ve yükleme koşulları gibi faktörlerin optimize edilmesi yoluyla bağlantı performansının artırılmasını amaçlayan tasarım yaklaşımlarını içermektedir. Yapıştırma tekniği ile oluşan bağlantıların, kullanılacak bölgedeki arzu edilen yükleri taşıyabilmesi ve gerekli

mekanik özellikleri gösterebilmesi için bazı koşulların sağlanması gerekmektedir. Bu kapsamda; yapıştırıcı tipi, yapıştırılan yüzeylerin kalite durumu ve yüzey hazırlama teknikleri ile yapıştırıcı malzemenin kalınlığı gibi unsurlar dikkate alınarak tasarım gerçekleştirilir. Yapıştırma tekniği uygulanmış bir bağlantıda tüm yükleme durumlarının (kayma, basma, çekme ve soyulma) kombinasyonu söz konusu olabilir. Bu nedenle bağlantı tasarımı yapılırken, yapının maruz kalacağı yükler göz önüne alınmalı ve tasarım geometrileri buna uygun şekilde oluşturulmalıdır. Yapıştırma yoluyla birleştirilecek parçaların bağlantı şekilleri, yapıya etki edecek yük türlerine göre tasarlanmalıdır. Gerilme ve yük dağılımları dikkate alınmadan yapılan yapıştırma bağlantı tasarımları hatalı sonuçlara yol açabilmektedir (Vasenin, 1969).

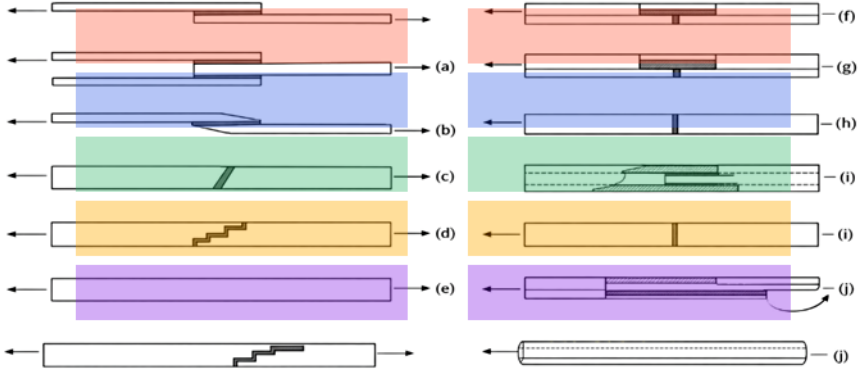
Uygun şekilde tasarlanan yapıştırma bağlantılarının, yapıştırıcının çalışma şartlarına uyum sağlaması durumunda, klasik mekanik birleştirme yöntemleri ile elde edilen bağlantılara kıyasla daha emniyetli sonuçlar verebildiği görülmektedir.

• Yapıştırma Bağlantı Çeşitleri

Yapıştırma ile birleştirilen elemanlarda kullanılan başlıca bağlantı tipleri, yük aktarım mekanizması, gerilme dağılımı ve uygulama geometrisine bağlı olarak farklı tasarım konfigürasyonlarında uygulanmaktadır. Bu kapsamda en yaygın kullanılan bağlantı türleri bindirme esaslı bağlantılar olup; tek tesirli bindirme, çift tesirli bindirme, boyun bindirme, açılı bindirme ve teraslama bindirme bağlantıları bu grupta yer almaktadır. Bunun yanı sıra yük taşıma kapasitesini artırmak amacıyla geliştirilen tek takviyeli ve çift takviyeli bindirme bağlantıları da mühendislik uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Bindirme temelli tasarımlara ek olarak, alın bağlantı (butt joint), silindirik bindirme bağlantısı ve soyulma bağlantısı gibi farklı geometrik ve yükleme koşullarına yönelik özel bağlantı tipleri de yapıştırma teknolojilerinde önemli bir yer tutmaktadır. Yapıştırma ile

birleştirilen elemanlarda kullanılan başlıca bağlantı tipleri şematik olarak **Şekil 13'te** gösterilmektedir.

Şekil 13. Yapıştırma bağlantı tipleri



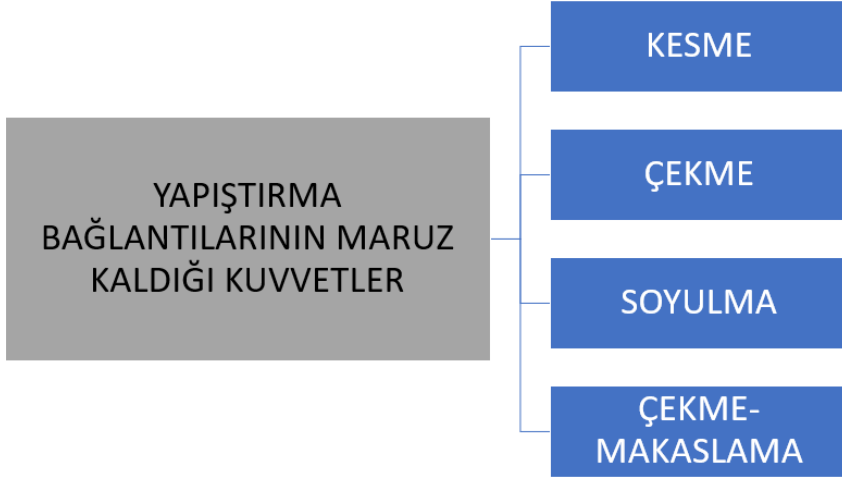
Yapıştırma bağlantı tipleri, (a) tek tesirli bindirme, (b) çift tesirli bindirme, (c) boyun bindirme, (d) açılı bindirme, (e) teraslama, (f) tek takviyeli bindirme, (g) çift takviyeli bindirme, (h) alın bağlantı, (i) silindirik bindirme, (j) soyulma

(Sunday, 2015)

- **Yapıştırma Bağlantılarının Maruz Kaldığı Kuvvetler**

Yapıştırma bağlantıları, servis koşulları altında farklı yükleme türlerinin etkisi altında çalışmaktadır. Bu bağlantıların maruz kaldığı başlıca kuvvetler; kesme, çekme, soyulma ve çekme-makaslama yükleridir. Yapıştırma bağlantılarının maruz kaldığı başlıca yükleme türleri şematik olarak **Şekil 14'te** gösterilmektedir.

Şekil 14. Yapıştırma Bağlantılarının Maruz Kaldığı Kuvvetler



(Udatha, Babu, Satyadev, & Bhagavathi, 2020)

Kesme kuvveti, yapıştırıcı tabakası boyunca paralel doğrultuda etki eden ve birleştirilen yüzeylerin birbirine göre kaymasına neden olan yük türüdür. Yapıştırma bağlantılarında en istenen ve bağlantının en yüksek dayanımı gösterdiği yükleme şekli genellikle kesme yüklemesidir.

Çekme kuvveti, yapıştırıcı tabakasına dik doğrultuda etki ederek birleştirilen yüzeyleri birbirinden ayırmaya çalışan yük türüdür. Bu yükleme durumunda gerilme dağılımı daha düzensiz olmakta ve bağlantı dayanımı kesmeye kıyasla daha düşük gerçekleşmektedir.

Soyulma kuvveti, bağlantının bir ucundan başlamak üzere yapıştırıcı tabakasını tabakalar hâlinde ayırmaya çalışan yükleme biçimidir. Gerilme, dar bir hat üzerinde yoğunlaştığı için yapıştırma

bağlantıları açısından en kritik ve en zayıf yükleme türlerinden biri olarak kabul edilmektedir.

Çekme-makaslama (kombine) kuvveti ise çekme ve kesme etkilerinin birlikte görüldüğü yükleme durumudur. Gerçek mühendislik uygulamalarında yapıştırma bağlantıları çoğunlukla bu tür kombine yüklemelere maruz kalmakta ve tasarım sürecinde bu karmaşık gerilme durumlarının dikkate alınması gerekmektedir.

14. Yapıştırma Bağlantılarında Oluşan Hasar Tipleri

Farklı yükleme şartları altında yapıştırma bağlantılarının ve kullanılan yapıştırıcıların mekanik davranışlarının tam anlamıyla ortaya konulabilmesi için, bağlantı bölgesinde meydana gelen hasar tiplerinin ayrıntılı biçimde karakterize edilmesi gerekmektedir. Hasar tiplerinin doğru şekilde tanımlanması; yapıştırıcının performansının, ara yüzey etkileşimlerinin ve yük transfer mekanizmalarının anlaşılmasında kritik öneme sahiptir. Bu nedenle yapıştırma bağlantılarının değerlendirilmesinde yalnızca dayanım değerleri değil, aynı zamanda hasarın oluşum biçimi ve ilerleme karakteri de dikkate alınmalıdır. Yapıştırıcı aracılığıyla iki veya daha fazla malzeme ya da parçanın bir araya getirildiği yapıştırma bağlantılarında genel olarak iki temel hasar modeli ile karşılaşılmaktadır. Bunlar **adhezyon hasarı** ve **kohezyon hasarı** olarak sınıflandırılmaktadır.

Adhezyon hasarı, yapıştırıcı ile adherent (yapıştırılan yüzey) arasındaki ara yüzey bağının zayıflaması veya kopması sonucu meydana gelirken; kohezyon hasarı yapıştırıcı malzemenin kendi iç yapısı içerisinde gerçekleşen kırılma şeklinde tanımlanmaktadır. Bu hasar türlerinin sınıflandırılması ve değerlendirilmesi, TS EN ISO 10365 standardında da tanımlandığı üzere, yapıştırma performansının karşılaştırmalı analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Belnoue & Hallett, 2016). Temel hasar mekanizmasının belirlenmesi, yapıştırma bağlantılarına uygulanan

mekanik testlerin (çekme, kayma, soyulma vb.) sonuçlarının doğru yorumlanabilmesini sağlamaktadır. Hasarın ara yüzeyde mi yoksa yapıştırıcı hacmi içerisinde mi oluştuğunun anlaşılması; yüzey hazırlama yöntemlerinin etkinliği, yapıştırıcı formülasyonunun yeterliliği ve yükleme koşullarına karşı bağlantının güvenilirliği hakkında önemli bilgiler sunmaktadır.

Bu bağlamda hasar türlerinin belirlenmesi, hem deneysel verilerin bilimsel olarak değerlendirilmesine hem de optimum yapıştırıcı–yüzey kombinasyonlarının geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu kapsamda üç temel hasar tipi tanımlanmaktadır:

Kohezyon hasarı: Kırılma, yapıştırıcı malzemenin kendi iç yapısı içerisinde gerçekleşmektedir. Yapıştırıcı tabaka yüzeylere tutunmaya devam ederken, kopma yapıştırıcının hacmi içinde oluşur. Bu durum genellikle iyi yüzey hazırlığı ve güçlü ara yüzey bağlanmasının göstergesi olarak kabul edilir. **Özel kohezyon hasarı:** Kohezyon hasarının belirli bölgelerde yoğunlaştığı veya heterojen dağılım gösterdiği özel bir kırılma biçimidir. Dolgu maddesi dağılımı, kürlenme farklılıkları veya iç gerilmeler bu hasar tipine neden olabilmektedir.

Adhezyon hasarı: Hasar, yapıştırıcı ile adherent yüzey arasındaki ara yüzey bağının kopması sonucu meydana gelmektedir. Yüzey pürüzlülüğünün yetersiz olması, kirlenme, düşük yüzey enerjisi veya hatalı yüzey hazırlama işlemleri adhezyon hasarının başlıca nedenleri arasında yer almaktadır. Yapıştırma bağlantılarında meydana gelen başlıca hasar türleri, şematik olarak Şekil 15’te sunulmaktadır.

Şekil 15. Yapıştırma bağlantılarında oluşan hasar türleri

Hasar Tipleri		Yapıştırıcıda meydana gelen hasarlar	
Yapıştırılan malzemede meydana gelen hasarlar	 Yapıştırılan malzemelerin birinde veya ikisinde de hasarın olması	Yapıştırıcıda meydana gelen hasarlar	 Kohezyon hasarı
	 Kohesiv yapıştırılan malzeme hasarı		 Özel kohezyon hasarı
Yapıştırılan malzemede meydana gelen hasarlar	 Kalkma (Deleminasyon) yoluyla hasar		 Adhezyon hasarı
	 Kalkma (Deleminasyon) yoluyla hasar	Yapıştırıcıda meydana gelen hasarlar	 Adhezyon hasarı

(Jeong Lee & Gil Lee, 1996)

15. Yorulma Olayı (Fatigue Phenomenon)

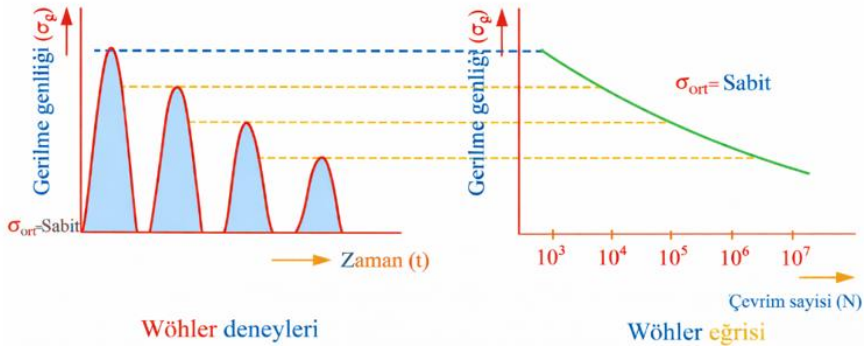
Yorulma olayı, malzemelerin veya birleştirilmiş yapıların statik dayanım sınırlarının altında kalan, ancak tekrarlı veya çevrimsel yüklemelere maruz kalmaları sonucunda zamanla hasar biriktirerek kırılmaya uğraması olarak tanımlanmaktadır. Yapıştırma bağlantılarında yorulma davranışı, yalnızca yapıştırıcının mekanik özelliklerine değil; aynı zamanda yapıştırılan malzemelerin özelliklerine, ara yüzey bağlanma kalitesine ve yük transfer mekanizmasına da bağlıdır. Yapıştırma bağlantıları çevrimsel çekme, kayma, eğilme veya soyulma gerilmelerine maruz kaldığında, bağlantı bölgesinde mikroskobik çatlaklar oluşmaya başlamaktadır. Bu çatlaklar genellikle gerilme yığılmalarının yoğun olduğu ara yüzey bölgelerinde veya yapıştırıcı tabakanın zayıf noktalarında başlar. Çevrim sayısı arttıkça çatlak ilerlemesi hızlanır ve belirli bir kritik boyuta ulaştığında ani kırılma meydana gelir. Yorulma hasarı üç temel aşamada incelenmektedir:

Çatlak Başlangıcı (Crack Initiation): İlk mikro çatlakların oluştuğu evredir. Yüzey pürüzlülüğü, boşluklar, dolgu aglomerasyonları ve kurlenme hataları bu aşamayı hızlandırabilir.

Çatlak İlerlemesi (Crack Propagation): Oluşan çatlakların çevrimsel yükleme altında büyüdüğü aşamadır. Bu ilerleme hızı; gerilme genliği, yapıştırıcı sünekliği ve ara yüzey dayanımına bağlıdır.

Son Kırılma (Final Fracture): Çatlak kritik uzunluğa ulaştığında bağlantı ani ve makroskopik olarak kırılır. Yapıştırma bağlantılarında yorulma performansı genellikle **S-N eğrileri (Gerilme-Çevrim sayısı eğrileri)** kullanılarak değerlendirilmektedir. Bu eğriler, belirli bir gerilme seviyesinde bağlantının kaç çevrim sonunda hasara uğradığını göstermekte ve yorulma ömrünün belirlenmesini sağlamaktadır (Kasper et al., 2021). Yapıştırıcı tabakasında tekrarlı yüklemeler altında gelişen yorulma hasarı ve çatlak ilerleme süreci Şekil 16'da şematik olarak gösterilmektedir.

Şekil 16. Yapıştırıcılarda yorulma oluşum süreci



(Schijve, 2001)

Yapışma alanlarının birinde meydana gelen bir çatlak, uygulanan gerilme etkisi altında yük transfer mekanizmasını değiştirerek diğer yapışma alanlarında da çatlak başlangıcını

tetikleyebilmektedir. Bu durum, hasarın bağlantı boyunca yayılmasına ve nihai kırılmanın daha kısa çevrim sayılarında gerçekleşmesine neden olmaktadır. Dolayısıyla yapıştırma bağlantılarında yorulma davranışının değerlendirilmesinde yalnızca çatlak başlangıcı değil, çatlakların karşılıklı etkileşimi ve ilerleme karakteri de dikkate alınmalıdır.

Yorulma davranışını etkileyen başlıca parametreler şunlardır:

- **Yapıştırıcı tabaka kalınlığı**
- **Ara yüzey yapışma dayanımı**
- **Yüzey hazırlama yöntemi**
- **Kürlenme derecesi ve sıcaklığı**
- **Dolgu maddesi varlığı ve dağılımı**
- **Yükleme frekansı ve gerilme oranı**
- **Çevresel koşullar (nem, sıcaklık, kimyasal ortam)**

Özellikle nem ve sıcaklık etkisi altında yapıştırıcı matriste plastikleşme meydana gelmesi, yorulma ömrünü önemli ölçüde düşürebilmektedir. Benzer şekilde soyulma gerilmelerinin baskın olduğu bağlantı geometrilerinde yorulma hasarı daha erken oluşmaktadır. Sonuç olarak yorulma olayı, yapıştırma bağlantılarının uzun süreli servis performansını belirleyen en kritik hasar mekanizmalarından biridir. Bu nedenle tasarım aşamasında yalnızca statik dayanım değerlerinin değil, çevrimsel yük altındaki davranışın da dikkate alınması gerekmektedir (Jeong Lee & Gil Lee, 1996).

16. Çevresel Dayanım ve Yaşlandırma

Polimerik yapıştırıcılar ve bu yapıştırıcılarla oluşturulan kompozit bağlantıların uzun süreli servis performansı, maruz kaldıkları çevresel koşullara bağlı olarak önemli ölçüde değişim göstermektedir. Özellikle nem, sıcaklık, kimyasal ortamlar ve termal

dalgalanmalar gibi dış etkenler hem yapıştırıcı matrisinde hem de yapıştırıcı–yapıştırılan ara yüzeyinde fiziksel ve kimyasal bozunma mekanizmalarının gelişmesine neden olabilmektedir.

Nem etkisi altında yapıştırıcı yapı içerisinde su moleküllerinin difüzyonu gerçekleşmekte, bu durum polimer zincirleri arasında plastikleşmeye yol açarak elastisite modülünde ve mekanik dayanımda azalmaya neden olmaktadır. Ayrıca hidrotermal yaşlandırma koşullarında ara yüzey bağlarının zayıflaması, adhezyon dayanımının düşmesine ve erken ara yüzey hasarlarının oluşmasına sebebiyet verebilmektedir.

Sıcaklık etkisi ise yapıştırıcı sistemin cam geçiş sıcaklığı (T_g) ile doğrudan ilişkilidir. T_g' ye yaklaşan veya T_g' nin üzerine çıkan servis sıcaklıklarında polimer matris yumuşamakta, yük transfer kabiliyeti azalmakta ve sürünme (creep) deformasyonları artmaktadır. Termal genleşme katsayıları farklı olan adherent ve yapıştırıcı tabaka arasında oluşan genleşme uyumsuzlukları da ilave iç gerilmelerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Kimyasal ortamlara maruziyet (asit, baz, solvent vb.) polimer ağ yapısında zincir kopmaları, çapraz bağ yoğunluğunda azalma ve ara yüzey kimyasal bağlarında zayıflama gibi geri dönüşümsüz hasarlara yol açabilmektedir. Bu tür kimyasal bozunmalar, bağlantının hem statik hem de yorulma dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir.

Termal dalgalanmalar ise tekrarlı genleşme–büzülme döngülerine bağlı olarak ara yüzeyde mikro çatlak oluşumunu hızlandırmakta ve yaşlandırma sürecini ivmelendirmektedir. Uzun süreli çevresel yaşlandırma sonucunda yapıştırma bağlantılarında adhezyon hasarının baskın hale geldiği sıklıkla rapor edilmektedir. Sonuç olarak çevresel dayanım ve yaşlandırma davranışı, polimerik yapıştırıcı sistemlerin gerçek servis koşullarındaki güvenilirliğinin değerlendirilmesinde kritik bir parametre olup; hızlandırılmış

yaşlandırma testleri ile bu etkilerin deneysel olarak incelenmesi büyük önem taşımaktadır (Ceylan, Ozun, Çoban, Bora, & Kutluk, 2023). Yapıştırma bağlantılarının çevresel koşullar altında maruz kaldığı yaşlandırma süreçleri Şekil 17’de şematik olarak gösterilmektedir.

Şekil 17. Yapıştırma bağlantılarında yaşlandırma testi



(Kandas & Ozdemir, 2024)

17. Sayısal Modelleme ve Simülasyon

Polimerik yapıştırıcı ve kompozit bağlantıların mekanik davranışının öngörülmesinde sayısal modelleme teknikleri önemli bir araçtır. Deneysel çalışmalarla desteklenen simülasyonlar, gerilme dağılımı, hasar oluşumu ve bağlantı optimizasyonu hakkında detaylı bilgi sunmaktadır.

- **Sonlu Elemanlar Analizi (FEA)**

Sonlu Elemanlar Analizi, yapıştırıcı bağlantılardaki gerilme ve deformasyon dağılımının hesaplanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Farklı yükleme ve geometri koşullarının sanal ortamda incelenmesine olanak tanır.

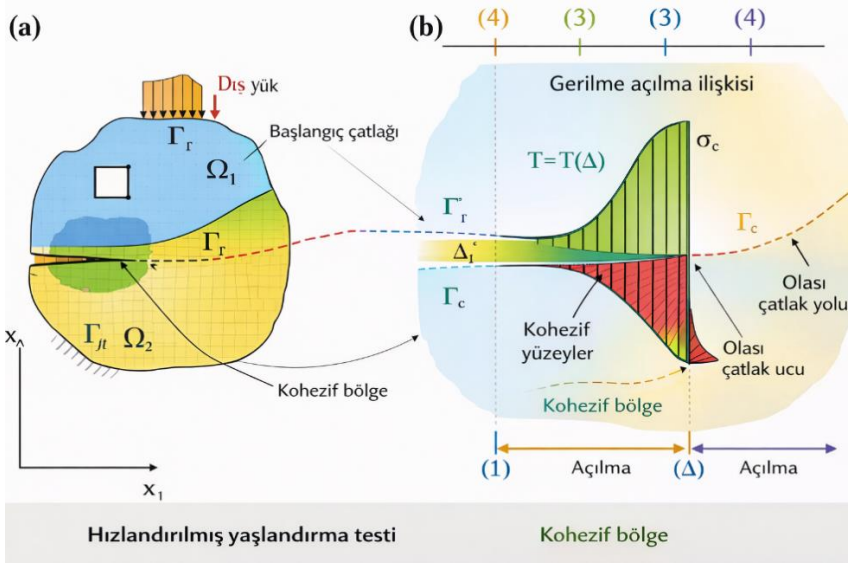
- **Gerilme Dağılımı Modellemesi**

Yapıştırıcı tabaka boyunca oluşan kayma ve soyulma gerilmeleri, bağlantı performansını belirleyen kritik parametrelerdir. Modellemede tabaka kalınlığı ve elastik özellikler önemli rol oynamaktadır.

- **Hasar Mekanîği Yaklaşımları**

Kırılma ve hasar ilerlemesi, kohezif zon modelleri ve kırılma mekanîği temelli yaklaşımlarla analiz edilmektedir. Bu yöntemler, bağlantı ömrünün tahmin edilmesinde kullanılmaktadır. Bu görsel, **kohezif zon modeli (Cohesive Zone Model – CZM)** temelinde yapıştırma bağlantılarında çatlak oluşumu ve ilerlemesini açıklayan iki parçalı (a–b) bir şemadır. Özellikle sayısal modelleme, kırılma mekanîği ve hasar ilerleme analizlerinde kullanılır (Abdel-Gwad, Elkaseer, Saber, & Elqazzaz, 2016). Kohezif zon yaklaşımı esas alınarak çatlak başlangıcı ve ilerlemesinin gerilme–açılma ilişkisi ile modellenmesi Şekil 19’da şematik olarak gösterilmektedir.

Şekil 19. Yapıştırma bağlantılarında kohezif zon yaklaşımına göre çatlak başlangıcı ve ilerlemesinin gerilme–açılma ilişkisi ile gösterimi.



Bu görsel, yapıştırma bağlantılarında hasar oluşumu ve çatlak ilerleme mekanizmasını açıklayan kohezif zon yaklaşımının temel prensiplerini ortaya koymaktadır. Buna göre, çatlak ilerlemesi ani ve keskin bir kırılma şeklinde gerçekleşmemekte; aksine kohezif zon olarak tanımlanan bölgede enerji tüketilerek kademeli biçimde ilerlemektedir. Bu süreçte malzeme, tamamen ayrılmadan önce belirli bir hasar evresinden geçmektedir. Hasar gelişimi, gerilme–açılma (traction–separation) ilişkisi kullanılarak sayısal olarak modellenabilmektedir. Bu ilişki sayesinde ara yüzeyde oluşan gerilme dağılımı, rijitlik kaybı ve ilerleyen hasar miktarı nicel olarak tanımlanabilmektedir. Söz konusu yaklaşım, özellikle yapıştırma bağlantılarında kırılma davranışının anlaşılması, hasar ilerleme sürecinin izlenmesi ve bağlantı ömrünün tahmin edilmesi amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sayede farklı yükleme koşulları

altında bağlantının performansı öngörülebilmekte ve tasarım optimizasyonu yapılabilmektedir.

(a) Makro Ölçekli Hasar ve Bölgesel Tanımlama

Şeklin sol tarafı, yapıştırma bağlantısının veya çok fazlı bir yapının makro ölçekteki hasar davranışını göstermektedir. Bu gösterimde, yapıya etki eden dış yük (f) sistem üzerinde bir gerilme alanı oluşturarak çatlak başlangıcını tetikleyen temel mekanik etkiyi temsil etmektedir. Yapı içerisinde mevcut bulunan ya da yükleme etkisiyle oluşan başlangıç çatlağı, hasar sürecinin ilk evresini oluşturmaktadır. Modelde yer alan Ω_1 ve Ω_2 bölgeleri, malzemenin farklı mekanik özelliklere sahip alt bölgelerini ifade etmektedir. Bu bölgeler, örneğin yapıştırılan malzeme ile yapıştırıcı tabakası veya iki farklı fazdan oluşan çok bileşenli sistemler olarak düşünülebilmektedir.

Çatlağın ilerlediği mevcut kırılma yüzeyi Γ_r ile gösterilmekte olup, bu yüzey malzemenin tamamen ayrıldığı bölgeyi tanımlamaktadır. Çatlak ucunun hemen önünde yer alan Γ_c bölgesi ise kohezif bölge olarak tanımlanmaktadır. Bu bölge, henüz tam ayrılmanın gerçekleşmediği ancak hasar gelişiminin başladığı bir geçiş zonudur. Kohezif bölgede gerilme aktarımı devam etmekte, ancak bağ dayanımı kademeli olarak azalmaktadır. Dolayısıyla bu yaklaşım, çatlak ilerlemesinin yalnızca keskin bir kırılma hattı boyunca değil, belirli bir enerji tüketimi zonu içerisinde gerçekleştiğini vurgulamaktadır (Atahan & Apalak, 2023).

(b) Kohezif Zon ve Gerilme–Açılma İlişkisi

Şeklin sağ tarafı, çatlak ucunun büyütülmüş görünümünü ve kohezif zon davranışını detaylı olarak göstermektedir. Bu bölgede hasar gelişimi, klasik keskin çatlak yaklaşımından farklı olarak, belirli bir süreç ve enerji tüketimi ile ilerleyen kademeli bir ayrılma mekanizması şeklinde ele alınmaktadır.

Kohezif zon modellemesinin temelini oluşturan gerilme–açılma (traction–separation) ilişkisi, kohezif yüzeylerde oluşan çekme ve/veya kayma gerilmelerinin, çatlak açılma miktarına (Δ) bağlı değişimini tanımlamaktadır. $T = T(\Delta)$ bağıntısı ile ifade edilen bu ilişki, ara yüzeyin yük taşıma kapasitesinin hasar ilerledikçe nasıl azaldığını sayısal olarak ortaya koymaktadır. Bu eğri üzerinde yer alan σ_c değeri, maksimum kohezif gerilmeyi temsil etmekte olup, yapıştırıcı ara yüzeyinin taşıyabileceği en yüksek gerilme seviyesini ifade etmektedir. Açılma miktarının Δ_c kritik değerine ulaşmasıyla birlikte bağ tamamen kopmakta ve çatlak ilerlemesi gerçekleşmektedir.

Kohezif yüzeyler, çatlak tamamen açılmadan önce dahi yük taşımaya devam eden bağ bölgeleri olarak tanımlanmaktadır. Bu nedenle enerji tüketiminin önemli bir bölümü bu yüzeylerde meydana gelmektedir. Kohezif bölge ise hasarın kademeli olarak ilerlediği, gerilme aktarımının azalarak sürdüğü geçiş zonudur. Bu yaklaşım, kırılma davranışının ani ve gevrek bir kopma yerine, yumuşak geçişli bir hasar süreci ile geliştiğini göstermektedir. Şemada ayrıca olası çatlak ucu ve çatlak ilerleme yolu da gösterilmektedir. Çatlağın ilerleme yönü; malzeme heterojenliği, ara yüzey özellikleri ve gerilme dağılımı gibi parametrelere bağlı olarak değişebilmektedir. Bu nedenle kohezif zon yaklaşımı, çatlak rotasının ve kırılma davranışının öngörülmesinde önemli bir modelleme aracı olarak kullanılmaktadır.

17. Sürdürülebilirlik ve Çevreci Yapıştırıcılar

Artan çevresel farkındalık ve sürdürülebilir üretim politikaları, polimerik yapıştırıcı teknolojilerinde çevre dostu sistemlerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Düşük emisyonlu, geri dönüştürülebilir ve yenilenebilir kaynaklı yapıştırıcılar üzerine çalışmalar hız kazanmıştır. Polimerik yapıştırıcı teknolojileri uzun yıllar boyunca yüksek performans odaklı geliştirilmiş olsa da, günümüzde çevresel etkilerin azaltılması en az mekanik performans

kadar kritik bir tasarım kriteri haline gelmiştir. Artan çevresel farkındalık, karbon salımının düşürülmesine yönelik uluslararası politikalar ve sürdürülebilir üretim hedefleri; yapıştırıcı sektörünü daha çevre dostu, düşük emisyonlu ve geri kazanılabilir sistemler geliştirmeye yönlendirmiştir. Bu doğrultuda araştırmalar, fosil bazlı hammaddelere alternatif oluşturabilecek yenilenebilir kaynaklı polimerlere, geri dönüştürülebilir kompozit yapılara ve uçucu organik bileşik (VOC) emisyonu düşük formülasyonlara odaklanmaktadır.

- **Biyo-Bazlı Yapıştırıcılar**

Biyo-bazlı yapıştırıcılar, petro-kimyasal kökenli reçineler yerine yenilenebilir biyokütle kaynaklarından elde edilen polimerleri esas alan çevre dostu yapıştırıcı sistemleridir. Bu kapsamda bitkisel yağlar (soya, hint ve ayçiçeği yağları gibi), lignin, nişasta ve selüloz türevleri en yaygın kullanılan hammadde kaynakları arasında yer almaktadır. Söz konusu biyopolimerler, sürdürülebilir malzeme teknolojileri açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Bu yapıştırıcı sistemleri, karbon nötr döngüye katkı sağlamaları, fosil kaynak tüketimini azaltmaları ve biyobozunur ya da kısmen biyobazlı yapı sunabilmeleri bakımından öne çıkmaktadır. Böylece çevresel etkilerin azaltılması ve yeşil kimya prensiplerine uyum sağlanması mümkün olmaktadır. Ayrıca biyobazlı hammaddeler, çeşitli fonksiyonelleştirme reaksiyonları aracılığıyla epoksi, poliüretan ve akrilik esaslı yapıştırıcı sistemlerine entegre edilebilmektedir. Bu sayede yalnızca çevresel sürdürülebilirlik değil, aynı zamanda rekabetçi mekanik performans, yeterli yapışma dayanımı ve uygulama uygunluğu da elde edilebilmektedir (Favi, Yi, Lenaghan, Xia, & Zhang, 2014).

- **Geri Dönüştürülebilir Kompozitler**

Geleneksel termoset esaslı yapıştırıcı ve kompozit sistemler, yüksek derecede çapraz bağlı üç boyutlu ağ yapıları nedeniyle

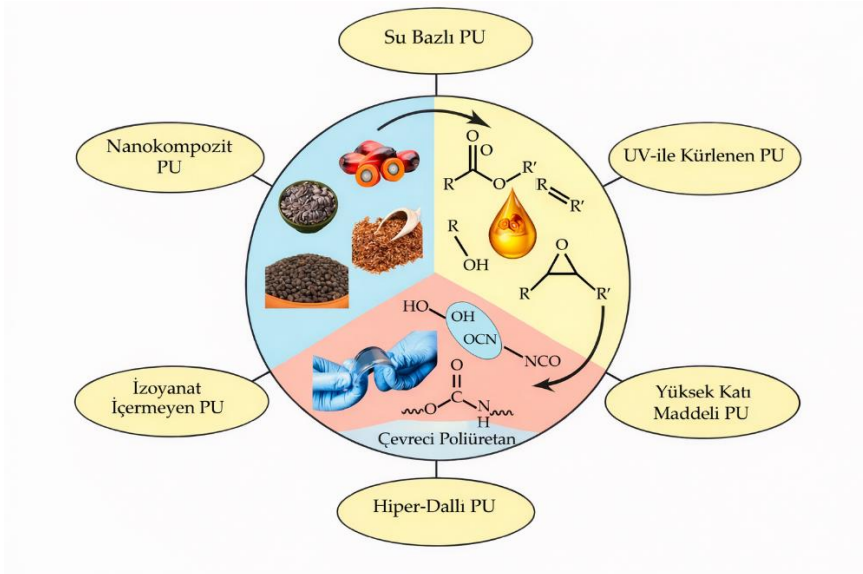
yeniden işlenebilirlik özelliği göstermemektedir. Kırılma sonrası oluşan bu kalıcı ağ yapısı, malzemenin yeniden eritilmesini veya şekillendirilmesini engellemekte; dolayısıyla servis ömrü sonunda geri dönüşüm süreçlerini önemli ölçüde zorlaştırmaktadır. Buna karşılık termoplastik matrisli yapıştırıcı ve kompozit sistemler, ısı etki altında yumuşayarak yeniden şekillendirilebilme özelliğine sahiptir. Bu sistemler, ısıtıldıklarında tekrar işlenebilmekte; mekanik geri dönüşüm yöntemleriyle yeniden öğütülüp kalıplanabilmekte veya uygun kimyasal proseslerle geri kazanılabilmektedir. Böylece kompozit atıkların yeniden kullanımı mümkün hâle gelmekte ve malzeme döngüsellliği desteklenmektedir. Söz konusu geri dönüştürülebilirlik avantajı, özellikle otomotiv, havacılık ve rüzgâr enerjisi gibi yüksek hacimli kompozit kullanımının söz konusu olduğu sektörlerde sürdürülebilir malzeme yönetimi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu yaklaşım, hem çevresel etkiyi azaltmakta hem de yaşam döngüsü maliyetlerinin optimize edilmesine katkı sağlamaktadır.

- **Düşük VOC İçerikli Sistemler**

Uçucu organik bileşikler (VOC), yapıştırıcı uygulamaları sırasında atmosfere salınarak hem çevresel kirliliğe hem de insan sağlığı açısından çeşitli risklere yol açabilmektedir. Bu bileşikler; solunum yolu irritasyonu, toksik etki ve kapalı ortamlarda hava kalitesinin bozulması gibi olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir. Bu nedenle modern yapıştırıcı teknolojileri, VOC emisyonlarının minimize edilmesine yönelik formülasyon ve proses geliştirme çalışmalarına odaklanmaktadır. Bu kapsamda geliştirilen başlıca düşük VOC içerikli sistemler arasında su bazlı yapıştırıcılar, solventsiz (%100 katı) sistemler ve yüksek katı maddeli formülasyonlar yer almaktadır. Su bazlı yapıştırıcılarda organik solventler yerine su dispersiyon ortamı kullanılmakta, böylece uçucu bileşen salınımı önemli ölçüde azaltılmaktadır.

Solventsiz sistemlerde ise kürlenme süreci sırasında uçucu bileşen açığa çıkmamakta, bu da emisyonları minimum seviyeye indirmektedir. Yüksek katı maddeli formülasyonlarda solvent oranı oldukça düşük tutulmakta, böylece uygulama sırasında atmosfere salınan VOC miktarı sınırlandırılmaktadır. Bu yaklaşımlar sayesinde i  güvenliği koşulları iyile tirilmekte, kapalı ortamlarda hava kalitesi korunmakta ve ulusal/uluslararası çevresel regülasyonlara uyum sağlanabilmektedir. Dolayısıyla düşük VOC içerikli yapıştırıcı sistemleri, sürdürülebilir üretim ve  evre dostu malzeme teknolojileri açısından kritik bir gelişim alanı olarak değerlendirilmektedir. Sürdürülebilir poliüretan yapıştırıcı sistemlerinin sınıflandırılması ve çevreci modifikasyon stratejileri  ekil 20’de şematik olarak gösterilmektedir.

Şekil 20. Sürdürülebilir poliüretan yapıştırıcı sistemlerinin sınıflandırılması ve çevreci modifikasyon yaklaşımlarının şematik gösterimi.



Sürdürülebilir yapıştırıcı teknolojileri, çevresel etkilerin azaltılması ve kaynak verimliliğinin artırılması amacıyla üç temel hedefe odaklanmaktadır. Bu hedeflerin ilki, yenilenebilir ham madde kullanımının yaygınlaştırılmasıdır. Biyokütle temelli polimerler ve doğal kaynaklı reçineler aracılığıyla fosil kökenli hammaddelere olan bağımlılığın azaltılması amaçlanmaktadır. İkinci temel yaklaşım, geri dönüştürülebilir malzeme tasarımına yöneliktir. Bu kapsamda yeniden işlenebilir matris sistemleri, sökülebilir yapıştırıcı teknolojileri ve döngüsel malzeme kullanımını destekleyen kompozit tasarımlar geliştirilmektedir. Üçüncü hedef ise üretim ve uygulama süreçlerinde emisyon ve toksisite düzeylerinin minimize edilmesidir. Düşük VOC içerikli formülasyonlar, solventsiz sistemler ve çevre dostu kurlenme mekanizmaları bu amaca hizmet etmektedir.

Bu sürdürülebilirlik odaklı yaklaşımlar, yalnızca çevresel fayda sağlamakla sınırlı kalmamakta; aynı zamanda endüstride yeşil üretim sertifikasyonlarının elde edilmesi, karbon ayak izinin azaltılması ve döngüsel ekonomi hedeflerine uyum sağlanması açısından da stratejik bir önem taşımaktadır.

18. Gelecek Perspektifler ve Yeni Nesil Teknolojiler

Polimerik yapıştırıcılar ve kompozit bağlantı teknolojileri, malzeme bilimi, nanoteknoloji ve fonksiyonel polimer tasarımı alanlarındaki gelişmelere paralel olarak hızlı bir dönüşüm sürecinden geçmektedir. Geleneksel yapıştırıcı sistemler yalnızca mekanik birleştirme fonksiyonu üstlenirken, yeni nesil yapıştırıcıların çok fonksiyonlu, uyarlanabilir ve uzun ömürlü performans sunması hedeflenmektedir.

Özellikle hafiflik, yüksek dayanım, akıllı tepki mekanizmaları ve sürdürülebilirlik, geleceğin yapıştırıcı tasarımında belirleyici parametreler olarak öne çıkmaktadır.

- **Akıllı Yapıştırıcılar**

Akıllı yapıştırıcı sistemleri, çevresel veya harici uyarılara kontrollü tepki verebilen fonksiyonel polimer yapılardan oluşan ileri teknoloji yapıştırıcı malzemelerdir. Bu sistemlerde yapışma davranışı, dış koşullara bağlı olarak değiştirilebilmekte ve gerektiğinde geri döndürülebilir özellikler sergileyebilmektedir. Söz konusu uyarılar arasında sıcaklık değişimleri, pH seviyesi, nem oranı, manyetik alan ve elektriksel uyarılar yer almakta; bu parametreler yapıştırıcının moleküler yapısında veya ara yüzey etkileşimlerinde değişim oluşturarak bağlantı performansını kontrol edilebilir hâle getirmektedir.

Akıllı yapıştırıcıların en önemli avantajlarından biri, kontrollü yapışma–ayrılma kabiliyetidir. Bu özellik sayesinde bağlantılar, birleştirilen yüzeylere zarar vermeden ve kalıntı bırakmadan sökülebilmektedir. Ayrıca yeniden bağlanabilirlik özelliği, aynı yapıştırıcı yüzeylerin tekrar kullanılarak yeniden montaj yapılmasına imkân tanımaktadır. Bunun yanında, uyarlanabilir mekanik özellikler sayesinde yapıştırıcının sertlik veya elastisite gibi mekanik parametreleri ortam koşullarına bağlı olarak değişebilmekte; böylece dinamik yükleme koşullarına daha uyumlu bağlantılar elde edilebilmektedir. Bu üstün fonksiyonel özellikleri nedeniyle akıllı yapıştırıcı sistemleri; elektronik paketlenme teknolojileri, biyomedikal cihaz montajı ve geçici montaj uygulamaları gibi hassas ve kontrollü birleştirme gerektiren alanlarda önemli bir kullanım potansiyeline sahiptir.

- **Kendini Onaran Sistemler**

Kendini onaran (self-healing) yapıştırıcılar, malzeme bünyesinde hasar oluştuğunda dış müdahaleye gerek kalmaksızın yapısal bütünlüğünü kısmen veya tamamen geri kazanabilen ileri fonksiyonel malzeme sistemleri olarak tanımlanmaktadır. Bu sistemler, çatlak oluşumu ve hasar ilerlemesi gibi servis ömrünü sınırlayan mekanizmaları geciktirmeyi veya ortadan kaldırmayı

amaçlayan yenilikçi bir yaklaşıma dayanmaktadır. Kendini onarma teknolojisi temelde iki ana mekanizma üzerinden geliştirilmektedir. Bunlardan ilki mikrokapsül tabanlı sistemlerdir. Bu yaklaşımda, yapıştırıcı matrise homojen biçimde dağıtılmış mikrokapsüller içerisinde iyileştirici ajanlar depolanmaktadır.

Çatlak oluştuğunda kapsüller kırılmakta ve açığa çıkan sıvı iyileştirici ajan hasarlı bölgeyi doldurarak polimerizasyon veya kimyasal reaksiyon yoluyla onarım sağlamaktadır. İkinci yaklaşım ise damar (vasküler) ağ yapılarıdır. Bu sistemlerde yapı içerisine entegre edilmiş mikrokannallar boyunca dolaşan iyileştirici sıvılar, hasar bölgesine taşınmakta ve burada reaksiyona girerek çatlak boşluğunu doldurmakta ve yapısal sürekliliği yeniden tesis etmektedir. Bu kendini onaran yapıştırıcı sistemler sayesinde çatlak ilerlemesi önemli ölçüde yavaşlatılabilmekte, yorulma ömrü uzatılmakta ve bakım-onarım maliyetleri azaltılabilmektedir.

Özellikle havacılık yapıları, otomotiv bileşenleri ve rüzgâr türbini kanatları gibi erişimi zor, büyük ölçekli ve servis dışı bırakılması maliyetli yapılarda önemli avantajlar sunmaktadır. Bu nedenle kendini onaran yapıştırıcı teknolojileri, uzun servis ömrü ve yapısal güvenilirlik gerektiren mühendislik uygulamaları açısından stratejik bir araştırma ve geliştirme alanı olarak değerlendirilmektedir.

- **Nano-Mühendislik Yaklaşımları**

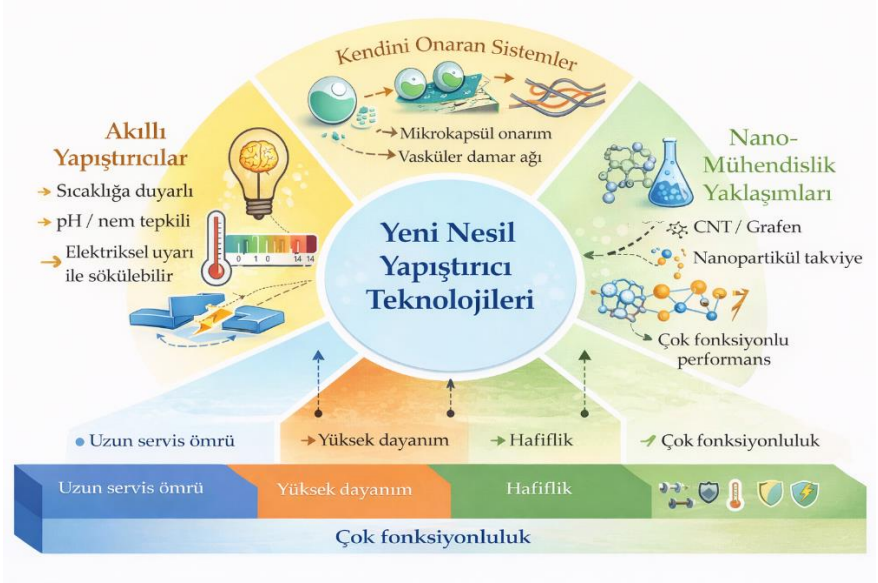
Nanoteknoloji, yapıştırıcı performansının moleküler ve nano ölçekte kontrol edilmesine imkân tanıyan en güçlü mühendislik araçlarından biri olarak değerlendirilmektedir. Yapıştırıcı matrisine ilave edilen nano boyutlu katkı maddeleri, oldukça düşük takviye oranlarında dahi ara yüzey etkileşimlerini, yük transfer mekanizmalarını ve matris bütünlüğünü iyileştirerek belirgin performans artışları sağlayabilmektedir.

Bu durum, nano ölçekteki yüksek özgül yüzey alanı ve gelişmiş faz etkileşimleri ile açıklanmaktadır. Yapıştırıcı

sistemlerinde yaygın olarak kullanılan nano katkılar arasında silika (SiO_2), alümina (Al_2O_3) ve manyetit (Fe_3O_4) gibi inorganik nanopartiküller; karbon nanotüpler (CNT); grafen ve grafen oksit türevleri ile nanokil ve selüloz nanofiberler yer almaktadır. Bu nano takviyeler, yapıştırıcı matris içerisinde homojen dağıldıklarında çok yönlü fonksiyonel kazanımlar sunmaktadır. Nano-mühendislik katkıları sayesinde yapıştırıcı sistemlerinde mekanik dayanım artışı, termal iletkenlik gelişimi, elektriksel iletkenlik kazandırılması, bariyer ve korozyon direncinin iyileştirilmesi ile yorulma ve çatlak ilerleme direncinin artırılması gibi çok sayıda performans iyileştirmesi elde edilebilmektedir.

Böylece yapıştırıcılar yalnızca birleştirici malzemeler olmaktan çıkmakta, aynı zamanda fonksiyonel mühendislik malzemeleri hâline gelmektedir. Yeni nesil yapıştırıcı teknolojilerinin gelişimi temelde üç ana eksen üzerinde ilerlemektedir. Bunlar; fonksiyonel uyaranlara tepki verebilen akıllı sistemlerin geliştirilmesi, hasarı otonom olarak onarabilen uzun ömürlü yapısal yapıştırıcıların tasarlanması ve nano ölçekte mühendislik yaklaşımıyla geliştirilmiş çok fonksiyonlu kompozit yapıştırıcı sistemlerinin üretilmesidir. Söz konusu teknolojik gelişmeler; hafif yapı tasarımı, enerji verimliliği, bakım ve onarım maliyetlerinin azaltılması ile sürdürülebilir mühendislik uygulamalarının yaygınlaştırılması açısından kritik bir rol oynamaktadır. Fonksiyonel performansı artırmaya yönelik geliştirilen yeni nesil yapıştırıcı teknolojileri Şekil 21’de şematik olarak gösterilmektedir.

Şekil 21. Yeni nesil yapıştırıcı teknolojileri



Kaynakça

Abdel-Gwad, E., Elkaseer, A., Saber, M., & Elqazzaz, M. S. (2016). Evaluation of Mixed Structural Steel lap Joints Using Experimental and Finite Element Methods. *Port-Said Engineering Research Journal*, 20(2), 124–131.

Adams, R. D. (2021). *Adhesive bonding: science, technology and applications*. Woodhead Publishing.

Adams, R. D., Comyn, J., & Wake, W. C. (1997). *Structural adhesive joints in engineering*. Springer Science & Business Media.

Aradhana, R., Mohanty, S., & Nayak, S. K. (2018). High performance epoxy nanocomposite adhesive: Effect of nanofillers on adhesive strength, curing and degradation kinetics. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 84, 238–249.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2018.03.013>

Atahan, M. G., & Apalak, M. K. (2023). Finite Element Analysis of Low-Speed Oblique Impact Behavior of Adhesively Bonded Composite Single-Lap Joints. *Applied Composite Materials*, 30(3), 955–985.

Athavale, S. P. (2018). *Hand Book of Pressure Sensitive Adhesives and Coatings: Pressure Sensitive Adhesives Technology*. Notion Press.

Balasubramanian, M. (2014). *Composite materials and processing* (Vol. 711). CRC press Boca Raton.

Bao, S., Daunch, W. A., Sun, Y., Rinaldi, P. L., Marcinko, J. J., & Phanopoulos, C. (1999). Solid state NMR studies of polymeric diphenylmethane diisocyanate (PMDI)

derived species in wood. *The Journal of Adhesion*, 71(4), 377–394.

Baroncini, E. A., Kumar Yadav, S., Palmese, G. R., & Stanzione III, J. F. (2016). Recent advances in bio-based epoxy resins and bio-based epoxy curing agents. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(45).

Belnoue, J. P.-H., & Hallett, S. R. (2016). Cohesive/adhesive failure interaction in ductile adhesive joints Part I: A smeared-crack model for cohesive failure. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 68, 359–368.

Bikerman, J. J. (2013). *The science of adhesive joints*. Elsevier.

Buchwalter, L. P. (1990). Adhesion of polyimides to metal and ceramic surfaces: an overview. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 4(1), 697–721.

Ceylan, R., Ozun, E., Çoban, O., Bora, M. Ö., & Kutluk, T. (2023). The effect of hygrothermal aging on the adhesion performance of nanomaterial reinforced aluminium adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 121, 103304. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103304>

Delmonte, J. (1947). The technology of adhesives. (*No Title*).

Ebnesajjad, S., & Ebnesajjad, C. (2013). *Surface treatment of materials for adhesive bonding*. William Andrew.

Ebnesajjad, S., & Landrock, A. H. (2014). *Adhesives technology handbook*. William Andrew.

Favi, P. M., Yi, S., Lenaghan, S. C., Xia, L., & Zhang, M. (2014). Inspiration from the natural world: from bio-adhesives to bio-inspired adhesives. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 28(3–4), 290–319.

First, U. S. (2003). Domestic manufacture of fish glues (isinglass). *Handbook of Adhesive Technology, Revised and Expanded*, 3.

Hadjichristidis, N., Iatrou, H., Pitsikalis, M., & Mays, J. (2006). Macromolecular architectures by living and controlled/living polymerizations. *Progress in Polymer Science*, 31(12), 1068–1132.

Harito, C., Bavykin, D. V, Yuliarto, B., Dipojono, H. K., & Walsh, F. C. (2019). Polymer nanocomposites having a high filler content: synthesis, structures, properties, and applications. *Nanoscale*, 11(11), 4653–4682.

Jenkins, A. D. (2013). *Polymer science: a materials science handbook*. Elsevier.

Jeong Lee, S., & Gil Lee, D. (1996). Development of a fatigue failure model for the adhesively bonded tubular single lap joint under dynamic torsional loading. *The Journal of Adhesion*, 56(1–4), 157–169.

Kandas, H., & Ozdemir, O. (2024). An investigation of the mechanical characteristics of natural particle-reinforced glass and epoxy composites after immersion in acidic and basic aging solutions. *Polymer Composites*, 45(2), 1288–1299.

Kasper, Y., Albiez, M., Ummenhofer, T., Mayer, C., Meier, T., Choffat, F., ... Pasternak, H. (2021). Application of toughened epoxy-adhesives for strengthening of fatigue-

damaged steel structures. *Construction and Building Materials*, 275, 121579.

Kellar, E. J. C. (2011). 16 Selection of Adhesives. *Handbook of Adhesion Technology*, 373.

Kinloch, P. J. (1980). *Samoan Health Practices in Wellington*. Management Services & Research Unit, Department of Health.

Lee, H. (1981). *The bonded orthodontic appliance: a monograph*. Pasadena Technology Press.

Lubin, G. (2013). *Handbook of composites*. Springer Science & Business Media.

Machado, J. J. M., Marques, E. A. S., & da Silva, L. F. M. (2018). Adhesives and adhesive joints under impact loadings: An overview. *The Journal of Adhesion*, 94(6), 421–452.

Matykiewicz, D. (2020). Hybrid Epoxy Composites with Both Powder and Fiber Filler: A Review of Mechanical and Thermomechanical Properties. *Materials*. doi:10.3390/ma13081802

McBain, J. W., & Hopkins, D. G. (2002). On adhesives and adhesive action. *The Journal of Physical Chemistry*, 29(2), 188–204.

Pethrick, R. A. (2015). Design and ageing of adhesives for structural adhesive bonding—a review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 229(5), 349–379.

Petrie, E. M. (1996). Plastic and elastomer adhesives (Chapter 7). *Handbook of Plastics and Elastomers*. McGraw-Hill, New York.

Petrie, Edward M. (2000). *Handbook of adhesives and sealants*.

Rudawska, A. (2017). Epoxy adhesives. In *Handbook of adhesive technology* (pp. 415–441). CRC Press.

Scarponi, C., & Pizzinelli, C. S. (2009). Interface and mechanical properties of natural fibres reinforced composites: a review. *International Journal of Materials and Product Technology*, 36(1–4), 278–303.

Schijve, J. (2001). *Fatigue of structures and materials*. Springer.

Shirai, T., Watanabe, H., Fuji, M., & Takahashi, M. (2009). Structural properties and surface characteristics on aluminum oxide powders. *Annual Report of the Ceramics Research Laboratory Nagoya Institute of Technology*, 9, 23–31.

Silva, L. F. M., Öchsner, A., & Adams, R. D. (2011). *Handbook of adhesion technology. (No Title)*.

Sunday, O. O. (2015). Strength of adhesive bonded joints: Comparative strength of adhesives. *International Journal of Engineering and Technical Research*, 3(8), 58–62.

Udatha, P., Babu, Y. N., Satyadev, M., & Bhagavathi, L. R. (2020). Effect of natural fibers reinforcement on lap-shear strength of adhesive bonded joints. *Materials Today: Proceedings*, 23, 541–544.

Vasenin, R. M. (1969). Adhesion, fundamentals and practice. *Ministry of Technology, MacLaren, London*.

VOYUTSKII, S. S. (1983). Autohesion and adhesion of high polymers New-York: Wiley Interscience, 1963
□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□
□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□
□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□
□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□
□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□
□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□
□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□
□□□□□□□□. *Continuum Thermodynamics Journal of Applied Mechanics*, 3, 1010–1020.

Wake, W. C. (1978). Theories of adhesion and uses of adhesives: a review. *Polymer*, 19(3), 291–308.

Zhao, X., Lu, S., Li, W., Zhang, S., Li, K., Nawaz, K., ... Ozcan, S. (2022). Epoxy as filler or matrix for polymer composites. *Epoxy-Based Composites*, 1.

METAL YANGINLARI

CHAPTER 4

ZEHRA YILDIZ

GİRİŞ

Yangın, istemediğimiz ve kontrolümüz dışı gerçekleşen zincirleme yanma reaksiyonudur. Yanmanın gerçekleşmesi için üç unsurun bir arada olması gerekir: yanıcı, oksijen ve ısı. Bu üç unsurun bir araya gelmesi ile yanma üçgeni oluşur. Yanıcı madde, oksijen ve ısı bu üçgenin kenarlarıdır. Kenarlardan biri olmazsa üçgen tamamlanmaz, yanma olayı gerçekleşmez.

Birkaç kimyasal madde hariç her şey uygun koşullarda yanar. Havadaki oksijen miktarı %21 olduğu için yanma için yeterli oksijeni sağlar. Yanma olayının gerçekleşmesi için gerekli oksijen miktarı yanıcı maddeye göre değişir. Çoğu maddenin yanması için en az %16 oranında oksijene gereksinimi vardır. Ancak yanıcı madde türüne göre yanma için gerekli oksijen miktarı değişiklik göstermektedir. Örneğin, mum %15, bütan %12 ve hidrojen yaklaşık %5.8 oksijen altında söner. Çoğu maddenin yanmasında oksijen oranı %14'nin altına düştüğünde yanma gerçekleşmez (URL-1, 2025). Oksijen miktarı düştüğünde yanma hızı yavaşlar, alev boyutu

Prof. Dr., Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Temel Bilimleri, Mersin, zyildiz@tarsus.edu.tr, Orcid ID: 0000-0003-1304-4857

küçülür, duman yoğunluğu artar. Aynı zamanda yanıcı madde türüne göre yetersiz oksijen ortamda olduğunda karbon iki oksijen atomu ile birleşip CO_2 değil ancak bir oksijen atomu ile

birleşip CO oluşur ve miktarı artar. CO duman yoğunluğunun artışı ile kendini gösterir, boğucu ve yanıcı bir gazdır.

Yanma olayının meydana gelmesi için uygun yakıt/oksijen oranında olması gerekir. Bu oran yanabilirlik sınırıdır. Hava+yakıt karışımında yakıt miktarı gerekli miktardan az ise karışım fakirdir

ve alt yanabilme limitinin altındadır. Eğer karışımdaki yakıt gerekenden çok fazla ise bu durumda yakıtın üst yanabilme limitinin üzerindedir ve karışım yakıt yönünden zengindir. Alt yanabilme limitin altında ve üst yanabilme limitinin üstünde yeterli hava ya da yakıt olmadığı için yanma meydana gelmez. Alt yanma limiti ve üst yanma limiti arasında kalan bölgede yanma meydana gelir ve bu bölge yanabilme aralığıdır.

Her ortamda yakıt ve oksijen bulunmasına rağmen yeterli ısı olmadığından yanma gerçekleşmemektedir. Yanma da kilit rol ısıdır. Bir tepkimenin başlaması için tepkimeye girecek maddelerin aktivasyon enerjisi dediğimiz bir enerji bariyerini aşması gerekmektedir. Yanma olayında aktivasyon enerjisi tutuşma noktasına tekabül etmektedir. Tutuşma sıcaklığı, dışardan bir alev teması olmaksızın yanma için gereken buharın kendiliğinden üretildiği minimum sıcaklıktır. Yakıt tutuştuktan sonra ısı çekilse bile yanma olayı kendiliğinden devam eder.

Yangın Sınıfları

Yanıcı maddeler fiziksel haline göre katı, sıvı ve gaz olarak sınıflandırılır. Yanma olayında yanıcı maddenin fiziksel hali, yangına müdahalede ve söndürmede önemlidir. Yanma olayında yanıcı maddenin buhar fazına geçmesi gerekir. Katı ya da sıvı madde yanmaz, buharı yanar. Dolayısıyla gazlar sıvılardan, sıvılar da katı maddelerden daha kolay tutuşabilme özelliğine sahiptir. Katı yanarken önce sıvı fazına sonra buhar fazına geçtikten sonra yanmaktadır. Ancak süblimleşebilen katılar doğrudan buhar fazına geçerek yanabilir. Katı maddelerde, yüzey alanın kütleye oranı maddenin tutuşma hızını etkilemektedir. Yüzey alanı arttıkça temas yüzeyi dolayısıyla yanma hızı artar. Ayrıca katılar yanarken alevin yanısıra korlaşma da görülür ve ısıyı sağlayan kordur. Sıvılar, buhar fazına geçtikten sonra yanarlar. Sıvı yanıcı maddeler, katı yanıcı maddelere göre daha kolay ve hızlı tutuşur. Sıvı her sıcaklıkta buharlaşır ve tutuşturma kaynağının ortamda olması ile yanma meydana gelir. Sıvı haldeki yanıcılarda yanma da sadece alev görülür, korlaşma ve yüzey altında yanma gerçekleşmez. Gaz halindeki yanıcı maddeler kolay ve hızlı yanan maddelerdir. Yangın sınıflandırması yanıcı maddenin fazına göre yapılmaktadır. Yanıcı madde fazı katı olduğu yangınlar A ve D, sıvı fazda olduğu yangınlar B, F ve K sınıfı yangınlar ve gaz halinde olduğu yangınlar ise C sınıfı yangınlar olarak sınıflandırılır.

Tablo 1. Amerika, Avrupa, Türkiye’de kabul edilen yangın sınıflandırması

Amerika	Avrupa	Türkiye	Yanıcı Malzeme Türü
A Sınıfı Yangın	A Sınıfı Yangın	A Sınıfı Yangın	Katı Madde Yangını
B Sınıfı Yangın	B Sınıfı Yangın	B Sınıfı Yangın	Yanabilen Sıvı Madde Yangını
	C Sınıfı Yangın	C Sınıfı Yangın	Gazların Yangını
C Sınıfı Yangın	E Sınıfı Yangın	-	Elektrik Yangını
D Sınıfı Yangın	D Sınıfı Yangın	D Sınıfı Yangın	Metallerin Yangını
K Sınıfı Yangın	F Sınıfı Yangın	-	Yanıcı petrol ve Yağ Yangını

Yangın sınıflandırılması yanıcı maddeye göre yapılmaktadır. Türkiye’ de TS EN 2 ve TS EN 2/A1’e göre yanıcı maddelerin yapısına göre yangın A, B, C ve D sınıflarından oluşurken Avrupa ve Amerika’da ek olarak elektrik yangınları (E), yanıcı petrol, yağ yangınları (F) ve mutfak yangınları (K) için ek sınıflandırma yapılmıştır (Sunar, 2010). Uluslararası standartlarda kabul edildiği gibi 1999 yılından beri TS’de E sınıfı elektrik yangınlarını daha sonra da F yangınları kabul edilmiştir.

Yangına ilk aşamada doğru müdahalede bulunmak için yangın sınıfına göre uygun yangın söndürücü ile müdahale edilmelidir (Tablo 2). Yangına yangın sınıfına göre müdahale etmek söndürme faaliyetlerini hızlandırmakta ve çevrede oluşan zararı en aza indirmektedir (Sunar, 2010). Yangınların büyük bir çoğunluğu katı A sınıfı yangın olup, su ile yangınlara müdahale edilir. Ancak A sınıfı yangınları haricinde hiçbir yangın sınıfında kullanılmaz. C ve E yangınında yangına müdahale etmeden önce doğalgaz ve elektrik kesilmesi gerekir. Ondan sonra uygun söndürücü ile müdahale edilmelidir.

Tablo 2. Yangın sınıfları ve etkin söndürücü maddeleri

Sembol	Yangın sınıfı	Etkin söndürücü maddesi
	Katı madde yangınları Odun, kömür, kâğıt	Su Sıvı söndürücüler Kuru kimyevi toz
	Sıvı madde yangınları Benzin, katran, makine yağları, yağlı boya	Kuru kimyevi toz Köpük, Halon gazı Karbondioksitli söndürücüler
	Gaz yangınları LPG, metan, propan, asetilen	Kuru kimyevi toz Karbondioksitli söndürücüler Halon gazı
	Metal tozu yangınları Lityum, sodyum, alüminyum, potasyum	Kuru kimyevi toz
	Elektrik yangınları Elektrikli ekipmanlar	Karbondioksitli söndürücüler Kuru kimyevi toz
	Mutfak yangınları Hayvansal ve bitkisel kaynaklı yağlar	Tozlu ve ya sulu kimyasal söndürücüler

A sınıfı yangınlar

A sınıfı katı yangınlar, metaller dışında yanabilen bütün katıları kapsar. Yangınların yaklaşık %90'nı A sınıfı yangındır. Odun, tekstil maddeleri, kâğıt, saman ve pamuk gibi katı formdaki maddelerin alevli ve korlu yandığı yangındır. Kor halinde yanmaya başlayan katı maddelerin kontrol altına alınıp söndürülmesi zordur. Kor ısıyı ve yanmanın devamını sağlayan bir ısı çekirdeğidir. Bu yüzden A sınıfı

yangınlarda yanan maddenin oluşturduğu koru soğutarak yanma reaksiyonu durdurulabilir. A sınıfı yangınların söndürülmesinde en etkili ve en çok kullanılan söndürücü sudur. Su, bol, ucuz, kolay temin edilen, toksik etkisi bulunmayan ve ısıyı en fazla absorplayan maddelerden biridir. Bununla birlikte yangının özelliğine göre soğutma etkisi yanında yüzeyi saracak hava ile ortamın temasını kesmek, oksijen yoğunluğu ve zincir reaksiyonlarını kırarak etkili söndürücüler de kullanılmaktadır (Sunar, 2010).

B sınıfı yangınlar

Petrol, akaryakıt, alkol gibi yanıcı sıvıların neden olduğu yangınlardır. Sıvı yangınları, sıvının su da çözünüp çözünmediğine göre üç sınıfa ayırmak mümkündür. Birinci sınıf; benzin, yağlar, boyalar, petrol gibi su ile karışmayan sıvı yakıtlardır. Yoğunluğu sudan düşük olan sıvı sudan hafif olduğu için suyun üstüne çıkar ve yanma suyun üzerinde gerçekleşir. Bu tür maddelerin yangınlarında zincirleme reaksiyonların kırılması ve yüzeyin oksitleyici ortamla ilişkisinin kesilmesi gerekmektedir. İkinci sınıf ise katran, asfalt, gres gibi su da çözünmeyen ağır ve vizkoz yağların neden olduğu yangınlardır. Bunlarda da soğutma, boğma ve zincirleme reaksiyonlarının kırılması yönünde etkili yangın söndürme metotları kullanılmaktadır. Üçüncü sınıf, etanol, metanol, bütanol gibi su da çözünen sıvı yakıtların neden olduğu yangınlardır. Bunlarda ise soğutma, boğma ve seyreltme gibi metotlar kullanılmaktadır. B sınıfı yangınlar için en ideal söndürme yöntemi köpüktür. Başlangıç

ve küçük çaplı yangınlara karbondioksitle ve kuru kimyevi tozla müdahale edilebilir (Sunar, 2010).

C sınıfı yangınlar

Yanabilen gazların sebep olduğu yangınlardır. Alevli yanma özelliğine sahiptirler. LPG, havagazı, doğal gaz ve hidrojen gibi yanıcı gazları kapsamaktadır. Gaz yangınlarında patlama olayı ile karşılaşabilmektedir. Oksijeni kendi kimyasal bileşiminde taşıyan patlayıcı maddelerde ortamda oksijen olmasa ya da oksijenle temasları çok az olsa bile parlama ve patlama şeklinde büyük yangınlar meydana gelebilir. Patlama ve parlama sırasında oluşan yüksek basınç, ısı ve alev yangını büyötmektedir. Gaz yangınlarında, gazın tahliyesi havadan hafif veya ağır olup olmamasına göre yapılır. Havadan ağır olan gazlar zemine çöker fakat havadan hafif olan gazlar için tavanda yoğunlaşır. Gaz kaçaklarında ortam havalandırılır. Gaz yangınlarına müdahale edilmeden önce gaz kaynağından kesilir daha sonra uygun söndürücü madde ile aleve müdahale edilir. Gaz yangınlarına başlangıç aşamasında karbondioksitle müdahale edilmektedir (Sunar, 2010).

D sınıfı yangınlar

Alüminyum, magnezyum, titanyum, zirkonyum, lityum, çinko, sodyum, potasyum, kalsiyum, vb. hafif yanabilen metallerin oluşturduğu yangınlardır. Metal yangınları genellikle en tehlikeli yangınlardan biridir. Korlu, alevsiz ve yüksek sıcaklıkta yanarlar. Çoğu D Sınıfı metal yangını, kesme, delme ve taşlama gibi metal imalatı işlemlerinde oluşan metal tozundan dolayı toz patlamaları veya metal yangınları meydana gelebilir. Metaller yandığında yüksek sıcaklıklara ulaşır. Sıcaklık en az 700°C'dir ve 1200°C'ye kadar yükselebilmektedir. Bu nedenle metal yangınlarına müdahale ederken, diğer yangınlarda etkili olan söndürücüler işe yaramaz kuru kimyevi toz, karbondioksit ve su kullanılmaz, yüksek ısıdan dolayı bu maddeler başka reaksiyonlara sebebiyet vermektedir. Su, bu maddelerin bazılarıyla kimyasal reaksiyona girerek yangını hızlandırır. Su 1000°C'de hidrojen ve oksijen birbirinden ayrıştırmaktadır. Metal yangınlarında su kullanılması tehlike yaratır. Metal yangınlarını söndürmenin tek yolu ya yanan malzemenin cinsine uygun söndürücüler kullanmak ya da kuru kum ile yangının üzerine örtmektir. Söndürme maddesi olarak bileşiminde sodyum klorür, potasyum klorür, baryum klorür ve grafit tozu ihtiva eden metal yangınları için özel üretilmiş D türü kuru kimyevi toz kullanılmaktadır. D sınıfı yangınlarını söndürmek için kuru kum ve döküm talaşı kullanılmaktadır (Ataman, 2008; Kaya ve Kaya, 2019).

E sınıfı yangınlar

Elektrikli teçhizat ve ekipmanlardan kaynaklanan yangınlardır. Çıkan yangınların büyük bir kısmının nedeni elektrik kaynaklıdır. Özellikle Amerika ve Japonya gibi teknolojisi gelişmiş ülkelerde yangın çıkış sebebinde ilk sırada elektrik bulunmaktadır. Elektrik yangınlarına müdahalede en etkili yöntem boğmadır. Boğma, atmosferik oksijen eksikliğine neden olurken, örtme, yanma için gerekli olan buhar kaynağını kesme amacıyla kullanılır. Boğmada kullanılan söndürücü ortamın ısınısını aniden düşürerek oksijen miktarını azaltarak söndürür. Gerilim altındaki elektrik tesisleri ve elektrikli cihazlarda gerçekleşen yangınlarda karbondioksit ve bikarbonatlı söndürücü maddeler kullanılır (Sunar, 2010).

F sınıfı yangınlar

F sınıfı yangınlar, mutfak yangınları ya da tava yağı yangınları olarak bilinmektedir. Mutfak yangınları NFPA (Ulusal Yangın Koruma Birliği) standardına göre K sınıfı olarak adlandırılmıştır. Avrupa standartlarında ise yağ yangınları F sınıfı yangınlar olarak ifade edilmiştir. Bitkisel ya da hayvansal yangınların tamamını kapsamaktadır. Yağ yangınları özellikle mutfaklarda yemek pişirme ve kızartma işlemlerinde kullanılan yağların fazla ısınmasıyla yağın tutuşma noktasına kadar ısınmasından meydana gelir. Ayrıca davlumbazlarda, aspiratörlerde yağ buharları zamanla birikerek yağ

yangınlarını oluşturmaktadır. Yağ yangınlarına su ile müdahale edilmez, su kızgın yağ buharı ile temas ettiğinde genleşir ve yangının büyüyerek yayılmasına sebep olurken yangına müdahale eden kişinin yaşamını tehlikeye sokmaktadır (Yıldız, 2019). Yağ yangınlarını söndürülmesi için hava ile temasın kesilmesi gerekir. F sınıfı yangının söndürülmesi için potasyum içerikli yangın söndürme maddesi, sulu kimyasal söndürücüler ya da kuru kimyevi toz etkilidir.

Metal yangınları

1950'li yıllara kadar sınırlı kullanım alanı bulan alüminyum, magnezyum, zirkonyum gibi metaller günümüzde uçak, boya ve patlayıcı sanayinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu metaller, toz haline geldiğinde parçacık boyutu düşer ve bu küçük partiküller geniş yüzey alanına sahip olduğu için yanabilir. Bir metal parçası genellikle yanmazken, toza veya ince partiküle dönüştüğünde tehlikeli derecede yanıcı hale gelir. Bazı metaller, artan yüzey alanı/hacim ile daha büyük bloklardan daha hızlı yanan talaş, makine talaşı veya diğer ince metal parçalar halinde tehlike oluşturabilir. Metal tozunun parçacık boyutu ne kadar az ise yanmaya o kadar yatkındır (Sharma vd., 1987; URL-2, 2025). Yanıcı metal yangınları, özellikle yüksek konsantrasyonda metal talaşı veya diğer ince metal parçaları alanda hızla yayılabilir. Ayrıca tutuştuğunda toz patlamalarına sebep olabilir. Hemen hemen tüm metallerin toz halinde yanıcı olup, normal bir yangın söndürücüsüyle

söndürülemezler. Metal yangını önlemek için çalışma alanları düzenli olarak temizlenerek ortamdaki metal talaşları ya da tozların zemin, kiriş gibi yerlerde dahil olmak üzere hiçbir yüzeyde birikmesine izin verilmemelidir. Metaller üzerinde kesme, taşlama, delme gibi herhangi bir üretim süreci gerçekleştirirken güvenlik prosedürlerine uyulmalıdır. Tüm yanıcı metaller ayrılmalı ve güvenli yerlerde veya kaplarda saklanmalıdır. Özellikle sodyum gibi oldukça reaktif metallerin hava veya suyla temas etmemesi sağlanmalıdır. Metal tozu, toz toplama sisteminde başka hiçbir şeyle asla birleştirilmemelidir. Metal ve ahşap tozunu birlikte toplamak çok tehlikelidir (URL-3, 2022).

Metal tozları yanma tehlikesine göre reaktif (demir, çelik, çinko vb.), oldukça reaktif (silikon vb.) veya aşırı derecede reaktif (alüminyum ve magnezyum vb.) olarak sınıflandırılmaktadır. Toz patlama riskinde K_{St} ve maksimum yanma basıncı (P_{max}) değerleri dikkate alınır. K_{St} değeri, toz patlaması şiddetinin göstergesi olup, bir toz tutuşturulduğunda 1 m³ hacmindeki tanktaki maksimum basınç artış oranıdır. K_{St} deki St ifadesi, Almanca da toz anlamına gelmektedir. K_{St} değeri, toz patlama şiddetini gösterir. Tablo 3’de K_{St} değerlerine göre toz patlama sınıfı ve patlama şiddeti gösterilmiştir (Bakdemir vd. 2021).

Tablo 3. K_{St} Değerine Göre Toz Patlama Sınıfları

Toz Patlama Sınıfı	K_{St} (bar.m/s)	Karakteristik
St 0	0	Patlamaz
St 1	>0 ve ≤200	Zayıf Patlayıcı
St 2	>200 ve ≤300	Kuvvetli Patlayıcı
St 3	> 300	Çok Kuvvetli Patlayıcı

Tablo 4’de yer alan K_{St} değerlerinden görüldüğü üzere 10 μm ’den küçük parçacık çapı olan Alüminyum, 28 μm parçacık çaplı Magnezyum ve 70 μm parçacık çaplı Nibonyum çok kuvvetli patlayıcı özelliğine sahiptir. Nibonyum parçacık çapı 70 μm iken çok kuvvetli patlayıcı özelliğe sahip iken 80 μm de kuvvetli patlayıcı özellik göstermektedir. Magnezyum parçacık çapı 28 μm iken çok kuvvetli patlayıcılık özelliği göstermekte ve K_{St} değeri 508 olmaktadır. Parçacık çapı 240 μm olduğunda K_{St} değeri 12’ye düşmekte ve zayıf patlayıcılık özelliği göstermektedir. Parçacık çapı düştükçe patlama riski artmaktadır (URL-2, 2025).

Tablo 4. Yaygın Metallerin Patlama Özellikleri

Materyal	Parçacık Çapı (μm)	K_{St} (bar m/s)	$P_{\max}$ (bar g)
Alüminyum	<10	515	11.2
Bronz	18	31	4.1
Demir	12	50	5.2
Demir karbonil	<10	111	6.1
Manganez (elektrolitik)	16	157	6.3
Magnezyum	28	508	17.5
Magnezyum	240	12	7.0
Nibonyum	80	238	6.3
Nibonyum	70	326	7.1
Silikon	<10	126	10.2
Silikon (toz kolektöründen)	16	100	9.4
Tantalyum	100	149	6.0
Tantalyum	80	97	3.7
Tantalyum	50	108	5.5
Tantalyum	65	129	5.8

Titanyum	~25	-	4.7
Titanyum	10	-	4.8
Çinko (toz kolektörden)	<10	125	6.7
Çinko (toz kolektörden)	10	176	7.3
Çinko (toz kolektörden)	19	85	6.0

Metal Yangınlarına Müdahale

Metal yangın söndürme çalışmaları, yangın söndürmenin temel mekanizmalarının incelenmesiyle başlamıştır. Farklı yanıcı malzemelerdeki yangınların söndürülebileceği bilinen mekanizmalar şunlardır:

1. Örtme
2. Boğma
3. Yanıcı buharların söndürme maddesi veya söndürücülerin ayrışma ürünü ile seyreltilmesi;
4. Söndürme-alev bölgesinin aerodinamik bozulmaları sonucu alevlerin fiziksel olarak uzaklaştırılması
5. Soğutma-alevlerden veya yanan malzemelerden ısı emilimi;
6. Radyasyon kalkanı
7. Tercihli oksidasyon
8. Kimyasal inhibisyon

Metal yangın söndürme için 1, 2 ve 5 numaralı mekanizmalar uygulanabilir. Boğma, atmosferik oksijen eksikliğine neden olurken, örtme, yanma için gerekli olan buhar beslemesini (bu durumda uygulanabilirliği oldukça sınırlı olsa da) kesme amacına hizmet eder. Ancak, örtme ve boğma, soğutma kadar etkili olmaz. Örtme ya da boğma sırasında soğutma kuru kimyasal maddenin eritilmesi veya metal yüzeyine zarar vermeden sıvı maddenin buharlaştırılmasıyla elde edilebilir. Uygulanan söndürme maddesinin eritilmesi veya buharlaştırılması ve metal yüzey üzerinde bir örtü oluşturulması yoluyla ısının çekilmesini prensibi, ilk olarak Nash, Elkins ve Frieser tarafından metal yangınları için kuru kimyasal toz söndürücüler geliştirmek amacıyla kullanılmıştır (Sharma vd. 1987).

Metal yangınlarında kuru kum, susuz soda külü, susuz sodyum klorid ve D sınıfı gibi söndürücüler kullanılır. Küçük ve yeni başlamış yangınlar, D sınıfı söndürme maddeleri ve kuru kum kullanılarak kontrol altına alınabilir. Yanıcı metal yangınlarının söndürülmesinde, yanan malzemenin özellikleri iyi bilinmelidir. Yangın bölgesi güvenli bir şekilde izole edilmeli ve kendi kendine sönmeye bırakılıp bırakılamayacağı belirlenmelidir. En iyi yaklaşım güvenli bir şekilde materyal mümkün olduğunca izole edilmeli, personeli tehlikeye sokmamak ve çevreye zarar vermeden ya da en az hasarla atlatmak için yangının kendi kendine sönmesine izin verilmelidir. Uygun bir uygulama sistemi olması durumunda personelin güvenliği sağlanarak yangın battaniyesi de kullanılabilir.

Kapalı bir konteynerde metal yangını meydana gelir ise argon ya da helyum gibi inert gazlar (ya da alkali metaller için azot) yangın kontrolünde etkili olabilir. Ayrıca yangın söndürüldükten sonra metal yüzeyinde oluşan tabaka ya da artıklara oda sıcaklığına soğuyuncaya kadar dokunulmamalı ve dikkatli şekilde atılmak üzere kapalı konteynerlerde taşınmalıdır (Kılıç, 2015).

Yaygın Kullanılan Metallerin Yangınları ve Söndürülmesi

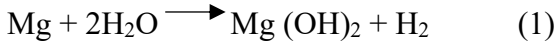
Alüminyum, Lityum, Magnezyum, Titanyum, Zirkonyum, Çinko, Baryum, Uranyum, Plütonyum, Sodyum, Potasyum ve Kalsiyum yüksek sıcaklıklarda yanabilen metallerdir (URL-4, 2025). Bu metallerin büyük miktarları yoğun ısıya maruz kaldığında veya eridiğinde yangına sebebiyet verebilir. Çoğu metal oldukça reaktiftir ve çok yüksek ısı ile yanar ve yüzey sıcaklıklarını 1200°C'nin üzerine çıkar. Bu metallerin reaktivitesi o kadar yüksektir ki, alüminyum, magnezyum ve zirkonyum azot varlığında bile yanmaya devam ederek nitrürlerini oluşturur. Su veya diğer kimyasallarla şiddetli reaksiyona girebilir. Su ve köpük gibi konvansiyonel yangın söndürme maddeleri çok küçük yangınları söndürebilse de, büyük yangınlara karşı neredeyse etkisizdir. Bu metallerin çoğu sıcakken su ile reaksiyona girer ve atmosferik oksijenle karıştırıldığında ciddi patlama tehlikelerine neden olabilecek hidrojen üretir. Potasyum ve sodyum gibi alkali metaller ortam sıcaklığı yüksek olmadığı durumda bile hava veya su ile temas ettiğinde hemen yanan, patlamalara yol açan oldukça reaktif elementlerdir. Genel olarak bu metaller, bozulmanın (yüzey oksidasyonu) havadaki nem ile temasını önlemek için reaktif olmayan bir sıvı içinde kapalı kaplarda saklanır. Bikarbonat bazlı kuru kimyevi tozlar da metal yangınlarına karşı etkisizdir çünkü bu metaller hava/oksijen varlığında karbondioksit (bikarbonatların ayrışma ürünü) ile reaksiyona girer. Bikarbonat/karbonat bazlı yaygın kuru kimyevi söndürme tozları metal yangınlarıyla mücadele edemediğinden, özel kuru kimyevi tozlar geliştirilmektedir. Metaller bir kez tutuşturulduktan sonra söndürülmesi zordur, çünkü yanma reaksiyonu su altında bile yanmayı desteklemek için yeterli oksijen üretir. Yaygın söndürme maddeleriyle yüksek reaktiviteleri nedeniyle söndürülmesi çok zordur. Bazı durumlarda, yanan metalin kumla kaplanması, reaksiyondan kaynaklanan ısı ve kıvılcımların kontrol altına

alınmasına yardımcı olabilir. Oldukça etkili olabilen metallere reaksiyona girmeyen özel olarak tasarlanmış kuru toz D Sınıfı söndürme maddeleri (genellikle bir kova veya kutuda kuru toz olarak) mevcuttur. Çoğu durumda, malzemeden ısıyı emerler ve tutuşma sıcaklığının altına soğuturlar. Tozlu yangın söndürücüler özellikle metal tozu veya talaşı içeren ortamlarda yanan metalin veya tozun yayılmasını durdurarak yangının yayılmasını önleme de fayda sağlar (Kılıç, 2015).

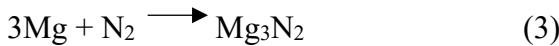
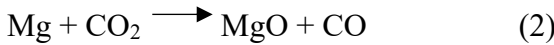
Endüstriyel yangınlara neden olma olasılığı en yüksek ilk beş metal zirkonyum, alüminyum, lityum, magnezyum ve titanyumdur. Bu beş yanıcı metal, çöp konteynerlerinde ve diğer atık depolama alanlarında, nakliye araçlarında ve işleme sırasında meydana gelen en kötü endüstriyel metal yangınlarının çoğundan sorumludur. Bu metallerin arasında Alüminyum en reaktif metal olmasa da muhtemelen en yaygın kullanılanıdır. İmalatta kullanılan yaygın bir metal alüminyumdur. Bu, onu öğütmek, biçimlendirmek, kesmek ve başka şekillerde yanıcı partiküle dönüştürmek anlamına gelir. Alüminyum işleniyorsa toplayıcıya çekilmesi gereken tek şey budur. Oraya başka hiçbir şey girmemelidir. Alüminyum ve çelik karıştırılmamalıdır. Alüminyum, sıcaklığa fazla dayanıklı değildir, 660°C’de erir. Alüminyum talaşları belirli bir boyutta alev alır (Aslan, 2023).

Magnezyum ve alüminyumun alaşım endüstrisi, inşaat ve günlük hayattaki kullanımı zamanla genişlemektedir. Magnezyum ve magnezyum alaşımlı yangınlar, magnezyumun oldukça reaktif olması sebebiyle normal söndürme maddeleri ile söndürülmez. Magnezyum yangınlarının başlangıç aşamalarında, metal yangınları için tasarlanan yangın söndürücü maddeler ile müdahale edilmelidir. Köpükle söndürme yapılacağı zaman, su atışları ile müdahale tercih edilmemelidir. Magnezyumun yoğun olması durumunda, büyük hacimlerde direkt su atışları uygulanmalıdır. Alevin kısmen şiddetlenmesine ve önemli derecede parlamaya sebebiyet

verebilecek olsa dahi olası etkiler ortadan kaldırıldığında yanmakta olan magnezyum parçalarına direkt su atışı uygulanmalıdır (Burhan vd., 2020). Magnezyumu tehlikeli yapan ana etken, inanılmaz derecede yüksek ısıda yanmasıdır. Magnezyum ve alaşımlarının yanma sıcaklığı 2800°C üzerine çıkabilir. Yanarken hemen hemen her şeyle şiddetli bir şekilde tepkimeye girebilmesidir. Magnezyum oksijen ile tepkimeye girdiğinde oksijeni ayırır. Örneğin, Eşitlik 1'den görüldüğü gibi magnezyum su ile tepkimesinde, oksijeni bağlı bulunduğu hidrojenden ayırır ve magnezyum hidroksit ile hidrojen gazı oluşur ve hidrojen gazı patlamalara sebep olur.



Magnezyum, azot ve karbondioksit gibi inert atmosferde bile yanar ve bu tür bir yangının söndürülmesi çok zordur. Eşitlik 2'deki gibi kapalı bir alanda, havadaki azot magnezyumla tepkimeye girerek magnezyum nitrit meydana getirerek yanmaya devam eder. Eşitlik 3'de görüldüğü gibi magnezyum karbon dioksit ile tepkimeye girdiğinde magnezyum oksit ve yanıcı ve boğucu bir gaz olan karbon monoksit oluşur.



Magnezyum gibi alkali ve toprak alkali metaller su ile temas ettiğinde yangın büyür, yayılır. Magnezyum tozunun depolanmış olabileceği binalarda otomatik yağmurlama sistemleri kesinlikle kullanılmamalıdır. Sadece, diğer yanıcı malzemeler de var ise, ağır

ya da hafif magnezyum dökümleri depolamak için kullanılan binalarda yağmurlama sistemleri kullanılabilir. NFPA da yanan yongaların ve ufak parçalar, uygun bir kuru söndürme maddesi kullanmak suretiyle boğarak ya da soğutarak söndürülmesi önerilmektedir. Magnezyum tozu olan yerlerde, özellikle basınçlı söndürücülerle toz bulutuna neden olmamasına özen gösterilmelidir. Aksi taktirde basınçlı püskürtme toz patlamasıyla karşılaşılabilir. Çevredeki yanıcı maddelerin uzaklaştırılması eğer magnezyum miktarı az ise magnezyumun kendi kendine yanıp sönmesini beklemek en iyi yoldur (Kılıç, 2015).

Titanyum, ısıya maruz kalan yüzeyleri kuvvetlendirmekte kullanılan güçlü mukavemet özelliğine sahip bir elementtir (Burhan vd., 2020). Titanyum, normal sıcaklıklarda bile oksijenle çok reaktiftir ve yüzeyinde bir oksit tabakası oluşturur. Ancak yüksek sıcaklıklarda oksijenle reaksiyonu aşırı hızlı hale gelir, yani çok sıcak ve çok hızlı yanar. Titanyum, oksijen ve azot ile tepkimeye girme isteği yüksektir. Titanyum oksitleri erimiş metal içinde kolayca çözülür. Bu nedenle, ısınmış titanyum söndürme maddesini kolayca azaltır. Koruyucu bir oksit filmin olmaması erimiş metal üzerinde sürekli olarak reaktif bir yüzeyin oluşmasına yol açar. NFPA 480 standardında su, titanyum tozu yangınlarında kullanılamayacağı ancak diğer titanyum yangınlarında dikkatli şekilde kullanılabileceği belirtilmektedir. Hurda yığınları dışındaki yangınlara hortum ile su uygulamak etkili olmakla beraber sıcak ya da yanan titanyuma suyun uygulandığı diğer durumlarda ciddi yaralanmalar olabilmektedir (Kılıç, 2015).

Zirkonyum talaş, toz veya partiküllerinin bir tutuşturma kaynağıyla temas etmesi yangına neden olur. Yanan zirkonyum tozu veya hurdası su ile patlama tepkimesi verir (Aslan, 2023). Zirkonyum talaşları ve yongaları 1 litreden fazla miktarda olması yangın tehlikesine neden olur. Yangının şiddeti, metal miktarı arttıkça ve parçaların uç kısımlarının boyutu küçüldükçe artar. Sızdırmaz

kaplarda su altında bulunan zirkonyum kırıntıları ve ince tanecikleri, yangına maruz kalsalar bile genellikle çok güvenlidir. Çapı 54 mikrometreden küçük mekanik olarak üretilen tozlar için su veya inert gaz altında depolama zorunludur. Su depolaması, kazara yangın veya patlama olasılığını büyük ölçüde azaltsa da, su depolamasına özgü bazı tehlikeler dikkate alınmalı ve önlenmelidir. Sulu çözeltiler donma ve çözülme sırasında genişleyerek depolama kabını patlatabilir. Bu durumu önlemek için antifriz çözeltileri kullanılabilir. Kap aşırı ısınır ve/veya patlarsa, sıvı dışarı akabilir ve içindekiler, en şiddetli yangın ve patlamalara neden olan %3 ila %15 nem aralığında kalabilir. Ayrıca, boşaltılan sıvı, en hafif ve en piroforik tozu süspansiyon halinde taşır. Kuruduğunda, bu toz, kabın içeriğini tutuşturabilecek bir piroforik fitil görevi görebilir. Nemli hurdanın harici bir yangına karışması durumunda, 1.000 ila 2.000 m/s hızla hareket eden şok cepheleriyle düşük mertebeli bir patlamaya yaklaşan son derece şiddetli bir patlama gerçek bir olasılıktır (Cooper, 1984).

Lityum, sodyum ve potasyum gibi saf halde genellikle yağda saklanır çünkü bir odada etrafta duran hava ile reaksiyona girer. Bu alkali metallere birinin bir parçasını suya atmak, metalin suyla şiddetli bir şekilde reaksiyona girmesiyle bir patlamaya neden olur. Lityum, son zamanlarda özellikle şarj edilebilir piller arasında yaygın olarak tercih edilen Lityum İyon (Li-ion) pillerin ana ham maddesidir. Aşırı şarj, aşırı ısınma veya üretim hatalarından dolayı pilde termal kaçaklar meydana gelebilir. Termal kaçaklar, içsel kısa devreler veya elektrolitlerin kimyasal tepkimeye girmesi ile pilin patlamasına veya alev almasına yol açabilir. Li-ion pillerinden dolayı meydana gelen yangınların söndürülmesinde su bazlı, köpüklü, kuru kimyasal tozlu, CO₂ ve HFC-227ea gibi söndürme maddeleri kullanılabilir. Her bir söndürücü maddenin faydası da zararı da bulunmaktadır. Su bazlı söndürücüler yangını soğutma özelliğine sahiptir ancak elektrikle temas halinde tehlikeye yol

açabilir. Li-ion pil yangınlarını etkili bir şekilde söndürmek için çevreye zarar vermeyen sulu vermikülit dağılımı (SVD) yangın söndürücü madde önerilmektedir (Ateş, 2024).

KAYNAKLAR

Aslan S. (2023). D Sınıfı Yangın Nasıl Tespit Edilir ve Söndürülür? Yangın ve Güvenlik Dergisi, 241,18-22.

Ataman, B. (2008). Arşiv ve kütüphanelerde yangınla mücadele. Bilgi ve Belge Araştırmaları, (1), 1-21.

Ateş B. (2024). Lityum İyon Pillerde Yangın ve Otopark Güvenlik Önlemleri. Yangın ve Güvenlik. 248:26-28.

Bakdemir, S. A., Bozkurt, Y., & Salman, S. (2021). Eklemeli imalat yöntemlerinde metal tozu patlama riski ve önleme yöntemleri. Journal of Innovative Engineering and Natural Science, 1(1), 41-60.

Burhan, A., Geçer, E., Uzun, G., Güler, İ., Aslantaş, O. (2020). Uçak Kaza Kırım ve Yangınları, Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, İtfaiyecilik ve Yangın Güvenliği Alanı, Ders Materyali

Cooper, T D. (1984). Review of zirconium-zircaloy pyrophoricity. Tecnical report. <https://doi.org/10.2172/5791423>

Kaya, B., & Kaya, Y. (2019). Elektrik Kaynaklı Yanma ve Yangın. *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(1), 152-157.

Kılıç A. (2015). Metal Yangınları ve Söndürülmesi. Yangın ve Güvenlik. 172:8-10.

Sharma, T. P., Lal, B. B., Singh, J. (1987). Metal Fire Extinguishment, Fire Technology. 23:205-229.

Sunar, P. (2010). Otellerde yangın güvenlik önlemleri ve tasarıma etkilerinin mekansal kontrol listeleri üzerinden analizi. Yüksek Lisans Tezi. Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / İç Mimarlık Ana Bilim Dalı

URL-1, Yanma ve Yangın Bilgisi. Erişim Tarihi: 20.06.2025

URL-2, <https://camfilapc.com/blog/understanding-nfpa-660-the-new-standard-for-combustible-dust-safety/>. Erişim Tarihi: 20.06.2025

URL-3, Metal Tozu Yangın Güvenliği: Nedenleri, Hazırlık ve Acil Durum Eylemleri, <https://www.isystemsweb.com/metal-dust-fire-safety-causes-preparedness-and-emergency-actions/>. Erişim Tarihi: 03.03.2022

URL-4, İnce A., Yangın Güvenlik Eğitimi. <https://abdurrahmanince.net/sondurme.pdf>. Erişim Tarihi: 20.06.2025

Yıldız, Z. (2021). Konutlardaki Mutfak Yangınları Üzerine Bir Değerlendirme. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi (21), 621-628.

CHAPTER 5

KARBONDİOKSİT YAKALAMA VE DEPOLAMA: MİNERAL KARBONATLAMA

M. Kürşat AYDEMİR¹

Tufan KIYAK²

Bahaa ALYOSİF³

Giriş

Dünyanın enerji talebini karşılamak için önemli miktarda fosil yakıt yakılmakta ve bunun sonucunda çevreye büyük miktarda sera gazı salınmaktadır. Bu durum ciddi sorunlara yol açmıştır. Sera etkisi, aşırı hava olaylarının meydana gelmesini tetiklemektedir (Assen ve diğ., 2021; Ripple ve diğ., 2019). 2021 yılında küresel CO₂ emisyonu 36,3 milyar tona ulaştığı ve bunun, 30 yıl öncesine göre yaklaşık %61'lik bir artış anlamına geldiği görülmektedir.

¹ İnönü Üniversitesi Mühendislik Fak. Maden Mühendisliği
Malatya/ Türkiye, Orcid: [0000-0003-0846-4355](https://orcid.org/0000-0003-0846-4355)

² Dr. İnönü Üniversitesi Mühendislik Fak. Maden Mühendisliği
Malatya/ Türkiye, Orcid: [0000-0002-5438-3794](https://orcid.org/0000-0002-5438-3794)

³ İnönü Üniversitesi Mühendislik Fak. Maden Mühendisliği
Malatya/ Türkiye, Orcid: [0000-0001-8904-7662](https://orcid.org/0000-0001-8904-7662)

Ayrıca CO₂ konsantrasyonları sanayi öncesi baz seviyesi olan 280 ppm'den 410 ppm'ye yükselmiştir (Zhang ve diğ., 2022a). 2018 yılında Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli, küresel sıcaklık artışlarını bu yüzyılın sonuna kadar 1,5 °C'nin altında sınırlandırmayı önermiştir. Çok sayıda çalışma, küresel ortalama sıcaklıklardaki artışın azaltılmasının, CO₂ emisyonlarının azaltılması ve mineral karbonatlama yoluyla CO₂'nin uzaklaştırılmasıyla sağlanabileceğini göstermiştir (Wang ve diğ. 2020a; 2022). Bu nedenle, karbon azaltımıyla ilgili teknolojiler üzerine yapılan araştırmalar büyük önem taşımaktadır. CO₂ yakalama, ayırma, taşıma ve depolama için çeşitli teknikleri kapsayan karbon yakalama ve depolama, şu anda CO₂ emisyonlarını azaltmak için potansiyel bir strateji olarak önemli ilgi görmektedir (Harifi Mood ve diğ., 2020). Uluslararası Enerji Ajansı'na göre, 2050 yılına kadar sera gazı emisyonlarını yarıya indirme hedefine ulaşmak için mineral karbonatlama yoluyla karbondioksit yakalama ve depolamanın emisyon azaltımının %20'sini oluşturması gerekmektedir.

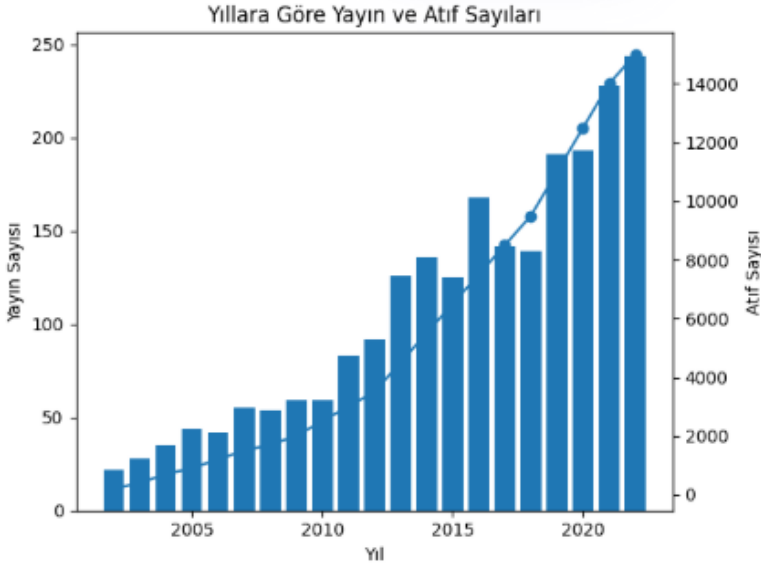
Genel olarak, derin tuzlu su akiferleri, kömür yatakları, tuz mağaraları, tükenmiş petrol ve doğalgaz rezervuarları ve petrol üretimini artırmak için yapılan enjeksiyonlar, CO₂'nin jeolojik olarak depolanması için olası yerlerdir.

Jeolojik depolama, büyük emisyon kaynakları için kullanılabilmesi ve geniş ölçekte uygulanabilmesi nedeniyle avantajlıdır. Bununla birlikte, jeolojik depolama teknolojisinde CO₂

sızıntısı, ekolojik dengesizlik, yeraltı suyu kirliliği ve hatta jeolojik felaketler de dahil olmak üzere birçok belirsiz risk bulunmaktadır. Okyanus depolaması ise CO₂'nin 1000 veya 3000 metre derinlikteki suya enjekte edilerek çevreye geri salınımının geciktirilmesini ifade etmektedir.

Deniz suyunda yüksek miktarda CO₂ bulunmasının deniz canlılarını öldürebileceği ve çözünmüş CO₂'nin sonunda çevreye geri dönmesine neden olabileceği; bu nedenle okyanus depolamasının anlamlı olmadığı düşünülmektedir (Pham ve diğ., 2016). Mineral karbonatlama, bu tür eksikleri önlemiş ve araştırmacılar tarafından geniş çapta ilgi görmekte ve CO₂ depolamasında önemli bir rol oynamaktadır. Şekil 1'de 2002'den 2022'ye kadar mineral karbonatlaşma alanındaki araştırma eğilimleri sunulmaktadır.

Mineral karbonatlama fikri ilk olarak Reddy ve diğ. (2010) tarafından, petrol şist endüstrisinde üretilen büyük miktardaki kararsız alkali şist sorununu çözmek için ortaya atılmıştır. 1990'lardan beri, Seifritz (1990) ilk olarak, aslında hızlandırılmış kaya aşınması sürecini simüle eden CO₂ mineral karbonizasyon yöntemini önermiştir. Diğer karbon yakalama teknolojileriyle karşılaştırıldığında, Mineral karbonatlama teknolojisi, CO₂'nin kalıcı olarak depolanması, katma değerli ürünlerin üretimi ve çevre dostu olması gibi birçok avantaja sahiptir. Mineral karbonatlama esas olarak hem yerinde (in-situ) hem de yer dışı (ex-situ) yakalamaya dayanmaktadır.

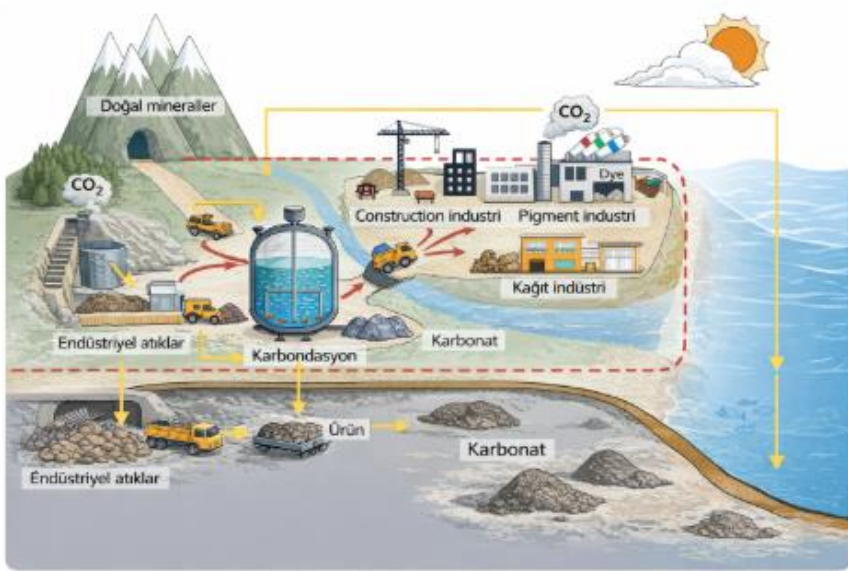


Şekil 1. 2002-2022 yılları arasındaki mineral karbonatlama araştırmaları (Lin ve diğ., 2024).

Bunlar arasında, yerinde karbon tutma, CO₂'nin jeolojik oluşumlara enjekte edilmesiyle karbonat üretimi anlamına gelir (Kashim ve diğ., 2020). Yer dışı depolama ise doğal minerallerin ve endüstriyel atıkların, esas olarak doğrudan karbonatlama ve dolaylı karbonatlama yöntemlerini içeren mineral karbonatlama için işleme tesislerine taşınması yöntemidir (Veetil ve Hitch, 2020). Şekil 2, doğal mineraller ve endüstriyel atıklar kullanılarak yapılan mineral karbonatlamayı göstermektedir.

Mineral karbonatlama için kullanılan ham maddeler esas olarak doğal mineraller ve endüstriyel atıklardan oluşmaktadır. Doğal mineraller başlıca olivin (Mg_2SiO_4), vollastonit ($CaSiO_3$) ve serpantin ($Mg_3Si_2O_5(OH)_4$) gibi kalsiyum ve magnezyum silikat

cevherlerini içerir.



Şekil 2. Doğal mineraller ve endüstriyel atıklar kullanılarak mineral karbonatlama yoluyla karbon tutulumunun şematik gösterimi (Lin ve diğ., 2024).

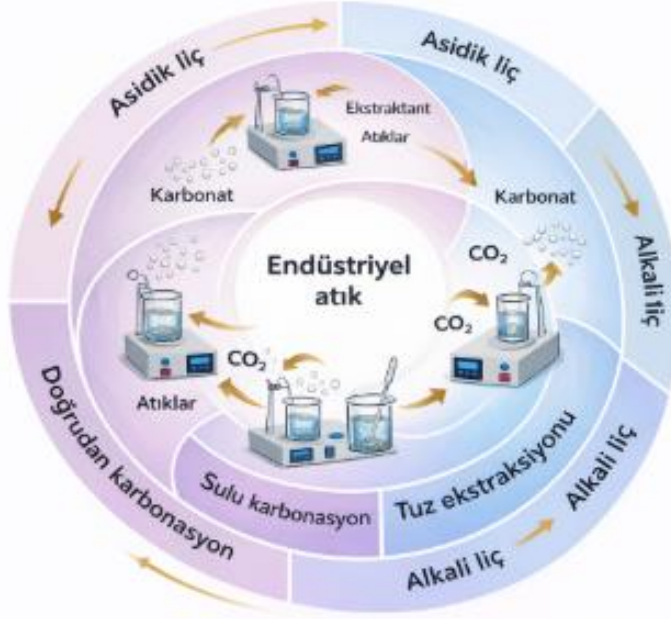
Doğal mineraller karbon tutma için iyi malzemeler olsada, madencilik, nakliye ve aktivasyon süreçlerindeki ek maliyetler onları ekonomik olarak uygulanabilir olmaktan çıkarır. Buna karşılık, endüstriyel atıklar, nispeten yüksek reaktiviteleri, düşük maliyetleri ve endüstriyel tesislerin yakınında bulunmaları nedeniyle CO₂ tutma için çok daha uygundur (Pan ve diğ., 2020; Wang ve diğ., 2021a; Sun ve diğ., 2021). Toplam endüstriyel atık miktarı doğal minerallere kıyasla nispeten az olmasına ve CO₂ emisyonlarını önemli ölçüde azaltmamasına rağmen, gerekli maliyetler genellikle

doğal cevherlere göre çok daha düşüktür. Mineral karbonatlama için düşünülen endüstriyel atıklar arasında, CaO veya MgO gibi alkali bileşenler içeren yüksek fırın cürufu, çelik cürufu, kömür uçucu külü, atık alçı ve kırmızı çamur yer almaktadır. Endüstriyel atıkların kaynakları ve fizikokimyasal özelliklerindeki farklılık nedeniyle, CO₂ mineralizasyon kapasitesi büyük ölçüde değişmektedir. Dahası, karbonatlı endüstriyel atıklar, klinker veya beton agregası için kısmi ikame hammaddesi olarak kullanılabilir; bu da dolaylı olarak Portland çimentosunun kullanımını önleyerek çimento endüstrisinden kaynaklanan CO₂ emisyonlarını azaltacaktır (Pan ve diğ., 2020). Katı atıkların çevre iyileştirmesinde kullanılması, çevre kirliliğinin azaltılması ve sürdürülebilir atık yönetimi nedeniyle özel bir ilgi görmektedir (Huang ve diğ., 2022a). Bu nedenle, endüstriyel atıklar kullanılarak CO₂'nin mineralizasyonu , atık yönetimi sorununu çözmenin yanı sıra küresel ısınmayı çözmek için potansiyel teknolojilerden biri olarak kabul edilmektedir.

Endüstriyel Atıkların Karbonatlaşması

Yüksek CaO ve MgO bileşen içeriği nedeniyle, endüstriyel atıklar CO₂ tutma için etkili malzemeler olarak kabul edilir. Şekil 3'te gösterildiği gibi, endüstriyel atıklar kullanılarak mineral karbonatlama için başlıca yollar doğrudan karbonatlama ve dolaylı karbonatlamadır. Doğrudan karbonatlama, CO₂'nin Ca ve Mg içeren doğal mineraller veya endüstriyel atıklarla doğrudan reaksiyona girmesi işlemidir ve doğrudan gaz-katı karbonatlama ve doğrudan

sulu karbonatlama olarak ikiye ayrılabilir (Bobicki ve diğ., 2012).

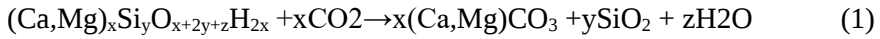


Şekil 2. CO₂ ile mineral karbonizasyonunun farklı yolları . (Lin ve diğ., 2024).

Doğrudan Gaz-Katı Karbonatlama

Lackner ve diğ. (1995) tarafından ilk kez önerilen doğrudan gaz-katı karbonatlama yöntemi, MC için en basit yöntemdir. Reaksiyon mekanizması Denklem (1) olarak gösterilebilir (Pan ve diğ., 2012). Karbonatlama işleminde, yüksek sıcaklıkta buhar veya elektrik gibi enerji gereklidir. Termodinamik hesaplamalara göre, bu reaksiyonun Gibbs serbest enerjisi sıfırdan küçüktür, bu da doğal koşullar altında teorik olarak kendiliğinden gerçekleştiğini gösterir.

Atmosferdeki CO₂ içeriği nispeten düşük olduğundan, reaksiyon doğada çok yavaştır. Doğrudan gaz-katı karbonatlama işleminde, parçacık boyutu, gazkatı teması, çalışma sıcaklığı ve basıncı değiştirilerek karbonatlama hızı veya dönüşüm hızı iyileştirilebilir. Bununla birlikte, genel olarak bu karbonatlama yönteminin verimi hala düşük ve enerji tüketimi yüksek (Azdarpour ve diğ., 2015a; Li ve Hitch, 2018). Bu nedenle, bu yöntemin şu anda endüstriyel uygulama potansiyeli sınırlıdır.



Doğrudan Sulu Karbonatlama Yöntemi

Doğrudan sulu karbonatlama, CO₂'nin sıvı fazdaki mineraller veya atıklarla reaksiyonunu ifade eder . Gaz-katı reaksiyonundan farklı olarak, doğrudan sulu karbonatlama işlemi, CO₂ ile mineraller veya atıklar arasında gerçekteşen bir reaksiyonu içerir.

Denklemler (2)–(4) ile temsil edilen gaz, sıvı ve katı fazlar (Liu ve diğ., 2021a; Zhang ve diğ., 2022a). Reaksiyon süreci üç adımdan oluşur: (1) CO₂ çözeltide çözünür, (2) Ca²⁺ ve Mg²⁺ iyonlarının liç edilmesi (3) minerallerden veya atıklardan ve (4) CO₂ ile Ca²⁺ ve Mg²⁺ arasında çökelme oluşturmak üzere reaksiyon. Suyun varlığı nedeniyle, çevresel koşullar altında CO₂ yakalama verimliliği daha yüksektir. Doğrudan sulu karbonatlama yöntemi, reaksiyon koşullarının optimizasyonu (Ji ve diğ., 2017; Ukwattage ve diğ., 2015), yüksek verçekimi yöntemleri (Chang ve diğ., 2012;

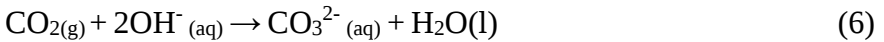
Chen ve diğ., 2016) ve ultrasonik teknikler (Wang ve diğ., 2020b) gibi çeşitli yöntemlerle karbonatlama dönüşümünü ve reaksiyon hızını iyileştirebilir. Ne yazık ki, ön işlem aşamaları bazen çok fazla enerji gerektirir ve bu da doğrudan sulu karbonatlama yöntemini yaygın kullanım için hala çok pahalı hale getirir. Dahası, doğrudan karbonatlama genellikle daha fazla kullanım veya değerli ürünler olarak satış için ayrılması zor olan karışık yan ürünler üretir. Yüksek saflıkta ürünler elde etmek ve doğrudan karbonatlama yönteminin ekonomik verimliliğini artırmak için, karbonatlama reaksiyonunun mekanizması ve kinetiği üzerine yapılan araştırmaları artırmak, işlem koşullarını sürekli olarak optimize etmek ve farklı katkı maddelerinin uygulanabilirliğini incelemek gereklidir.

Doğrudan sulu karbonatlama yönteminin ekonomik olarak uygulanabilir olduğunu kanıtlayan hiçbir çalışma olmamasına rağmen, CO₂ yakalama için en umut vadeden teknoloji olarak kabul edilmektedir.



Dolaylı Karbonatlama

Dolaylı karbonatlama genellikle iki aşamalı Ca^{2+} lileme işlemi içerir. Ve Mg^{2+} ve karbonatizasyon (Azdarpour ve diğ., 2015a). İlk olarak, endüstriyel atıklardan Ca^{2+} ve Mg^{2+} 'yi li etmek için asidik veya hafif asidik reaktifler kullanılır (Denklem (5)). Daha sonra, Ca ve Mg açısından zengin çözelti, alkali veya hafif alkali ortamlarda CO_2 ile reaksiyona girer ve CO_2 , CaCO_3 şeklinde ökeliir (Denklemler (6) ve (7)). Bu yöntem, nispeten hafif reaksiyon koşulları, Ca ve Mg'nin yüksek karbonizasyon dönüşüm oranları ve yüksek saflıkta yan ürünlerin üretimi nedeniyle şu anda büyük ilgi görmektedir (Hu ve diğ., 2017). Bu nedenle, araştırmacılar tarafından endüstriyel atıklardan Ca^{2+} ve Mg^{2+} iyonlarını çıkarmak için farklı asidik veya hafif asidik reaktifler kullanılmıştır; bunlar arasında hidroklorik asit (HCl) (Choo ve diğ., 2016), nitrik asit (HNO_3) (Van Zomeren ve diğ., 2011), sülfürik asit (H_2SO_4) (Azdarpour ve diğ., 2015b), asetik asit (CH_3COOH) (Teir ve diğ., 2007) ve amonyum tuzları (NH_4Cl , NH_4NO_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ veya NH_4HCO_3) (Dri ve diğ., 2013) yer almaktadır. Bununla birlikte, bu kimyasal maddelerin çoğ u geri dönüştürölmesi zor ya da çok fazla enerji gerektirmektedir.



KAYNAKÇA

Assen, A.H., Belmabkhout, Y., Adil, K., Lachehab, A., Hassoune, H., Aggarwal, H., (2021). Advances on CO₂ storage: Synthetic porous solids, mineralization and alternative solutions. *Chem. Eng. J.* 419: 129569.

Azdarpour, A., Asadullah, M., Mohammadian, E., Hamidi, H., Junin, R., Karaei, M.A., (2015a). A review on carbon dioxide mineral carbonation through pH-swing process. *Chem. Eng. J.* 279: 615–630.

Azdarpour, A., Asadullah, M., Mohammadian, E., Junin, R., Hamidi, H., Manan, M., Daud, A.R.M., (2015b). Mineral carbonation of red gypsum via pH-swing process: Effect of CO₂ pressure on the efficiency and products characteristics. *Chem. Eng. J.* 264: 425–436.

Bobicki, E.R., Liu, Q., Xu, Z., Zeng, H., (2012). Carbon capture and storage using alkaline industrial wastes. *Prog. Energy Combust. Sci.* 38(2): 302–320.

Chang, E.E., Pan, S.Y., Chen, Y.H., Tan, C.S., Chiang, P.C., (2012). Accelerated carbonation of steelmaking slags in a high-gravity rotating packed bed. *J. Hazard Mater.* 227: 97–106.

Chen, K.W., Pan, S.Y., Chen, C.T., Chen, Y.H., Chiang, P.C., (2016). High-gravity carbonation of basic oxygen furnace slag for CO₂ fixation and utilization in blended cement. *J. Clean. Prod.* 124: 350–360.

Choo, T.K., Etschmann, B., Selomulya, C., Zhang, L., (2016). Behavior of Fe^{2+/3+} cation and its interference with the precipitation of Mg²⁺ cation upon mineral carbonation of Yallourn fly ash leachate under ambient conditions. *Energy Fuels* 30(4): 3269–3280.

Dri, M., Sanna, A., Maroto-Valer, M.M., (2013). Dissolution of steel slag and recycled concrete aggregate in ammonium bisulphate for CO₂ mineral carbonation. *Fuel Process. Technol.* 113: 114–122.

Harifi-Mood, A.R., Mohammadpour, F., Boczkaj, G., (2020). Solvent dependency of carbon dioxide Henry's constant in aqueous solutions of choline chloride–ethylene glycol based deep eutectic solvent. *J. Mol. Liq.* 319: 114173.

Hu, J., Liu, W., Wang, L., Liu, Q., Chen, F., Yue, H., et al., (2017). Indirect mineral carbonation of blast furnace slag with (NH₄)₂SO₄ as a recyclable extractant. *J. Energy Chem.* 26(5): 927–935.

Huang, R., Yang, J., Cao, Y., Dionysiou, D.D., Wang, C., (2022a). Peroxymonosulfate catalytic degradation of persistent organic pollutants by engineered catalyst of self-doped iron/carbon nanocomposite derived from waste toner powder. *Sep. Purif. Technol.* 291: 120963.

Ji, L., Yu, H., Wang, X., Grigore, M., French, D., Gözükar, Y.M., et al., (2017). CO₂ sequestration by direct mineralisation using fly ash from Chinese Shenfu coal. *Fuel Process. Technol.* 156: 429–437.

Kashim, M.Z., Tsegab, H., Rahmani, O., Abu Bakar, Z.A., Aminpour, S.M., (2020). Reaction mechanism of wollastonite in situ mineral carbonation for CO₂ sequestration: Effects of saline conditions, temperature, and pressure. *ACS Omega* 5(45): 28942–28954.

Lackner, K.S., Wendt, C.H., Butt, D.P., Joyce Jr., E.L., Sharp, D.H., (1995). Carbon dioxide disposal in carbonate minerals. *Energy* 20(11): 1153–1170.

Li, J., Hitch, M., (2018). Economic analysis on the application of mechanical activation in an integrated mineral carbonation process. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 128: 63–71.

- Lin, X., Zhang, Y., Liu, H., Boczkaj, G., Cao, Y., Wang, C., (2024). Carbon dioxide sequestration by industrial wastes through mineral carbonation: Current status and perspectives. *J. Clean. Prod.* 434: 140258.
- Liu, W., Teng, L., Rohani, S., Qin, Z., Zhao, B., Xu, C.C., et al., (2021a). CO₂ mineral carbonation using industrial solid wastes: A review of recent developments. *Chem. Eng. J.* 416: 129093.
- Pan, S.Y., Chang, E.E., Chiang, P.C., (2012). CO₂ capture by accelerated carbonation of alkaline wastes: A review on its principles and applications. *Aerosol Air Qual. Res.* 12(5): 770–791.
- Pan, S.Y., Chen, Y.H., Fan, L.S., Kim, H., Gao, X., Ling, T.C., et al., (2020). CO₂ mineralization and utilization by alkaline solid wastes for potential carbon reduction. *Nat. Sustain.* 3(5): 399–405.
- Pham, L.H.H.P., Rusli, R., Keong, L.K., (2016). Consequence study of CO₂ leakage from ocean storage. *Procedia Eng.* 148: 1081–1088.
- Reddy, K.J., Weber, H., Bhattacharyya, P., Morris, A., Taylor, D., Christensen, M., et al., (2010). Instantaneous capture and mineralization of flue gas carbon dioxide: Pilot scale study. *Nature Precedings*: 1–1.
- Ripple, W., Wolf, C., Newsome, T., Barnard, P., Moomaw, W., Grandcolas, P., (2019). World scientists’ warning of a climate emergency. *Bioscience*: 1149–1155.
- Seifritz, W., (1990). CO₂ disposal by means of silicates. *Nature* 345: 486–486.
- Sun, R., Huang, R., Yang, J., Wang, C., (2021). Magnetic copper smelter slag as heterogeneous catalyst for tetracycline degradation: Process variables, kinetics, and characterizations. *Chemosphere* 285: 131560.

Ukwattage, N.L., Ranjith, P.G., Yellishetty, M., Bui, H.H., Xu, T., (2015). A laboratory-scale study of the aqueous mineral carbonation of coal fly ash for CO₂ sequestration. *J. Clean. Prod.* 103: 665–674.

Van Zomeren, A., Van der Laan, S.R., Kobesen, H.B., Huijgen, W.J., Comans, R.N., (2011). Changes in mineralogical and leaching properties of converter steel slag resulting from accelerated carbonation at low CO₂ pressure. *Waste Manage.* 31(11): 2236–2244.

Veetil, S.P., Hitch, M., (2020). Recent developments and challenges of aqueous mineral carbonation: A review. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 17: 4359–4380.

Wang, B., Bonn'e, R., Zhang, Y., Wang, A., Liu, W., (2022). Renewable energy driving microbial electrochemistry toward carbon neutral. *Sustainable Horizons* 4: 100031.

Wang, B., Pan, Z., Cheng, H., Guan, Y., Zhang, Z., Cheng, F., (2020b). CO₂ sequestration: High conversion of gypsum into CaCO₃ by ultrasonic carbonation. *Environ. Chem. Lett.* 18: 1369–1377.

Wang, J., Feng, L., Palmer, P.I., Liu, Y., Fang, S., Bösch, H., et al., (2020a). Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data. *Nature* 586(7831): 720–723.

Wang, X., Ni, W., Li, J., Zhang, S., Li, K., (2021a). Study on mineral compositions of direct carbonated steel slag by QXRD, TG, FTIR, and XPS. *Energies* 14(15): 4489.

Zhang, Y., Yu, L., Cui, K., Wang, H., Fu, T., (2022a). Carbon capture and storage technology by steel-making slags: Recent progress and future challenges. *Chem. Eng. J.*: 140552

