

KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA
GÜNCEL KONULAR VE
AKADEMİK DEĞERLENDİRMELER

Editör: Dr. Öğr.Üyesi Sevilay DEMİRCİ



**Kimya Mühendisliği Alanında
Güncel Konular ve Akademik Değerlendirmeler**

Editör

Dr. Öğr.Üyesi Sevilay DEMİRCİ

yaz
yayınları

2026

**Kimya Mühendisliği Alanında Güncel
Konular ve Akademik Değerlendirmeler**

Editör: Dr. Öğr.Üyesi Sevilay DEMİRCİ

© YAZ Yayınları

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

E_ISBN 978-625-8926-91-0

Ekim 2026 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

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

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

İÇİNDEKİLER

Battery Technologies for Electric Vehicles	1
<i>Zeynep ÖZSERÇE HASTE</i>	
Emerging Battery Technologies	19
<i>Zeynep ÖZSERÇE HASTE</i>	
Krom Sonrası Dönem: Alternatif Tabaklama Sistemlerinin Karşılaştırmalı Bir Değerlendirmesi	37
<i>Hatice ER, Ertan EROL</i>	
Bor Atıklarının Çevresel Sürdürülebilirlik Açısından Değerlendirilmesi	58
<i>Havva MUMCU ŞİMŞEK</i>	

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

BATTERY TECHNOLOGIES FOR ELECTRIC VEHICLES

Zeynep ÖZSERÇE HASTE¹

1. INTRODUCTION

The rapid growth of electric mobility has established battery technology as a key determinant of electric vehicle (EV) performance. Beyond energy storage, batteries directly influence driving range, power capability, charging performance, service life, safety, vehicle mass, and cost. Lithium-ion batteries currently dominate EV applications because of their favorable balance of energy density, power capability, efficiency, and durability. However, these attributes are strongly interdependent; improvements in energy density or charging rate may introduce trade-offs involving thermal behavior, degradation, and safety (Sciatti et al., 2026).

Battery performance must therefore be evaluated across multiple scales, from fundamental electrochemical processes and cell components to module and pack integration. This chapter reviews the role of batteries in EV performance, the electrochemical principles governing rechargeable energy storage, battery architecture and components, and the key performance parameters and chemistry-dependent trade-offs that define contemporary EV battery technologies.

¹ Dr., Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği, ORCID: 0000-0001-7783-9515.

1.1. Role of Batteries in Electric Vehicle Performance

The battery is the primary onboard energy-storage system in a battery electric vehicle (BEV) and directly influences driving range, power capability, charging performance, service life, safety, and overall cost. Unlike conventional vehicles, BEVs rely on electrochemical energy storage to supply electrical power to the traction system. Battery selection therefore requires a balanced consideration of energy and power capability, durability, efficiency, safety, cost, and operating conditions rather than optimization of a single parameter (Sciatti et al., 2026; Waseem et al., 2025).

Specific energy and volumetric energy density determine how much energy can be accommodated within the mass and volume available in a vehicle and therefore strongly influence driving range and battery-pack design. However, nominal battery capacity alone does not determine vehicle range. Vehicle mass, aerodynamic and rolling resistance, auxiliary loads, regenerative braking, driving conditions, and powertrain efficiency also affect how effectively stored energy is converted into vehicle motion (Sciatti et al., 2026). Power capability is equally important because it governs the rate at which energy can be delivered or accepted during acceleration, hill climbing, and regenerative braking.

Charging performance and battery lifetime are closely interconnected. Fast charging improves vehicle usability but can accelerate degradation when high charging currents coincide with unfavorable temperature or state-of-charge conditions (Leijon, 2025). Battery aging occurs through both cycling and calendar processes and is influenced by temperature, charge-discharge rate, voltage limits, cell variability, and electrochemical changes that progressively reduce usable capacity and increase internal resistance (Zhang et al., 2024).

Temperature further affects electrochemical kinetics, ionic transport, resistance, durability, and safety. Low temperatures generally restrict ion transport and increase internal resistance, whereas elevated temperatures can accelerate parasitic reactions and degradation. Appropriate thermal control is therefore essential for maintaining performance and limiting safety risks, particularly during high-power charging and discharging (Rahman et al., 2025). Safety must likewise be considered together with energy density because overcharging, overheating, mechanical damage, or internal degradation may initiate hazardous failure processes, including thermal runaway (Şen et al., 2024; Rahman et al., 2025).

Battery technology also affects the economic and environmental performance of EVs through material requirements, manufacturing cost, resource availability, recyclability, and end-of-life management. Consequently, modern EV battery development increasingly involves balancing electrochemical performance with safety, durability, cost, and sustainability (Sciatti et al., 2026).

1.2. Electrochemical Fundamentals

Rechargeable batteries store and release energy through reversible electrochemical reactions governed by thermodynamics, reaction kinetics, and charge transport. During discharge, oxidation and reduction reactions convert stored chemical energy into electrical work: electrons flow through the external circuit, while ionic transport through the electrolyte maintains charge balance. During charging, an external electrical potential drives these processes in the reverse direction, restoring a higher-energy electrochemical state (Finkelstein et al., 2024). The fundamental charge–discharge mechanism is illustrated in Figure 1.

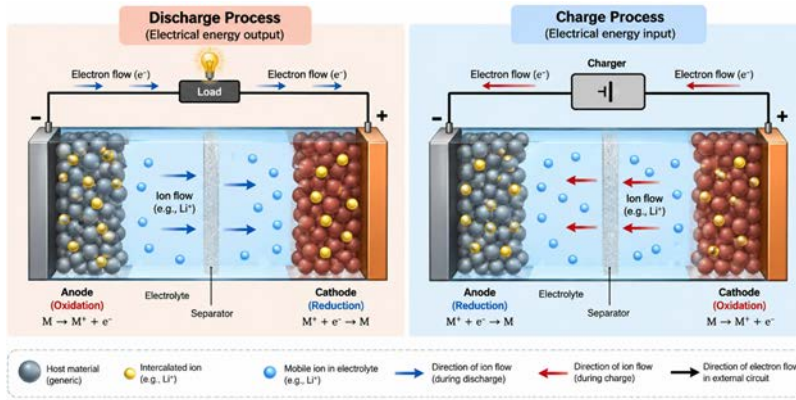


Figure 1. Fundamental electrochemical processes during charge and discharge, showing electron flow through the external circuit and ionic transport through the electrolyte.

Source: Original illustration by the author, based on Finkelstein et al. (2024).

The thermodynamic origin of cell voltage is described by the Gibbs free-energy change of the overall electrochemical reaction:

$$\Delta G = -nFE$$

where ΔG is the Gibbs free-energy change, n is the number of electrons transferred, F is Faraday's constant, and E is the equilibrium cell potential. A spontaneous discharge reaction therefore corresponds to a negative ΔG and a positive cell potential, with the free-energy difference defining the maximum reversible electrical work obtainable from the cell (Finkelstein et al., 2024). The relationship between Gibbs free energy and equilibrium cell potential is illustrated in Figure 2.

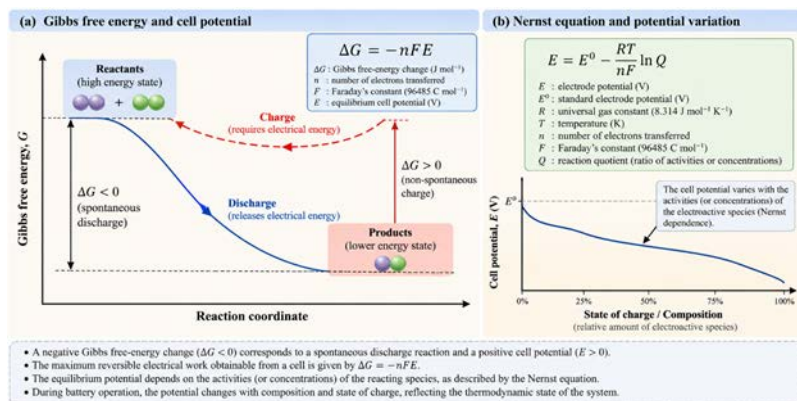


Figure 2. Relationship between Gibbs free-energy change and equilibrium cell potential according to $\Delta G = -nFE$.

Source: Original illustration by the author, based on Finkelstein et al. (2024).

The equilibrium potential varies with the thermodynamic state of the reacting species and can be expressed by the Nernst equation:

$$E = E^\circ - \left(\frac{RT}{nF}\right) \ln Q$$

where E° is the standard electrode potential, R is the universal gas constant, T is absolute temperature, and Q is the reaction quotient. Variations in composition and species activity consequently modify the equilibrium potential during battery operation. This relationship also underlies the use of electromotive-force and open-circuit-voltage measurements to investigate electrochemical potential, temperature, composition, and state of charge (Hu et al., 2024).

Practical battery operation deviates from thermodynamic equilibrium because electrochemical reactions and transport processes occur at finite rates. The resulting polarization includes activation losses associated with interfacial charge-transfer kinetics, ohmic losses arising from ionic and electronic resistance, and concentration polarization caused by mass-transport limitations. These losses generally increase with current

and reduce discharge voltage or increase the voltage required during charging. The principal sources of electrochemical polarization are illustrated in Figure 3.

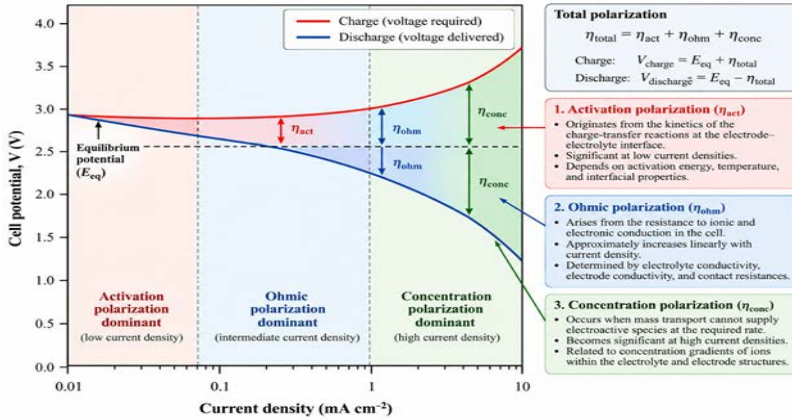


Figure 3. Principal sources of electrochemical polarization: activation, ohmic, and concentration losses.

Source: Original illustration by the author.

Battery performance therefore depends on coordinated ionic and electronic transport. Ionic conductivity, diffusion, transport distance, temperature, and local concentration influence the rate at which electrochemical reactions can proceed. The theoretical amount of charge available is governed by Faraday's law, whereas practical capacity and energy are reduced by incomplete active-material utilization, polarization, transport limitations, resistance, and parasitic reactions. Consequently, practical energy efficiency remains below the ideal reversible limit.

Temperature affects thermodynamics, reaction kinetics, ionic mobility, diffusion, and internal resistance simultaneously. Low temperatures generally increase polarization by slowing transport and interfacial reactions, whereas excessive temperatures may accelerate unwanted reactions and irreversible losses. Rechargeable battery behavior therefore results from the

coupled effects of redox thermodynamics, interfacial kinetics, polarization, and charge transport, which together determine how closely practical operation approaches the thermodynamic limit.

1.3. Architecture and Components of EV Batteries

Electric vehicle batteries are hierarchical energy-storage systems in which individual electrochemical cells are integrated into larger electrical and structural assemblies. At the cell level, performance depends on the coordinated operation of the electrodes, electrolyte, separator, current collectors, and supporting materials. At the vehicle level, cells are interconnected and integrated into modules and packs to satisfy voltage, capacity, power, mechanical, and packaging requirements (De Santis, Giusti, Poli, Piancastelli, & Liverani, 2026; Sciatti et al., 2026).

The electrodes contain electrochemically active materials, conductive additives, and binders deposited onto metallic current collectors. Active materials store and release charge-carrying ions, conductive additives provide electronic pathways, and binders maintain mechanical cohesion. Aluminum and copper foils are commonly used as positive- and negative-electrode current collectors, respectively, providing low-resistance electronic pathways while contributing to the inactive mass of the cell (Sciatti et al., 2026).

The electrolyte enables ionic transport between the electrodes, while the separator prevents direct electronic contact while remaining permeable to ions. Together, these components must provide sufficient ionic conductivity, electrical insulation, chemical stability, and mechanical integrity for reliable cell operation (Sciatti et al., 2026). The principal components of a lithium-ion battery cell are illustrated in Figure 4.

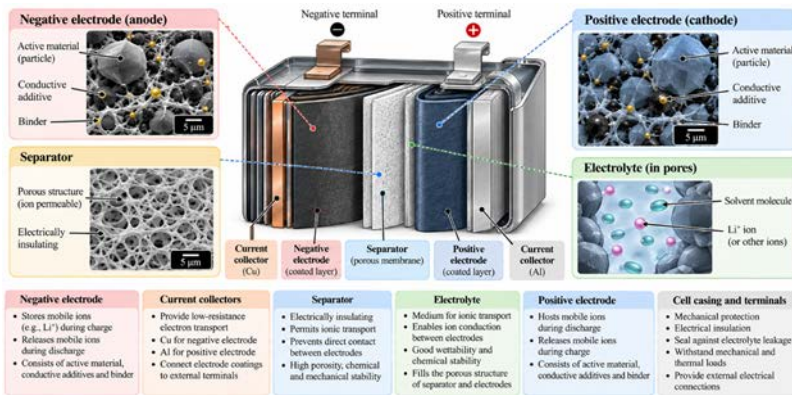


Figure 4. Principal components of a lithium-ion battery cell, including electrodes, current collectors, separator, electrolyte, and external terminals.

Source: Original illustration by the authors, based on Sciatti et al. (2026).

These internal components are enclosed within a mechanically protective housing, and their arrangement gives rise to the major commercial cell formats used in EVs: cylindrical, prismatic, and pouch cells. Cylindrical cells employ wound electrode assemblies enclosed in rigid metallic casings and benefit from standardized manufacturing and high mechanical robustness. Prismatic cells package electrode layers within a rectangular rigid enclosure, enabling efficient utilization of available installation space. Pouch cells replace the rigid metal enclosure with a flexible laminated package, reducing inactive structural mass but increasing the importance of external mechanical support. The choice among these formats therefore affects not only cell geometry but also manufacturing complexity, structural overhead, packaging efficiency, and subsequent integration into the vehicle (De Santis, Giusti, Poli, Piancastelli, & Liverani, 2026).

A single electrochemical cell cannot normally provide the voltage and energy required for vehicle propulsion. Cells are therefore interconnected electrically in series and/or parallel

configurations. Series connections increase the total operating voltage, whereas parallel connections increase available capacity and current capability. Groups of interconnected cells may form modules, which provide an intermediate level of mechanical organization and electrical assembly. Multiple modules, together with electrical interconnects, sensing elements, protective devices, structural supports, and thermal-management interfaces, are subsequently integrated into the complete battery pack. Cell-to-cell variations in capacity, internal resistance, and state of charge can become important at this scale because the behavior of individual cells influences the performance and reliability of the assembled pack (Chang et al., 2024). The hierarchical cell–module–pack architecture is illustrated in Figure 5.

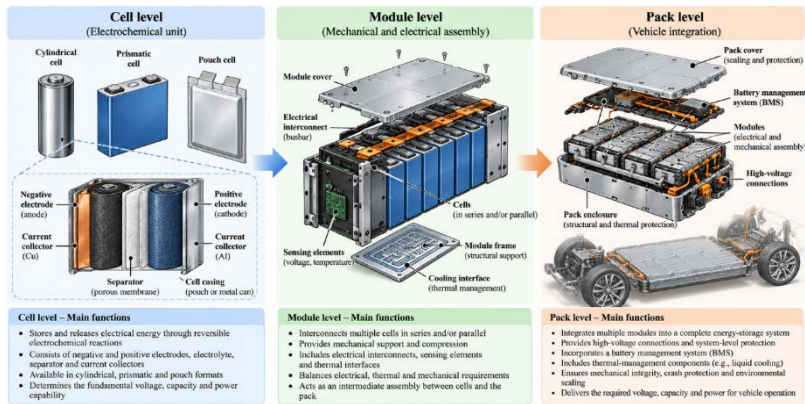


Figure 5. Hierarchical cell–module–pack architecture of an EV battery system.

Source: Original illustration by the authors.

Conventional cell–module–pack architectures introduce intermediate housings, frames, connectors, and other inactive components that add mass and occupy volume. Recent EV battery design has therefore increasingly explored more integrated architectures. In cell-to-pack (CTP) configurations, cells are incorporated more directly into the pack, reducing or eliminating conventional module-level structures. More highly integrated

concepts extend this principle toward cell-to-body or cell-to-chassis designs, in which the battery assembly contributes more directly to the vehicle structure. Reducing intermediate packaging can increase the proportion of pack mass and volume devoted to energy-storing cells; however, higher integration also introduces design trade-offs involving mechanical protection, thermal interfaces, manufacturability, maintenance, and end-of-life disassembly (De Santis et al., 2026; GhasemiPourMasoule, Keshavarzi, & Saeidi Googarchin, 2026). The evolution toward more integrated battery architectures is illustrated in Figure 6.

The battery pack must additionally withstand mechanical loads encountered during vehicle operation and potential crash events. Its enclosure and supporting structures protect the cells from vibration, deformation, impact, and environmental exposure while maintaining appropriate electrical isolation. Reinforcements, energy-absorbing elements, mounting structures, sealing systems, and safety components are therefore integral to pack architecture. Structural design is particularly important because improvements in mechanical protection generally require additional material, whereas excessive structural mass reduces pack-level specific energy. Modern EV battery engineering consequently seeks to minimize inactive structural overhead without compromising mechanical integrity or safety (GhasemiPourMasoule et al., 2026).

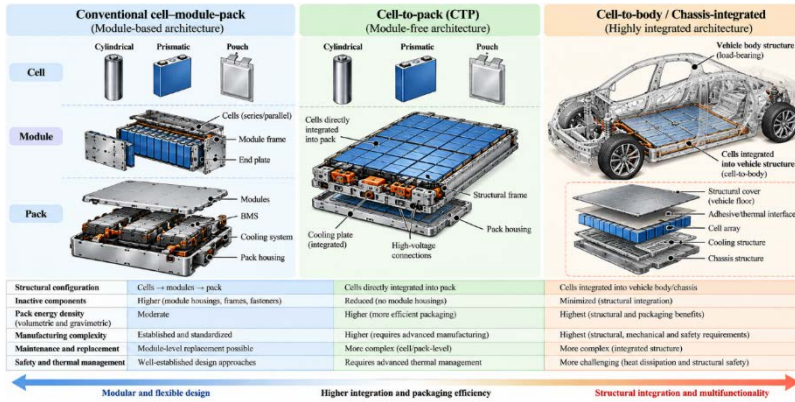


Figure 6. Evolution from conventional module-based battery architecture toward cell-to-pack and structurally integrated configurations.

Source: Original illustration by the authors, based on De Santis et al. (2026) and GhasemiPourMasoule et al. (2026).

Overall, EV battery architecture represents a transition from microscopic electrochemical components to a vehicle-scale energy-storage system. Electrodes, electrolyte, separator, current collectors, and supporting materials establish the functional cell, while cell format, electrical interconnection, structural integration, and packaging determine how this electrochemical capability is translated to the module and pack levels. The resulting architecture directly influences usable energy, power delivery, volumetric efficiency, mass, reliability, and vehicle integration.

1.4. Key Performance Parameters of EV Batteries

The performance of an electric vehicle (EV) battery cannot be represented adequately by a single metric. Driving range, acceleration, charging capability, service life, energy efficiency, and safe operation depend on several interrelated parameters, including capacity, operating voltage, specific energy, volumetric energy density, specific power, C-rate capability, cycle life, and temperature tolerance. Their relative

importance also changes with vehicle requirements. A long-range passenger vehicle, for example, places greater emphasis on energy density, whereas applications involving frequent charging or intensive cycling may benefit more from durability and rate capability. Battery chemistry consequently plays a central role in establishing the balance among these performance attributes.

Capacity and operating voltage provide the starting point for evaluating battery performance. Capacity, conventionally expressed in ampere-hours (Ah), represents the amount of charge that can be transferred under specified conditions, whereas the energy available from a battery depends on both capacity and operating voltage. Chemistry strongly influences voltage. Commercial NMC and NCA cells generally operate at higher nominal voltages than LFP-based cells, while LTO-containing systems operate at substantially lower cell voltages because of the relatively high potential of the LTO negative electrode. These differences are consequential at the pack level because the required number of series-connected cells and the attainable energy depend partly on cell voltage (Sciatti et al., 2026; Şen, Özcan, & Eker, 2024)

For EV applications, **specific energy and volumetric energy density** are particularly important because they determine how much energy can be accommodated within the mass and volume available in the vehicle. Specific energy is expressed in Wh kg^{-1} , while volumetric energy density is expressed in Wh L^{-1} . Among established lithium-ion technologies, NCA and high-Ni NMC generally provide the highest cell-level specific energy. Recent reviews report commercial specific-energy ranges of approximately 220–240 Wh kg^{-1} for NMC and 250–300 Wh kg^{-1} for NCA, although values depend strongly on cell design and material formulation. LFP typically provides lower specific energy, with reported commercial ranges around 90–160 Wh kg^{-1} , but its lower energy density is compensated by other

advantages, particularly thermal stability and durability. LMO generally occupies a lower-to-intermediate energy range, while LTO-based cells exhibit particularly low specific energy because of their lower operating voltage (Sciatti et al., 2026; Şen et al., 2024).

The emerging lithium manganese iron phosphate (LMFP) chemistry seeks to narrow the energy-density gap between LFP and layered transition-metal oxides. Partial substitution of Fe by Mn raises the operating voltage relative to conventional LFP while retaining many characteristics associated with phosphate-based cathodes. Recent commercial-scale reports summarized by Sciatti et al. (2026) indicate that advanced LMFP cells can approach approximately 240 Wh kg⁻¹ under favorable designs. LMFP therefore illustrates an important point in battery evaluation: performance development does not necessarily involve maximizing one parameter, but can instead involve modifying chemistry to obtain a more favorable compromise among energy density, cost, stability, and lifetime. The comparative characteristics of major EV battery chemistries are summarized in Figure 7.

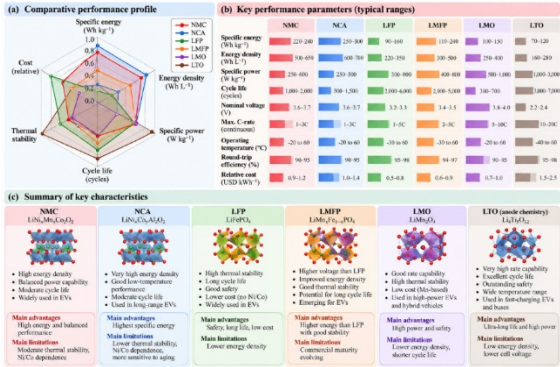


Figure 7. Comparative performance characteristics of major lithium-ion battery chemistries for EV applications.

Source: Original illustration by the authors, based on Şen et al. (2024) and Sciatti et al. (2026).

Energy storage must be considered together with power capability. Specific power (W kg^{-1}) and volumetric power density (W L^{-1}) describe how rapidly energy can be delivered relative to battery mass and volume. High power capability is required during acceleration and hill climbing and is also relevant to regenerative braking, where the battery must accept energy over relatively short periods. LTO-based cells are particularly attractive from this perspective because their chemistry supports high charge and discharge rates. LMO also exhibits favorable rate capability, whereas NMC and NCA are generally engineered to balance power delivery with higher energy storage. LFP can provide substantial power, although its lower cell voltage and energy density influence overall pack characteristics. These differences demonstrate why energy density alone is insufficient for selecting a battery technology for a particular EV application (Şen et al., 2024). The trade-off between specific energy and specific power is illustrated in Figure 8.

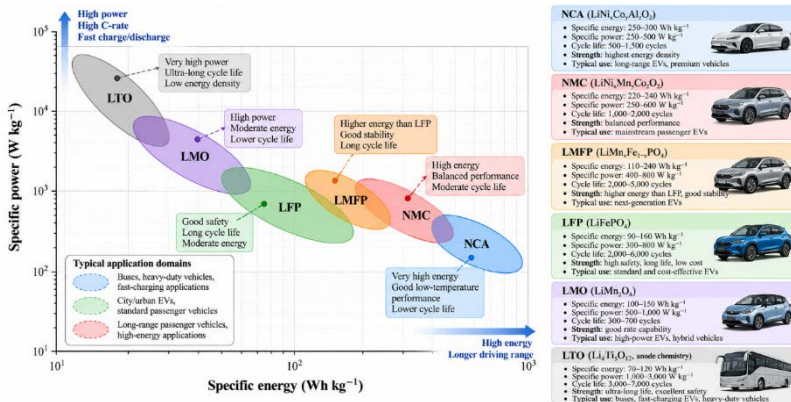


Figure 8. Conceptual Ragone-type comparison of specific energy and specific power for major lithium-ion battery chemistries used in electric mobility.

Source: Original illustration by the authors based on recent comparative literature.

The **C-rate** provides a normalized measure of charge or discharge current relative to nominal capacity. Under idealized conditions, 1C corresponds to transferring the nominal capacity in approximately one hour, 2C in approximately 30 min, and 0.5C in approximately two hours. In practice, increasing C-rate intensifies internal heat generation and may introduce stronger kinetic and transport limitations. The permissible rate is therefore chemistry- and design-dependent. LTO is particularly well suited to high-rate operation, whereas conventional NMC, NCA, and LFP cells are normally operated within more conservative ranges when long service life is required. Importantly, the maximum short-duration C-rate reported for a cell should not be interpreted as a continuously sustainable operating condition (Sciatti et al., 2026).

Cycle life further differentiates lithium-ion chemistries. It is generally defined as the number of charge–discharge cycles completed before capacity falls to a specified end-of-life threshold. NMC cells commonly provide approximately 1,000–2,000 cycles under representative conditions, although optimized operating windows can extend their lifetime considerably. LFP typically offers longer and more stable cycling, with values of roughly 2,000 cycles or more frequently reported. LTO-based systems exhibit exceptional durability, with approximately 3,000–7,000 cycles and values above 5,000 cycles reported in comparative literature. By contrast, conventional NCA and LMO systems may show shorter cycle life under demanding conditions. These ranges must be interpreted cautiously because depth of discharge, C-rate, temperature, state-of-charge window, cell construction, and end-of-life criterion can substantially alter the measured result (Şen et al., 2024; Sciatti et al., 2026).

Temperature-dependent behavior and **thermal stability** introduce another important chemistry-dependent distinction. Layered Ni-rich oxides such as NMC and NCA enable high

energy density but require careful control of temperature and state of charge because increasing Ni content can reduce structural and thermal stability. LFP possesses a comparatively stable olivine framework and is generally more resistant to thermally induced decomposition. Comparative literature reports thermal-runaway onset values around 150 °C for some NCA systems, approximately 210 °C for NMC, and approximately 250–270 °C for LMO and LFP, although the actual onset temperature depends strongly on cell design, state of charge, electrolyte, testing procedure, and the definition of thermal runaway. LTO-containing systems can offer still greater thermal tolerance in some configurations. These values should therefore be used comparatively rather than as universal safety thresholds (Şen et al., 2024; Sciatti et al., 2026).

Energy efficiency describes the fraction of charging energy that can subsequently be recovered. Coulombic efficiency considers the ratio of discharged to charged capacity, whereas round-trip energy efficiency additionally accounts for voltage losses. High energy efficiency is desirable because internal losses reduce usable energy and generate heat. However, efficiency is not exclusively determined by cathode chemistry; cell resistance, electrode design, temperature, C-rate, state of charge, and aging condition also contribute. It is therefore more appropriate to regard efficiency as a cell- and operating-condition-dependent performance metric rather than assign a single invariant efficiency value to each chemistry.

REFERENCES

- Chang, L., Yu, Y., Mu, M., Ding, Z., MacDonald, B., & Sun, Z. (2024). Effect of module configurations on the performance of parallel-connected lithium-ion battery modules. *Journal of Energy Storage*, 102, 114091. doi:10.1016/j.est.2024.114091
- De Santis, M., Giusti, I., Poli, F., Piancastelli, L., & Liverani, A. (2026). Design and production trade-offs in lithium-ion batteries from cell formats to electric vehicles. *Cell Reports Physical Science*, 7(3), 103162. doi:10.1016/j.xcrp.2026.103162
- Finkelstein, S. H., Ricci, M., Böttcher, T., & Schmidt-Rohr, K. (2024). How lithium-ion batteries work conceptually: Thermodynamics of Li bonding in idealized electrodes. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 26, 24157–24171. doi:10.1039/D4CP00818A
- GhasemiPourMasoule, S. H., Keshavarzi, A., & Saeidi Googarchin, H. (2026). A review on structural and mechanical insights into electric vehicle battery packs: Subsystems, standards, and design innovations. *Journal of Energy Storage*, 158, 121657. doi:10.1016/j.est.2026.121657
- Hu, Y., Liang, J., Chen, X., Chen, G., Peng, Y., Tang, S., . . . Yang, Y. (2024). Comparative study of thermodynamic & kinetic parameters measuring techniques in lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 606, 234590. doi:10.1016/j.jpowsour.2024.234590
- Leijon, J. (2025). Charging strategies and battery ageing for electric vehicles: A review. *Energy Strategy Reviews*, 57, 101641. doi:10.1016/j.esr.2025.101641

- Rahman, M. A., Reddy, G. M. V., Chatterjee, R., Hait, S., Hasnain, S. M. M., Paramasivam, P., & Dabelo, L. H. (2025). Energy sources and thermal management technologies for electric vehicle batteries: A technical review. *Global Challenges*, 9(7), e00083. doi:10.1002/gch2.202500083
- Sciatti, F., Tamburrano, P., Distaso, E., Amirante, R., Radogna, A. V., Morciano, A., & Grassi, G. (2026). A comprehensive overview of lithium-ion batteries for electric vehicles: Materials, performance, safety, recycling, and emerging technologies. *Journal of Energy Storage*, 144, 119694. doi:10.1016/j.est.2025.119694
- Şen, M., Özcan, M., & Eker, Y. R. (2024). A review on the lithium-ion battery problems used in electric vehicles. *Next Sustainability*, 3, 100036. doi:10.1016/j.nxsust.2024.100036
- Waseem, M., Lakshmi, G. S., Ahmad, M., & Suhaib, M. (2025). Energy storage technology and its impact in electric vehicle: Current progress and future outlook. *Next Energy*, 6, 100202. doi:10.1016/j.nxener.2024.100202
- Zhang, J., Huang, H., Zhang, G., Dai, Z., Wen, Y., & Jiang, L. (2024). Cycle life studies of lithium-ion power batteries for electric vehicles: A review. *Journal of Energy Storage*, 93, 112231. doi:10.1016/j.est.2024.112231

EMERGING BATTERY TECHNOLOGIES

Zeynep ÖZSERÇE HASTE¹

1. INTRODUCTION

Continued expansion of electric mobility and renewable-energy storage is increasing the performance demands placed on rechargeable batteries. Although lithium-ion technology has reached a high level of maturity, simultaneously increasing energy storage capability, safety, charging performance, service life, and material sustainability remains difficult. Emerging battery concepts therefore seek improvement through changes in electrode chemistry, electrolyte design, or the fundamental architecture of the electrochemical cell.

These approaches can be broadly distinguished by the limitation they are intended to overcome. Solid-state systems redesign ion transport by replacing conventional liquid electrolytes with solid ion conductors, whereas lithium-metal and silicon-based concepts primarily target greater anode capacity (Dutra et al., 2025; Wang et al., 2024; Sun et al., 2024). Lithium-sulfur chemistry instead exploits sulfur conversion reactions to achieve high theoretical energy storage (Heo et al., 2025). Sodium-ion batteries broaden the material base through Na-based electrochemistry and abundant sodium resources (Mariyappan et al., 2026), while metal-air systems obtain a cathodic reactant from atmospheric oxygen rather than storing all active material within the cell (Rai et al., 2025). The resulting technologies therefore differ not only in potential performance but also in the

¹ Dr., Sivas University of Science and Technology, Department of Chemical Engineering, ORCID: 0000-0001-7783-9515.

interfacial, structural, kinetic, and manufacturing problems that must be resolved.

These technologies address different limitations of conventional batteries and therefore offer distinct advantages and challenges. Their main development pathways are summarized in Figure 1.

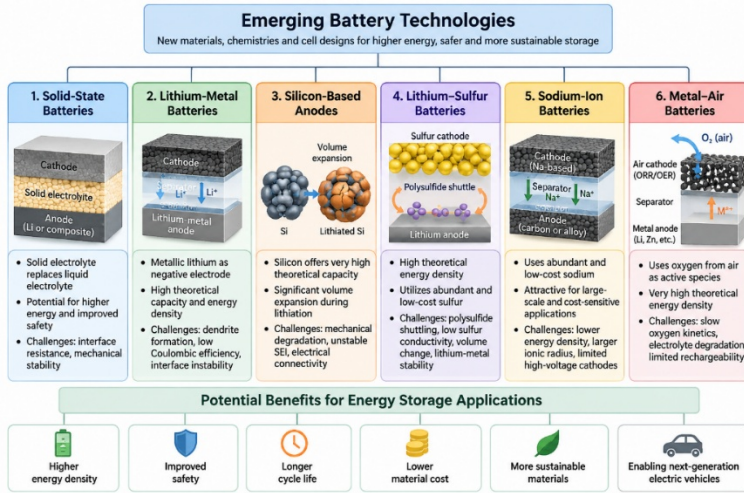


Figure 1. Principal development pathways of emerging battery technologies.

Source: Original illustration by the author.

The following sections discuss solid-state, lithium-metal, silicon-anode, lithium–sulfur, sodium-ion, and metal–air batteries, focusing on their key characteristics, advantages, limitations, and potential applications.

2. SOLID-STATE BATTERIES

Solid-state batteries (SSBs) are considered a promising alternative to conventional lithium-ion batteries. Their main difference is the use of a solid electrolyte instead of a liquid electrolyte. This design can improve battery safety by reducing

the use of flammable liquids and may also enable high-energy electrodes such as lithium metal (Sung et al., 2024; Dutra et al., 2025).

Solid electrolytes used in SSBs encompass sulfide-, oxide-, polymer-, and halide-based materials, each providing a different balance between ion transport, stability, mechanical behavior, and manufacturability. Sulfides are attractive for their high ionic conductivity, although their sensitivity to moisture complicates processing. Oxides generally provide greater chemical and thermal robustness, but their rigidity can limit intimate contact with electrode surfaces. Polymer electrolytes offer greater flexibility and easier processing at the expense of comparatively limited room-temperature conductivity. Halide electrolytes have emerged as another promising class, particularly because of their ionic conductivity and compatibility with high-voltage cathodes. Consequently, electrolyte selection remains a multi-parameter optimization problem rather than a choice based solely on ionic conductivity (Pourzolfaghar et al., 2024; Dutra et al., 2025).

The basic structure and major electrolyte types of SSBs are illustrated in Figure 2.

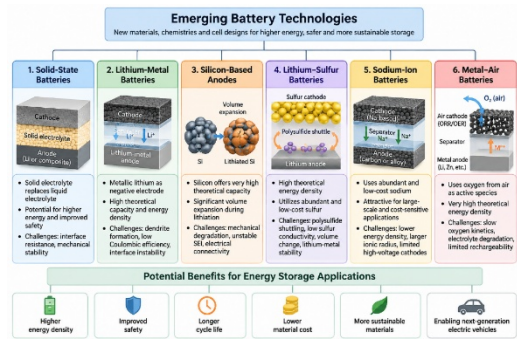


Figure 2. Basic structure and major solid-electrolyte types of solid-state batteries.

Source: Original illustration by the author.

The performance of SSBs is strongly governed by the quality of the interfaces formed between solid components. In contrast to liquid electrolytes, which can readily wet electrode surfaces, a solid electrolyte must preserve physical and electrochemical contact as the cell undergoes repeated cycling. Interfacial reactions, local contact loss, and mechanically induced stress can therefore create resistive regions and hinder ion transport. These effects become particularly important when lithium metal is employed, since heterogeneous lithium deposition may further destabilize the electrolyte–anode interface (Jia et al., 2024).

Large-scale manufacturing also remains challenging. Solid electrolytes must be produced as thin and uniform layers while maintaining sufficient mechanical strength and ionic conductivity. Material cost, moisture sensitivity, processing conditions, and pressure requirements can further complicate commercial production (Sung et al., 2024).

Recent studies therefore focus on improving solid electrolytes, stabilizing electrode–electrolyte interfaces, and developing scalable manufacturing methods. Continued progress in these areas could make SSBs suitable for electric vehicles requiring higher energy density and improved safety. However, long-term cycling stability, manufacturing complexity, and cost must still be addressed before widespread commercialization (Dutra et al., 2025).

3. LITHIUM-METAL BATTERIES

Lithium-metal batteries (LMBs) seek to increase cell-level energy storage by replacing the conventional graphite anode with metallic lithium. The attraction of this approach arises from lithium metal's theoretical specific capacity of 3860 mAh g^{-1} and its electrochemical potential of -3.04 V versus the standard

hydrogen electrode (SHE) (Wang et al., 2024). Its practical behavior, however, is governed by the reversibility of lithium deposition and removal. During repeated cycling, spatially uneven current distribution can produce irregular lithium deposits rather than a compact and uniform layer. Continued growth of these deposits may generate dendritic or moss-like structures, while some deposited lithium can lose electronic contact and remain electrochemically inactive as “dead lithium.” Together, these processes lower Coulombic efficiency and accelerate capacity loss (Jiang & Ye, 2024).

A second limitation originates from the strong chemical reactivity of metallic lithium toward the electrolyte. Instead of forming a completely stable interface, repeated lithium deposition and stripping can continuously disturb the solid electrolyte interphase (SEI), exposing fresh lithium to further parasitic reactions. The resulting consumption of lithium and electrolyte progressively increases interfacial losses. This issue becomes particularly critical when cells are evaluated under practically relevant conditions, including limited electrolyte quantity, thin lithium electrodes, and high cathode loading (Sun et al., 2025).

Accordingly, current strategies are designed not only to inhibit dendritic growth but also to regulate how lithium nucleates, deposits, and dissolves at the interface. Electrolyte formulation, artificial interphases, three-dimensional host architectures, and solid electrolytes represent complementary approaches for promoting more homogeneous deposition and accommodating morphological changes during cycling (Peng et al., 2024; He et al., 2024).

The main processes and challenges associated with lithium-metal anodes are illustrated in Figure 3.

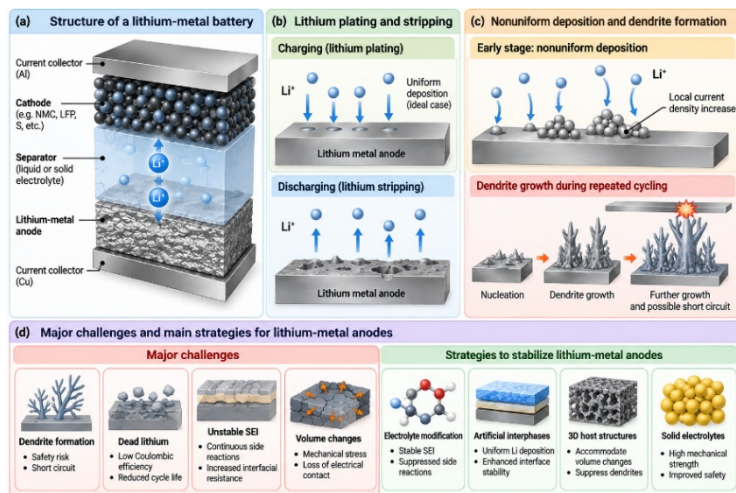


Figure 3. Lithium plating–stripping behavior and major challenges of lithium-metal anodes.

Source: Original illustration by the author.

Overall, lithium-metal batteries offer substantial potential for increasing battery energy density. However, dendrite formation, unstable interfaces, low Coulombic efficiency, and limited cycle life must be controlled under practical operating conditions before widespread application can be achieved.

4. SILICON-BASED ANODES

Silicon offers a substantially different lithium-storage mechanism from graphite and is therefore an attractive route toward higher-capacity lithium-ion batteries (LIBs). Formation of $\text{Li}_{15}\text{Si}_4$ corresponds to a theoretical specific capacity of approximately 3579 mAh g^{-1} , compared with 372 mAh g^{-1} for graphite. This large capacity advantage, together with silicon's abundance and relatively low operating potential, has motivated extensive research on silicon-containing anodes (Sun et al., 2024).

The principal difficulty is that lithium storage in silicon proceeds through alloying rather than conventional graphite-like intercalation. Incorporation of lithium into the silicon structure can produce a volume increase of approximately 300%, followed by substantial contraction as lithium is removed. Repetition of this dimensional change imposes mechanical stress throughout the electrode. Over successive cycles, the resulting damage can fracture silicon particles, disrupt conductive pathways, and progressively isolate active material from the electrode network (Li et al., 2025).

Mechanical degradation is closely coupled with interfacial instability. When an expanded silicon particle contracts and its surface fractures, newly exposed regions react again with the electrolyte. The SEI must therefore repeatedly reform instead of remaining stable over long-term cycling. This continuous reconstruction consumes cyclable lithium and electrolyte, contributing to irreversible capacity loss and low initial Coulombic efficiency, particularly in electrodes containing large fractions of silicon (Xiao et al., 2026).

Materials engineering consequently aims to preserve both mechanical integrity and interfacial stability. Nanostructured or porous silicon can provide additional space for dimensional changes, whereas mechanically adaptable binders help maintain cohesion within the electrode. Combining silicon with carbon is particularly useful because the carbon phase can provide continuous electron-transport pathways while partially buffering silicon expansion. Complementary approaches, including prelithiation, electrolyte optimization, and targeted interface modification, are being investigated to compensate for irreversible lithium loss and promote a more stable SEI (Sun et al., 2024; Xiao et al., 2026).

The main lithiation-induced changes and degradation mechanisms of silicon-based anodes are illustrated in Figure 4.

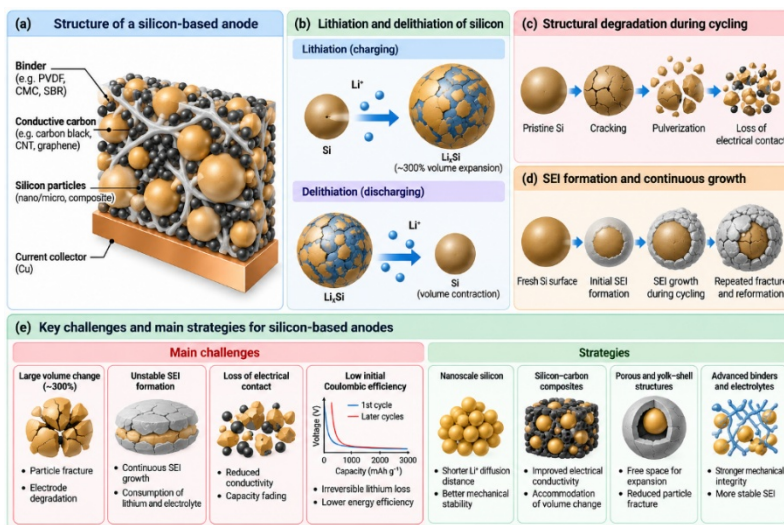


Figure 4. Volume expansion and major degradation mechanisms of silicon-based anodes.

Source: Original illustration by the author.

Overall, silicon-based anodes provide a promising pathway toward higher-energy LIBs while remaining compatible with established lithium-ion battery chemistry (Sun et al., 2024; Xiao et al., 2026). However, controlling volume expansion, maintaining electrode integrity, and stabilizing the SEI under practical operating conditions remain essential for their broader commercialization.

5. LITHIUM-SULFUR BATTERIES

Lithium-sulfur (Li-S) batteries derive their high theoretical energy-storage capability from the conversion chemistry of sulfur rather than the intercalation reactions characteristic of conventional lithium-ion cathodes. Sulfur

provides a theoretical specific capacity of 1675 mAh g^{-1} , while the corresponding cell chemistry has a theoretical specific energy of approximately 2600 Wh kg^{-1} . Its natural abundance and relatively low cost further strengthen the interest in sulfur as a cathode material for lightweight, high-energy batteries (Heo et al., 2025).

Sulfur reduction does not occur in a single step. During discharge, elemental sulfur is progressively transformed through intermediate lithium polysulfides (LiPSs) before the reaction terminates predominantly in lithium sulfide (Li_2S); charging drives the sequence in the opposite direction. The difficulty is that several intermediate LiPSs are soluble in commonly used electrolytes. Once dissolved, they can leave the cathode region and migrate through the cell, producing the characteristic polysulfide shuttle. This redistribution of sulfur species promotes parasitic reactions, self-discharge, and loss of electrochemically available sulfur, ultimately accelerating capacity decay (Ke et al., 2025).

The shuttle process is only one component of the practical challenge. Both sulfur and Li_2S are electronically insulating, so efficient electron transport must be provided by the electrode architecture. At the same time, conversion between sulfur species produces dimensional changes within the cathode, while the lithium-metal counter electrode introduces its own interfacial and deposition instabilities. Stable operation therefore requires simultaneous management of reaction kinetics, mass transport, electrode structure, and lithium-anode behavior (Qian et al., 2024; Majid et al., 2024).

These considerations have shifted research toward integrated cell design, including conductive sulfur hosts, catalytic interfaces, selective separators, electrolyte optimization, and lithium-anode protection. Importantly, improvements obtained

with excess electrolyte or very low sulfur loading may not translate into high cell-level energy density. Practical development therefore requires strong electrochemical performance to be retained at high sulfur loading and under lean-electrolyte conditions (Fei & Li, 2024; Qian et al., 2024).

The main sulfur conversion reactions and polysulfide shuttle mechanism are illustrated in Figure 5.

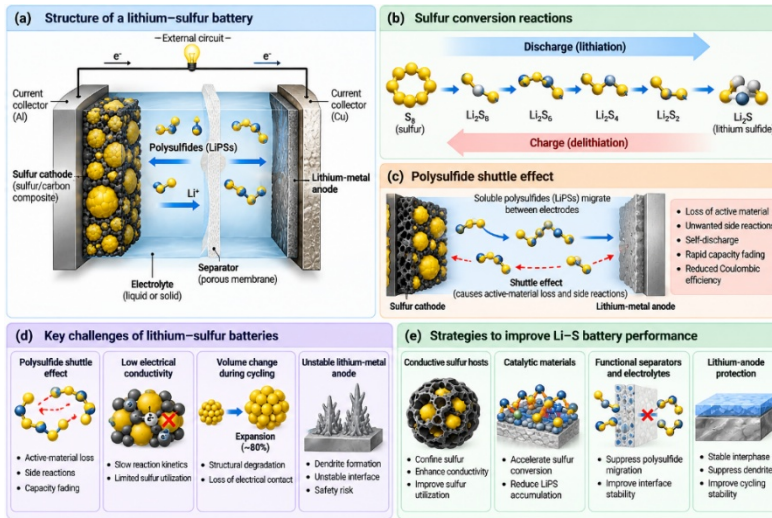


Figure 5. Sulfur conversion and polysulfide shuttle mechanism in lithium-sulfur batteries.

Source: Original illustration by the author.

Overall, Li-S batteries offer high theoretical energy density and the advantage of abundant sulfur resources. Their practical development, however, depends on controlling polysulfide shuttling, improving electrode conductivity, stabilizing the lithium-metal anode, and maintaining good performance under realistic sulfur-loading and electrolyte conditions.

6. SODIUM-ION BATTERIES

Sodium-ion batteries (SIBs) provide an alternative electrochemical platform in which Na^+ ions reversibly move between positive and negative electrodes during cycling. Their growing importance is associated not only with electrochemical performance but also with the broad geographical availability of sodium resources and the possibility of reducing dependence on some critical raw materials used in lithium-ion technologies. These characteristics have generated particular interest in SIBs for stationary storage and selected mobility applications (Mariyappan et al., 2026).

The chemistry offers considerable flexibility in electrode selection. Layered transition-metal oxides, polyanionic compounds, and Prussian blue analogues are among the principal cathode families, whereas hard carbon has become a leading anode candidate. Unlike a simple single-site storage process, sodium uptake by hard carbon can involve several contributions, including adsorption at accessible sites, insertion within carbon layers, and storage associated with nanoporous regions. The relative contribution of these mechanisms depends strongly on carbon structure and processing history (Wu et al., 2024).

Sodium chemistry also introduces constraints that differ from those encountered in lithium-ion systems. The larger ionic radius of Na^+ can impose greater structural and kinetic demands on some host materials, while current SIBs generally deliver lower energy density than leading lithium-ion cells. For hard-carbon anodes, irreversible sodium consumption during initial cycling can additionally reduce the initial Coulombic efficiency (Wang et al., 2025). Consequently, current research seeks to control pore architecture, defect populations, surface chemistry, precursor characteristics, and electrode–electrolyte interactions in

order to improve reversible sodium storage and cycling stability (Wu et al., 2024; Wang et al., 2025).

The basic operating mechanism, electrode materials, and main advantages and limitations of SIBs are summarized in Figure 6.

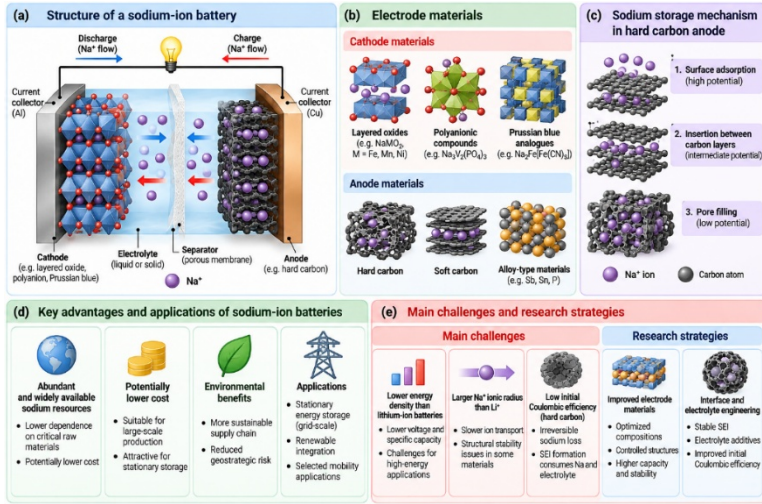


Figure 6. Operating principle and key characteristics of sodium-ion batteries.

Source: Original illustration by the author based on the literature discussed in the text.

Overall, sodium-ion batteries offer an attractive route toward more resource-diverse and potentially lower-cost energy storage. Their broader application will depend on further improvements in energy density, electrode performance, and manufacturing efficiency

7. METAL–AIR BATTERIES

Metal–air batteries (MABs) differ fundamentally from closed battery systems because one of the electrochemically active reactants—oxygen—is supplied from the external

environment rather than stored entirely within the cell. In a typical configuration, oxidation occurs at the metal anode, while a porous air electrode provides sites for oxygen electrochemistry. This open-cathode concept reduces the amount of internally stored cathode-active material and accounts for the high theoretical specific energies associated with several metal–air chemistries (Rai et al., 2025).

The electrochemical requirements of the air electrode change with the direction of operation. During discharge, oxygen participates in the oxygen reduction reaction (ORR), coupled with oxidation of the metal anode. Rechargeable configurations must additionally support the reverse oxygen evolution reaction (OER) during charging. Because both processes can exhibit sluggish kinetics and substantial polarization, the activity and durability of the air-electrode catalyst strongly influence round-trip efficiency and long-term performance (Liu et al., 2025).

The choice of metal produces chemically distinct systems rather than a single universal metal–air technology. Lithium–air cells are attractive from the standpoint of theoretical energy storage but remain highly sensitive to electrolyte and reaction-product stability. Zinc–air chemistry benefits from the availability and relatively low cost of zinc and has been widely investigated for rechargeable and stationary systems. Aluminum–air and magnesium–air batteries offer similarly abundant metallic resources, although corrosion, surface passivation, and difficulties in achieving efficient electrical recharge remain significant limitations (Rai et al., 2025; Nazir et al., 2024).

Progress therefore depends on coordinated improvements at both electrodes and within the electrolyte. At the air cathode, reducing ORR/OER polarization requires active and durable bifunctional catalysts together with structures that maintain oxygen and ion transport. Meanwhile, electrolyte decomposition,

metal corrosion or passivation, atmospheric contamination, and anode instability must be controlled to preserve reversibility. Advances in catalyst design, electrolyte chemistry, air-electrode architecture, and anode protection are consequently being pursued as complementary rather than isolated solutions (Rai et al., 2025; Liu et al., 2025).

The working principle, major types, advantages, and challenges of metal–air batteries are summarized in Figure 7.

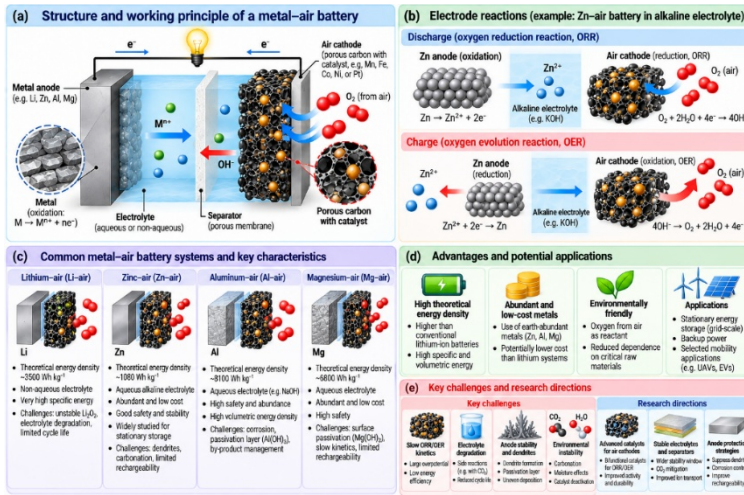


Figure 7. Working principle and key characteristics of metal–air batteries.

Source: Original illustration by the authors based on the literature discussed in the text.

Overall, metal–air batteries offer considerable potential for high-energy and sustainable energy storage. However, practical application requires improvements in oxygen-reaction kinetics, electrolyte stability, anode protection, rechargeability, and long-term cycling performance (Rai et al., 2025; Liu et al., 2025).

REFERENCES

- Dutra, A. C. C., Goldmann, B. A., Islam, M. S., ... Dawson, J. A. (2025). Understanding solid-state battery electrolytes using atomistic modelling and machine learning. *Nature Reviews Materials*, 10, 566–583. doi:10.1038/s41578-025-00817-y.
- Fei, Y., & Li, G. (2024). Unveiling the pivotal parameters for advancing high energy density in lithium-sulfur batteries: A comprehensive review. *Advanced Functional Materials*, 34(21), 2312550. doi:10.1002/adfm.202312550.
- He, X., Zhang, K., Zhu, Z., Tong, Z., & Liang, X. (2024). 3D-hosted lithium metal anodes. *Chemical Society Reviews*, 53, 9–24. doi:10.1039/D3CS00495C.
- Heo, J., Gu, H., Lee, C., Sung, J., Kim, D.-H., Han, J., ... Park, J.-W. (2025). Recent advances in achieving high energy/power density of lithium–sulfur batteries for current and near-future applications. *Battery Energy*, 4(5), e20240051. doi:10.1002/bte2.20240051.
- Jia, L., Zhu, J., Zhang, X., Guo, B., Du, Y., ... Zhuang, X. (2024). Li–solid electrolyte interfaces/interphases in all-solid-state Li batteries. *Electrochemical Energy Reviews*, 7, 12. doi:10.1007/s41918-024-00212-1.
- Jiang, Y., & Ye, F. (2024). Dead lithium in lithium metal batteries: Formation, characterization and strategies. *Chemistry—A European Journal*, 30(43), e202400424. doi:10.1002/chem.202400424.
- Ke, J., Wang, Z., Zhu, H., Chen, M., Song, R., Ji, Q., ... Lan, S. (2025). Suppression strategies for the polysulfide shuttle effect in electrolyte systems. *Communications Materials*, 6, 237. doi:10.1038/s43246-025-00953-6.

- Li, B., Zhang, K., Yu, B., Yan, R., Jiang, X., Zhang, S., ... Yao, Y. (2025). Achieving cycling stability of silicon-based anodes for lithium-ion batteries: From lithium storage/failure mechanism to structure optimization. *Journal of Energy Storage*, 136, 118395. doi:10.1016/j.est.2025.118395.
- Liu, J., Ma, B., Chen, Z., & Wei, X. (2025). Novel strategies for low overpotential metal–air batteries. *Chemical Communications*, 61, 14340–14353. doi:10.1039/D5CC03685B.
- Majid, M., Deng, Z., & Wang, X. (2024). Recent progress towards the diverse practical applications of lithium-sulfur batteries. *Nano Energy*, 132, 110387. doi:10.1016/j.nanoen.2024.110387.
- Mariyappan, S., Desai, P., Morcrette, M., & Tarascon, J.-M. (2026). From lab to market with sustainable sodium-ion batteries. *Nature Sustainability*, 9, 360–371. doi:10.1038/s41893-025-01701-x.
- Nazir, G., Rehman, A., Lee, J.-H., Kim, C.-H., Gautam, J., Heo, K., ... Park, S.-J. (2024). A review of rechargeable zinc–air batteries: Recent progress and future perspectives. *Nano-Micro Letters*, 16, 138. doi:10.1007/s40820-024-01328-1.
- Peng, Y., Tamate, R., & Nishikawa, K. (2024). Review on artificial interphases for lithium metal anodes: From a mechanical perspective. *ChemElectroChem*, 11(16), e202400278. doi:10.1002/celec.202400278.
- Pourzolfaghar, H., Wang, P.-Y., Jiang, X.-Y., Kositsarakhom, S., Jirasupcharoen, W., Suwantri, C., ... Li, Y.-Y. (2024). Emerging trends and innovations in all-solid-state lithium batteries: A comprehensive review. *Chemical*

- Engineering Journal, 500, 157394.
doi:10.1016/j.cej.2024.157394.
- Qian, W., Guo, Y., Zuo, W., Wu, X., & Zhang, L. (2024). Toward practical lithium–sulfur batteries. *Materials Chemistry Frontiers*, 8, 2556–2577. doi:10.1039/D4QM00180J.
- Rai, S., Prachi, P., Kant, C. R., & Jha, R. (2025). Metal-air batteries: From fundamental mechanisms to practical applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 1033, 180805. doi:10.1016/j.jallcom.2025.180805.
- Sun, L., Liu, Y., Wang, L., & Jin, Z. (2024). Advances and future prospects of micro-silicon anodes for high-energy-density lithium-ion batteries: A comprehensive review. *Advanced Functional Materials*, 34(39), 2403032. doi:10.1002/adfm.202403032.
- Sun, S.-Y., Zhang, X.-Q., Yan, X.-Y., Zheng, Z., Zhang, Q.-K., & Huang, J.-Q. (2025). Advances in high-coulombic-efficiency lithium metal anodes under practical conditions in liquid electrolytes. *EES Batteries*, 1, 340–363. doi:10.1039/D4EB00034J.
- Sung, J., Heo, J., Kim, D.-H., Jo, S., Ha, Y.-C., Kim, D., Ahn, S., & Park, J.-W. (2024). Recent advances in all-solid-state batteries for commercialization. *Materials Chemistry Frontiers*, 8, 1861–1887. doi:10.1039/D3QM01171B.
- Wang, J., Fan, J., Yue, X., Fan, M., Xie, Z., Yang, Z., ... Guan, G. (2025). Hard carbon anodes for advanced sodium ion batteries: A review on sodium storage mechanism and strategies to improve the initial Coulombic efficiency. *Chemical Engineering Journal*, 511, 161953. doi:10.1016/j.cej.2025.161953.

- Wang, L., Wu, F., Yao, Y., & Zhang, C. (2024). Lithium metal anode in electrochemical perspective. *ChemElectroChem*, 11(15), e202400019. doi:10.1002/celc.202400019.
- Wu, C., Yang, Y., Zhang, Y., Xu, H., He, X., Wu, X., & Chou, S. (2024). Hard carbon for sodium-ion batteries: Progress, strategies and future perspective. *Chemical Science*, 15, 6244–6268. doi:10.1039/D4SC00734D.
- Xiao, X., Xu, J., Zhang, C., Huang, M., Miao, Y., Yao, J., ... Zheng, Z. (2026). Structural regulation and interface engineering in silicon-based anodes for high-energy-density lithium-ion batteries: A comprehensive review. *Journal of Energy Chemistry*, 113, 327–364. doi:10.1016/j.jechem.2025.09.047.

KROM SONRASİ DÖNEM: ALTERNATİF TABAKLAMA SİSTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI BİR DEĞERLENDİRMESİ

Hatice ER¹

Ertan EROL²

1. GİRİŞ

Deri, hayvan postunun kolajen yapısının kimyasal olarak kararlı hâle getirilmesiyle elde edilen ve insanlık tarihinin en eski işlenmiş malzemelerinden biridir. Ham post, nem ve mikroorganizmalar karşısında hızla bozunur; ısıtıldığında ise belirli bir sıcaklıkta geri dönüşümsüz biçimde büzülür. Tabaklama, kolajen lifleri arasında yeni bağlar ya da etkileşimler kurarak bu biyolojik malzemeyi çürümeye karşı dirençli, ısıl açıdan daha kararlı ve kullanım özellikleri kalıcı bir malzemeye dönüştüren süreçtir (Covington, 2009). Tabaklamanın etkinliği sektörde en yaygın biçimde büzülme sıcaklığı (Ts) ile ifade edilir; ham kolajen için bu değer yaklaşık 60–65 °C iken etkili bir tabaklama ile 100 °C'nin üzerine çıkabilmektedir (Covington ve Wise, 2019).

Yüzyıllar boyunca deri, ağırlıklı olarak bitkisel tanenlerle tabaklanmıştır. On dokuzuncu yüzyılın ikinci yarısında krom tuzlarının tabaklama amacıyla kullanılmaya başlanması ise sektörü kökten değiştirmiştir. Bugün dünya deri üretiminin büyük bölümü (genellikle %80–90 aralığında tahmin edilmektedir)

¹ Öğr. Üyesi Dr. Hatice ER, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Meslek Yüksekokulu, Deri Teknolojisi Bölümü, ORCID: 0000-0003-2125-7406.

² Öğr. Gör. Ertan EROL, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Meslek Yüksekokulu, Deri Teknolojisi Bölümü, ORCID: 0000-0002-2595-9387.

bazik krom(III) sülfat ile tabaklanmaktadır (Covington, 2009; China vd., 2020). Krom tabaklamanın bu hâkimiyeti tesadüf değildir: süreç hızlıdır, görece ucuzdur, öngörülebilir sonuçlar verir ve yüksek ısı kararlılığına sahip, yumuşak, dolgun ve boyamaya elverişli bir ara ürün olan “wet-blue” deriyi ortaya çıkarır.

Ne var ki son otuz yılda krom tabaklamaya yönelik çevresel, sağlık ve pazar kaynaklı baskılar giderek artmıştır. Bitmiş deride altı değerlikli krom [Cr(VI)] oluşma olasılığı, krom içeren katı atıkların ve arıtma çamurlarının yönetimi, işletmelerin atıksu deşarj yükümlülükleri ve markaların “kromsuz” ürün talepleri, sektörü alternatif tabaklama sistemlerini ciddi biçimde değerlendirmeye yöneltmiştir (Dixit vd., 2015; Kral, Schmel ve Buljan, 2014). Bu bağlamda “krom sonrası dönem” kavramı, kromun tamamen terk edildiği bir geleceği değil, krom tabaklamanın tartışmasız varsayılan seçenek olmaktan çıktığı ve farklı son kullanımlar için farklı tabaklama kimyalarının rekabet ettiği bir dönüşüm sürecini ifade etmektedir.

Bu bölümün amacı, başlıca alternatif tabaklama sistemlerini (bitkisel, aldehit esaslı, reaktif sentetik organik, krom dışı mineral, kombinasyon ve biyo-bazlı sistemler) teknik performans, proses özellikleri, çevre ve sağlık etkileri ile ekonomik uygulanabilirlik ölçütleri çerçevesinde karşılaştırmalı olarak değerlendirmektir. Özetle, bir sistemin sadece kromsuz olması onu kendiliğinden daha sürdürülebilir yapmaz. Alternatifler kıyaslanırken tek bir üretim aşaması yerine, tüm üretim zinciri ve ürünün kullanım ömrü dolduktan sonraki durumu dikkate alınmalıdır.

2. KROM TABAKLAMAMANIN KİMYASI VE SINIRLARI

2.1. Tabaklama Mekanizması ve Kromun Üstünlükleri

Krom tabaklamada etken madde, sulu çözeltide çok çekirdekli kompleksler oluşturan bazik krom(III) sülfattır. Tabaklama, pikle edilmiş (düşük pH'ta asit ve tuzla dengelenmiş) postun krom tuzuyla muamele edilmesi ve ardından pH'ın kademeli olarak yükseltilmesi (bazifikasyon) ile gerçekleştirilir. Bu süreçte krom kompleksleri, kolajenin yan zincirlerindeki karboksil grupları ile koordinasyon bağları kurar ve kolajen molekülleri arasında çapraz bağlar oluşturur (Covington, 1997). Genişletilmiş X-ışını soğurma ince yapı (EXAFS) çalışmaları, krom türlerinin kolajenle etkileşiminin klasik “iki karboksil arasında köprü” modelinden daha karmaşık olduğunu ve kolajen etrafında bir supramoleküler ağ yapısının ısıl kararlılığa katkıda bulunduğunu göstermiştir (Covington vd., 2001).

Covington'ın “bağla-kilit” (link-lock) kuramı ise tabaklamayı, kolajen etrafındaki su yapısı ve tabaklama maddesiyle oluşan yeni matrisin kooperatif davranışıyla açıklar; bu kuram, kombinasyon sistemlerinin neden bileşenlerinden daha yüksek büzülme sıcaklıkları sağlayabildiğini anlamak için de bir çerçeve sunar (Covington ve Wise, 2019).

Kromun endüstriyel üstünlükleri; 100 °C'nin üzerindeki büzülme sıcaklığı, bir ila iki günlük proses süresi, wet-blue derinin retenaj ve bitirme aşamalarında çok farklı son kullanımlara uyarlanabilmesi ve küresel ölçekte standartlaşmış bilgi birikimi ile tedarik zinciri olarak özetlenebilir (Heidemann, 1993; Covington, 2009).

2.2. Altı Değerlikli Krom Sorunu ve Düzenleyici Çerçeve

Tabaklamada kullanılan Cr(III) bileşikleri görece düşük toksisiteye sahipken, Cr(VI) bileşikleri Uluslararası Kanser Araştırma Ajansı tarafından insanlar için kanserojen (Grup 1) olarak sınıflandırılmaktadır (IARC, 2012). Cr(VI) ayrıca güçlü bir cilt alerjenidir ve krom kaynaklı alerjik kontakt dermatitin önemli bir nedeni olarak kabul edilir. Deri sektörü açısından kritik nokta, tabaklama aşamasında Cr(VI) kullanılmamasına karşın bitmiş deride Cr(III)'ün belirli koşullarda Cr(VI)'ya yükseltgenebilmesidir.

Bu yükseltgenmeyi tetikleyen başlıca etkenler arasında doymamış yağ asitleri içeren yağlama maddeleri, UV ışığına ve ısıya maruz kalma, yüksek pH ve uzun süreli depolama sayılmaktadır (Hauber ve Germann, 1999). Bu bulgular, Cr(VI) sorununun büyük ölçüde proses yönetimiyle kontrol edilebileceğini de göstermektedir: antioksidan içeren yağlama maddelerinin kullanımı, bitkisel tanenlerle retenaj ve son aşamalarda pH kontrolü Cr(VI) oluşumunu önemli ölçüde azaltabilmektedir (Covington ve Wise, 2019).

Düzenleyici açıdan Avrupa Birliği, 301/2014 sayılı Komisyon Tüzüğü ile REACH Ek XVII'ye ekleme yaparak ciltle temas eden deri ürünlerinde ve deri bileşenlerinde Cr(VI) içeriğini kuru ağırlığın 3 mg/kg'ı ile sınırlandırmıştır (European Commission, 2014). Bu sınır pratikte standart analiz yönteminin tespit sınırına karşılık geldiğinden, fiilen Cr(VI) içermeyen ürün anlamına gelmektedir. Avrupa pazarına ihracat yapan üreticiler açısından bu düzenleme, krom tabaklanmış derilerde süreç kontrolünü zorunlu kılmış ve bazı segmentlerde kromsuz alternatiflere yönelimi hızlandırmıştır.

2.3. Atık Yönetimi ve Krom Geri Kazanımı

Krom tabaklamanın ikinci büyük sorunu atık yönetimidir. Geleneksel krom tabaklamada kullanılan kromun önemli bir kısmı deriye bağlanmadan atık tabaklama çözeltisine geçer. Kütle denkliliği çalışmaları, bir ton ham postun işlenmesinde ortaya çıkan katı atıkların (traşlama talaşı, kesim artıkları, arıtma çamuru) ve atıksuyun önemli miktarda krom içerdiğini ortaya koymuştur (Buljan, Reich ve Ludvik, 2000). Krom içeren talaş ve çamurun depolanması ya da yakılması, yükseltgen koşullarda Cr(VI) oluşumu riski nedeniyle özel önlemler gerektirir (Kolomaznik vd., 2008).

Bu sorunlara yanıt olarak geliştirilen yüksek tükenmeli (high-exhaustion) krom tabaklama sistemleri, tabaklama çözeltisinin geri dönüşümü ve kromun çöktürülerek geri kazanılması gibi teknikler Avrupa Birliği'nin Mevcut En İyi Teknikler (BAT) referans belgesinde ayrıntılı olarak ele alınmıştır (Black vd., 2013). Krom geri kazanımı ve verimli kullanımı üzerine yapılan kapsamlı değerlendirmeler, iyi yönetilen bir krom prosesinin çevresel yükünün geleneksel uygulamalara göre önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermektedir (Sreeram ve Ramasami, 2003; Sundar, Raghava Rao ve Muralidharan, 2002). Türkiye'de arıtma çamurundan krom geri kazanımının yaşam döngüsü değerlendirmesi yaklaşımıyla incelendiği çalışmalar da bu tartışmaya katkı sağlamıştır (Kılıç vd., 2011).

3. ALTERNATİF SİSTEMLERİ DEĞERLENDİRME ÇERÇEVESİ

Alternatif tabaklama sistemlerine ilişkin literatür, çoğu zaman tek bir ölçüte, özellikle de büzülme sıcaklığına odaklanmaktadır. Oysa endüstriyel uygulanabilirlik açısından tabaklama sistemi; teknik performans, proses özellikleri, çevre ve

sağlık etkileri ve ekonomik uygulanabilirlik olmak üzere en az dört düzlemde değerlendirilmelidir (China vd., 2020).

Teknik performans düzleminde büzülme sıcaklığının yanı sıra dolgunluk, yumuşaklık, gerilme ve yırtılma dayanımı, boyanabilirlik, ışık haslığı ve boyutsal kararlılık önem taşır. Diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) bu düzlemde nesnel karşılaştırma olanağı sunar (Önem vd., 2017). Proses düzleminde süre, kimyasal tüketimi, mevcut dolap ve ekipman altyapısıyla uyum ve işletme esnekliği belirleyicidir. Çevre ve sağlık düzleminde atıksudaki kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), toplam çözünmüş katı ve tuz yükü, işçilerin kimyasal maruziyeti, bitmiş ürünlerdeki kalıntı maddeler ve katı atıkların değerlendirilebilirliği ele alınmalıdır. Son olarak ekonomik düzlemde kimyasal maliyeti, enerji ve su tüketimi ile ölçeklenebilirlik dikkate alınmalıdır.

Bu dört düzlemi birleştiren en kapsamlı araç yaşam döngüsü değerlendirmesidir (YDD). YDD, bir tabaklama sisteminin hammadde üretiminden ürünün ömür sonuna kadar olan çevresel etkilerini farklı etki kategorilerinde (iklim değişikliği, ötrofikasyon, toksisite vb.) nicel olarak karşılaştırmaya olanak tanır. Ancak YDD sonuçları sistem sınırlarına, fonksiyonel birim seçimine ve veri kalitesine son derece duyarlıdır; bu nedenle farklı çalışmaların sonuçlarının dikkatle yorumlanması gerekir (Laurenti vd., 2017).

4. ALTERNATİF TABAKLAMA SİSTEMLERİ

4.1. Bitkisel Tabaklama

Bitkisel tabaklama, ağaç kabukları, odun, meyve, yaprak ve kozalak gibi bitkisel kaynaklardan elde edilen polifenolik bileşiklerle (tanenler) gerçekleştirilir. Tanenler kimyasal yapılarına göre iki ana gruba ayrılır. Hidrolize olabilen tanenler,

bir şeker çekirdeğinin (genellikle glikoz) gallik asit ya da elajik asit türevleriyle esterleşmesiyle oluşur; kestane, tara, sumak ve palamut (valonya) bu grubun başlıca temsilcileridir. Kondanse tanenler ise flavan-3-ol birimlerinin polimerleşmesiyle oluşan proantosiyanidinlerdir; mimoza (akasya) ve kebrako bu grubun ticari açıdan en önemli örnekleridir (Haslam, 1998; Falcão ve Araújo, 2018).

Tanenler kolajenle ağırlıklı olarak çok sayıda hidrojen bağı ve hidrofobik etkileşim kurar. Bu nedenle bitkisel tabaklamada deriye kütlece yüksek miktarda tabaklama maddesi girer ve ortaya çıkan deri sıkı, dolgun ve şekil tutan bir yapıya sahip olur. Büzülme sıcaklığı tanen tipine bağlı olarak genellikle 70–85 °C aralığındadır; kondanse tanenler hidrolize olabilen tanenlere göre biraz daha yüksek değerler verme eğilimindedir (Covington, 2009). Bitkisel deri, taban derisi, saraciye, kemer, kayış ve kaliteli deri eşya için bugün de standart malzemedir ve yaşlandıkça kazandığı patina nedeniyle lüks segmentte ayrıcalıklı bir konuma sahiptir.

Bitkisel tabaklamanın zayıf yönleri de iyi bilinmektedir. Geleneksel çukur tabaklama haftalar hatta aylar sürebilir; dolap tabaklama bu süreyi günlere indirse de krom tabaklamaya göre daha uzundur. Kimyasal tüketimi yüksektir ve tükenmemiş tanenler atıksuda yüksek KOİ ve renk yükü oluşturur; polifenollerin biyolojik arıtması da güçtür (Dixit vd., 2015). Bitkisel deri ışığa maruz kaldığında koyulaşır, ıslandığında sertleşme eğilimi gösterir ve krom tabaklı deriye kıyasla daha düşük ısı ve hidrotermal kararlılığa sahiptir. Bu nedenle yumuşak giyim derisi veya yüksek performans gerektiren otomotiv derisi için tek başına uygun değildir.

Bitkisel tabaklamanın çevresel profilini iyileştirmeye yönelik çalışmalar, enzim destekli süreçlerle tanen nüfuzunun hızlandırılmasını ve tükenmenin artırılmasını incelemiştir (Kanth

vd., 2009). Tanen kaynaklarının arazi kullanımı ve tedarik zinciri boyutu da “doğal” etiketinin sorgulanmasını gerektirmektedir.

Anadolu açısından bitkisel tabaklamanın ayrı bir tarihsel önemi bulunmaktadır. Batı Anadolu’da yetişen palamut meşesinin kadehlerinden elde edilen valonya, yüzyıllar boyunca hem yerel debbağlık hem de ihracat açısından önemli bir hammadde olmuştur. Valonya gibi yerel tanen kaynaklarının modern proses teknikleriyle yeniden değerlendirilmesi, hem ürün kimliği hem de yerel değer zinciri açısından bir fırsat olarak görülebilir.

4.2. Aldehit Tabaklama ve Wet-White Süreçleri

Aldehitler, kolajenin lizin ve hidroksilizin kalıntılarındaki serbest amino gruplarıyla kovalent bağlar kurarak tabaklama etkisi gösterir. Tarihsel olarak formaldehit bu amaçla kullanılmış, ancak toksikolojik profili nedeniyle bugün büyük ölçüde terk edilmiştir. Günümüzde en yaygın kullanılan aldehit tabaklama maddesi glutaraldehit ve onun modifiye türevleridir; oksazolidinler ve tetrakis(hidroksimetil)fosfonyum sülfat (THPS) da bu grupta incelenen diğer maddelerdir (Covington ve Wise, 2019).

Aldehit tabaklama ile genellikle 75–85 °C aralığında büzülme sıcaklığı elde edilir. Ortaya çıkan beyaz renkli ara ürün, wet-blue’ya karşılık olarak “wet-white” olarak adlandırılır. Wet-white deri tek başına yeterli dolgunluk ve deri karakteri sağlamaz; bu nedenle retenaj aşamasında sentetik tanenler, bitkisel tanenler ve polimerlerle tamamlanır. Bu yaklaşım özellikle otomotiv döşemelik derisinde yaygınlaşmıştır. Bunun başlıca nedenleri, kromsuz talaş ve kesim artıklarının değerlendirilmesinin daha kolay olması, araç ömrü sonu düzenlemelerine uyum ve otomotiv iç mekânında aranan düşük buğulanma (fogging) değerleridir (Fathima vd., 2006; Shi vd., 2016).

Aldehit sistemlerinin başlıca sınırlılığı sağlık boyutundadır. Glutaraldehit solunum yolu ve cilt için duyarlılaştırıcı bir maddedir ve işyerinde maruziyetin dikkatle denetlenmesi gerekir. Formaldehit ise IARC tarafından Grup 1 kanserojen olarak sınıflandırılmıştır (IARC, 2012); bu nedenle formaldehit salabilen sistemler ve kalıntı formaldehit, bitmiş deride sıkı biçimde izlenmektedir. Ayrıca wet-white derinin ışık ve UV etkisi altındaki davranışı retenaj sistemine güçlü biçimde bağlıdır (Rosu vd., 2018).

4.3. Reaktif Sentetik Organik Tabaklama Maddeleri

Aromatik bileşiklerin formaldehit ile kondenzasyonundan elde edilen sentetik tanenler (sintanlar) esas olarak retenajda kullanılır; “değiştirme sintanları” ise yüksek oranda kullanıldığında tek başına tabaklama etkisi gösterebilir (Covington, 2009). Ancak bu ürünlerde kalıntı serbest fenol, formaldehit ve bisfenol türevleri gibi maddelerin varlığı, kimyasal kısıtlama listeleri açısından giderek daha fazla dikkat çekmektedir.

Son yıllardaki en dikkat çekici gelişme, kolajenle kovalent bağ kuran ve aldehit içermeyen reaktif organik tabaklama maddelerinin endüstriyel ölçekte kullanıma girmesidir. Bu gruptaki triazin esaslı ürünler, kolajenin amino gruplarıyla reaksiyona girerek yaklaşık 75 °C civarında büzülme sıcaklığı sağlayabilmektedir. Bu sistemlerin mevcut dolap altyapısıyla uyumlu olması, piklesiz ya da düşük tuzlu süreçlere olanak tanıyarak atıksudaki tuz yükünü azaltabilmesi ve aldehit kaynaklı sağlık sorunlarından kaçınılması önemli avantajlardır (China vd., 2020).

Bununla birlikte reaktif sentetik sistemlerin maliyeti krom tabaklamadan yüksektir ve ortaya çıkan derinin “eli” (dokunsal karakteri) ve dolgunluğu kromdan farklıdır; bu farkın kapatılması retenaj kimyasına bağlıdır. Ayrıca bu ürünlerin petrokimya

kökenli olması, biyobozunurluk ve yaşam döngüsü profilleri açısından ürüne özgü değerlendirme yapılmasını gerektirmektedir. Krishnamoorthy ve arkadaşlarının (2012) doğal olmayan amino asit türevleriyle kromsuz tabaklama üzerine yaptığı çalışma gibi araştırmalar, bu alanda yeşil kimya ilkelerine dayalı yeni moleküler tasarımların arandığını göstermektedir.

4.4. Krom Dışı Mineral Tabaklama Maddeleri

Krom dışındaki metal tuzlarının tabaklama potansiyeli uzun süredir bilinmektedir. Alüminyum, zirkonyum, titanyum ve demir bu bağlamda en çok incelenen metallerdir (Covington, 2009; Covington ve Wise, 2019).

Alüminyum tuzları tarihsel olarak beyaz deri (şap tabaklama) üretiminde kullanılmıştır. Alüminyumun kolajen karboksil gruplarıyla kurduğu bağlar görece zayıftır; bu nedenle tek başına sağladığı büzülme sıcaklığı sınırlıdır ve tabaklama etkisi yıkamayla kısmen geri dönebilir (Covington ve Sykes, 1984). Bu nedenle alüminyum günümüzde daha çok kombinasyon sistemlerinde, özellikle bitkisel tanenlerle birlikte kullanılmaktadır.

Zirkonyum tuzları yüksek büzülme sıcaklıkları sağlar; ancak çok düşük pH gerektirir ve sıkı, görece sert bir deri verir. Bu nedenle zirkonyum daha çok beyaz ve açık renkli deriler gibi özel uygulamalarda kullanılmaktadır.

Titanyum son yıllarda yeniden ilgi gören bir alternatiftir. Titanyum(IV) bileşiklerinin biyolojik açıdan görece inert kabul edilmesi ve beyaz, açık renkli deriler üretilebilmesi önemli avantajlardır. Titanyum tuzlarının hidrolize eğilimi nedeniyle maskeleyme maddeleriyle kontrollü kullanımı gerekmektedir. Türkiye’den yapılan çalışmalar, metal endüstrisi atıklarından elde edilen titanyum esaslı tabaklama maddeleriyle kromsuz deri üretiminin teknik olarak mümkün olduğunu göstermiştir (Mutlu vd., 2014). Bununla birlikte titanyum tabaklamanın proses

kararlılığı henüz kromun tutarlılık düzeyine ulaşmamıştır. Ayrıca tüm mineral alternatifler, “kromsuz” olsalar da metal içeren atık sorununu ortadan kaldırmaz; yalnızca biçimini değiştirir.

4.5. Kombinasyon Tabaklama Sistemleri

Tek bileşenli alternatif sistemlerin çoğu, kromun sağladığı özellik bütünü tek başına karşılayamaz. Bu nedenle literatürde ve endüstride en umut verici yaklaşımlardan biri kombinasyon tabaklamadır. Kombinasyon sistemlerinde farklı mekanizmalarla etki eden iki ya da daha fazla tabaklama maddesi birlikte kullanılır ve sinerjik bir etki elde edilmesi amaçlanır (Covington ve Wise, 2019).

En iyi bilinen örnekler, “yarı metal” tabaklama olarak adlandırılan bitkisel tanen–alüminyum kombinasyonu ile kondanse tanen–oksazolidin kombinasyonudur; bu sistemlerle kromla karşılaştırılabilir büzülme sıcaklıklarına ulaşılabildiği rapor edilmiştir (Covington, 2009). Aldehit ile bitkisel tanen, sentetik tanen ile bitkisel tanen ve titanyum ile alüminyum gibi kombinasyonlar da yoğun biçimde incelenmektedir (Fathima vd., 2006; Bacardit vd., 2014).

4.6. Biyo-Bazlı ve Gelişmekte Olan Yaklaşımlar

Son on yılda yenilenebilir kaynaklardan elde edilen tabaklama maddeleri üzerine yapılan araştırmalar hız kazanmıştır. Bu grupta oksitlenmiş polisakkaritler (dialdehit nişasta, oksitlenmiş aljinat ve benzeri türevler), lignin türevleri, genipin gibi doğal çapraz bağlayıcılar, modifiye bitkisel polifenoller ve zeytin yaprağı ekstraktı gibi tarımsal yan ürünlerden elde edilen maddeler yer almaktadır (China vd., 2020). Bu maddelerin bir kısmı aldehit benzeri reaktif gruplar taşıyarak kolajenle kovalent bağ kurarken, diğerleri polifenollere benzer etkileşimlerle tabaklama etkisi gösterir.

Biyoteknolojik yaklaşımlar da bu alanda önemli bir yer tutmaktadır. Enzimlerin kıl giderme, kireçlik ve tabaklama öncesi işlemlerde kullanımı, kimyasal tüketimini azaltmanın ve tabaklama maddelerinin nüfuzunu kolaylaştırmanın bir yolu olarak uzun süredir incelenmektedir (Thanikaivelan vd., 2004; Thanikaivelan vd., 2005). Döngüsel ekonomi perspektifinden ise deri katı atıklarının tabaklama ve retenaj kimyasallarına dönüştürülmesi dikkat çeken bir araştırma alanıdır (Sathish, Madhan ve Raghava Rao, 2019).

Ne var ki bu sistemlerde hammadde arzının tutarlılığı, endüstriyel ölçekte proses kararlılığı, maliyet ve uzun süreli performans henüz yeterince kanıtlanmamıştır; bu nedenle önce niş segmentlerde yayılmaları beklenebilir.

5. KARŞILAŞTIRMALI DEĞERLENDİRME

5.1. Teknik Performans

Tablo 1, ele alınan sistemlerin başlıca özelliklerini krom tabaklama referans alınarak özetlemektedir.

Tablo 1. Başlıca Tabaklama Sistemlerinin Karşılaştırması

Sistem	Yaklaşık Ts (°C)	Güçlü Yanları	Sınırlılıkları
Krom(III) (referans)	100–120	Hız, maliyet, çok yönlülük	Cr(VI) riski, krom içeren atık
Bitkisel	70–85	Dolgunluk, şekil tutma, yenilenebilir kaynak	Uzun süre, yüksek KOİ, ışık haslığı
Aldehit (wet-white)	75–85	Kromsuz atık, otomotiv uyumu	Duyarlılaştırıcılık, sınırlı dolgunluk
Reaktif sentetik	~75	Aldehitsiz, mevcut altyapıyla uyum	Maliyet, petrokimya kökeni
Al / Zr / Ti	70–95*	Krom dışı mineral seçenek, açık renk	Sertlik, kararlılık, metal içeren atık
Kombinasyon	85–115*	Sinerji, esneklik	Proses karmaşıklığı
Biyo-bazlı	Değişken	Yenilenebilirlik, biyobozunurluk	Ölçek, tutarlılık, maliyet

Not: Değerler yaklaşık olup formülasyon ve proses koşullarına göre değişir. * Kullanılan metale veya bileşenlere bağlıdır. Covington (2009), Covington ve Wise (2019) ve China vd. (2020) temel alınarak derlenmiştir.

Teknik performans açısından tablo açık bir örüntü ortaya koymaktadır: tek bileşenli alternatiflerin hiçbirisi kromun yüksek ısı kararlılık, hız ve çok yönlülük birleşimini tek başına karşılayamamaktadır. Ancak bu durum her uygulama için bir dezavantaj anlamına gelmez. Pek çok son kullanımda 100 °C'nin üzerinde büzülme sıcaklığı gerçek bir gereksinim değildir; ayakkabı üretiminde ısıllı şekillendirme veya yüksek sıcaklıkta kurutma gibi işlemler dışında, 75–85 °C aralığındaki değerler çoğu zaman yeterlidir. Bu nedenle değerlendirme “kromla eşdeğer mi?” sorusundan çok “bu son kullanım için yeterli mi?” sorusuna dayanmalıdır.

5.2. Çevresel Etki ve Yaşam Döngüsü Bakış Açısı

Kamuoyunda “kromsuz” ile “çevre dostu” çoğu zaman eşdeğer kabul edilse de yaşam döngüsü çalışmaları bunun her zaman geçerli olmadığını göstermektedir. Farklı deri işleme teknolojilerinin çevresel ayak izinin ölçüldüğü çalışmalar, sonuçların seçilen etki kategorisine, sistem sınırlarına ve proses verimliliğine güçlü biçimde bağlı olduğunu ortaya koymuştur (Laurenti vd., 2017). Wet-white deri üretiminin fiziksel ve çevresel performansının birlikte değerlendirildiği çalışmalar da kromsuz süreçlerin bazı kategorilerde avantajlı, bazılarında ise dezavantajlı olabildiğini göstermektedir (Shi vd., 2016).

Örneğin bitkisel tabaklamanın yüksek tanen tüketimi, tanen üretiminin ormancılık ve işleme aşamalarındaki etkileri, uzun mesafeli taşıma ve atıksudaki yüksek organik yük, bazı etki kategorilerinde iyi yönetilen bir krom prosesinden daha olumsuz sonuçlar doğurabilir. Benzer şekilde sentetik tabaklama maddelerinin petrokimya kökeni ve üretimlerindeki enerji yoğunluğu, iklim değişikliği kategorisinde dezavantaj oluşturabilir. Öte yandan kromsuz derinin en net üstünlüğü katı atık yönetimi ve ömür sonu aşamasındadır: kromsuz talaş ve kesim artıkları jelatin, kolajen hidrolizati, gübre veya biyogaz

gibi değerlendirme yollarına çok daha kolay yönlendirilebilir (Yılmaz vd., 2007; Kolomaznik vd., 2008).

Bu bulgular iki ilkeyi öne çıkarmaktadır: karşılaştırma tüm üretim zincirini ve ömür sonunu kapsamalı, alternatifler ise düşük verimli uygulamalarla değil, mevcut en iyi tekniklerle yürütülen krom tabaklama ile kıyaslanmalıdır.

5.3. Ekonomik ve Endüstriyel Uygulanabilirlik

Ekonomik açıdan krom tabaklama hâlâ en rekabetçi seçenektir; alternatiflerin çoğu daha yüksek kimyasal maliyetine ya da daha uzun proses süresine sahiptir. Ayrıca wet-blue, uluslararası ticarete konu olan standart bir ara ürün işlevi görmektedir (Kral vd., 2014); alternatif bir ara ürünün bu konuma ulaşması ticari standartlaşma da gerektirir.

Öte yandan otomotiv sektörünün wet-white deriyi büyük ölçüde benimsemesi ve bazı lüks markaların kromsuz deriyi farklılaştırma aracı olarak kullanması, bu segmentlerde yüksek maliyetin katma değerle dengelenebildiğini göstermektedir.

6. TÜRKİYE DERİ SEKTÖRÜ AÇISINDAN DEĞERLENDİRME

Türkiye, köklü bir debbağlık geleneğine ve Tuzla, Menemen, Çorlu, Uşak ve Gerede gibi bölgelerde yoğunlaşmış organize deri sanayi altyapısına sahip bir üretici ülkedir. Organize deri sanayi bölgelerindeki ortak atıksu arıtma tesisleri, krom yönetimi ve geri kazanımı açısından önemli bir yapısal avantaj sunmaktadır. Arıtma çamurundan krom geri kazanımının çevresel optimizasyonuna (Kılıç vd., 2011) ve deri atıklarının değerlendirilmesine (Yılmaz vd., 2007) yönelik çalışmalar, bu altyapının döngüsel ekonomi yaklaşımıyla birlikte ele alınabileceğini göstermektedir.

Türk deri sektörünün önemli bir bölümü Avrupa pazarına yönelik üretim yapmaktadır. Bu durum, REACH kapsamındaki Cr(VI) sınırı ve markaların kimyasal kısıtlama listeleri gibi gerekliliklere uyumu zorunlu kılmakta, aynı zamanda kromsuz deri talebine yanıt verebilme kapasitesini rekabet açısından kritik hâle getirmektedir. Titanyum esaslı tabaklama (Mutlu vd., 2014) ve tabaklama maddelerinin karşılaştırılması (Önem vd., 2017) üzerine yapılan çalışmalar, bu alanda ulusal bir bilgi birikiminin oluştuğunu göstermektedir.

Sektör açısından üç stratejik yön öne çıkmaktadır. Birincisi, mevcut krom proseslerinin yüksek tükenmeli sistemler, krom geri kazanımı ve Cr(VI) önleyici bitirme uygulamalarıyla mevcut en iyi teknikler düzeyine taşınmasıdır. İkincisi, otomotiv ve ihracata yönelik premium segmentlerde wet-white ve kombinasyon sistemlerine yönelik üretim kapasitesinin geliştirilmesidir. Üçüncüsü, valonya gibi yerel bitkisel tanen kaynaklarının ve tarımsal yan ürünlerin tabaklama kimyası açısından yeniden değerlendirilmesidir; bu yaklaşım hem yerel değer zincirini güçlendirebilir hem de ürünlere ayırt edici bir kimlik kazandırabilir.

7. SONUÇ

Bu bölümdeki değerlendirme, kromun yüksek ısı kararlılık, hız, maliyet ve çok yönlülük birleşimini tek başına karşılayabilecek bir alternatifin bugün bulunmadığını ortaya koymaktadır. Bitkisel tabaklama kendi nişinde rakipsiz olmakla birlikte proses süresi ve atıksu yükü açısından sınırlıdır; aldehit ve reaktif sentetik sistemler otomotiv gibi segmentlerde başarıyla uygulanmakta, ancak sağlık profili ve maliyet açısından farklı zorluklar taşımaktadır; krom dışı mineral sistemler ise metal içeren atık sorununu ortadan kaldırmamaktadır.

Kombinasyon sistemleri, farklı tabaklama maddelerinin güçlü yanlarını bir araya getirerek kromla karşılaştırılabilir özellikler sunma potansiyeli taşıdığından, kısa ve orta vadede en gerçekçi yol olarak görünmektedir. Biyo-bazlı yaklaşımlar ise uzun vadeli bir dönüşüm için umut vaat etmekle birlikte, endüstriyel ölçekte tutarlılık ve maliyet açısından henüz olgunlaşmamıştır.

Yaşam döngüsü perspektifi, “kromsuz” ile “sürdürülebilir” kavramlarının eşdeğer olmadığını ve tabaklama sistemlerinin yalnızca tabaklama adımına göre değil, tüm üretim zinciri ve ürünün ömür sonu davranışı dikkate alınarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu nedenle krom sonrası dönemin, kromun tamamen ortadan kalktığı bir dönem olmaktan çok, son kullanıma göre seçilmiş bir tabaklama sistemleri portföyünün olduğu bir dönem olacağı öngörülebilir: otomotivde wet-white ve reaktif sentetik sistemler, saraciye ve lüks segmentte bitkisel ve kombinasyon sistemleri, kitlesel ayakkabı ve giyim derisinde ise mevcut en iyi tekniklerle yürütülen krom tabaklama.

Gelecekteki araştırmalar için karşılaştırılabilir fonksiyonel birimlerle yürütülen yaşam döngüsü değerlendirmeleri, biyo-bazlı maddelerin endüstriyel ölçekte performansının belgelenmesi ve kromsuz derilerin ömür sonu davranışının sistematik olarak incelenmesi öncelikli alanlar olarak öne çıkmaktadır.

KAYNAKÇA

- Bacardit, A., van der Burgh, S., Armengol, J., & Ollé, L. (2014). Evaluation of a new environment friendly tanning process. *Journal of Cleaner Production*, 65, 568–573.
- Black, M., Canova, M., Rydin, S., Scalet, B. M., Roudier, S., & Sancho, L. D. (2013). Best available techniques (BAT) reference document for the tanning of hides and skins. Eur Comm Database, 46, 2013.
- Buljan, J., Reich, G., & Ludvik, J. (2000). Mass balance in leather processing. United Nations industrial development organization. Regional programme for pollution control in the tanning industry in South-East Asia.
- China, C. R., Maguta, M. M., Nyandoro, S. S., Hilonga, A., Kanth, S. V., & Njau, K. N. (2020). Alternative tanning technologies and their suitability in curbing environmental pollution from the leather industry: A comprehensive review. *Chemosphere*, 254, 126804.
- Covington, A. D. (1997). Modern tanning chemistry. *Chemical Society Reviews*, 26(2), 111–126.
- Covington, A. D. (2009). *Tanning chemistry: The science of leather*. Cambridge, UK: Royal Society of Chemistry.
- Covington, A. D., Lampard, G. S., Menderes, O., Chadwick, A. V., Rafeletos, G., & O'Brien, P. (2001). Extended X-ray absorption fine structure studies of the role of chromium in leather tanning. *Polyhedron*, 20(5), 461–466.
- Covington, A. D., & Sykes, R. L. (1984). The use of aluminium salts in tanning. *Journal of the American Leather Chemists Association*, 79(3), 72–93.

- Covington, A. D., & Wise, W. R. (2019). *Tanning chemistry: The science of leather* (2nd ed.). Cambridge, UK: Royal Society of Chemistry.
- Dixit, S., Yadav, A., Dwivedi, P. D., & Das, M. (2015). Toxic hazards of leather industry and technologies to combat threat: A review. *Journal of Cleaner Production*, 87, 39–49.
- European Commission. (2014). Commission Regulation (EU) No 301/2014 of 25 March 2014 amending Annex XVII to Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH) as regards chromium VI compounds. *Official Journal of the European Union*, L 90, 1–3.
- Falcão, L., & Araújo, M. E. M. (2018). Vegetable tannins used in the manufacture of historic leathers. *Molecules*, 23(5), 1081.
- Fathima, N. N., Kumar, T. P., Kumar, D. R., Rao, J. R., & Nair, B. U. (2006). Wet white leather processing: A new combination tanning system. *Journal of the American Leather Chemists Association*, 101(2), 58–65.
- Haslam, E. (1998). *Practical polyphenolics: From structure to molecular recognition and physiological action*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Hauber, C., & Germann, H. P. (1999). Investigations on a possible formation and avoidance of chromate in leather. *World Leather*, 12(6), 73–80.
- Heidemann, E. (1993). *Fundamentals of leather manufacturing*. Darmstadt, Germany: Eduard Roether KG.

- International Agency for Research on Cancer [IARC]. (2012). *Arsenic, metals, fibres, and dusts* (IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 100C). Lyon, France: IARC.
- Kanth, S. V., Venba, R., Madhan, B., Chandrababu, N. K., & Sadulla, S. (2009). Cleaner tanning practices for tannery pollution abatement: Role of enzymes in eco-friendly vegetable tanning. *Journal of Cleaner Production*, 17(5), 507–515.
- Kılıç, E., Puig, R., Baquero, G., Font, J., Çolak, S., & Gürler, D. (2011). Environmental optimization of chromium recovery from tannery sludge using a life cycle assessment approach. *Journal of Hazardous Materials*, 192(1), 393–401.
- Kolomaznik, K., Adamek, M., Andel, I., & Uhlirova, M. (2008). Leather waste—Potential threat to human health, and a new technology of its treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 160(2–3), 514–520.
- Kral, I., Schmel, F., & Buljan, J. (2014). *The future for leather*. Vienna: United Nations Industrial Development Organization, 1(415), 1-9.
- Krishnamoorthy, G., Sadulla, S., Sehgal, P. K., & Mandal, A. B. (2012). Green chemistry approaches to leather tanning process for making chrome-free leather by unnatural amino acids. *Journal of Hazardous Materials*, 215–216, 173–182.
- Laurenti, R., Redwood, M., Puig, R., & Frostell, B. (2017). Measuring the environmental footprint of leather processing technologies. *Journal of Industrial Ecology*, 21(5), 1180–1187.

- Mutlu, M. M., Crudu, M., Maier, S. S., Deselnicu, D., Albu, L., Gulumser, G., ... Adiguzel Zengin, A. C. (2014). Eco-leather: Properties of chromium-free leathers produced with titanium tanning materials obtained from the wastes of the metal industry. *Ekoloji*, 23(91), 83–90.
- Önem, E., Yorgancioglu, A., Karavana, H. A., & Yilmaz, O. (2017). Comparison of different tanning agents on the stabilization of collagen via differential scanning calorimetry. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 129(1), 615–622.
- Rosu, L., Varganici, C. D., Crudu, A. M., Rosu, D., & Bele, A. (2018). Ecofriendly wet–white leather vs. conventional tanned wet–blue leather. A photochemical approach. *Journal of Cleaner Production*, 177, 708–720.
- Sathish, M., Madhan, B., & Raghava Rao, J. (2019). Leather solid waste: An eco-benign raw material for leather chemical preparation – A circular economy example. *Waste Management*, 87, 357–367.
- Shi, J., Puig, R., Sang, J., & Lin, W. (2016). A comprehensive evaluation of physical and environmental performances for wet-white leather manufacture. *Journal of Cleaner Production*, 139, 1512–1519.
- Sreeram, K. J., & Ramasami, T. (2003). Sustaining tanning process through conservation, recovery and better utilization of chromium. *Resources, Conservation and Recycling*, 38(3), 185–212.
- Sundar, V. J., Raghava Rao, J., & Muralidharan, C. (2002). Cleaner chrome tanning—Emerging options. *Journal of Cleaner Production*, 10(1), 69–74.
- Thanikaivelan, P., Rao, J. R., Nair, B. U., & Ramasami, T. (2004). Progress and recent trends in biotechnological methods

for leather processing. *Trends in Biotechnology*, 22(4), 181–188.

Thanikaivelan, P., Rao, J. R., Nair, B. U., & Ramasami, T. (2005). Recent trends in leather making: Processes, problems, and pathways. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 35(1), 37–79.

Yılmaz, O., Kantarli, I. C., Yuksel, M., Saglam, M., & Yanik, J. (2007). Conversion of leather wastes to useful products. *Resources, Conservation and Recycling*, 49(4), 436–448.

BOR ATIKLARININ ÇEVRESEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Havva MUMCU ŞİMŞEK¹

1. GİRİŞ

Bor, ticari olarak boraks, üleksit, kolemanit, tinkal, kernit, sassolit gibi minerallerden üretilir. Bor bileşikleri, kozmetik ürünler, gübre, deterjan, tekstil, cam, ilacıda içine alan önemli endüstriyel ürünlerde kullanılmaktadır (Zengin ve ark., 2023). Dünya bor kaynakları belirli jeolojik bölgelerde yoğunlaşmaktadır. Bor yatakları dünya genelinde özellikle üç ana jeolojik kuşakta yoğunlaşmaktadır. Önemli borat yatakları özellikle Alp-Himalaya kuşağı, And kuşağı ve Kuzey Amerika'da bulunmaktadır. Türkiye, sahip olduğu geniş bor kaynakları nedeniyle dünya bor endüstrisinde stratejik bir konuma sahiptir. Bunun yanında ABD, Arjantin, Şili, Çin ve Rusya da önemli bor kaynaklarına sahip ülkeler arasında yer almaktadır. Tablo 1'de Ülkelere ait bor rezervleri gösterilmiştir (Warren 2010).

¹ Dr. Öğr. Üyesi Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Bahçe Meslek Yüksek Okulu, Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojileri Bölümü, Osmaniye, Türkiye, ORCID: 0000-0002-8396-3771.

Tablo 1. Ülkelerdeki bor rezervleri ve 2025 üretim miktarı

Ülke	2024 Üretimi (bin ton)	2025 Üretimi (bin ton)	Rezerv (bin ton)
Türkiye	1.800	1.500	950.000
ABD	W	W	48.000
Rusya	90	80	40.000
Şili	470	300	35.000
Çin	210	230	9.100
Peru	190	220	4.000
Bolivya	230	380	—
Arjantin	160	170	—
Almanya	45	40	—

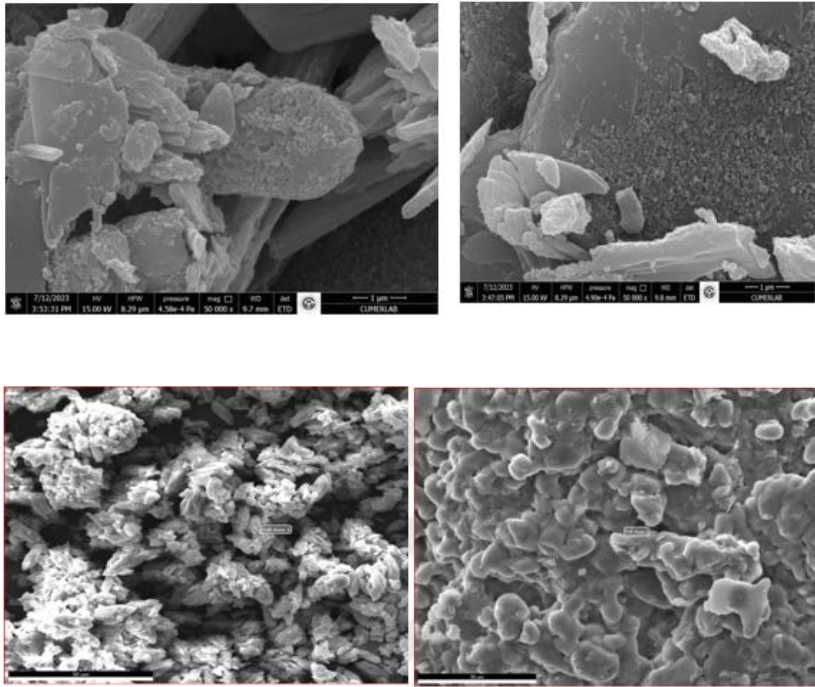
Türkiye, dünya bor rezervlerinin yaklaşık %73'üne sahip olması nedeniyle bor madenciliği açısından dünyada önemli bir konuma sahiptir. Ülkede bilinen başlıca bor yatakları Eskişehir-Kırka, Kütahya-Emet, Balıkesir-Bigadiç ve Bursa-Kestelek bölgelerinde bulunmaktadır. Türkiye'de rezerv miktarı bakımından en önemli bor mineralleri tinkal ve kolemanittir. Tinkal yatakları ağırlıklı olarak Eskişehir-Kırka'da bulunurken, kolemanit yatakları Kütahya-Emet, Balıkesir-Bigadiç ve Bursa-Kestelek'te yer almaktadır (Helvacı 2017). Bunun yanı sıra Balıkesir-Bigadiç'te önemli miktarda üleksit rezervi bulunmakta, Bursa-Kestelek'te ise zaman zaman üleksit yan ürün olarak elde edilmektedir. Türkiye'de bor ve bor ürünlerinin üretimi, işletilmesi ve pazarlanmasına ilişkin faaliyetler, 2840 sayılı Kanun kapsamında Eti Maden tarafından yürütülmektedir. Eti Maden bünyesinde faaliyet gösteren dört İşletme Müdürlüğündeki tesislerde çeşitli rafine bor ürünleri üretilmektedir. Bu ürünler arasında Boraks Pentahidrat, Boraks Dekahidrat, Borik Asit (B_2O_3), Etidot-67, Bor Oksit, Çinko Borat, Kalsine Tinkal, Susuz Boraks, Öğütülmüş Kolemanit ve Öğütülmüş Üleksit bulunmaktadır. Üretilen bu ürünler hem yurt içi hem de uluslararası pazarlara sunulmaktadır (Eti maden 2025 Raporu).

Eti Maden'in 2017 yılı itibarıyla toplam rafine bor üretim kapasitesi yaklaşık 2,7 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Bu üretim kapasitesi, Türkiye'nin sahip olduğu zengin bor kaynaklarının ekonomik değere dönüştürülmesinde ve bor ürünlerinin dünya pazarındaki konumunun güçlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle rafine bor ürünlerinin üretilmesi, borun yalnızca ham madde olarak ihraç edilmesinin ötesine geçilerek katma değerli ürünlere dönüştürülmesine katkı sağlamaktadır.

Ham bor mineralleri arasında en kapsamlı şekilde incelenen ve endüstriyel olarak üretilen bileşik borik asittir. Bu ürün, endüstride çok önemli bir yere sahiptir ve birçok özel bor ürününün üretiminde öncü madde olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Literatürde, en yaygın kullanılan ham bor minerallerinden biri olan yüksek saflıkta borik asit elde etmek amacıyla pek çok çalışma yapılmıştır (Laçın 2025). Stratejik ve endüstriyel öneme sahip bir ürün olan borik asit, tarım, cam, seramik, tekstil, deterjanlar ve nükleer enerji gibi endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Yurtalan ve ark 2014). Ayrıca, çinko borat, bor esterleri, bor karbür, bor nitrür, bor fosfat, bor trihalojenürler, organik bor tuzları ve floroboratlara dahil olmak üzere çeşitli özel bor bileşiklerinin sentezinde öncü madde olarak işlev görür (Rajadesingu ve ark 2023). Buna ek olarak, nükleer reaktörlerde nötronları emmek için, kaynak ve lehimlemede, ısıya dayanıklı malzemelerin (refrakterler ve seramikler gibi) üretiminde, akıllı telefon bileşenlerinde ve antiseptik ve farmasötik ürün formülasyonlarında katkı maddesi olarak kullanılır. Bu nedenle, yüksek saflıkta borik asit üretimi, modern endüstride giderek daha önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir.

2. BOR ENDÜSTRİSİNDE ATIK OLUŞUMU

ETİ Maden İşletmeleri'nin konsantrasyon tesislerinde fiziksel işlemlerin ardından elde edilen yüksek kaliteli konsantre cevherlerin yanı sıra, küçük tanecik boyutuna ve yüksek B_2O_3 içeriğine sahip atıklar atık havuzlarında veya barajlarında toplanmaktadır (Elbeyli 2015; Tuzun ve ark 2015). Üretim yıllardır aynı şekilde devam ederken, her yıl atık havuzlarına ve barajlarına aktarılan atıklar sayesinde önemli miktarda B_2O_3 (yaklaşık %10) birikmektedir. 2000–2007 döneminde Türkiye'de yaklaşık 2 milyon ton düşük kaliteli, kullanılmamış bor bulunduğu belirtilmiştir (Kar ve ark 2021; Kılış ve ark 2009). 2019 yılında Bigadiç Tesisi atık havuzlarında 2 milyon ton atık bulunduğu tahmin edilirken, yeni bir atık havuzu/barajına ihtiyaç duyulmuş, yeni inşa edilen Çamköy atık havuzu doldurulmuş ve seti yükseltilmiştir (Batar ve ark 2007; Yoğurtçuoğlu 2019). Bu atıkların değerlendirilmemesi ekonomik kayıplara, çevre kirliliğine ve depolama sorunlarına yol açmaktadır (Kayandan ve ark 2004). Kolemanit ve tincal konsantratör atıkları, çimento üretiminde kullanılan mineral katkı maddeleriyle benzer kimyasal bileşime sahiptir ve betonun dayanıklılığını ve bağlanma özelliğini artıran puzolanik özellikler sergilemektedir (Kula 2000). Bu atıkların çimento ve beton üretiminde değerlendirilmesi, hem çevre sorunlarının azaltılmasına hem de ekonomik kazanç sağlanmasına katkıda bulunur (Ünal ve ark 2025). Şekil 1'de atık örneğinin sem görüntüsü heterojen ve aglomere olmuş partiküllerden oluştuğunu göstermektedir. Partiküllerin düzensiz morfolojiye, farklı boyut dağılımına ve pürüzlü yer yer gözenekli yüzeylere sahip olduğu gözlenmiştir. Bu yapı, bor atığının karmaşık ve heterojen mineralojik bileşimi ile ilişkilendirilebilir.



Şekil 1. Kütahya-Emet bölgesindeki borik asit fabrikası atığının SEM görüntüsü.

2.1. Bor Atıklarının Geri Kazanımı ve Yeniden Kullanımı ile ilgili yapılan çalışmalar

Cevher işleme ve arıtma süreçleri sırasında ortaya çıkan atıkların B_2O_3 içeriği ağırlıkça %11 ile %20 arasındadır (Kavas 2011). Bu atıklar ya atık havuzlarında depolanmakta ya da çöp sahalarına boşaltılmaktadır (Önal 2008; Kavas 2011), bu da çevreyi kirletmektedir. Bu nedenle, bu atıkların seramik üretimi gibi endüstriyel uygulamalar için hammadde olarak kullanılabilme olasılığı, hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemlidir.

Türk seramik karo endüstrisi dünyanın beşinci büyük ihracatçısı olmasına rağmen, üretimde en fazla enerji tüketen aşama yaklaşık 1180 °C’de gerçekleştirilen sinterlemedir. Bu nedenle enerji tasarrufu ve çevrenin korunması için sinterleme

sıcaklığının düşürülmesi önemlidir. Ayrıca, yenilenemeyen akı maddelerine alternatif olarak düşük maliyetli atık malzemelerin kullanılması, maliyetlerin ve çevre kirliliğinin azaltılmasına katkı sağlayacaktır. Atık borun değerlendirilmesi sayesinde, atık barajı yerleştirme sorunları ortadan kalkacak, baraj maliyetleri önlenecek, mevcut stoklar (yılda 600 bin ton atık) ekonomiye kazandırılacak stoklamadan kaynaklanan sorunlar ortadan kalkacak, çevre kirliliği azalacak, üretilen ürün ek gelir sağlayacak ve atıklara bağlı su kirliliği önlenecektir (Cengizler 2022).

Bor çamurları esas olarak magnezit ve forsteritten oluşur. Magnezyum oksit (MgO) içeren kalsine bor çamurları, magnezya hammaddesi olarak kullanılabilir. Kalsinasyon öncesi ve sonrası bor çamurlarının özellikleri incelenmiştir. Kalsinasyonun ardından, tam yanmış MgO yerine kalsine bor çamurları kullanılarak hazırlanan hidrasyon ürünleri ve mikroyapıları üzerinde testler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, tam yanmış MgO'nun bir kısmının kalsine bor çamurlarıyla ikame edildiği MPC macunlarının özellikleri de incelenmiştir. Sonuçlar, %40 oranında tam yanmış MgO'nun kalsine bor çamurlarıyla ikame edildiği macunların yeterli priz süresi, iyi akışkanlık ve yüksek basınç dayanımı sergilediğini göstermektedir. Bu nedenle, biriken bor çamurlarının değerlendirilmesi amacıyla MPC üretiminde tam yanmış MgO'nun kısmen kalsine bor çamurlarıyla ikame edilmesi önerilmiştir (Yu ve ark 2021).

Bor madeni üretiminden atılan bor içeren atık kilin (WCB) alkali aktivasyon olasılığı araştırılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında, 500°C ile 800°C arasındaki farklı sıcaklıklarda kalsine edilen WCB'nin buharla kürlenme koşulları altında alkali aktivasyonu incelenmiştir. WCB'nin alkali aktivasyonunu başlatmak için en az 700°C'lik bir kalsinasyon sıcaklığının gerekli olduğu, maksimum basınç dayanımı değerinin ise

800°C’de elde edildiği saptanmıştır. Bu çamurun vitrifiye fayanslarda kullanımı, işleme ve ürün performanslarındaki kilit noktalar dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Çamur, taş fayans partilerine (ağırlıkça %10’a kadar) eklendi ve laboratuvar ölçeğinde test edildi. Bu çamur, feldspatlar, kuvars, illit ve klorit ile buna ek olarak bu çamuru güçlü bir akışkan haline getiren uleksit (%6,4 B₂O₃) içerir. Atık, öğütme sırasında önemsiz bir etki göstermiş, ancak sıkıştırmanın iyileşmesini sağlamıştır. Pişirme sırasındaki reaktivite arttı eklenen çamur miktarına göre maksimum sıcaklık 1200°C’den 1140°C’ye düşürülebilir (Aydın ve Kızıltepe 2011).

3. ÇEVRESEL RİSKLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bor kullanımının bir dezavantajı, sudaki yüksek çözünürlüğüdür (Mori ve ark., 2002). Bor koruyucu çözeltilerle işleme tabi tutulan ahşap ürünlerin, sulu ortamlara maruz kaldıklarında kolayca sızdığı bilinmektedir (Lesar ve ark., 2012; Obanda ve ark., 2008). Bu nedenle, bor bazlı işlenmiş ahşap ürünlerinin çoğu yalnızca iç mekan kullanımı için tasarlanmıştır. Dış mekan ürünlerinde ahşap koruma amacıyla kullanıldığında, genellikle ek koruyucu kimyasallar veya formülasyonlar eklenir (Baysal ve Yalinkilic, 2005; Guantt ve ark., 2006). Düşük konsantrasyonlarda bor, bitkiler için temel bir mikro besin maddesi işlevi görürken, birçok meyve bitkisi ve mikro omurgasızlar için optimum aralığın biraz üzerinde olan konsantrasyonlarda toksik etkiler gözlemlenmiştir (Schoderboeck ve ark., 2011). Borun insanlar üzerindeki etkisiyle ilgili olarak, Dünya Sağlık Örgütü (WHO), 0,17 mg/kg/günlük tolere edilebilir günlük alım değeri (TDI),60 kg'lık bir yetişkin için 2 L'lik günlük içme suyu tüketim oranı ve TDI'nın %40'ının suya tahsis edilmesi esas alınarak 2400

mg/L'lik bir içme suyu kılavuz değeri belirlemiştir (WHO, 2009). Bor kirliliği birçok çalışmada araştırılmış olsa da, toplam bor konsantrasyonlarını, ekolojik riski ve insan sağlığı riskini bir araya getiren kapsamlı değerlendirmeler hala sınırlı kalmaktadır. Bunun önemli bir nedeni, ekolojik risk endekslerinin hesaplanması için gerekli olan toksisite katsayısının mevcut olmaması nedeniyle, borun uzun yıllar boyunca ekolojik risk değerlendirmelerinde nispeten az ilgi görmüş olmasıdır. Xu ve ark. (2020), bir bor toksisite katsayısı önermiş ve bunun ekolojik risk değerlendirme çalışmalarında uygulanabilirliğini göstermiştir. Bu gelişmeye rağmen, toplam bor birikimini, ekolojik riski, insan sağlığı riskini ve toprak sınıflandırması ilişkilerini eşzamanlı olarak değerlendiren çalışmalar hâlâ azdır. Türkiye’de, tarım topraklarındaki toplam bor konsantrasyonlarını ekolojik ve insan sağlığı riskleriyle birlikte kapsamlı bir şekilde değerlendiren çalışmalar bulunmaktadır (Aytop ve ark., 2023; Varol ve ark., 2023).

4. SONUÇ

Bor, insanlar, bitkiler ve endüstriler için en önemli elementlerden biridir. Daha önceki çalışmalar, borun uzaklaştırılmasına yönelik bazı süreçleri ele almıştır. Bu çalışmada, bor geri kazanım tekniklerini özetleyen çakışma olup bor atığının çevresel sürdürülebilirlik açısından ele almıştır. Borun çevresel davranışı, yalnızca toplam bor konsantrasyonuna bağlı değildir. Borun bulunduğu mineral fazlar, çözünürlüğü, pH, toprak özellikleri, organik madde miktarı ve su ile temas koşulları borun mobilitesini ve çevreye taşınmasını etkileyen önemli parametrelerdir. Bu nedenle bor atıklarının çevresel risk değerlendirmesinde toplam bor analizinin yanı sıra suda çözünebilir ve liç edilebilir bor miktarlarının belirlenmesi önem taşımaktadır. Borun belirli konsantrasyonların üzerinde bitkiler

ve diğer canlılar üzerinde olumsuz etkilere neden olabilmesi, özellikle atık depolama alanlarının çevresel açıdan düzenli olarak izlenmesini gerekli kılmaktadır. Bor atıklarının uzun dönemli yönetiminde en önemli konulardan biri, depolama alanlarından gerçekleştirilecek bor taşınımının kontrol edilmesidir. Yağış ve sızıntı suları, borun atık ortamından çözünerek çevredeki toprak ve su sistemlerine taşınmasına neden olabilir. Bu nedenle bor atıklarının depolandığı alanlarda yüzey ve yeraltı suyu kalitesinin düzenli olarak izlenmesi, sızıntı suyunun karakterizasyonunun yapılması ve atığın uzun dönemli liç davranışının belirlenmesi gerekmektedir. Risk değerlendirmesinde yalnızca mevcut bor konsantrasyonlarının değil, zaman içerisinde oluşabilecek değişimlerin de dikkate alınması sürdürülebilir çevre yönetimi açısından önemlidir. Bor atıklarının yönetiminde yalnızca bertaraf yaklaşımının benimsenmesi yerine, atıkların ikincil hammadde ve geri kazanılabilir kaynak olarak değerlendirilmesi daha sürdürülebilir bir yaklaşım sunmaktadır. Özellikle bor içeren atık sulardan borun geri kazanılması konusunda adsorpsiyon, iyon değiştirme, solvent ekstraksiyonu, membran prosesleri, çöktürme ve elektrodializ gibi farklı teknolojiler geliştirilmiştir. Literatür, borun uzaklaştırılması ile borun geri kazanılmasının birbirinden farklı hedefler olduğunu; sürdürülebilir kaynak yönetimi açısından mümkün olduğunca geri kazanımın tercih edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Son yıllarda borun atık akımlardan geri kazanılması, döngüsel ekonomi yaklaşımı kapsamında giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bor içeren atıkların ikincil kaynak olarak değerlendirilmesi, hem doğal kaynak kullanımının azaltılmasına hem de atıkların depolanması nedeniyle oluşabilecek çevresel yüklerin sınırlandırılmasına katkı sağlayabilir. Özellikle boraks çamurları, endüstriyel atık sular, tuzlu sular ve diğer bor içeren ikincil kaynaklardan borun geri kazanılmasına yönelik çalışmalar, bor atıklarının ekonomik değere dönüştürülebileceğini göstermektedir. Bu

değerlendirmeler doğrultusunda bor atıklarının sürdürülebilir yönetimi için atık oluşumunun azaltılması, güvenli depolama, geri kazanım, yeniden kullanım ve çevresel izleme aşamalarını kapsayan bütünlük bir yaklaşım geliştirilmelidir. Atığın karakterizasyonundan başlayarak kimyasal ve mineralojik özelliklerinin belirlenmesi; daha sonra liç davranışının, çevresel mobilitesinin ve geri kazanım potansiyelinin araştırılması gerekmektedir. Uygun özelliklere sahip atıkların çimento, beton, seramik, cam ve geopolimer gibi malzemelerde değerlendirilmesi mümkün olmakla birlikte, her kullanım alanı için teknik performans ve çevresel güvenlik birlikte değerlendirilmelidir.

KAYNAKÇA

- Aydın, S., & Kızıltepe, C. Ç. (2019). Valorization of boron mine tailings in alkali-activated mortars. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(10), 04019224.
- Aytop, H., Ateş, Ö., Dengiz, O., Yılmaz, C. H., & Demir, Ö. F. (2023). Environmental, ecological and health risks of boron in agricultural soils of Amik Plain under Mediterranean conditions. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 37(6), 2069–2081. <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02380-w>
- Batar, T., Bayca, S., Solak, O., et al. (2007). Bor cevheri ve atıklarının seramik duvar karosu yapısında etkileri [Effects of boron ore and its tailings to the ceramic wall tile structure]. In *6th International Industrial Minerals Symposium* (pp. 328–333).
- Baysal, E., & Yalınkılıç, M. K. (2005). A new boron impregnation technique of wood by vapor boron of boric acid to reduce leaching boron from wood. *Wood Science and Technology*, 39(3), 187–198.
- Cengizler, H. (2022). Effect of calcination temperature on use of high-boron-content waste for low-temperature wall tile production. *Ceramics International*, 48(5), 6024–6036.
- Elbeyli, I. Y. (2015). Production of crystalline boric acid and sodium citrate from borax decahydrate. *Hydrometallurgy*, 158, 19–26.
- Guantt, J. C., Amburgey, T. L., & Kitchens, S. C. (2006). Decay in wood ties: Problem solved How application of proven preservatives technology may eventually eliminate biological failure mechanisms. In *American Wood Preservers Association*, 102 (pp. 155–163).

- Helvacı, C. (2017). Borate deposits: An overview and future forecast with regard to mineral deposits. *Journal of Boron*, 2(2), 59–70.
- Kar, Y., Şen, N., & Demirbaş, A. (2006). Boron minerals in Turkey, their application areas and importance for the country's economy. *Mineral Energy – Raw Materials Reports*, 20, 2–10.
- Kavas, T., Christogerou, A., Pontikes, Y., & Angelopoulos, G. N. (2011). Valorisation of different types of boron-containing wastes for the production of lightweight aggregates. *Journal of Hazardous Materials*, 185, 1381–1389.
- Kayandan, İ., et al. (2004). Concentration of low grade colemanite ore by calcination. In *Proceedings of the 2nd International Boron Symposium* (pp. 65–69).
- Kılıç, A. M., Kılıç, O., Andaç, İ., et al. (2009). Investigation of possibilities on usage of low grade boron in sectoral areas. In *4th Industrial Boron Symposium* (pp. 35–42).
- Kula, İ. (2000). *Utilization of boron industry wastes in cement producing as an additive material* [Doctoral dissertation, Sakarya University].
- Laçın, Ö., & Demir, F. (2025). Impurity control in boric acid leaching: A review of challenges and strategies. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 11(3), 2075–2097.
- Lesar, B., Budija, F., Kralj, P., Petrič, M., & Humar, M. (2012). Leaching of boron from wood impregnated with preservative solutions based on boric acid and liquefied wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 70(1), 365–367.
- Mori, Y., Kobayashi, J., Manabe, K., & Kobayashi, S. (2002). Use of boron enolates in water: The first boron enolate-

- mediated diastereoselective aldol reactions using catalytic boron sources. *Tetrahedron*, 58(41), 8263–8268.
- Obanda, D. N., Shupe, T. F., & Barnes, H. M. (2008). Reducing leaching of boron-based wood preservatives: A review of research. *Bioresource Technology*, 99(15), 7312–7322.
- Önal, G., & Burat, F. (2008). Boron mining and processing in Turkey. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 24, 49–60.
- Rajadesingu, S., Monisha, P., & Arunachalam, K. D. (2023). Synthesis and characterization determination of boric acid for gamma and neutron shielding efficiency of bio-caulk incorporated high-performance concrete (HPC). *Surface and Interfaces*, 41, 103223.
- Schoderboeck, L., Mühlegger, S., Losert, A., Gausterer, C., & Hornek, R. (2011). Effects assessment: Boron compounds in the aquatic environment. *Chemosphere*, 82(3), 483–487.
- Tüzün, H., Ün, S., & Buğdaycı, S. (2019). Konsantre ve rafine bor ürünler. In *International Symposium on Boron* (pp. 63–70).
- Ünal, S., & Canbaz, M. (2025). Effect of colemanite-based boron concentrator waste on concrete properties. *Çankaya University Journal of Science and Engineering*, 22(1), 23–32.
- Warren, J. K. (2010). Evaporites through time: Tectonic, climatic and eustatic controls in marine and nonmarine deposits. *Earth-Science Reviews*, 98(3–4), 217–268.
- Varol, M., Deliboran, A., Aytop, H., & Ateş, Ö. (2023). Boron contamination and related health risk assessment in the soils collected from olive groves in İzmir province, Tür

- kiye. Chemosphere, 343, 140210. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140210>
- Xu, J. M., Wang, K., Bell, R. W., Yang, Y. A., & Huang, L. B. (2001). Soil boron fractions and their relationship to soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 65(1), 133–138.
- Yogurtcuoğlu, E. (2019). Bigadiç bor atıklarından sitrik asit ile borik asit elde edilmesi. In *1st International Conference on Environmental Technology and Management* (pp. 1054–1060).
- Yu, J., Lin, L., Qian, J., Jia, X., & Wang, F. (2021). Preparation and properties of a low-cost magnesium phosphate cement with the industrial by-products boron muds. *Construction and Building Materials*, 302, 124400.
- Yurtalan, N., Geyikçi, F., & Uğuz, G. (2024). Effect of boric acid addition on antibacterial dye production. *Journal of Turkish Chemical Society, Section B*, 7, 175–182.
- Zengin, A., Aka, B., Gençay, S., & Uzun, M. (2023). Bor madeni ve endüstriyel uygulamaları. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 46, 161–178.

**KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA
GÜNCEL KONULAR VE
AKADEMİK DEĞERLENDİRMELER**

yaz
yayınları

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