

FİZİK ÇALIŞMALARI

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Murat Metehan TÜRKOĞLU

FİZİK ÇALIŞMALARI

Editör

Dr.Öğr.Üyesi Murat Metehan TÜRKOĞLU

yaz
yayınları

2024

FİZİK ÇALIŞMALARI

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Murat Metehan TÜRKOĞLU

© 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 978-625-6642-74-4

Temmuz 2024 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

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

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

info@yazyayinlari.com

İÇİNDEKİLER

Electrical Properties Of Organic/Inorganic Semiconductor Devices	1
<i>İlhan CANDAN, Sezai ASUBAY</i>	
MXene Malzemelerin Uygulamaları	19
<i>Mehmet ERDEM</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."

ELECTRICAL PROPERTIES OF ORGANIC/INORGANIC SEMICONDUCTOR DEVICES

İlhan CANDAN¹

Sezai ASUBAY²

1. INTRODUCTION

Semiconductor devices are at the heart of modern technological advancements, underpinning the functionality of everything from everyday electronic gadgets to complex industrial systems (Candan & Asubay, 2023b; Wagih et al., 2022). Semiconductors, characterized by their ability to conduct electricity under specific conditions, are classified into two primary categories: inorganic and organic (Alshammari et al., 2023; Terna, Elemike, Mbonu, Osafire, & Ezeani, 2021). Inorganic semiconductors, notably silicon (Si) and gallium arsenide (GaAs) have dominated the industry due to their exceptional electrical properties, robust performance, and well-established fabrication techniques. These materials are essential for high-speed processors, efficient solar cells, and reliable communication devices, among other applications (CANDAN & ASUBAY, 2023; Li et al., 2020; Wang, Liu, & Zhou, 2022).

On the other hand, organic semiconductors, comprising carbon-based molecules or polymers, have garnered significant attention for their unique attributes. These include mechanical

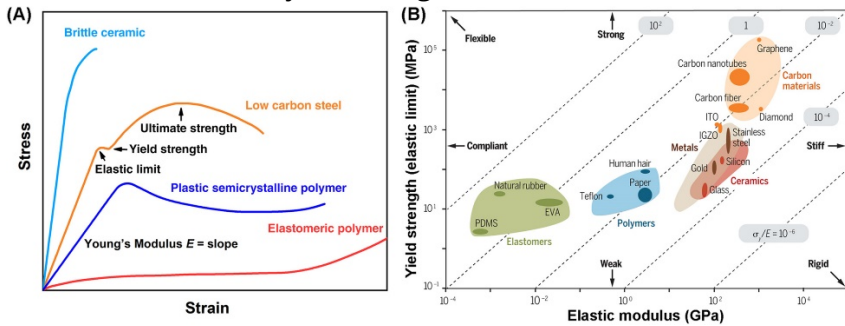
¹ Dr, Dicle University, Science Faculty, Department of Physics, ilhan.candan@dicle.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9489-5324.

² Prof. Dr., Dicle University, Science Faculty, Department of Physics, sezai.asubay@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2171-8479.

flexibility, lightweight nature, and the potential for low-cost, large-area production through printing techniques as shown in Figure 1. Organic semiconductors have paved the way for novel applications such as flexible displays, organic light-emitting diodes (OLEDs), and organic photovoltaics, expanding the horizon of electronic device capabilities (Chen, Yao, Turetta, & Samorì, 2022; Huang, Pan, & Wang, 2024).

This chapter delves into the intricate electrical properties of both organic and inorganic semiconductor devices. It begins with a comprehensive overview of the fundamental characteristics of semiconductors, including carrier concentration, mobility, and bandgap. The discussion then extends to these materials' distinct charge transport mechanisms, highlighting the drift-diffusion model in inorganic semiconductors and the hopping and band transport models in organic semiconductors. Furthermore, the chapter examines the structural and operational principles of key devices like diodes and transistors, contrasting their performance

Figure 1. A) Typical materials' stress–strain curves. B) Various materials' yield strength vs elastic modulus



Source: (Peng & Snyder, 2019).

in different semiconductor contexts. By exploring the advantages, limitations, and emerging trends in semiconductor technology, this chapter provides a thorough understanding of the current

landscape and future potential of organic and inorganic semiconductor devices.

2. FUNDAMENTAL PROPERTIES OF INORGANIC SEMICONDUCTORS

Inorganic semiconductors, primarily silicon (Si) and gallium arsenide (GaAs), are the pillars of the semiconductor industry, renowned for their well-defined and stable electrical properties (Bhaliya, Popaliya, Patel, Mishra, & Shah, 2023). These materials exhibit a crystalline structure that allows for precise control over electronic behavior, making them ideal for a wide range of electronic devices.

2.1. Carrier Concentration

The concentration of charge carriers (electrons and holes) in an inorganic semiconductor is a critical parameter. It can be intrinsically controlled by the material's purity and extrinsically modified through doping, where impurities are introduced to create n-type (electron-rich) or p-type (hole-rich) regions. Doping levels directly influence the material's conductivity and the performance of semiconductor devices (Yaemsunthorn, 2023).

2.2. Carrier Mobility

This property measures how quickly charge carriers can move through the semiconductor when subjected to an electric field. High mobility is essential for fast-switching and high-frequency applications. Silicon, with moderate mobility, is suitable for most digital electronics, while GaAs, with significantly higher mobility, is preferred in high-speed and high-frequency applications such as RF amplifiers and microwave circuits (Lazergui & Bakel, 2021).

2.3. Bandgap

The energy gap between the valence band and the conduction band in a semiconductor defines its electrical and optical properties. Silicon has a bandgap of about 1.1 eV, making it suitable for a wide range of electronic applications. GaAs, with a larger bandgap of 1.43 eV, is advantageous for optoelectronic devices like LEDs and laser diodes, due to its efficient light emission properties (An, Park, & Kim, 2023).

2.4. Thermal Properties

Inorganic semiconductors exhibit excellent thermal stability, essential for maintaining performance in varying temperature conditions. Silicon, for example, has a high melting point and can operate reliably over a wide temperature range, which is critical for both consumer electronics and industrial applications (Guo et al., 2021).

These key electrical properties—carrier concentration, mobility, bandgap, and thermal stability—enable inorganic semiconductors to form the backbone of modern electronics, offering reliable and efficient performance across a multitude of applications.

3. CHARGE TRANSPORT MECHANISMS OF INORGANIC AND ORGANIC SEMICONDUCTORS

Charge transport mechanisms are fundamental to the operation of semiconductor devices, dictating their efficiency and performance (Bronstein, Nielsen, Schroeder, & McCulloch, 2020; Schweicher et al., 2020). In inorganic semiconductors like silicon and gallium arsenide, charge transport is primarily governed by the movement of electrons and holes. These carriers move through the crystal lattice via two main mechanisms: drift

and diffusion. Drift occurs when carriers move under the influence of an external electric field, essential for device operations like diodes and transistors. Diffusion, on the other hand, is the process where carriers move from regions of high concentration to low concentration, significant in the behavior of p-n junctions and intrinsic semiconductors (Zhang & Shih, 2020).

In organic semiconductors, the charge transport mechanisms are more complex due to the molecular structure and degree of disorder (Stoeckel et al., 2021). These materials often rely on the hopping mechanism, where charge carriers jump between localized states within the organic matrix. This process is influenced by thermal energy and can be less efficient than in inorganic counterparts. In more crystalline organic semiconductors, band transport can occur, where carriers move through delocalized states akin to inorganic materials. However, this is less common due to the inherent disorder in most organic materials.

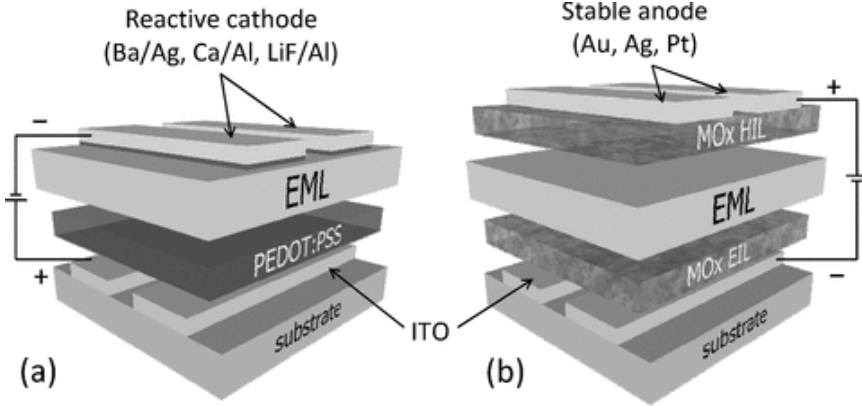
Understanding these mechanisms is crucial for optimizing device performance. Inorganic semiconductors benefit from high mobility and efficient charge transport, ideal for high-speed electronics. Organic semiconductors, while offering flexibility and low-cost fabrication, require ongoing research to improve their charge transport properties for broader application in advanced electronic devices.

4. DEVICE STRUCTURES AND CHARACTERISTICS OF INORGANIC AND ORGANIC DIODES

Diodes, fundamental components in electronic circuits, exhibit distinct structures and characteristics depending on whether they are fabricated from inorganic or organic semiconductors (Leydecker, Wang, Torricelli, & Orgiu, 2020).

4.1. Inorganic Diodes

Figure 2. (a) A structure of OLED with different layers, (b) architecture of HyLED with the EML sandwiched in between a metal oxide (MOx) EIL and a MOx HIL with metal anode



Source: (Sessolo & Bolink, 2011).

Inorganic diodes, such as silicon-based p-n junction diodes, are characterized by their simple yet effective structure (Ge et al., 2021). The device consists of a junction formed between p-type and n-type semiconductors. When forward biased, electrons and holes move across the junction, facilitating current flow. In reverse bias, the junction prevents current flow, with only a small leakage current until breakdown occurs. Key characteristics include high rectification efficiency, robust thermal stability, and predictable I-V behavior, making them ideal for applications in power rectification and signal modulation (Candan & Asubay, 2023; Gu, Guo, Hemour, & Wu, 2020).

4.2. Organic Diodes

Organic diodes, often used in organic light-emitting diodes (OLEDs) and organic photovoltaic cells, have a more complex multilayer structure (Yadav, Mittal, & Negi, 2022). Typically, these devices consist of an anode, a hole transport layer (HTL), an organic active layer, an electron transport layer (ETL),

and a cathode. The organic layers facilitate charge injection and recombination, with the emitting layer producing light in OLEDs as shown in Figure 2. Organic diodes exhibit unique characteristics such as flexibility, lower manufacturing costs, and the potential for large-area fabrication through printing techniques (C. Liu, Xiao, Xie, & Li, 2021; H. Liu, Liu, Yang, Gao, & Wu, 2023). However, they generally have lower charge carrier mobility and shorter operational lifetimes compared to their inorganic counterparts.

Understanding the structures and operational principles of inorganic and organic diodes is essential for leveraging their respective advantages in various applications, from traditional electronics to cutting-edge flexible and wearable technologies.

5. DEVICE STRUCTURES AND CHARACTERISTICS OF INORGANIC AND ORGANIC TRANSISTORS

Transistors, the building blocks of modern electronics, exhibit varying structures and characteristics based on whether they are inorganic or organic.

5.1. Inorganic Transistors

Inorganic transistors, particularly metal-oxide-semiconductor field-effect transistors (MOSFETs), are essential for high-performance electronic circuits (Luo et al., 2020). The typical MOSFET structure includes a source, drain, and gate, with an insulating oxide layer separating the gate from the silicon channel. When a voltage is applied to the gate, it modulates the conductivity of the channel, allowing current to flow between the source and drain. Key characteristics of inorganic transistors include high electron mobility, excellent thermal stability, and fast switching speeds, making them suitable for applications in

microprocessors, memory devices, and power management circuits (Zhao, Du, Li, Zhao, & Lei, 2023).

5.2. Organic Transistors

Organic thin-film transistors (OTFTs) use organic semiconductors in their active layer and are notable for their mechanical flexibility and potential for low-cost production (Lampert et al., 2020). The typical OTFT structure includes source and drain electrodes, a gate electrode, and an organic semiconductor layer. These transistors often use a gate dielectric made from flexible materials to maintain device integrity under bending. Although organic transistors have lower charge carrier mobility and slower switching speeds compared to inorganic transistors, their unique characteristics, such as flexibility and ease of fabrication on large areas, make them ideal for applications in flexible displays, wearable electronics, and disposable sensors.

Understanding the distinct structures and performance traits of inorganic and organic transistors is crucial for optimizing their use in diverse technological applications, from high-speed computing to innovative, flexible electronic devices (Yuvaraja et al., 2020).

6. EMERGING TRENDS AND FUTURE DIRECTIONS OF ORGANIC/INORGANIC SEMICONDUCTOR DEVICES

The semiconductor industry stands on the cusp of revolutionary advancements, driven by the evolving demands for more efficient, versatile, and high-performance electronic devices (Sundaram, Muniyandi, Ethiraj, Parimelazhagan, & Kumar, 2024). Inorganic semiconductors, such as silicon (Si) and gallium arsenide (GaAs), have long been the backbone of electronic

devices due to their superior electrical properties, including high carrier mobility, thermal stability, and reliable performance. However, the advent of organic semiconductors has introduced a new realm of possibilities, characterized by flexibility, lightweight construction, and cost-effective, large-area manufacturing. This section explores the emerging trends and future directions in the electrical properties of both organic and inorganic semiconductor devices.

6.1. Hybrid Devices

A significant trend is the development of hybrid devices that integrate organic and inorganic materials (Ren et al., 2021). These devices leverage the high performance of inorganic semiconductors and the versatility of organic materials, aiming to achieve superior functionality. Hybrid devices hold promise for flexible and wearable electronics, combining mechanical flexibility with high-speed performance. For instance, hybrid solar cells and transistors are being developed to offer enhanced efficiency and new form factors, paving the way for innovative applications in various fields.

6.2. Nanoscale Devices

The push towards nanoscale semiconductor devices represents another frontier. Inorganic semiconductors, particularly silicon, have already made significant strides, with technologies reaching nanometer scales in modern integrated circuits (Hernandez-Ramirez, Romano-Rodriguez, & Prades, 2020). Nanoscale devices offer improved performance, reduced power consumption, and increased device density. Organic semiconductors are also making progress in this area, with research focused on molecular electronics and the self-assembly of organic molecules into nanoscale structures with unique electronic properties. These advancements could lead to

breakthroughs in miniaturization and performance of electronic devices.

6.3. Advanced Organic Materials

The development of advanced organic materials is crucial for enhancing the electrical properties of organic semiconductors. Innovations in polymer chemistry and molecular design are yielding materials with higher charge carrier mobility, better stability, and improved environmental resilience. These advancements are expanding the application scope of organic semiconductors, making them viable for use in high-performance devices like organic photovoltaics, organic light-emitting diodes (OLEDs), and organic field-effect transistors (OFETs) (Chauhan, Jha, Aswal, & Yakhmi, 2022).

6.4. Flexible and Wearable Electronics

Flexible and wearable electronics are a significant future direction, driven by the unique properties of organic semiconductors (Xu, Zhao, & Liu, 2023). These devices need materials that maintain performance under mechanical deformation, enabling new applications in healthcare, sports, and consumer electronics. Efforts are also underway to adapt inorganic semiconductors for flexible applications through the development of thin, bendable substrates and novel fabrication techniques. This trend points towards a future where electronics can seamlessly integrate with the human body and the environment.

6.5. Quantum and Nanoelectronics

Quantum and nanoelectronics represent the cutting edge of semiconductor research. Both organic and inorganic semiconductors are being explored for their potential in quantum computing and advanced nanoscale devices (Rahimi-Iman, 2021). Organic materials offer unique quantum properties that

could revolutionize computing, while inorganic materials provide the precision and control necessary for fabricating quantum devices. The intersection of these technologies could lead to unprecedented advancements in processing power and efficiency.

In conclusion, the electrical properties of organic and inorganic semiconductor devices are driving the next wave of technological innovation. By harnessing the strengths of both material types, future electronic devices will achieve new heights in performance, efficiency, and versatility, transforming the landscape of technology and everyday life (Rogdakis, Karakostas, & Kymakis, 2021).

7. CONCLUSION

The exploration of the electrical properties of organic and inorganic semiconductor devices reveals a dynamic and rapidly evolving field. Inorganic semiconductors like silicon and gallium arsenide remain the backbone of high-performance electronic devices, offering unparalleled carrier mobility, thermal stability, and mature fabrication techniques. Their role in high-speed processors, efficient solar cells, and reliable communication systems underscores their critical importance.

Conversely, organic semiconductors have introduced new dimensions to the industry, providing flexibility, lightweight construction, and cost-effective large-area manufacturing possibilities. These materials are paving the way for innovative applications such as flexible displays, organic light-emitting diodes (OLEDs), and wearable electronics, which are increasingly becoming part of our daily lives.

Emerging trends, including the development of hybrid devices, nanoscale advancements, and the creation of advanced organic materials, point towards a future where the best attributes

of both material types are harnessed. These trends are not only pushing the boundaries of what is technologically possible but also expanding the application horizons of semiconductor devices.

As research and development continue to advance, the synergistic integration of organic and inorganic materials promises to unlock unprecedented capabilities in electronic devices. This evolution will lead to more efficient, versatile, and powerful technologies, ultimately transforming the way we interact with and utilize electronic systems in our daily lives. The future of semiconductor technology is bright, with organic and inorganic semiconductors at the forefront of this exciting journey.

RERERENCES

- Alshammari, B. H., Lashin, M. M., Mahmood, M. A., Al-Mubaddel, F. S., Ilyas, N., Rahman, N., . . . Khan, R. (2023). Organic and inorganic nanomaterials: fabrication, properties and applications. *RSC advances*, 13(20), 13735-13785.
- An, S., Park, H., & Kim, M. (2023). Recent advances in single crystal narrow band-gap semiconductor nanomembranes and their flexible optoelectronic device applications: Ge, GeSn, InGaAs, and 2D materials. *Journal of Materials Chemistry C*, 11(7), 2430-2448.
- Bhaliya, J., Popaliya, M. R., Patel, G. M., Mishra, A., & Shah, V. (2023). Recent Advances in Semiconducting Nanowires-Based Hybrid Structures for Solar Cell Application. *1D Semiconducting Hybrid Nanostructures: Synthesis and Applications in Gas Sensing and Optoelectronics*, 127-162.
- Bronstein, H., Nielsen, C. B., Schroeder, B. C., & McCulloch, I. (2020). The role of chemical design in the performance of organic semiconductors. *Nature Reviews Chemistry*, 4(2), 66-77.
- Candan, İ., & Asubay, S. (2023a). Electrical and Current-Voltage/Capacitance-Voltage Properties of Schottky Diodes. In: YAZ Yayınları.
- Candan, İ., & Asubay, S. (2023). Optical and Structural Properties of Metal Doped Copper Oxide Semiconducto. *Innovative Research In Natural Science And Mathematics*, 83-95.
- Candan, İ., & Asubay, S. (2023b). Optical And Structural Properties Of Schottky Diodes. In H. Y. Çoğun (Ed.),

Current Debates on Natural and Engineering Sciences 11
(Vol. 1, pp. 378 -384): Bidge Publications.

- Chauhan, A., Jha, P., Aswal, D., & Yakhmi, J. (2022). Organic devices: fabrication, applications, and challenges. *Journal of Electronic Materials*, 51(2), 447-485.
- Chen, Y., Yao, Y., Turetta, N., & Samorì, P. (2022). Vertical organic transistors with short channels for multifunctional optoelectronic devices. *Journal of Materials Chemistry C*, 10(7), 2494-2506.
- Ge, M., Cao, C., Biesold, G. M., Sewell, C. D., Hao, S. M., Huang, J., . . . Lin, Z. (2021). Recent advances in silicon-based electrodes: from fundamental research toward practical applications. *Advanced Materials*, 33(16), 2004577.
- Gu, X., Guo, L., Hemour, S., & Wu, K. (2020). Optimum temperatures for enhanced power conversion efficiency (PCE) of zero-bias diode-based rectifiers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 68(9), 4040-4053.
- Guo, J., Liu, X., Yu, J., Xu, C., Wu, Y., & Senthil, R. A. (2021). An overview of the comprehensive utilization of silicon-based solid waste related to PV industry. *Resources, conservation and recycling*, 169, 105450.
- Hernandez-Ramirez, F., Romano-Rodriguez, A., & Prades, J. D. (2020). Inorganic nanomaterials. In *Advanced Nanomaterials for Inexpensive Gas Microsensors* (pp. 17-35): Elsevier.
- Huang, Q., Pan, B., & Wang, Z. (2024). Organic Electronics in Flexible Devices: Engineering Strategy, Synthesis, And Application. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 96, 251-260.

- Lamport, Z. A., Cavallari, M. R., Kam, K. A., McGinn, C. K., Yu, C., & Kymissis, I. (2020). Organic thin film transistors in mechanical sensors. *Advanced Functional Materials*, 30(51), 2004700.
- Lazergui, A., & Bakel, A. (2021). *GaN-based High Electron Mobility Transistors for High Frequency HF Applications*. Université Ibn Khaldoun-Tiaret,
- Leydecker, T., Wang, Z. M., Torricelli, F., & Orgiu, E. (2020). Organic-based inverters: basic concepts, materials, novel architectures and applications. *Chemical Society Reviews*, 49(21), 7627-7670.
- Li, N., Han, K., Spratt, W., Bedell, S., Ren, J., Gunawan, O., . . . Libsch, F. (2020). Dust-Sized High-Power-Density Photovoltaic Cells on Si and SOI Substrates for Wafer-Level-Packaged Small Edge Computers. *Advanced Materials*, 32(49), 2004573.
- Liu, C., Xiao, C., Xie, C., & Li, W. (2021). Flexible organic solar cells: Materials, large-area fabrication techniques and potential applications. *Nano Energy*, 89, 106399.
- Liu, H., Liu, D., Yang, J., Gao, H., & Wu, Y. (2023). Flexible electronics based on organic semiconductors: from patterned assembly to integrated applications. *Small*, 19(11), 2206938.
- Luo, M., Zhu, M., Wei, M., Shao, S., Robin, M., Wei, C., . . . Zhang, Z. (2020). Radiation-hard and repairable complementary metal-oxide-semiconductor circuits integrating n-type indium oxide and p-type carbon nanotube field-effect transistors. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(44), 49963-49970.
- Peng, J., & Snyder, G. J. (2019). A figure of merit for flexibility. *Science*, 366(6466), 690-691.

- Rahimi-Iman, A. (2021). *Semiconductor photonics of nanomaterials and quantum structures: applications in optoelectronics and quantum technologies* (Vol. 196): Springer Nature.
- Ren, Z., Yang, J., Qi, D., Sonar, P., Liu, L., Lou, Z., . . . Wei, Z. (2021). Flexible sensors based on organic–inorganic hybrid materials. *Advanced Materials Technologies*, 6(4), 2000889.
- Rogdakis, K., Karakostas, N., & Kymakis, E. (2021). Up-scalable emerging energy conversion technologies enabled by 2D materials: from miniature power harvesters towards grid-connected energy systems. *Energy & Environmental Science*, 14(6), 3352-3392.
- Schweicher, G., Garbay, G., Jouclas, R., Vibert, F., Devaux, F., & Geerts, Y. H. (2020). Molecular semiconductors for logic operations: dead-end or bright future? *Advanced materials*, 32(10), 1905909.
- Sessolo, M., & Bolink, H. J. (2011). Hybrid organic–inorganic light-emitting diodes. *Advanced Materials*, 23(16), 1829-1845.
- Stoeckel, M. A., Olivier, Y., Gobbi, M., Dudenko, D., Lemaire, V., Zbiri, M., . . . Migliori, A. (2021). Analysis of external and internal disorder to understand band-like transport in n-type organic semiconductors. *Advanced Materials*, 33(13), 2007870.
- Sundaram, G. A., Muniyandi, G. r., Ethiraj, J., Parimelazhagan, V., & Kumar, A. S. K. (2024). Introduction and Advancements in Room-Temperature Ferromagnetic Metal Oxide Semiconductors for Enhanced Photocatalytic Performance. *ChemEngineering*, 8(2), 36.

- Terna, A. D., Elemike, E. E., Mbonu, J. I., Osafire, O. E., & Ezeani, R. O. (2021). The future of semiconductors nanoparticles: Synthesis, properties and applications. *Materials Science and Engineering: B*, 272, 115363.
- Wagih, M., Balocchi, L., Benassi, F., Carvalho, N. B., Chiao, J.-C., Correia, R., . . . Gouveia, C. (2022). Microwave-enabled wearables: Underpinning technologies, integration platforms, and next-generation roadmap. *IEEE Journal of Microwaves*, 3(1), 193-226.
- Wang, S., Liu, X., & Zhou, P. (2022). The road for 2D semiconductors in the silicon age. *Advanced Materials*, 34(48), 2106886.
- Xu, X., Zhao, Y., & Liu, Y. (2023). Wearable electronics based on stretchable organic semiconductors. *Small*, 19(20), 2206309.
- Yadav, S., Mittal, P., & Negi, S. (2022). Recent advancements over a decade for organic light-emitting diodes: from structural diversity, role of layers, colour emission, material classification, performance improvement, fabrication to applications. *Bulletin of Materials Science*, 45(3), 109.
- Yaemsunthorn, K. (2023). *Phase-dependent photocatalytic activity of TiO₂-the role of intrinsic and extrinsic factors*.
- Yuvaraja, S., Nawaz, A., Liu, Q., Dubal, D., Surya, S. G., Salama, K. N., & Sonar, P. (2020). Organic field-effect transistor-based flexible sensors. *Chemical Society Reviews*, 49(11), 3423-3460.
- Zhang, J., & Shih, T. (2020). A transient bulging phenomenon in fast doping processes for pn junctions. *IEEE Access*, 8, 126523-126529.

Zhao, X., Du, Y., Li, W., Zhao, Z., & Lei, M. (2023). Organic/inorganic hybrids for intelligent sensing and wearable clean energy applications. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 6(5), 176.

MXENE MALZEMELERİN UYGULAMALARI

Mehmet ERDEM¹

1. GİRİŞ

MXene'ler hızla büyüyen ve çok geniş 2 boyutlu (2D) malzeme ailesi olan geçiş metallerinin karbür ve nitritlerine verilen isimdir.[1,2] 2D MXene içeriğinde; M katmanı erken geçiş metallerini temsil eder. X katmanı karbon veya nitrojeni temsil eder. Genel MXene formu şu şekildedir. $M_{n+1}X_nT_x$. Formülde bulunan T_x , dış katmanlara bağlanan, yüzey sonlandırma veya fonksiyonelleştirme olarak adlandırılan O, OH veya F'yi temsil eder. Bununla beraber Cl olabileceğiyle ilgili çalışmalar da bulunmaktadır.[3] Formüldeki n sayısının ise teorik olarak daha fazla söyleyen çalışmalar vardır.[4] Lakin malzemenin kararlılık durumu göz önüne alındığında deneysel olarak bu şekilde üretmek imkansız yakın görülmektedir. Deneysel olarak en fazla 3 veya 4 olabileceğiyle ilgili çalışmalar vardır.[5] MXene'ler günümüzde MAX fazında bulunan malzemelerin kimyasal aşındırmasıyla üretilmektedir. Bu aşındırma daha çok katmanlı seramikler oluşturan alüminyum, silikon, galyum veya alüminyum karbür katmanlarının seçici kimyasal aşındırmasıdır. MAX fazları genelde M erken geçiş metali, A ana grup elementi ve X karbon veya azottan oluşan üçlü seramik malzemelerdir.[6] 150' den fazla MXene malzeme olması ve çok sayıda uygulamaya konu olması bizi bu çalışmaya iten nedenler arasındadır. MAX fazından MXene malzemeye nasıl geçildiği ve sözü edilen 150'den fazla MXene malzemenin

¹ Dr., Gebze Teknik Üniversitesi, Fizik Bölümü, mehmet.erdem@gtu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-7827-0030.

isimleri ve sınıflandırmasının yanı sıra, MXene çeşitleri bu çalışmanın kapsamı dışındadır. Bu çalışma daha çok MXene'lerin enerjiyle ilgili uygulamaları, elektrokimyasal uygulamaları, çevresel uygulamaları, sensör uygulamaları, süperkapasitör uygulamaları vb. çeşitli uygulamaları sınıflandırılarak anlatılan bir çalışmadır.

2. ENERJİYLE İLGİLİ UYGULAMALAR

Bu gruba piller ve tüm pil gruplarıyla ilgili uygulamaların yanı sıra süperkapasitör uygulamaları girse de çok alt başlık içermesi nedeniyle bunlar elektrokimyasal enerji depolama olarak ayrı bir alt başlıkta gösterilmiştir. Enerji ve bununla birlikte çevresel konular tüm dünyada üzerinde titizlikle çalışılan önemli konulardan olması nedeniyle, bilim adamları bu alana önemli katkılarda bulunmuşlardır. Bunlara örnek olarak biyokütleden türetilen enerjiler, rüzgâr enerjisi ve güneş pilleri verilebilir. Uzun zamandır üzerinde çalışılan ve bu enerjiyle ilgili benzeri teknolojilerdeki en büyük problem enerjinin depolanmasıdır. Maalesef ki bu problem günümüzde istenilen seviyede aşılmış değildir. MXene'lerin keşfedilmesiyle birlikte elektrokimyasal enerji depolama alanında yoğun çalışmalar vardır.

2.1. Elektrokimyasal Enerji Depolama

2.1.1. Sodyum İyon Piller

Sodyum iyon piller, günümüzde sıklıkla üretilen lityum iyon pillere alternatif olarak düşünülen enerji depolama cihazlarıdır. MXene'lerin geniş yüzey alanları ve çok katmanlı yapıları sayesinde sodyum iyon pillerde yüksek kapasite sağlayabilir. Sodyum iyonlarının hızlı ve etkin şekilde interkalasyonu, yani tabakalar arasına yerleşmesi mümkündür.[7,8] Ayrıca bu malzemelerin yüksek iletkenlikleri

sebebiyle sodyum iyon pillerinin hızlı şarj ve hızlı deşarj döngüsüne imkân sağlar ve depolama cihazlarının daha verimli çalışmasını sağlar.[9,10] Bununla birlikte MXene'ler katot malzemesi olarak kullanıldığında sodyum iyonlarının hızlı hareketini ve elektron iletkenliğini artırabilir.[11] Bu da pilin performansını ve verimliliğini yükseltebilir. MXene'ler yüksek kimyasal stabiliteleri sayesinde katot malzemelerin daha uzun ömürlü olmasını sağlar. Bu özellik pillerin genel dayanıklılığını artırır. MXene'ler elektrolitlerde de kullanılabilir. Elektrolitlerde sodyum iyonlarının seçici taşınmasını sağlayabilir. Bu da pilin performansına ve güvenliğine olumlu katkıda bulunur. MXene'lerin katmanlı yapıları da elektrolitlerde iyon iletkenliğini optimize edebilir.[12] Bu da pilin enerji yoğunluğunu ve verimini artırır. Yüksek mekanik dayanıklılıkları sayesinde yapısal bütünlüğü korunan bu piller uzun döngü ömrüne sahip olur. MXene'ler esnek yapıları sayesinde pillerin mekanik stres altında bile işlevselliğini korumasına yardımcı olur.

Sodyumun bol bulunan ve düşük maliyetli bir element olması nedeniyle, MXene'lerle birleştğinde bu pillerin ekonomik olarak daha avantajlı hale gelmesini sağlar.

2.1.2. Lityum İyon Piller

Sodyum iyon pillerindeki gibi lityum iyon pillerde de uygulamada hem anot malzeme hem katot malzeme olarak kullanılabilmektedir. Anot malzeme olarak kullanıldığında yüksek kapasite ve hızlı şarj/deşarj oranına sahip olur. Böylelikle şarj süresi kısalmış kullanım süresi uzayan pil, uzun döngü ömrüne sahip olur. Katot malzemeleriyle birleştirildiğinde genel performansı artan pilin, enerji yoğunluğu da optimize edilir. MXene'ler lityum iyon pillerde nanokompozit malzemelerin bir parçası olarak kullanılabilir. Böylelikle pil malzemelerinin mekanik ve elektrokimyasal özellikleri iyileştirilebilir. Örnek

vermek gerekirse MXene ile kaplanmış grafen veya karbon nanotüpler, pillerin iletkenliğini ve mekanik dayanıklılığını artırabilir. Esnek ve hafif yapıları sayesinde lityum iyon pillerin geliştirilmesinde önemli bir konuma sahip olan MXene'ler, özellikle giyilebilir elektronik cihazlar ve esnek ekranlar gibi yeni nesil teknolojiler için önemlidir. İlk bulunan MXene'lerden olan ve araştırmalarda en sık kullanılan MXene'lerden biri olan $Ti_3C_2T_x$ 'in lityum iyon pillerde anot malzemesi olarak kullanıldığında yüksek kapasite ve uzun döngü ömrü gösterdiği görülmüştür. Bununla beraber Ti_2C MXene'ler de yüksek iletkenliği ve uygun boşluk yapısı ile dikkat çeker ve hızlı şarjdeşarj oranına sahip pillerin geliştirilmesinde kullanılır. [13,14]

2.1.3. Lityum Sülfür Piller

Lityum sülfür piller yüksek enerji yoğunlukları ve düşük maliyetleri nedeniyle enerji depolama alanında beklenen ilgiyi görmektedir. Lakin, düşük döngü ömrü, düşük iletkenlik gibi bazı nedenlerden ötürü ticari olarak uygulanabilir hale gelmesi zordur. Tam da bu noktada imdada MXene'ler yetişmektedir. Yüksek elektrik iletkenlikleri sayesinde katot malzemesi olarak kullanılabilir ve bu da hem pilin iletkenliğini artırır hem de performansını iyileştirir. Yüzey kimyası ve büyük yüzey alanları sayesinde polisülfid iyonlarını soğurabilen iyonlar, pilin döngü ömrünü uzatmasıyla birlikte kapasite kaybını da azaltır.[15] MXene kaplamaları, lityum metal anot üzerinde dendrit büyümesini önleyebilir.[16] Dendritler pil performansını olumsuz etkileyen ve güvenlik sorunlarına yol açan metalik yapılar olarak ta bilinir. Katı hal elektrolitlerinde katkı malzemesi olarak kullanılabilen MXene'ler, Li - S pillerinin termal ve mekanik stabilitesini artırır.[17] Sıvı elektrolitlerde bağlayıcı olarak kullanılabilen bu yapılar, elektrolitin iletkenliğini ve stabilitesini artırır. Lityum sülfür pillerinde katot ve separatör arasında ara katman olarak MXene kullanıldığında, polisülfid iyonlarının difüzyonunu engelleyerek pilin performansını ve

ömrünü iyileştirir.[18,19] Önceki pillerde de bahsedildiği gibi Li-S pillerde de MXene'ler, kompozit yapılar için mekanik dayanıklılığı artırarak, elektrotların yapısal bütünlüğünü korur. Bu çalışmaların devam etmesi, Li – S pillerinin ticari kullanımı konusunda da umut vadetmektedir.

2.1.4. Potasyum İyon Piller

Potasyum iyon piller, lityum iyon pillere kıyasla, potasyumun bol bulunabilirliği ve düşük maliyeti nedeniyle artan bir ilgi görmektedir. Dolayısıyla MXene'ler, KIP olarak da adlandırılan potasyum iyon piller gibi enerji depolama cihazlarında da önemli uygulamalara sahiptir. MXene'lerin bu pillerde kullanımı bazı avantajlara sahiptir. Bunlar hemen hemen hepsi diğer pillerde de bahsedildiği üzere, pillerdeki elektron transfer süreçlerinin hızlanmasını sağlayan yüksek iletkenlik, yapısı nedeniyle potasyum iyonunun aktif bölgelere erişimini ve kapasitans artışı sağlayan geniş yüzey alanı, bir çok şarj/deşarj döngüsünden sonra dahi performansının korunmasını sağlayan mekanik dayanıklılık, potasyum iyonlarının verimli şekilde depolanmasını sağlayan katyon değişim kapasitesi, ve uzun süreli stabilite sağlayan kimyasal kararlılıktır.[20]

2.1.5. Süperkapasitörler

MXene'ler, yüksek elektriksel iletkenlik, geniş yüzey alanı ve kimyasal stabilite gibi özellikleri nedeniyle, süperkapasitör uygulamaları için son derece elverişli malzemelerdir. Hızlı şarj/deşarj yeteneği ve yüksek güç yoğunluğu ile bilinen süperkapasitörlerin performansını artırmak için MXene'ler kullanılabilir. MXene'ler, yüksek elektriksel iletkenlikleri nedeniyle süperkapasitörlerde düşük iç direnç sağlar. Böylelikle hızlı şarj/deşarj işlemleri mümkün hale gelir. Esnek yapıları sayesinde esnek süperkapasitörlerde kullanılabilen MXene'ler, giyilebilir elektronik cihazlar gibi esnek enerji depolama çözümleri için idealdir. 2D yapısı

nedeniyle geniş bir yüzey alanı sunan MXene malzemeler, daha fazla elektrokimyasal reaksiyon alanı sağlar ve enerji yoğunluğunu artırır.[21] Kararlı yapıları nedeniyle de uzun ömür ve kararlı performans sağlar. MXene'ler su bazlı elektrolitlerle de uyumludur ve bu da çevre dostu kapasitörlerin üretimine olanak tanır. Pillerde olduğu gibi süperkapasitörlerde de elektrolit malzemesi olarak kullanıldığında yüksek kapasitans değerleri ve hızlı yük transferi sağlar. Yüksek iletkenlikleri sayesinde elektrotlar arasında düşük iç direnç sağlanır. Ayrıca diğer iletken malzemelerle de birleştirilerek kompozit elektrotlar oluşturulabilir. Bu da enerji ve güç yoğunluğunun artmasına yol açar. Süperkapasitörler uzun vadeli kompakt enerji gerektiren uygulamalarda da kullanılmıştır. Bunlar otomobil, otobüs, tren, vinç ve asansörlerde de vardır. Ayrıca sınıflandırmada süperkapasitörün alt dallarından olan psödo kapasitörler yani sözde kapasitörler vardır.[22] Yüzey alanı ve yüzey aktif grupları sayesinde psödo kapasitif davranış sergileyebilirler. Böylelikle enerji depolama kapasitesi artarak performans artışı gerçekleşir. Buna ek olarak mikro süper kapasitörler vardır. Bununla ilgili çalışmalar da giderek artmaktadır. Her ne kadar daha ileri teknoloji gerektirse de mikro yapıları nedeniyle giyilebilir ürünlerde ve nesnelerin interneti uygulamalarında idealdir.

2.2.Su Bölme

MXene'ler su bölme (water splitting) uygulamalarında da yüksek potansiyele sahiptir. Su bölme, suyu hidrojen ve oksijen gazlarına ayırma işlemidir ve bu süreçte elektrokatalizörler önemli rol oynar. MXene'ler yüksek yüzey alanları, iletkenlikleri ve kimyasal kararlılıkları sayesinde su bölme reaksiyonlarında etkili elektrokatalizörler olarak kullanılabilir.[23] Örneğin, yüksek elektriksel iletkenlikleri sayesinde elektrokatalitik reaksiyonlarda hızlı elektron transferi sağlar, bu da su bölme verimliliğini artırır. Geniş yüzey alanı sayesinde daha fazla aktif katalitik bölge sağlar ve reaksiyon hızını artırır. Kimyasal olarak

kararlı olduklarından, su bölme ortamlarında uzun süre stabil kalabilir. Bu da katalizörlerin uzun ömürlü ve verimli olmasını sağlar. MXene'lerin yüzey kimyası çeşitli yöntemlerle modifiye edilebildiklerinden katalitik özelliklerinin optimize edilmesine olanak sağlar.

Suyun hidrojen ve oksijen gazlarına ayrılması reaksiyonlarında etkili elektrokatalizör olarak kullanılabilen MXene'lerin yüksek yüzey alanı ve iletkenlikleri sayesinde bu reaksiyonlar hızlandırılabilir. Diğer katalitik malzemelerle birleşerek kompozit katalizörler oluşturulabilir. Böylece su bölme verimliliği artar ve daha kararlı katalizörler sağlayabilir. Ayrıca fotokatalitik su bölme reaksiyonlarında da kullanılabilir.[24] Bu tür uygulamalarda MXene'ler, güneş ışığı altında suyu hidrojen ve oksijen gazlarına ayırmada etkin bir rol oynar. Her ne kadar çok fazla kullanım alanı olsa da yüzey modifikasyonu uygulaması, bunun en önemli uygulamalarından birisidir. Yüzeylerin çeşitli kimyasal gruplarla (örneğin -O, -F, -OH) modifiye edilmesi, katalitik özelliklerini optimize edebilir ve su bölme reaksiyonlarında performanslarını artırabilir.[25] MXene'lerin su bölme uygulamalarındaki potansiyeli, enerji üretimi ve depolama teknolojilerinde önemli gelişmelere yol açabilir. Özellikle hidrojen üretimi için, daha verimli ve ekonomik katalizörlerin geliştirilmesi, temiz enerji (clean energy) kaynaklarına geçişi hızlandırabilir. Gelecekte MXene'lerin optimizasyonu ve büyük ölçekli üretimi ile su bölme teknolojilerinde daha yüksek performanslı ve daha ekonomik çözümler sunabilir.

2.3.Hidrojen Depolama

Hidrojen, temiz ve sürdürülebilir bir enerji taşıyıcısı olarak büyük potansiyele sahiptir, ancak etkin ve güvenli bir şekilde depolanması ciddi zorlukları da beraberinde getirmektedir. MXene'ler geniş yüzey alanı, iletkenlikleri ve

kimyasal uyarlanabilirlikleri sayesinde hidrojen depolama malzemeleri olarak çeşitli avantajlar sunarlar. Böylelikle, hidrojen moleküllerinin adsorpsiyonu için daha fazla aktif bölge sağlar. Yüzey kimyası çeşitli yöntemlerle modifiye edilip, hidrojen adsorpsiyon kapasitesi ve depolama verimliliği artabilir. Yüksek elektriksel iletkenlik özelliği sayesinde MXene'lerin elektrostatik etkileşimler yoluyla hidrojen adsorpsiyonunu desteklemesini sağlar.[26,27] Gaz adsorpsiyonu, kompozit malzemelerde kullanımı ve elektrokimyasal hidrojen depolama gibi kullanım alanları vardır.[28,29]

Araştırmalar, MXene'lerin yüzeylerinin çeşitli kimyasal gruplarla modifiye edilmesiyle, hidrojen adsorpsiyon kapasitesinin artırılabilirliğini göstermektedir.[30] Örneğin yüzeydeki -OH veya -F grupları, hidrojen molekülleriyle güçlü etkileşimler sağlayabilir. MXene'lerin MOF kompozitleriyle birleştirilmesi, her iki malzemenin de avantajlarını birleştirerek, yüksek performanslı hidrojen depolama kompozitleri oluşturabilir. MOF'lar kalıcı gözenek ve büyük yüzey alanına sahip 3D metal-organik-melez polimerlerdir. Bu tür kompozitler hem geniş yüzey alanı hem de güçlü kimyasal etkileşimler sağlayarak depolama kapasitesini artırabilir. MXene'lerin, hidrojen gazının desorpsiyonu (kontrollü bir şekilde serbest bırakılması) için de uygun olduğu bulunmuştur. [28] Bu, hidrojen depolama sistemlerinin verimliliğini artırabilir. Hidrojen depolama uygulamalarındaki potansiyel, temiz enerji teknolojilerinin gelişiminde önemli bir rol oynar ve gelecekte bu malzemelerin optimizasyonu ve büyük ölçekli üretimi ile daha yüksek performanslı ve ekonomik hidrojen depolama çözümleri geliştirilebilir. Bu hidrojen ekonomisinin yaygınlaşmasına ve fosil yakıtlarının yerini almasına katkı sağlayabilir.

3. ÇEVRESEL UYGULAMALAR

3.1. Ağır Metal İyonlarının Emilimi

MXene'ler, su arıtma ve ağır metal iyonlarının giderimi uygulamalarında da önemli role sahip malzemelerdir. Büyük yüzey alanları, bol miktarda yüzey fonksiyonel grupları ve kimyasal kararlılıkları sayesinde, ağır metal iyonlarını etkili bir şekilde adsorbe edebilir ve uzaklaştırabilir.

MXene'lerin 2D yapısının sağladığı geniş yüzey alanı nedeniyle, daha fazla adsorpsiyon bölgesi sunularak, ağır metal iyonlarının etkin bir şekilde emilmesi sağlanır.[31] Yüzeyde bulunan -O, -F, ve -OH gibi fonksiyonel gruplar sayesinde ağır metal iyonları güçlü kimyasal bağlar oluşturabilir bu da yüksek adsorpsiyon kapasitesi sağlar.[32] MXene'ler, yüksek iyon değişim kapasitesine sahip olması nedeniyle ağır metal iyonlarının etkili bir şekilde uzaklaştırılmasına yardımcı olur.[33] Ayrıca çeşitli pH ve sıcaklık koşullarında kimyasal olarak kararlı kalabilmesi nedeniyle su arıtma uygulamalarında uzun ömür ve güvenilirlik sağlar.

MXene'ler, su kaynaklarındaki kurşun (Pb^{+2}), kadmiyum (Cd^{+2}), cıva (Hg^{+2}), arsenik (As^{+3}) gibi toksik ağır metal iyonlarını adsorbe ederek etkili bir şekilde giderir.[34] Ayrıca diğer adsorban malzemelerle birleştirilerek yüksek performanslı kompozit adsorbanlar oluşturulabilir.[35] Bu da daha büyük bir alandaki kirleticilerin giderilmesini sağlar. MXene'ler, kimyasal ve ısıtma yöntemlerle rejenerasyon yapılabilir ve yeniden kullanılabilir. Bu da sürdürülebilir (sustainable) ve ekonomik bir su arıtma çözümü sunar. Araştırmalar $Ti_3C_2T_x$ MXene'lerinin yüksek yüzey alanları ve yüzey fonksiyonel grupları sayesinde Pb^{2+} iyonlarını etkili bir şekilde adsorbe edebildiğini göstermiştir.[36] Ayrıca bu malzemelerin, zeolit, karbon nanotüpler veya biyopolimerler gibi diğer adsorban malzemelerle birleştirilmesi, ağır metal iyonlarının giderilmesinde daha yüksek

performans sağlayabilir.[37] MXene'lerin adsorpsiyon kapasitesinin pH ve sıcaklık koşullarına bağlı olarak değiştiği bulunmuştur. Bu ise su arıtma sistemlerinin optimize edilmesinde önemli bir faktördür. Bu konunun geliştirilmesi ve bu alana yapılacak her türlü katkı, insan sağlığının iyileştirilmesine yapılacak katkıya eşdeğerdir.

3.2.Organik Boyaların Çıkarımı

MXene'ler, yüksek yüzey alanı, kimyasal kararlılık ve yüzey fonksiyonel gruplarının çeşitliliği gibi özellikleri nedeniyle organik boyaların su kaynaklarından çıkarılması ve arıtılması uygulamalarında önemli bir yere sahiptir. Organik boyalar, çevre kirliliğine neden olan ve insan sağlığına zararlı maddelerdir. İşte bu yüzden, etkin bir şekilde çıkarılıyor olabilmeleri önemlidir. MXene'lerin 2D yapısının geniş bir yüzey alanı sağlaması nedeniyle daha fazla adsorpsiyon bölgesi sunarak, organik boyaların verimli bir şekilde emilmesi sağlanır. Yüzeyindeki fonksiyonel gruplar nedeniyle organik boyalarla güçlü kimyasal etkileşimler oluşturabilir, bu da yüksek adsorpsiyon kapasitesi sağlar. Ayrıca hızlı adsorpsiyon kinetiğine sahip olması nedeniyle, organik boyaların kısa sürede etkin bir şekilde giderilmesi sağlanır.

MXene'ler, su kaynaklarındaki metilen mavisi, rodamin B, malahit yeşili gibi yaygın organik boyaları adsorbe ederek etkili bir şekilde uzaklaştırabilir.[38] Aktif karbon, biyopolimerler ve zeolit gibi diğer adsorban malzemelerle birleştirilerek, yüksek performanslı kompozit adsorbanlar oluşturabilir, bu da birçok kirleticinin giderilmesini sağlar.[39]

Konuyla ilgili yapılan araştırmalarda yine $Ti_3C_2T_x$ MXene'lerinin metilen mavisi gibi organik boyaları etkin bir şekilde adsorbe edilebildiği görülmüştür.[40] MXene'ler fotokatalitik özellikleri sayesinde organik boyaların UV veya görünür ışık altında parçalanmasını da sağlayabilir.[41] Bu da

boya moleküllerinin tamamen mineralize edilmesine olanak tanır ve suyu temizler. MXene'lerin bu konudaki potansiyeli, endüstriyel atık su arıtma ve temiz su kaynaklarının korunması için önemli katkılar sağlayabilir.

3.3.Radyonüklid Kirleticilerin Ortadan Kaldırılması

MXene'ler, Radyonüklid kirleticilerin ortadan kaldırılması konusunda gelecek vadeden malzemelerdir. Radyonüklidler, insan ve çevre sağlığı için ciddi riskler barındıran radyoaktif izotoplardır ve etkili bir şekilde uzaklaştırılmaları önemlidir. MXene'lerin yüksek yüzey alanı, kimyasal kararlılık, yüksek iyon değişim kapasitesi ve çeşitli yüzey fonksiyonel grupları sayesinde radyonüklidlerin adsorpsiyonu ve immobilizasyonu için potansiyel sunarlar.[42] MXene'ler, su ve atık sularındaki radyonüklid izotoplarını adsorbe ederek etkili bir şekilde giderir.[43] Ayrıca nükleer tesislerden kaynaklanan radyoaktif atıkların yönetimi ve arıtılmasında kullanılabilir. Bu, çevresel riskleri azaltabilir ve atık yönetim sürecini daha güvenli hale getirir. Nükleer atıkların uzun vadeli depolanmasında ve immobilizasyonunda da kullanılabilen MXene'ler, bu özellikleri sayesinde radyoaktif maddelerin çevresel etkilerini azaltabilir.

3.4.Ürenin Atılması

Üre, endüstriyel süreçlerde ve tarımsal faaliyetlerde yaygın olarak kullanılan bir kimyasaldır ve su kaynaklarından etkin bir şekilde uzaklaştırılması gerekebilir. MXene'lerin iki boyutlu yapısı nedeniyle üre moleküllerinin etkin bir şekilde adsorpsiyonu sağlanır. Ayrıca MXene'lerin yüzeyindeki fonksiyonel gruplar, üre gibi belirli moleküllerle seçici etkileşimler kurabilir, bu da diğer bileşenlerin arasından ürenin ayrılmasını kolaylaştırır.[44]

MXene'ler, endüstriyel atık sularından veya tarımsal suların arıtılmasında üre giderimi için kullanılabilir. Bu da su

kaynaklarının korunmasına ve çevre kirliliğinin azaltılmasına katkı sağlar. MXene'lerin, su ortamındaki üre konsantrasyonlarını etkili bir şekilde azaltabildiğini gösteren çalışmalar bulunmaktadır.[45] Ayrıca yüzeyindeki kimyasal grupların modifikasyonu, üre adsorpsiyon kapasitesini ve spesifitesini artırabilir. Örneğin, yüzeydeki -OH grupları, üre molekülleri ile güçlü hidrojen bağları oluşturarak adsorpsiyon verimliliğini artırabilir.[46]

4. KİMYASAL/BİYOLOJİK SENSÖRLER

4.1.Elektrokimyasal Sensörler

Elektrokimyasal sensörler, bir analitik kimya teknolojisi olarak, elektrokimyasal reaksiyonları kullanarak çeşitli maddelerin tespit edilmesini sağlar. MXene'lerin bu alandaki potansiyeli, yüksek yüzey alanı, elektriksel iletkenlik, kimyasal dayanıklılık ve özelleştirilebilir yüzey fonksiyonel grupları ile ilişkilendirilir.

MXene'lerin iki boyutlu yapısı büyük bir yüzey alanı sağlar ve bu özellik, sensörün hassasiyetini artırabilir ve daha fazla analit molekülünün yüzeyde adsorpsiyonunu mümkün kılar. MXene'ler, yüksek elektriksel iletkenlikleri ile elektron transferini kolaylaştırır.[47] Bu da sensörün hızını ve yanıt zamanını iyileştirebilir. Çeşitli kimyasal ortamlarda kararlı kalabilmesi nedeniyle, sensörün uzun süreli ve tekrarlanabilir kullanımını sağlar. Yüzeyindeki -OH, -O, ve -F gibi fonksiyonel gruplar, sensörün belirli analitlerle seçici etkileşim kurmasını sağlayabilir. [48] Bu, sensörün spesifiklik ve duyarlılık açısından optimize edilmesini mümkün hale getirir.

Elektrokimyasal sensörlerin biyomedikal alanda uygulamaları vardır. Örneğin; Biyosensörler. DNA ve proteinler gibi biyolojik moleküllerin tespitinde kullanılabilir.[49] Ağır

metaller ve organik bileşikler gibi çeşitli çevresel kirleticilerin izlenmesi ve tespiti için MXene'ler, elektrokimyasal sensörlerde kullanılır.[50] Gıda güvenliği ve tarımsal üretimde kullanılan MXene tabanlı sensörler, pestisitler ve patojen mikroorganizmaların tespiti gibi alanlarda önemli bir rol oynayabilir. MXene'lerin elektrokimyasal özellikleri, kimyasal ve biyokimyasal analizlerde (örneğin, ilaç ve biyolojik moleküllerin analizi) yüksek hassasiyet ve doğruluk sağlayabilir. Yüzeyindeki kimyasal grupların modifikasyonu veya katkı maddelerinin eklenmesi, sensör performansını optimize etmek için yaygın olarak araştırılmaktadır. Ayrıca yeni MXene türleri çıktıkça veya hakkında araştırmalar arttıkça, yeni kompozitlerin sentezi olmakta, bu da farklı analitlerin tespiti için daha hassas ve seçici sensörlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

Bu alanda yapılacak çalışmalarla, gelecekte bu malzemelerin daha fazla karakterizasyonuna; endüstriyel ölçekte üretimi ve sensör teknolojilerindeki entegrasyonuyla daha duyarlı daha hızlı ve daha güvenilir sensör sistemlerinin geliştirilmesine katkıda bulunması beklenmektedir.

4.2.Gaz Sensörleri

Gaz sensörleri, çevresel izleme, sağlık kontrolü, endüstriyel güvenlik ve tıbbi tanı gibi birçok uygulamada önemli bir rol oynar. MXene'lerin, büyük yüzey alanı nedeniyle sensörün gaz moleküllerini yakalama ve algılama kapasitesi artar. Yüksek iletkenlikleri nedeniyle sensörün yanıt süresi ve hassasiyeti artabilir. Kimyasal ortamdaki kararlılığı nedeniyle, sensörün uzun süreli ve tekrarlanabilir kullanımı sağlanır.

MXene tabanlı gaz sensörleri, hava kalitesi izleme ve çevresel kirlilik tespiti gibi uygulamalarda kullanılabilir. [51] Gaz kaçaklarının erken tespiti ve tehlikeli gazların izlenmesi, endüstriyel güvenlik için kritik önem taşır. MXene'ler bu tür uygulamalarda duyarlı sensörler olarak potansiyel gösterir.

MXene tabanlı bu sensörler aynı zamanda solunum analizleri ve tıbbi teşhislerde de kullanılabilir. Böylelikle hastalıkların erken teşhisi ve tedavi takibi amacıyla kullanılabilir. Akıllı şehirlerde, trafik yoğunluğu ve çevresel koşulların izlenmesi amacıyla da kullanılabilir. Tüm bunlara ek olarak konu hakkında gelişmekte olan alanlar da vardır. Örneğin, CO₂ ve NO_x gibi düşük yoğunluklu gazların hassas algılanmasındaki potansiyeli üzerine bilim adamları araştırma yapmaktadır.

4.3.Fotoluminesans Sensörleri

MXene'ler, Fotoluminesans sensörler için yeni ve ilginç bir potansiyele sahip olan 2 boyutlu malzemelerdir. Fotoluminesans, bir malzemenin ışık absorpsiyonu sonucu uyarıldığında yaydığı ışık enerjisidir. MXene'lerin bu alandaki potansiyeli, geniş yüzey alanı, kimyasal stabilite, iletkenlik özellikleri ve uyarılabilir optik özellikleri ile ilişkilidir. Büyük yüzey alanı sayesinde fotoluminesans sinyalleri artar ve daha hassas sensörlerin gelişimi sağlanır. Bazı MXene türleri, ışık uyarılması sonucunda, belirli dalga boylarında fotoluminesans gösterebilirler. Bu özellik, sensörlerin optik algılama ve analiz yeteneklerini artırabilir. Ayrıca MXene'ler, farklı dalga boylarında (ultraviyole, kızılötesi, görünür bölge vb.) uyarılarak çeşitli analitlerin tespit edilmesinde kullanılabilir.

MXene tabanlı fotoluminesans sensörler, biyolojik moleküller, ilaçlar veya çeşitli kimyasal analitlerin tespitinde kullanılabilmesinin yanı sıra çevresel kirleticilerin izlenmesi ve tespiti gibi uygulamalarda değerli olabilmektedir.[52] MXene'ler, optik görüntüleme tekniklerinde (örneğin, hücresel görüntüleme veya biyomedikal görüntüleme) kontrast iyileştirmesi veya belirli bileşenlerin izlenmesi için sensörler olarak kullanılabilir.[53] MXene tabanlı bu sensörler, gıda güvenliği kontrolleri veya tarımsal ürünlerin kalite kontrolü gibi

alanlarda da kullanılarak, patojenler veya kimyasal kalıntıların hızlı tespitini sağlayabilir.[54]

5. ELEKTROKATALİTİK UYGULAMALARI

MXene'ler, elektrokatalizör olarak kullanıldıklarında çeşitli elektrokimyasal uygulamalarda önemli potansiyel göstermektedirler. Elektrokataliz, kimyasal reaksiyonların hızını artırmak veya enerji dönüşümlerini etkinleştirmek amacıyla, elektrot üzerinde katalizör kullanımını içerir. MXene'lerin bu alandaki avantajları, büyük yüzey alanı, iletkenlik, kimyasal dayanıklılık ve uygun yüzey fonksiyonel grupları sayesinde çıkmaktadır. MXene'lerin yapısı nedeniyle katalitik aktif bölgelerin yoğunluğu artar ve böylelikle reaksiyon hızlarını artırabilir.[55] Yüksek elektriksel iletkenlikleri sayesinde, elektrokimyasal reaksiyonlarda elektron transferi kolaylaşır. Kimyasal ortamlarda kararlı kalabilmesi yeteneği sayesinde, uzun süreli ve tekrarlanabilir katalitik performans sağlar. MXene'lerin yüzeyinde bulunan -OH, -F, -O gibi fonksiyonel gruplar, kataliz için uygun reaktif siteler sağlar. MXene'ler, Oksijen İndirgeme Reaksiyonu (ORR) ve Hidrojen Evrim Reaksiyonu (HER) gibi yakıt hücresi uygulamalarında elektrokatalizör olarak potansiyel gösterebilirler.[56,57] Bu, yakıt hücrelerinin verimliliğini artırır. Ayrıca, su elektrolizi yoluyla, hidrojen üretiminde katalitik aktivite gösterebilirler. Bu ise temiz enerji üretimi için önemli bir adımdır. Elektrokimyasal sensörlerde, katalitik etkinlik göstererek, duyarlılık ve seçicilik sağlarlar. MXene'lerin bazıları, karbondioksit dönüşümü reaksiyonlarında, CO₂'nin değerli kimyasallara dönüştürülmesinde katalizör olarak kullanılabilir.[58]

6. ELEKTROMANYETİK GİRİŞİM KORUMASI VEYA MİKRODALGA EMİLİMİ

Elektromanyetik girişim koruması (EMI), elektronik cihazların, elektromanyetik alanlardan kaynaklanan zararlı etkilerden korunması için kritik bir gerekliliktir. Aynı zamanda mikrodalga uygulamaları da MXene'lerin yüksek iletkenlikleri ve mikrodalga emilim özellikleri nedeniyle üzerinde çalışıla gelen bir alan olmuştur. MXene'ler, yüksek elektriksel iletkenliğe sahip olması nedeniyle, elektronik cihazlara uygulanan EMI koruması için etkin bir şeffaf iletken katman sağlar. Bu, çeşitli endüstriyel ve askeri uygulamalarda önemlidir. MXene'ler, esnek altyapılara kolayca uygulanabilen film formunda üretilebilirler.[59] Bu, esnek elektronik cihazlar ve mobil cihazlar gibi uygulamalar için idealdir. Bazı MXene türleri, mikrodalga frekanslarında da yüksek EM emilim kapasitesine sahiptir.[60] Bu özellik, radar güçleri, elektromanyetik sinyal istihbaratı ve diğer savunma uygulamalarında potansiyel olarak kullanılabilir.

Belirli MXene türleri, mikrodalga frekanslarında güçlü bir şekilde EM dalgalarını emebilirler. Bu özellik, mikrodalga fırınlar, radyo frekansı kimyasal reaksiyonları ve diğer mikrodalga uygulamaları için alan açar. MXene'ler, mikrodalga enerjiyi emerek ısıyı etkin bir şekilde yönetebilirler. Bu, endüstriyel ısıtma ve termal yönetim uygulamalarında kullanım için avantaj sağlar. MXene'lerin mikrodalga emilim özellikleri, radar kesilme, elektromanyetik radyasyon adsorpsiyonu ve elektromanyetik sinyal istihbaratı gibi savunma ve güvenlik uygulamalarında kullanılmalarını sağlayabilir.

MXene'ler, karbon nanotüpler veya grafen gibi diğer iletken malzemelerle birleştirilerek, daha yüksek performanslı EMI koruma veya mikrodalga emilim kompozitleri oluşturulabilir.[60] MXene'lerin yapısal ve kimyasal modifikasyonları, EM özelliklerini optimize etmeyi amaçlayan

çalışmalara konu olmuştur. Gelecekte bu malzemelerin geliştirilmesi ve ölçeklendirilmesi ile daha güçlü, hafif ve daha etkili elektromanyetik koruma sistemleri ve mikrodalga cihazlar geliştirilmesi beklenmektedir.

7. ŞEFFAF İLETKEN FİMLER

Şeffaf iletken filmler, güneş pilleri, dokunmatik ekranlar, akıllı camlar ve esnek elektronik cihazlar gibi birçok uygulamada kullanılan önemli bir teknolojidir. MXene'ler, elektriksel iletkenlikleri sayesinde şeffaf iletken filmler için ideal bir seçenek olabilir.[61] Bu özellikleri, enerji transferi ve elektronik cihazlarda düşük direnç sağlar. MXene'lerin optik şeffaflığı, güneş pilleri ve dokunmatik ekranlar gibi uygulamalarda görüntü kalitesini korurken, iletkenlik sağlar. Film formuna dönüştürülmesi, çeşitli basit ve ölçeklenebilir yöntemlerle (örneğin, spreylendirme, daldırma kaplama, baskı teknikleri) mümkündür. Bu da endüstriyel üretim için potansiyel sağlar.

8. SONUÇ

MXene malzemeler günümüzde sıcak konu (hot-topic) olarak adlandırılan malzemelerden biridir. 2011 yılında Drexel üniversitesi profesörlerinden Yuri Gogotsi ve arkadaşları tarafından geliştirilmesinden beri kendisine en çok uygulama alanı bulan konulardan olan MXene malzemeler, MAX fazından türetilmektedir. Deneyisel olarak da üretilen bu malzemenin çeşitli sentez yolları bulunmaktadır. Bilinen 150'den fazla MXene olması, bunların çok geniş uygulama alanının bulunmasının da habercisidir. Biz de en sık çalışılan uygulama alanlarını yukarıda verdik. Hangi uygulamanın hangi yıl bulunduğu/çalışıldığına dair yuvarlak skala, ingilizce olarak Google aramalarında MXene yazılıp görsellere tıkladığında, çok

çeşitli kaynaklarda çıkmaktadır. Bunların hepsi ayrı öneme sahip olup, bazıları halen gelişmeyi beklemektedir. Unutulmamalıdır ki, yukarıda sayılanlara ek olarak da çeşitli uygulama alanları vardır.

KAYNAKÇA

1. Anasori, B., & Gogotsi, Ü. G. (2019). *2D metal carbides and nitrides (MXenes)* (Vol. 2549). Berlin: Springer.
2. Anasori, B., & Gogotsi, Y. (2019). Introduction to 2D transition metal carbides and nitrides (MXenes). *2D Metal Carbides and Nitrides (MXenes) Structure, Properties and Applications*, 3-12.
3. Bashir, T., Ismail, S. A., Wang, J., Zhu, W., Zhao, J., & Gao, L. (2023). MXene terminating groups O,–F or –OH,–F or O,–OH,–F, or O,–OH,–Cl?. *Journal of Energy Chemistry*, 76, 90-104.
4. Azharul Islam, A. K. M. (2024). New wonder materials-exciting technological horizon. *Journal of the Bangladesh Academy of Sciences*, 48(1).
5. Deysher, G., Shuck, C. E., Hantanasirisakul, K., Frey, N. C., Foucher, A. C., Maleski, K., ... & Gogotsi, Y. (2019). Synthesis of Mo₄VC₄ MAX phase and two-dimensional Mo₄VC₄ MXene with five atomic layers of transition metals. *ACS nano*, 14(1), 204-217.
6. Lei, X., & Lin, N. (2022). Structure and synthesis of MAX phase materials: a brief review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 47(5), 736-771.
7. Xie, Y., Dall'Agnese, Y., Naguib, M., Gogotsi, Y., Barsoum, M. W., Zhuang, H. L., & Kent, P. R. (2014). Prediction and characterization of MXene nanosheet anodes for non-lithium-ion batteries. *ACS nano*, 8(9), 9606-9615.
8. Wang, X., Shen, X., Gao, Y., Wang, Z., Yu, R., & Chen, L. (2015). Atomic-scale recognition of surface structure and intercalation mechanism of Ti₃C₂X. *Journal of the American Chemical Society*, 137(7), 2715-2721.

9. Yang, E., Ji, H., Kim, J., Kim, H., & Jung, Y. (2015). Exploring the possibilities of two-dimensional transition metal carbides as anode materials for sodium batteries. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 17(7), 5000-5005.
10. Er, D., Li, J., Naguib, M., Gogotsi, Y., & Shenoy, V. B. (2014). Ti₃C₂ MXene as a high capacity electrode material for metal (Li, Na, K, Ca) ion batteries. *ACS applied materials & interfaces*, 6(14), 11173-11179.
11. Bao, W., Shuck, C. E., Zhang, W., Guo, X., Gogotsi, Y., & Wang, G. (2019). Boosting performance of Na–S batteries using sulfur-doped Ti₃C₂T_x MXene nanosheets with a strong affinity to sodium polysulfides. *ACS nano*, 13(10), 11500-11509.
12. Dong, Y., Shi, H., & Wu, Z. S. (2020). Recent advances and promise of MXene-based nanostructures for high-performance metal ion batteries. *Advanced Functional Materials*, 30(47), 2000706.
13. Ashton, M., Hennig, R. G., & Sinnott, S. B. (2016). Computational characterization of lightweight multilayer MXene Li-ion battery anodes. *Applied Physics Letters*, 108(2).
14. Ahmed, B., Anjum, D. H., Gogotsi, Y., & Alshareef, H. N. (2017). Atomic layer deposition of SnO₂ on MXene for Li-ion battery anodes. *Nano Energy*, 34, 249-256.
15. Li, C., Xi, Z., Guo, D., Chen, X., & Yin, L. (2018). Chemical immobilization effect on lithium polysulfides for lithium–sulfur batteries. *Small*, 14(4), 1701986.
16. Zhang, D., Wang, S., Li, B., Gong, Y., & Yang, S. (2019). Horizontal growth of lithium on parallelly aligned MXene layers towards dendrite-free metallic lithium anodes. *Advanced Materials*, 31(33), 1901820.

17. Man, Q., An, Y., Shen, H., Wei, C., Zhang, X., Wang, Z., ... & Feng, J. (2023). MXenes and Their Derivatives for Advanced Solid-State Energy Storage Devices. *Advanced Functional Materials*, 33(41), 2303668.
18. Zhao, Q., Zhu, Q., Liu, Y., & Xu, B. (2021). Status and prospects of MXene-based lithium–sulfur batteries. *Advanced Functional Materials*, 31(21), 2100457.
19. Xiao, Z., Li, Z., Meng, X., & Wang, R. (2019). MXene-engineered lithium–sulfur batteries. *Journal of Materials Chemistry A*, 7(40), 22730-22743.
20. Wu, Y., Sun, Y., Zheng, J., Rong, J., Li, H., & Niu, L. (2021). MXenes: advanced materials in potassium ion batteries. *Chemical Engineering Journal*, 404, 126565.
21. Xiong, D., Li, X., Bai, Z., & Lu, S. (2018). Recent advances in layered Ti₃C₂T_x MXene for electrochemical energy storage. *Small*, 14(17), 1703419.
22. Jiang, Q., Kurra, N., Alhabeb, M., Gogotsi, Y., & Alshareef, H. N. (2018). All pseudocapacitive MXene-RuO₂ asymmetric supercapacitors. *Advanced Energy Materials*, 8(13), 1703043.
23. Zubair, M., Hassan, M. M. U., Mehran, M. T., Baig, M. M., Hussain, S., & Shahzad, F. (2022). 2D MXenes and their heterostructures for HER, OER and overall water splitting: a review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(5), 2794-2818.
24. Guo, Z., Zhou, J., Zhu, L., & Sun, Z. (2016). MXene: a promising photocatalyst for water splitting. *Journal of Materials Chemistry A*, 4(29), 11446-11452.
25. Kulkarni, R., Lingamdinne, L. P., Koduru, J. R., Karri, R. R., Chang, Y. Y., Kailasa, S. K., & Mubarak, N. M. (2024).

- Recent Advanced Developments and Prospects of Surface Functionalized MXenes-Based Hybrid Composites toward Electrochemical Water Splitting Applications. *ACS Materials Letters*, 6, 2660-2686.
26. Kang, Z., Khan, M. A., Gong, Y., Javed, R., Xu, Y., Ye, D., ... & Zhang, J. (2021). Recent progress of MXenes and MXene-based nanomaterials for the electrocatalytic hydrogen evolution reaction. *Journal of Materials Chemistry A*, 9(10), 6089-6108.
27. Li, X., Wang, C., Cao, Y., & Wang, G. (2018). Functional MXene materials: progress of their applications. *Chemistry-An Asian Journal*, 13(19), 2742-2757.
28. Kumar, P., Singh, S., Hashmi, S. A. R., & Kim, K. H. (2021). MXenes: Emerging 2D materials for hydrogen storage. *Nano Energy*, 85, 105989.
29. Thomas, T., Bontha, S., Bishnoi, A., & Sharma, P. (2024). MXene as a hydrogen storage material? A review from fundamentals to practical applications. *Journal of Energy Storage*, 88, 111493.
30. Li, P., Zhu, J., Handoko, A. D., Zhang, R., Wang, H., Legut, D., ... & Zhang, Q. (2018). High-throughput theoretical optimization of the hydrogen evolution reaction on MXenes by transition metal modification. *Journal of Materials Chemistry A*, 6(10), 4271-4278.
31. Sheth, Y., Dharaskar, S., Chaudhary, V., Khalid, M., & Walvekar, R. (2022). Prospects of titanium carbide-based MXene in heavy metal ion and radionuclide adsorption for wastewater remediation: A review. *Chemosphere*, 293, 133563.

32. Meng, X. (2024). Research of MXenes and Their Applications in Sensors and Batteries. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 87, 204-208.
33. Gan, D., Huang, Q., Dou, J., Huang, H., Chen, J., Liu, M., ... & Wei, Y. (2020). Bioinspired functionalization of MXenes (Ti₃C₂TX) with amino acids for efficient removal of heavy metal ions. *Applied Surface Science*, 504, 144603.
34. Rasheed, T., Kausar, F., Rizwan, K., Adeel, M., Sher, F., Alwadai, N., & Alshammari, F. H. (2022). Two dimensional MXenes as emerging paradigm for adsorptive removal of toxic metallic pollutants from wastewater. *Chemosphere*, 287, 132319.
35. Solangi, N. H., Karri, R. R., Mubarak, N. M., Mazari, S. A., Jatoi, A. S., & Koduru, J. R. (2023). Emerging 2D MXene-based adsorbents for hazardous pollutants removal. *Desalination*, 549, 116314.
36. Chen, Y., Zhao, P., Hu, Z., Liang, Y., Han, H., Yang, M., ... & Huo, D. (2023). Amino-functionalized multilayer Ti₃C₂Tx enabled electrochemical sensor for simultaneous determination of Cd²⁺ and Pb²⁺ in food samples. *Food Chemistry*, 402, 134269.
37. Fei, Y., & Hu, Y. H. (2022). Design, synthesis, and performance of adsorbents for heavy metal removal from wastewater: a review. *Journal of Materials Chemistry A*, 10(3), 1047-1085.
38. Albukhari, S. M., Abdel Salam, M., & Aldawsari, A. M. (2022). Removal of malachite green dye from water using MXene (Ti₃C₂) Nanosheets. *Sustainability*, 14(10), 5996.

39. Algaradah, M. M. (2024). MXene-based adsorbent materials for pollutants removal from water: Current challenges and future prospects. *Inorganic Chemistry Communications*, 112113.
40. Bilal, M., Khan, U., & Ihsanullah, I. (2023). MXenes: The emerging adsorbents for the removal of dyes from water. *Journal of Molecular Liquids*, 385, 122377.
41. Othman, Z., Sinopoli, A., Mackey, H. R., & Mahmoud, K. A. (2021). Efficient photocatalytic degradation of organic dyes by AgNPs/TiO₂/Ti₃C₂T_x MXene composites under UV and solar light. *ACS omega*, 6(49), 33325-33338.
42. Liu, F., Hu, Z., Xiang, M., & Hu, B. (2022). Magnetic amidoxime-functionalized MXenes for efficient adsorption and immobilization of U (VI) and Th (IV) from aqueous solution. *Applied Surface Science*, 601, 154227.
43. Hwang, S. K., Kang, S. M., Rethinasabapathy, M., Roh, C., & Huh, Y. S. (2020). MXene: An emerging two-dimensional layered material for removal of radioactive pollutants. *Chemical Engineering Journal*, 397, 125428.
44. Yen, Z., Bradley, D. G., Wang, Y., Hanna, J. V., & Lam, Y. M. (2024). Organic Functionalization of Ti₃C₂T_x MXene for Urea Adsorption in Aqueous Solutions. *ACS Applied Nano Materials*, 7(7), 7430-7441.
45. Meng, F., Seredych, M., Chen, C., Gura, V., Mikhalovsky, S., Sandeman, S., ... & Gogotsi, Y. (2018). MXene sorbents for removal of urea from dialysate: a step toward the wearable artificial kidney. *ACS nano*, 12(10), 10518-10528.
46. Sajjadi, B., Broome, J. W., Chen, W. Y., Mattern, D. L., Egiebor, N. O., Hammer, N., & Smith, C. L. (2019). Urea functionalization of ultrasound-treated biochar: A feasible

strategy for enhancing heavy metal adsorption capacity. *Ultrasonics sonochemistry*, 51, 20-30.

47. Jia, L., Zhou, S., Ahmed, A., Yang, Z., Liu, S., Wang, H., ... & Sun, L. (2023). Tuning MXene electrical conductivity towards multifunctionality. *Chemical Engineering Journal*, 146361.
48. Sajid, M. (2021). MXenes: are they emerging materials for analytical chemistry applications?—a review. *Analytica chimica acta*, 1143, 267-280.
49. Zhang, X., Ju, H., & Wang, J. (Eds.). (2011). *Electrochemical sensors, biosensors and their biomedical applications*. Academic Press.
50. Rhouati, A., Berkani, M., Vasseghian, Y., & Golzadeh, N. (2022). MXene-based electrochemical sensors for detection of environmental pollutants: A comprehensive review. *Chemosphere*, 291, 132921.
51. Li, Q., Li, Y., & Zeng, W. (2021). Preparation and application of 2D MXene-based gas sensors: A review. *Chemosensors*, 9(8), 225.
52. Kalambate, P. K., Gadhari, N. S., Li, X., Rao, Z., Navale, S. T., Shen, Y., ... & Huang, Y. (2019). Recent advances in MXene-based electrochemical sensors and biosensors. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 120, 115643.
53. Li, X., Lu, Y., & Liu, Q. (2021). Electrochemical and optical biosensors based on multifunctional MXene nanoplateforms: Progress and prospects. *Talanta*, 235, 122726.
54. Li, T., Shang, D., Gao, S., Wang, B., Kong, H., Yang, G., ... & Wei, G. (2022). Two-dimensional material-based

- electrochemical sensors/biosensors for food safety and biomolecular detection. *Biosensors*, 12(5), 314.
55. Zhu, Q., Cui, Y., Zhang, Y., Cao, Z., Shi, Y., Gu, J., ... & Yang, S. (2021). Strategies for engineering the MXenes toward highly active catalysts. *Materials Today Nano*, 13, 100104.
56. Kang, Z., Khan, M. A., Gong, Y., Javed, R., Xu, Y., Ye, D., ... & Zhang, J. (2021). Recent progress of MXenes and MXene-based nanomaterials for the electrocatalytic hydrogen evolution reaction. *Journal of Materials Chemistry A*, 9(10), 6089-6108.
57. Peera, S. G., Liu, C., Sahu, A. K., Selvaraj, M., Rao, M. C., Lee, T. G., ... & Singh, L. (2021). Recent advances on MXene-based electrocatalysts toward oxygen reduction reaction: a focused review. *Advanced Materials Interfaces*, 8(23), 2100975.
58. Tahir, M., Ali Khan, A., Tasleem, S., Mansoor, R., & Fan, W. K. (2021). Titanium carbide (Ti₃C₂) MXene as a promising co-catalyst for photocatalytic CO₂ conversion to energy-efficient fuels: a review. *Energy & Fuels*, 35(13), 10374-10404.
59. Sreenilayam, S. P., Ahad, I. U., Nicolosi, V., & Brabazon, D. (2021). MXene materials based printed flexible devices for healthcare, biomedical and energy storage applications. *Materials Today*, 43, 99-131.
60. Wang, Z., Cheng, Z., Fang, C., Hou, X., & Xie, L. (2020). Recent advances in MXenes composites for electromagnetic interference shielding and microwave absorption. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 136, 105956.

61. Zhang, C. J., & Nicolosi, V. (2019). Graphene and MXene-based transparent conductive electrodes and supercapacitors. *Energy Storage Materials*, 16, 102-125.

FİZİK ÇALIŞMALARI

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