



**Metilen Mavisi, Rodamine B, Malahit Yeşili ve Kongo Kırmızısı  
Boyalarının ZnO Nanopartikülleri ile Fotokatalitik Parçalanmasının  
İncelenmesi**

Muhammed Enes BALKAN<sup>1\*</sup>, Halil İbrahim PALABIÇAK<sup>2</sup>, Ali Kemal SOĞUKSU<sup>3</sup>

**Öz**

Fotokataliz, güneş enerjisi kullanılarak sudaki boya kaynaklı kirliliğin giderilmesi için umut vadeden bir yöntemdir. Bu çalışmada, ZnO nanopartikül hidrotermal yöntem kullanılarak sentezlenmiştir. Sentezlenen nanopartikül X-ışını kırınımı (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) teknikleriyle karakterize edilmiştir. Sentezlenen numunelerin fotokatalitik etkileri, metilen mavisi (MM), rodamin B (RB), kongo kırmızısı (KK) ve malahit yeşili (MY) sulu çözeltilerinde 300W ksenon ışığı altında incelenmiştir. Numunelerin fotokatalitik bozunma özellikleri, UV-Vis emilim spektrumlarında (metilen mavisi 664 nm, rodamin B 554 nm, malahit yeşili 617 nm ve kongo kırmızısı 500 nm) ilgili dalga boylarındaki emilimdeki azalmalar hesaplanarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, ZnO nanopartikül metilen mavisi için 80 dakika içinde %99.5, malahit yeşili için 70 dakika içinde %96.5, kongo kırmızısı için 100 dakika içinde %99.8 ve rodamin B için 180 dakika içinde %100 bozunma oranlarına ulaştığı bildirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Fotokataliz, Bozunma, Emilim.

**Investigation of Photocatalytic Degradation of Methylene Blue, Rhodamine B, Malachite Green and Congo Red Dyes with ZnO Nanoparticles**

**Abstract**

Photocatalysis is a promising method for the removal of dye-induced pollution in water using solar energy. In this study, ZnO nanoparticle were synthesized using the hydrothermal method. The synthesized nanoparticle were characterized through X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) techniques. The photocatalytic effects of the synthesized samples were investigated in aqueous solutions of methylene blue (MM), rhodamine B (RB), congo red (KK), and malachite green (MY) under a 300W xenon light. The photocatalytic degradation properties of the samples were evaluated by calculating the decreases in absorption at the respective wavelengths in the UV-Vis absorption spectra (methylene blue 664 nm, rhodamine B 554 nm, malachite green 617 nm, and congo red 500 nm). Furthermore, the ZnO nanoparticles were reported to achieve degradation rates of 99.5% for methylene blue within 80 minutes, 96.5% for malachite green within 70 minutes, 99.8% for congo red within 100 minutes, and 100% for rhodamine B within 180 minutes.

**Keywords:** Photocatalysis, Degradation, Absorption.

<sup>1</sup>Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kimya Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, Türkiye, [menesbalkaann@gmail.com](mailto:menesbalkaann@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-7678-5401>

<sup>2</sup>Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, Türkiye, [ibrahimplbck@gmail.com](mailto:ibrahimplbck@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0004-4505-6857>

<sup>3</sup>Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fizik, Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, Türkiye, [kemalsoguksu@gmail.com](mailto:kemalsoguksu@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-8370-5369>

## 1. Giriş

Endüstriyel devrim sonrası artan organik kirlilik, özellikle tekstil sektöründeki atık sular ekosistemi ciddi şekilde tehdit etmektedir. Endüstriyel atıklardan kaynaklanan boyalar ve diğer kirleticilerin su ortamlarından uzaklaştırılması, günümüzde önemli bir çevre sorunudur (Farhan Hanafi & Sapawe, 2020; Rathi et al., 2021). Bu sorunu çözmek için çok sayıda arıtma yöntemi geliştirilmiş olsa da, su kaynaklarının sürdürülebilirliği için daha etkili çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır (Wagh et al., 2023). Sürdürülebilir bir çevre için bu atıklardan organik boyaların etkin bir şekilde uzaklaştırılması gerekmektedir. Geleneksel yöntemlere göre daha çevreci ve ekonomik olan fotooksidasyon, bu alanda umut veren bir yaklaşım olarak öne çıkmıştır. Fujishima ve Honda'nın 1972'deki çığır açan çalışmasıyla başlayan fotokatalitik süreçler, yarı iletken malzemelerin yardımıyla ortam koşullarında kirleticileri parçalayabilme potansiyeline sahiptir (Chakravorty & Roy, 2024; Rafiq et al., 2021). Bu nedenle, oksidatif bozunma için yüksek performanslı fotokatalitik materyaller geliştirmek güncel araştırmaların odak noktasıdır (Ghaffar et al., 2023; Soğuksu et al., 2021). Yarı iletken fotokatalizör olan ZnO, yüksek kuantum verimliliği, geniş bant boşluğu ve toksik olmaması nedeniyle organik boyaların fotokatalitik olarak uzaklaştırılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Rahman et al., 2023; Sanakousar et al., 2022; Kerli et al., 2022). ZnO, geniş bant aralığı ( $E_g = 3.37$  eV) ve yüksek eksiton bağlama enerjisi (60 meV) gibi dikkat çekici özellikleri sayesinde II-VI yarı iletken seramik malzemeler arasında önemli bir yere sahiptir (Abebe et al., 2020; Batra et al., 2022; Bhapkar & Bhame, 2024). Yüksek termal ve kimyasal stabilite, yüksek elektron hareketliliği ve optik geçirgenlik gibi üstün özellikleri, ZnO'yu optoelektronik cihazlar, sensörler ve katalizörler gibi birçok alanda potansiyel bir aday haline getirmiştir. Ayrıca radyasyon kalkanlamaya yönelik çalışmalarda da ZnO kullanılmıştır (Soğuksu et al., 2024). Bu malzemenin nanoteller, nanoyapılar ve nanotüpler gibi çeşitli morfolojilerde sentezi, ıslak kimyasal yöntemler başta olmak üzere farklı sentez teknikleriyle gerçekleştirilmektedir. Sprey piroliz, hidrotermal sentez, kimyasal buhar biriktirme ve sol-jel gibi yöntemler, literatürde sıklıkla kullanılan sentez yaklaşımlarıdır (Sedefoglu, 2023; Workie et al., 2023; Kerli et al., 2020). ZnO nanopartikülleri, geniş bir organik ve inorganik molekül yelpazesini tamamen mineralize etme yeteneğine sahiptir. Boya bozunma mekanizması, nanopartikül yüzeyinden çevresel oksijen türlerine, biyomoleküllere veya diğer organik bileşiklere elektron transferini içerir (Batra et al., 2022). Bu süreç, reaktif oksijen türlerinin (ROS) oluşmasına yol açar. Yarı iletken nanopartiküllerin toksisitesi konusunda endişeler bulunmasına rağmen, ZnO nanopartiküllerinin biyolojik sistemler üzerindeki etkileri nispeten daha az zararlıdır (Hendrix et al., 2023). Bu çalışmada, çinko oksit (ZnO) nanopartikülünün fotokatalitik özellikleri

araştırılmıştır. Çalışmada, hidrotermal yöntemle üretilen Çinko oksitin dört farklı boyar madde üzerinde etkisine bakarak, en çok hangi boyar madde üzerinde etkin olduğu incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1 Kullanılan kimyasal malzemeler

Çinko nitrat hekzahidrat ( $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) (%98 Acros organics), heksametilentetramin ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$ ) (%99 Merck), metilen mavisi (MB) ( $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{IN}_3\text{S}$ ) (Alfa aesar), Rodamine B (RB) ( $\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{ClN}_2\text{O}_3$ ) (Alfa aesar), Malahit Yeşili (RB) ( $\text{C}_{23}\text{H}_{25}\text{N}_2$ ) (Alfa aesar) ve Kongo Kırmızısı (KK) ( $\text{C}_{32}\text{H}_{22}\text{N}_6\text{Na}_2\text{O}_6\text{S}_2$ ) (Alfa aesar)

### 2.2 Çinko oksit (ZnO) nanopartikül sentezi

ZnO nanopartikül hidrotermal yöntem ile sentezlendi. 0.05 M  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  250 mL saf su içerisinde manyetik karıştırıcı ile karıştırıldı. Çözelti üzerine çökmeyi artırmak için 0.05 M  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$  eklendi karıştırıldı. Daha sonra, bu çözelti 250 mL'lik teflon astarlı çelik otoklav içerisine alındı ve 180 °C'de 8 saat boyunca kül fırınında bekletildi. Sonra oda sıcaklığına getirilen çözelti süzüldü. Sentezlenen ürün 550 °C'de 2 saat kalsine edildi.

### 2.3 Karakterizasyon

Sentezlenen nanopartiküllerin kristal yapısı, Philips X'Pert PRO marka X-ışını difraktometresi (XRD) ile karakterize edildi. Partiküllerin yüzey morfolojisi FEI Quanta FEG 450 taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelendi. Üretilen nanopartiküllerin fotokatalitik aktivitesi, farklı organik boyalar (metilen mavisi, rodamin B, malahit yeşili ve kongo kırmızısı) kullanılarak UV-Vis spektroskopisi ile belirlendi. Fotokatalitik analizlerde ışık kaynağı olarak 300 W'lık ksenon lambası kullanıldı. Boya çözeltilerinin bozunma kinetiği 350-800 nm dalga boyu aralığında UV-Vis spektrumları alınarak takip edildi. Her bir ölçümde 10 mg ZnO 5 ppm konsantrasyonundaki 50 mL'lik boya çözeltisine eklenerek karıştırıldı. Böylece karışım karanlıkta bekletilerek adsorpsiyon-desorpsiyon dengesine ulaştırıldı. Daha sonra numunelerin belirli zaman aralıklarında UV-Vis spektrumları alındı ve bozunma verimleri Denklem (1) kullanılarak hesaplandı.

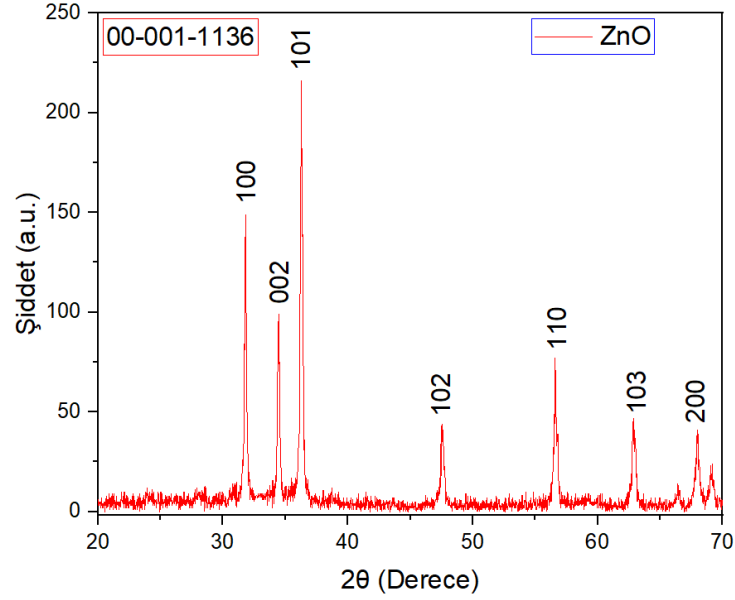
$$\text{Bozunma}(\%) = \left[ 1 - \frac{C_t}{C_0} \right] \times 100 \quad (1)$$

Burada,  $C_0$  başlangıç konsantrasyonunu,  $C_t$  ise numune alma zamanındaki konsantrasyonu temsil eder. Boya bozunmasının reaksiyon kinetiklerini incelemek için Langmuir-Hinshelwood modeli uygulandı. L-H modeli, düşük boya konsantrasyonunda heterojen fotokataliz için iyi yapılandırılmıştır ve denklem aşağıdaki gibi ifade edilebilir(Kerli et al., 2022).

Burada  $C_0$ ,  $C_t$ ,  $k$  ve  $t$ , 0 zamanında çözeltideki boya konsantrasyonları,  $t$  zamanında çözeltideki boya konsantrasyonları, hız sabiti ve reaksiyon süresidir (Kerli et al., 2022).

### 3. Bulgular ve Tartışma

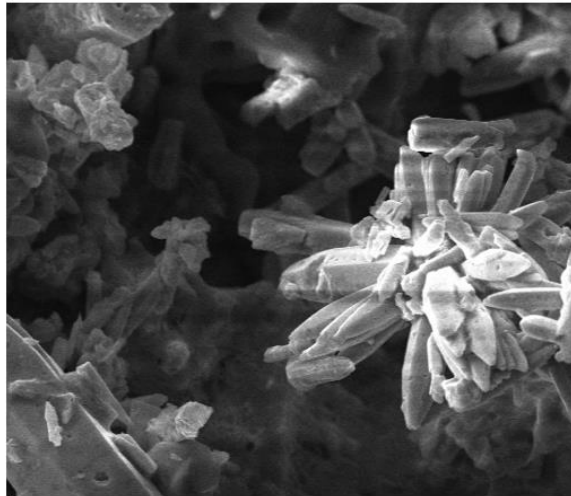
#### 3.1 Yapısal Karakterizasyon



Şekil 1. ZnO nanopartikül için X-ışını kırınım deseni

Hidrotermal işlemle üretilen nanopartikülün numunelerin kristal yapıları, X-ışını kırınım (XRD) modelleri ile belirlendi. Şekil 1, elde edilen ZnO nanopartikül modelini göstermektedir.

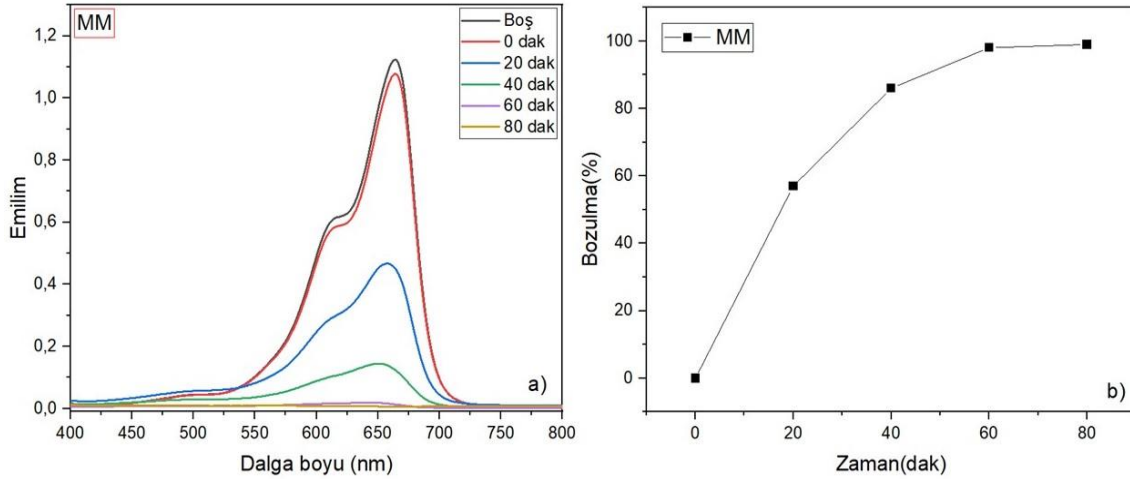
Şekil 2, saf ZnO nanopartikül X-ışını kırınımı (XRD) desenlerini göstermektedir. ZnO nanopartikül ZnO fazında olup, altıgen bir yapıya sahiptir. XRD spektrumu 00-001-1136 referans kodu ile eşleşmektedir.



Şekil 2. ZnO nanopartikül için SEM görüntüleri

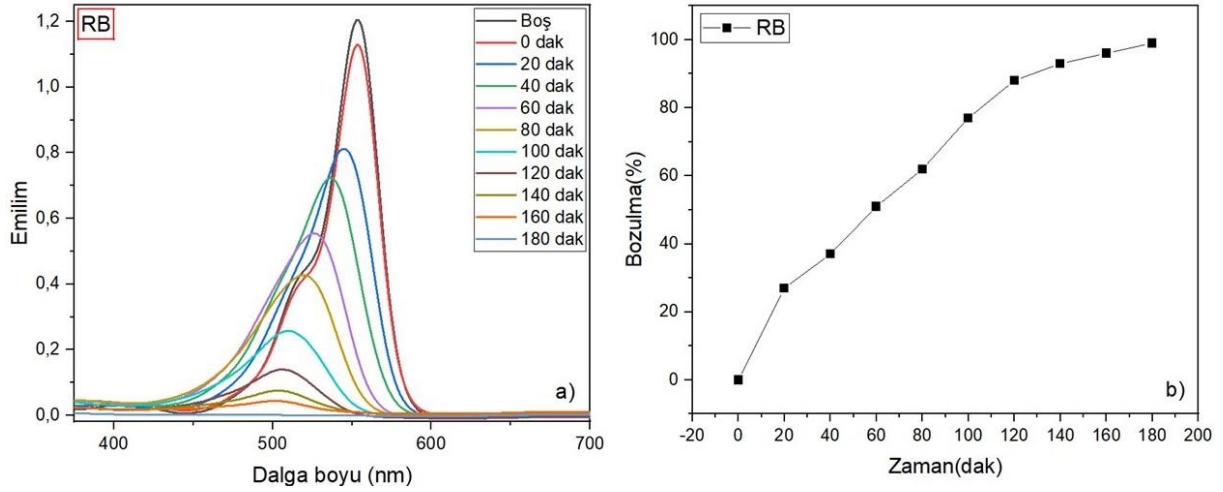
Fotokatalizör olarak kullanılacak bir malzemenin yüzey morfolojisi büyük önem taşımaktadır. Bir fotokatalistin toplam yüzey alanı, bozunma hızını büyük ölçüde etkiler. Yüzey alanı genişliğinin fotokatalitik bozunmayı olumlu yönde etkilediği bilinmektedir (Utomo et al., 2024). ZnO nanopartikül SEM görüntüsü Şekil 2'de gösterilmiştir. Sentezlenen malzemelerin SEM görüntüsü literatürde bilinen tipik bir ZnO görüntüsüdür (Moezzi et al., 2012).

Mikro yapı incelendiğinde yüzeyin çubuk kristallerden oluştuğu görülür. Bu, toplam yüzey alanını arttıracak düşünülmemektedir.



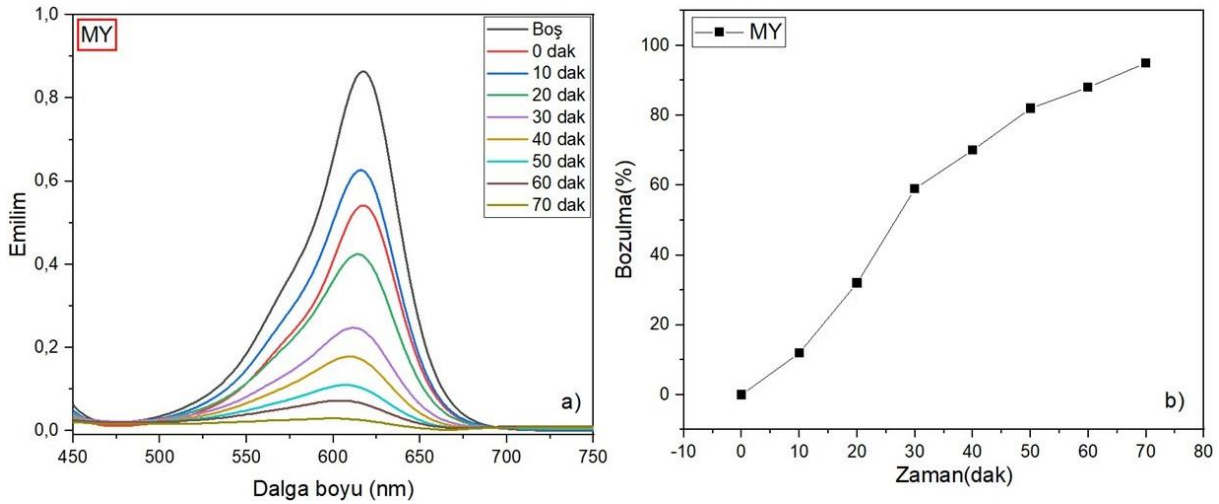
**Şekil 3.** MM, a) Emilim grafiği b) bozunma grafiği

Hazırlanan 50 ml çözeltideki MM konsantrasyonu 5 ppm'dir. Şekil 3a, MM boyar çözeltisi içerisindeki ZnO nanopartikül fotokatalitik emilim verimliliğini gösteren emilim grafiğidir. Görünür ışık altında fotokatalizör olarak sentezlenen ZnO nanopartiküllerinin fotokatalitik emilim verimliliği, MM için 80 dakikada %99.5 olduğu görülmüştür. Şekil 3b'de sentezlenen numunelerin görünür ışık altında MM üzerindeki fotokatalitik etkilerini gösteren bozunma grafiği gösterilmiştir.



**Şekil 4.** RB, a) Emilim grafiği b) bozunma grafiği

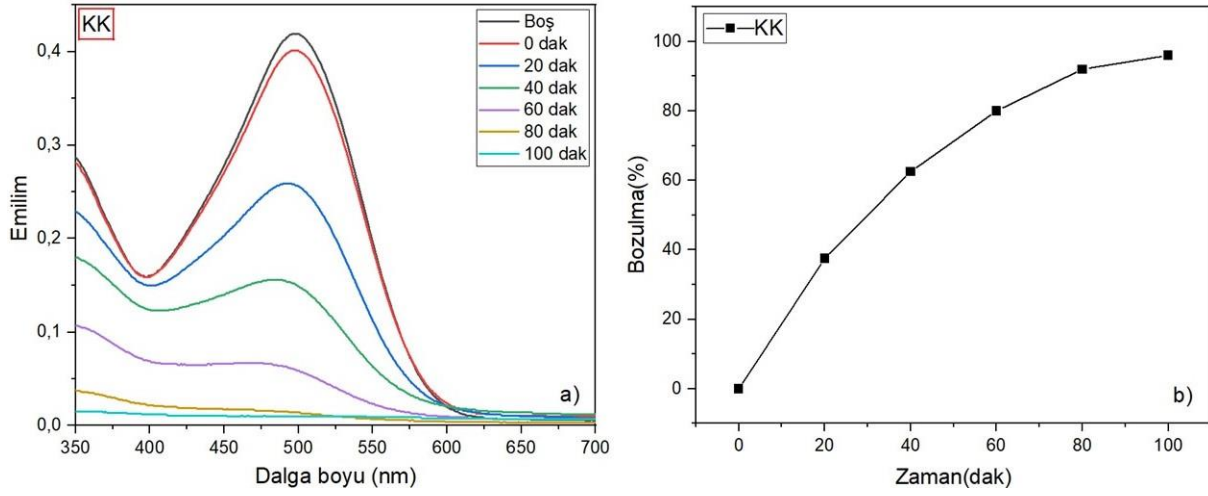
Hazırlanan 50 ml çözeltideki RB konsantrasyonu 5 ppm'dir. Şekil 4a, RB içerisindeki ZnO nanopartikül fotokatalitik emilim verimliliğini gösteren emilim grafiğidir. Görünür ışık altında fotokatalizör olarak sentezlenen nanopartikül fotokatalitik emilim verimliliği RB için 180 dakikada %100 olduğu bulunmuştur. Sentezlenen numunelerin görünür ışık altında RB üzerindeki fotokatalitik etkilerini gösteren bozunma grafiği Şekil 4b'de gösterilmiştir.



**Şekil 5.** MY, a) Emilim grafiği b) bozunma grafiği

Hazırlanan 50 ml çözeltideki MY konsantrasyonu 5 ppm'dir. Şekil 5a, MY'deki ZnO nanopartikül fotokatalitik bozunma verimliliğini gösteren emilim grafiğidir. Görünür ışık altında fotokatalizör olarak sentezlenen ZnO nanopartikül fotokatalitik emilim verimliliğinin

MY için 70 dakikada %96.5 olduğu bulunmuştur. Sentezlenen numunelerin görünür ışık altında MY üzerindeki fotokatalitik etkilerini gösteren bozunma grafiği Şekil 5b’de gösterilmiştir.



Şekil 6. KK, a) Emilim grafiği b) bozunma grafiği

Hazırlanan 50 ml çözeltideki KK konsantrasyonu 5 ppm'dir. Şekil 6a, KK'deki ZnO nanopartikül fotokatalitik emilim verimliliğini gösteren emilim grafiğidir. Görünür ışık altında fotokatalizör olarak sentezlenen ZnO nanopartiküllerinin fotokatalitik emilim verimliliğinin 100 dakikada KK için %99.8 olduğu bulunmuştur. Sentezlenen numunelerin görünür ışık altında KK üzerindeki fotokatalitik etkilerini gösteren bozunma grafiği Şekil 6b'de gösterilmiştir. Kongo kırmızı ile yapılan çalışma, literatürle uyumluluk göstermektedir (Madan et al., 2019; Lei et al., 2017).

Kullanılan dört farklı boyar maddenin aynı konsantrasyonda olsa bile farklı zamanda bozunmasının sebepleri arasında; boyar maddenin kimyasal yapısı, fotokatalizör yüzeyine bağlanma kapasitesi, hidroksil radikalleri ( $\cdot\text{OH}$ ) veya süperoksit anyonlarının ( $\text{O}_2^{\cdot-}$ ) oluşum verimliliği, boyar maddenin çözünürlüğü ve pH seviyesi sayılabilir. Ayrıca literatürde farklı boyarlarla yapılan çalışmalar mevcuttur (Elmas et al. 2023).

#### 4. Sonuçlar ve Öneriler

ZnO nanopartikül; basit, düşük maliyetli ve hızlı bir yöntem kullanılarak sentezlenmiştir. Sentezlenen katalizör, XRD, SEM ve UV-Vis analizleri ile doğrulanmış ve karakterize edilmiştir. Sentezlenen nanopartikül, 300W Ksenon ışık altında MM, RB, MY ve KK bozunması için bir katalizör olarak kullanılmıştır. ZnO nanopartikül fotokatalizörü en hızlı ve en yüksek bozunmayı metilen mavisi üzerinde göstermiştir. Tüm numunelerde renksizleşme ve bozunma tespit edilmiştir. ZnO nanopartikül, Metilen Mavisi üzerinde 80 dakikada %99.5,

Malahit Yeşili üzerinde 70 dakikada %96.5, Kongo Kırmızısı üzerinde 100 dakikada %99.8 ve Rodamin B için 180 dakikada %100 bozunma etkisi gösterdiği tespit edilmiştir. Saf Çinko oksitin boyar maddeler üzerinde sonuçlarının ileriye dönük çalışmaların genişletilmesinde örnek teşkil edeceği düşünülmektedir.

#### **Yazarların Katkısı**

1. Yazar : %40
2. Yazar: %40
3. Yazar: %20

#### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

#### **Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı**

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur

#### **Kaynaklar**

Abebe, B., Murthy, H. C. A., & Amare, E. (2020). Enhancing the photocatalytic efficiency of ZnO: Defects, heterojunction, and optimization. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 14, 100336. <https://doi.org/10.1016/J.ENMM.2020.100336>

Batra, V., Kaur, I., Pathania, D., Sonu, & Chaudhary, V. (2022). Efficient dye degradation strategies using green synthesized ZnO-based nanoplatfroms: A review. *Applied Surface Science Advances*, 11, 100314. <https://doi.org/10.1016/J.APSADV.2022.100314>

Bhapkar, A. R., & Bhame, S. (2024). A review on ZnO and its modifications for photocatalytic degradation of prominent textile effluents: Synthesis, mechanisms, and future directions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(3), 112553. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2024.112553>

Chakravorty, A., & Roy, S. (2024). A review of photocatalysis, basic principles, processes, and materials. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 8, 100155. <https://doi.org/10.1016/J.SCENV.2024.100155>.



Elmas, F., Kırkgeçit, R., Özlü Torun, H., Öztürk, E., (2023). Investigation of photochemical properties of CeO<sub>2</sub>:0.1Nd and CeO<sub>2</sub>:0.05Nd0.05 M(M: Dy, Sm, Tb), *Journal of Photochemistry & Photobiology, A: Chemistry* 439 (2023) 114616. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2023.114616>

Farhan Hanafi, M., & Sapawe, N. (2020). A review on the water problem associate with organic pollutants derived from phenol, methyl orange, and remazol brilliant blue dyes. *Materials Today: Proceedings*, 31, A141–A150. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.01.258>

Ghaffar, S., Abbas, A., Naeem-ul-Hassan, M., Assad, N., Sher, M., Ullah, S., Alhazmi, H. A., Najmi, A., Zoghebi, K., Al Bratty, M., Hanbashi, A., Makeen, H. A., & Amin, H. M. A. (2023). Improved Photocatalytic and Antioxidant Activity of Olive Fruit Extract-Mediated ZnO Nanoparticles. *Antioxidants* 2023, Vol. 12, Page 1201, 12(6), 1201. <https://doi.org/10.3390/ANTIOX12061201>

Hendrix, Y., Rauwel, E., Nagpal, K., Haddad, R., Estephan, E., Boissière, C., & Rauwel, P. (2023). Revealing the Dependency of Dye Adsorption and Photocatalytic Activity of ZnO Nanoparticles on Their Morphology and Defect States. *Nanomaterials*, 13(13). <https://doi.org/10.3390/nano13131998>

Kerli, S., Kavgacı, M., Soğuksu, A. K., & Avar, B. (2022). Photocatalytic Degradation of Methylene Blue, Rhodamine-B, and Malachite Green by Ag @ ZnO/TiO<sub>2</sub>. *Brazilian Journal of Physics*, 52(1), 1–11. <https://doi.org/10.1007/S13538-021-01007-1/TABLES/3>

Kerli, S., Soğuksu, A. K., Kavgacı, M., (2020). Production of nickel oxide nanostructure particles and their photocatalytic degradation of different organic dye. *International Journal of Modern Physics B*. © World Scienti. DOI:10.1142/S0217979220500812.

Lei, C., Pi, M., Jiang, C., Cheng, B., & Yu, J. (2017). Synthesis of hierarchical porous zinc oxide (ZnO) microspheres with highly efficient adsorption of Congo red. *Journal of Colloid and Interface Science*, 490, 242–251. doi:10.1016/j.jcis.2016.11.049.

Madan, S., Shaw, R., Tiwari, S., & Tiwari, S. K. (2019). Adsorption dynamics of Congo red dye removal using ZnO functionalized high silica zeolitic particles. *Applied Surface Science*. doi:10.1016/j.apsusc.2019.04.273.

Moezzi, A., McDonagh, A. M., & Cortie, M. B. (2012). Zinc oxide particles: Synthesis, properties and applications. *Chemical engineering journal*, 185, 1-22.

Rafiq, A., Ikram, M., Ali, S., Niaz, F., Khan, M., Khan, Q., & Maqbool, M. (2021). Photocatalytic degradation of dyes using semiconductor photocatalysts to clean industrial water

pollution. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 97, 111–128. <https://doi.org/10.1016/J.JIEC.2021.02.017>

Rahman, T. U., Roy, H., Shoronika, A. Z., Fariha, A., Hasan, M., Islam, M. S., Marwani, H. M., Islam, A., Hasan, M. M., Alsukaibi, A. K. D., Rahman, M. M., & Awual, M. R. (2023). Sustainable toxic dye removal and degradation from wastewater using novel chitosan-modified TiO<sub>2</sub> and ZnO nanocomposites. *Journal of Molecular Liquids*, 388, 122764. <https://doi.org/10.1016/J.MOLLIQ.2023.122764>

Rathi, B. S., Kumar, P. S., & Vo, D. V. N. (2021). Critical review on hazardous pollutants in water environment: Occurrence, monitoring, fate, removal technologies and risk assessment. *Science of The Total Environment*, 797, 149134. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.149134>

Sanakousar, F. M., Vidyasagar, C., Jiménez-Pérez, V. M., & Prakash, K. (2022). Recent progress on visible-light-driven metal and non-metal doped ZnO nanostructures for photocatalytic degradation of organic pollutants. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 140, 106390. <https://doi.org/10.1016/J.MSSP.2021.106390>

Sedefoglu, N. (2023). Characterization and photocatalytic activity of ZnO nanoparticles by green synthesis method. *Optik*, 288, 171217. <https://doi.org/10.1016/J.IJLEO.2023.171217>

Soğuksu, A. K., Kerli, S., Kavgacı, M., and Gündeş, A., (2021) “Electrochemical Properties, Antimicrobial Activity and Photocatalytic Performance of Cerium-Iron Oxide Nanoparticles. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2022, Vol. 96, No. 1, pp. 209–215. DOI: 10.1134/S0036024422010228.

Soğuksu, A.K., Kerli, S., Kavun. Y., Alver, Ü., (2024). “Synthesis and characterizations of Ce-doped ZnO thin films for radiation shielding”. *Optical Materials*, Volume 148, February 2024, 114941.

Utomo, W. P., Afifah, P. A. I., Rozafia, A. I., Mahardika, A. A., Santoso, E., Liu, R., & Hartanto, D. (2024). Modulation of particle size and morphology of zinc oxide in graphitic carbon nitride/zinc oxide composites for enhanced photocatalytic degradation of methylene blue. *Surfaces and Interfaces*, 46, 104017.

Wagh, S. S., Kadam, V. S., Jagtap, C. V., Salunkhe, D. B., Patil, R. S., Pathan, H. M., & Patole, S. P. (2023). Comparative Studies on Synthesis, Characterization and Photocatalytic Activity of Ag Doped ZnO Nanoparticles. *ACS Omega*, 8(8), 7779–7790. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07499>

Workie, A. B., Ningsih, H. S., & Shih, S. J. (2023). An comprehensive review on the spray pyrolysis technique: Historical context, operational factors, classifications, and product

applications. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 170, 105915.  
<https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2023.105915>.