

**T.C.**  
**GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**NADİR TOPRAK ELEMENTLERİNDEN LANTAN VE SERYUM KATKILI  
İRİDYUM RUTENYUM KARIŞIK METAL OKSİT ELEKTROTLARIN TEKSTİL  
ATIKSUYU ARITMA PERFORMANSINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**MELİKE CEREN OKUR**

**DOKTORA TEZİ**  
**ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN: PROF. DR. ABDURRAHMAN AKYOL**

**ŞUBAT 2025**

**T.C.**  
**GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**NADİR TOPRAK ELEMENTLERİNDEN LANTAN VE SERYUM KATKILI  
İRİDYUM RUTENYUM KARIŞIK METAL OKSİT ELEKTROTLARIN TEKSTİL  
ATIKSUYU ARITMA PERFORMANSINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**MELİKE CEREN OKUR**

**DOKTORA TEZİ**  
**ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN: PROF. DR. ABDURRAHMAN AKYOL**

**ŞUBAT 2025**

**T.R.**  
**GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY**  
**GRADUATE SCHOOL**

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF LANTHANUM AND CERIUM-DOPED  
IRIDIUM RUTHENIUM MIXED METAL OXIDE ELECTRODES ON TEXTILE  
WASTEWATER TREATMENT PERFORMANCE**

**MELİKE CEREN OKUR**

**A THESIS OF DOCTORATE**  
**DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING**

**ADVISOR: PROF. DR. ABDURRAHMAN AKYOL**

**FEBRUARY 2025**

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 03/02/2025 tarih ve 2025/08 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 27/02/2025 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Melike Ceren Okur'un tez çalışması Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

**JÜRİ**

ÜYE  
(TEZ DANIŞMANI) : PROF. DR. ABDURRAHMAN AKYOL

ÜYE : DOÇ. DR. SERDAR KARA

ÜYE : PROF. DR. ORHAN TANER CAN

ÜYE : DOÇ. DR. BAŞAK TEMUR ERGAN

ÜYE : DOC. DR. ÖMÜR ARAS

**ONAY**

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun

...../...../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

## ÖZET

Bu tez çalışmasında, lantan (La) ve seryum (Ce) katkılı Ti/RuO<sub>2</sub>-IrO<sub>2</sub> karışık metal oksit elektrotlarının karakterizasyonu ve optimizasyonu ile bu elektrotların Reaktif Siyah 5 (RB5) boyası içeren sentetik atıksu ve mevcut bir tekstil fabrikasından temin edilen gerçek tekstil atıksuyundaki arıtım performansını incelenmiştir.

Üretilen elektrotlar, daha önceki çalışmalarımızda elde ettiğimiz ve standart kabul ettiğimiz Ti/RuO<sub>2</sub>(60%)-IrO<sub>2</sub>(40%) kompozisyonlu elektrot referans alınarak, mevcut konfigürasyona %5, %10 ve %20 oranlarında La ve/veya Ce nadir toprak elementleri ile katkılandırılması ile hazırlanmıştır. Burada amaç yüksek maliyetli iridyum miktarını azaltırken, performansı arttırmaktır. Bu kompozisyonlarda hazırlanan çözeltiler titanyum plaka üzerine fırça ile yayma metodu kullanılarak kaplanmıştır. Ayrıca, %10 Ce ve %10 La oranında karışık bir kompozisyon ile farklı bir elektrot daha geliştirilmiştir. Bu tez çalışması, La ve Ce ile katkılandırılmış elektrotların elektrokimyasal giderim sürecindeki rollerini; pH, iletkenlik ve konsantrasyonun atıksu arıtma verimine etkilerini araştırmaya odaklanmaktadır. Elektrot performansları, ikincil kirletici oluşturmadan atıksudaki renk giderimini etkin bir şekilde sağlayan elektrooksidasyon (EO) proses ile çalışılmıştır. La ve Ce katkılarının karışık kompozisyon olarak tek bir elektrotta kullanılması, performansı artırarak elektrot kullanım ömrünü uzatmakta ve atıksu arıtma maliyetlerini düşürmektedir; bu tez kapsamında geliştirilen elektrot ile EO prosesindeki önemli bir dezavantaja çözüm önerisi sunulmaktadır.

Ön denemeler 100 ppm'de hazırlanmış sentetik RB5 çözeltisi ile yapılmıştır. Ce ve La katkıları ile üretilen 7 farklı elektrot ve Ce ve/veya La katkılandırılması yapılmayan standart Ti/RuO<sub>2</sub>(60%)-IrO<sub>2</sub>(40%) elektrodu referans alınarak, 200 A.m<sup>-2</sup>, 3500 µS.cm<sup>-1</sup>, pH 5,5 ve 300 dk koşullarında EO prosesi uygulanmıştır. En iyi giderim verimini %10 Ce ve %10 La katkılandırma yapılan karışık kompozisyonlu elektrotta sağlanmış olup, toplam organik karbon (TOK) giderim verimliliği %36,12 olarak ölçülürken, klor üretimi 794,08 mg.L<sup>-1</sup> olarak belirlenmiştir. Elektrot giderim performansının artırılmasına yönelik olarak en iyi giderim verimini sağlayan %10 Ce ve %10 La katkılı karışık kompozisyonlu elektrot, farklı pH değerleri (3, 5, 7, 9), farklı çözelti konsantrasyonları (50, 100, 300, 500 ppm), farklı akım yoğunlukları (100, 200, 350, 600 A.m<sup>-2</sup>) ve farklı iletkenlik değerlerinde (1500, 3500, 5500, 10000 µS.cm<sup>-1</sup>) EO deneyleri yapılmış ve optimum koşullar 200 A.m<sup>-2</sup>, 3500 µS.cm<sup>-1</sup>, pH 5,5 ve 300 dk olarak belirlenmiştir.

Çalışmanın devamında aynı elektrotlar tekstil atıksuyu gideriminde EO prosesi ile uygulanmıştır. Elektrotların endüstriye uygulanabilir olmasının en önemli parametresi enerji olduğu için tüm elektrotlara 100 A.m<sup>-2</sup>, 200 A.m<sup>-2</sup>, 350 A.m<sup>-2</sup> ve 600 A.m<sup>-2</sup>, akım yoğunluklarında EO prosesi uygulanmıştır. Mevcut atıksuyun pH değeri 8.5 iletkenlik değeri ise 4000 µS.cm<sup>-1</sup>'dir. En iyi giderim verimi yine %10 Ce ve %10 La karışık kompozisyonlu katkılandırma yapılan elektrotta sağlanmış olup, TOK giderim verimliliği %29.26 olarak ölçülürken, klor üretimi 843.71 mg.L<sup>-1</sup> olarak belirlenmiştir.

Sonuçlar, üretilen elektrotların kirletici giderimi ve renk giderimi açısından önemli iyileştirmeler sağlandığını göstermekte olup, katkılı elektrotların atıksu arıtımı için potansiyelini ortaya koymaktadır. Çalışma, özellikle tekstil endüstrisi atıksularının elektrokimyasal arıtımı için proses optimizasyonuna yönelik önemli bilgiler sunmaktadır.

**Anahtar Kelimeler: Seryum, Lantan, Termal Kaplama, Elektrooksidasyon.**

## ABSTRACT

In this study, the characterization and optimization of Ti/RuO<sub>2</sub>-IrO<sub>2</sub> mixed metal oxide electrodes doped with lanthanum (La) and cerium (Ce) were investigated, along with the evaluation of these electrodes' treatment performance in synthetic wastewater containing Reactive Black 5 (RB5) dye and real textile wastewater obtained from an existing textile factory. The fabricated electrodes were prepared by modifying the standard Ti/RuO<sub>2</sub>(60%)-IrO<sub>2</sub>(40%) composition, in which the iridium content was reduced, and doped with 5%, 10%, and 20% of La and/or Ce rare earth elements. The coatings were applied onto titanium plates using the brush-coating technique from the prepared solutions. Additionally, a new electrode was developed with a mixed composition containing 10% Ce and 10% La.

This study focused on examining the roles of La- and Ce-doped electrodes in the electrochemical removal process and investigating the effects of pH, conductivity, and concentration on wastewater treatment efficiency. Electrode performances were assessed through the electrooxidation (EO) process, which effectively removes color from wastewater without forming secondary pollutants. The use of both La and Ce dopants in a single electrode composition improved performance, extended electrode lifespan, and reduced wastewater treatment costs, thereby providing a solution to one of the key disadvantages of the EO process.

Preliminary experiments were conducted using a synthetic RB5 solution prepared at a concentration of 100 ppm. The EO process was carried out under standard conditions (200 A.m<sup>-2</sup>, 3500 μS.cm<sup>-1</sup>, pH 5.5, and 300 min) using seven different electrodes doped with Ce and La and a reference electrode of standard Ti/RuO<sub>2</sub>(60%)-IrO<sub>2</sub>(40%) composition. The best removal efficiency was achieved with the mixed composition electrode doped with 10% Ce and 10% La, yielding a total organic carbon (TOC) removal efficiency of 36.12% and a chlorine generation of 794.08 mg.L<sup>-1</sup>. To enhance electrode removal performance, EO experiments were further conducted using the 10% Ce and 10% La mixed composition electrode under varying pH values (3, 5, 7, 9), solution concentrations (50, 100, 300, 500 ppm), current densities (100, 200, 350, 600 A.m<sup>-2</sup>), and conductivity values (1500, 3500, 5500, 10000 μS.cm<sup>-1</sup>). The optimum conditions were determined as 200 A.m<sup>-2</sup>, 3500 μS.cm<sup>-1</sup>, pH 5.5, and 300 minutes.

Subsequently, the same electrodes were applied to the treatment of real textile wastewater using the EO process. Given that energy is a critical parameter for industrial applicability, EO was performed at current densities of 100, 200, 350, and 600 A.m<sup>-2</sup> for all electrodes. The actual wastewater had a pH of 8.5 and a conductivity of 4000 μS.cm<sup>-1</sup>. Again, the best removal efficiency was achieved with the mixed composition electrode containing 10% Ce and 10% La, where TOC removal efficiency was measured at 29.26%, and chlorine production was determined as 843.71 mg.L<sup>-1</sup>.

The results demonstrated significant improvements in pollutant and color removal using the produced electrodes, revealing the potential of the doped electrodes for wastewater treatment. This study provides critical insights for process optimization in the electrochemical treatment of textile industry wastewaters.

**Keywords: Cerium, Lanthanum, Thermal Coating, Electrooxidation.**

## TEŞEKKÜR

Öncelikle doktora eğitimim boyunca desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyip değerli rehberliği ile bu çalışmanın oluşmasının sağlayan danışmanım Prof. Dr. Abdurrahman Akyol'a,

Deneysel çalışmalarımın ve tez sürecimin tamamında destek olan ve çalışmamın ilerlemesini sağlayan Dr. Dilara Öztürk'e

Yoğun laboratuvar günlerimdeki desteği için Selver Konuk'a,

Doktora eğitimim süresince desteklerini esirgemeyen eski Genel Müdür'üm Mustafa Yılmaz'er'e,

Çalışmalarım süresinde yanımda olan eşim Onur Okur'a,

Bu yola girmemdeki en büyük destekçim babam Halil Çakır'a ve annem Nebahat Çakır'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez YÖK 100/2000 Doktora Bursu ile desteklenmiştir.

Bu tez 2022-A-102-17 nolu BAP birimi tarafından desteklenmiştir.

# İÇİNDEKİLER

|  | <b><u>Sayfa</u></b> |
|--|---------------------|
| ÖZET   | v                   |
| ABSTRACT   | vi                  |
| TEŞEKKÜR   | vii                 |
| İÇİNDEKİLER  | viii                |
| SİMGELER VE KISALTMALAR  | x                   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ  | xi                  |
| TABLolar   | xiii                |
| <br>   |                     |
| 1. GİRİŞ   | 1                   |
| 2. İLERİ ARITMA YÖNTEMLERİ   | 3                   |
| 2.1. Homojen Sistemler   | 3                   |
| 2.1.1. Ozonlama (O <sub>3</sub> )  | 3                   |
| 2.1.2. Katalitik Ozonlama  | 4                   |
| 2.1.3. Hidrojen Peroksit/Ozon (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub> ) | 4                   |
| 2.1.4. Ozon/UV (O <sub>3</sub> /UV)  | 5                   |
| 2.1.5. Hidrojen Peroksit/UV (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /UV)                | 5                   |
| 2.1.6. Fenton Prosesi (FeSO <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )      | 6                   |
| 2.2. Heterojen Sistemler   | 6                   |
| 2.2.1. Foto-katalitik Oksidasyon   | 6                   |
| 2.2.2. Ultrasonik Oksidasyon   | 7                   |
| 2.2.3. Membran Sistemi   | 7                   |
| 2.2.4. Elektrokimyasal Oksidasyon  | 8                   |
| 3. ELEKTROKİMYASAL ARITIM YÖNTEMLERİ   | 9                   |
| 3.1. Elektrokoagülasyon  | 9                   |
| 3.2. Elektroflotasyon  | 10                  |
| 3.3. Elektrooksidasyon   | 10                  |
| 4. ELEKTROOKSIDASYON   | 12                  |
| 4.1. Direkt Oksidasyon   | 14                  |
| 4.2. Dolaylı Oksidasyon  | 16                  |
| 4.3. Elektrokimyasal Oksidasyon Prosesini Etkileyen Parametreler               | 18                  |
| 4.3.1. Elektrot Tipi   | 19                  |
| 4.3.2. Elektrotlar Arası Mesafe  | 20                  |
| 4.3.3. Akım Yoğunluğu  | 21                  |
| 4.3.4. pH  | 22                  |
| 4.3.5. Süre  | 23                  |
| 4.3.6. İletkenlik  | 23                  |
| 4.3.7. Sıcaklık  | 25                  |
| 5. NADIR TOPRAK ELEMENTLERİ VE ELEKTROT MALZEMELERİ                            | 26                  |
| 5.1. Lantan'ın Elektrokimyasal ve Çevresel Uygulamalardaki Önemi               | 29                  |
| 5.2. Seryum'un Elektrokimyasal ve Çevresel Uygulamalardaki Önemi               | 30                  |

|  |    |
|--|----|
| 6. ELEKTROOKSIDASYON PROSESLERİNDE KULLANILAN ANOTLARIN ÜRETİMİNDEKİ TERMAL KAPLAMA YÖNTEMLERİ | 32 |
| 6.1. Fırça İle Yayma (Spread Yayma) Yöntemi  | 32 |
| 6.2. Spreyleme (Spraying) Yöntemi  | 34 |
| 6.3. Daldırma (Dipping) Yöntemi  | 35 |
| 6.4. Döndürmeli Kaplama (Spin Coating) Yöntemi   | 35 |
| 7. TEKSTİL ENDÜSTRİSİ VE ATIKSU  | 37 |
| 7.1. Tekstil Endüstrisindeki Boyar Madde İçeren Atıksuların Çevre Üzerine Etkileri             | 38 |
| 7.2. Reaktif Siyah 5 Boyar Maddeler  | 39 |
| 8. MATERYAL VE YÖNTEM  | 41 |
| 8.1. Kimyasallar ve Sentetik Çözeltinin Hazırlanması   | 41 |
| 8.2. Tekstil Atıksuyunun Temini ve Karakterizasyonu  | 42 |
| 8.3. Laboratuvar Üretimi Elektrot Kaplaması ve Analizleri                                      | 42 |
| 8.4. Deney Düzenegi  | 45 |
| 8.5. Deneysel Sonuçlar ile İlgili Gerekli Hesaplamalar   | 47 |
| 8.6. Analizler sırasında kullanılan ekipman ve cihazlar  | 47 |
| 9. BULGULAR VE TARTIŞMA  | 50 |
| 9.1. Karakterizasyon   | 50 |
| 9.1.1. X-Işını Difraktometresi (XRD)   | 50 |
| 9.1.2. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM)  | 52 |
| 9.1.3. Doğrusal Taramalı Voltametri (LSV)  | 56 |
| 9.1.4. Dönüşümlü Voltametri (CV)   | 57 |
| 9.1.5. ICP-OES   | 58 |
| 9.1.6. Elektrot kullanım ömrü  | 59 |
| 9.2. RB5 Giderim Çalışmaları   | 60 |
| 9.2.1. Akım Yoğunluğunun Etkisi  | 61 |
| 9.2.2. pH'ın Etkisi  | 62 |
| 9.2.3. İletkenliğin Etkisi   | 63 |
| 9.2.4. Konsantrasyonun Etkisi  | 65 |
| 9.2.5. Renk Giderimi   | 66 |
| 9.3. Tekstil Atıksuyu Giderim Çalışmaları  | 69 |
| 9.3.1. Akım Yoğunluğunun Etkisi  | 70 |
| 9.3.2. Renk Giderimi   | 72 |
| 9.4. Elektrotların karşılaştırılması   | 75 |
| 10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER   | 79 |
| KAYNAKLAR  | 81 |
| ÖZGEÇMİŞ   | 92 |
| TEZ METNİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR   | 93 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

|                |   |
|----------------|---|
| $\Delta P$     | : Hidrolik Basınç                                       |
| $\Delta \pi$   | : Osmotik Basınç  |
| $\bullet OH$   | : Hidroksil Radikali                                    |
| $BrO_3^-$      | : Bromat  |
| Ce             | : Seryum  |
| $CO_2$         | : Karbon Dioksit  |
| $H_2O_2$       | : Hidrojen Peroksit                                     |
| $IrO_2$        | : İridyum Dioksit                                       |
| La             | : Lantan  |
| M(O)           | : Elektrot yüzeyindeki aktif oksijen türü               |
| $O_3$          | : Ozonlama  |
| $PbO_2$        | : Kurşun Dioksit  |
| R              | : Organik Kirleticisi                                   |
| R'             | : Oksitlenmiş Ürün                                      |
| $RuO_2$        | : Rutenyum Dioksit                                      |
| $SnO_2$        | : Kalay Dioksit   |
| $SO_4^\bullet$ | : Sülfat Radikali                                       |
| Ti             | : Titanyum  |
| NiO            | : Nikel Oksit   |
| HCl            | : Hidroklorik Asit                                      |
| Co             | : Kobalt  |
| AOP            | : İleri Oksidasyon Prosesleri                           |
| BDD            | : Bor Katkılı Elmas                                     |
| BOİ            | : Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı                         |
| CV             | : Dönüşümlü Voltametre                                  |
| EC             | : Enerji Tüketimi                                       |
| EO             | : Elektrooksidasyon                                     |
| ICP-OES        | : İndüktif Eşleşmiş Plazma-Optik Emisyon Spektrometresi |
| İPA            | : İzopropil Alkol                                       |
| KOİ            | : Kimyasal Oksijen İhtiyacı                             |
| LSV            | : Lineer Taramalı Voltametre                            |
| NTE            | : Nadir Toprak Elementleri                              |
| RB5            | : Reaktif Siyah 5, Remazol Siyah B                      |
| SEM            | : Taramalı Elektron Mikroskopu                          |
| TOK            | : Toplam Organik Karbon                                 |
| UV-Vis         | : Ultraviyole Görünür                                   |
| XRD            | : X-Işınları Difraksiyonu                               |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|   | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| <b>Şekil 1.1:</b> Yapılacak çalışmanın şematik gösterimi.   | 2            |
| <b>Şekil 3.1:</b> Elektrokimyasal arıtım yöntemleri.  | 9            |
| <b>Şekil 4.1:</b> Elektrokoksiasyon prosesinin şematik gösterimi.   | 13           |
| <b>Şekil 5.1:</b> Nadir torak elementleri kullanım alanları yüzdesi [71]  | 28           |
| <b>Şekil 6.1:</b> Fırça ile yayma yöntemi şematik gösterimi.  | 33           |
| <b>Şekil 6.2:</b> Fırça ile yayma yöntemindeki kaplama adımları.  | 33           |
| <b>Şekil 6.3:</b> Spreyleme yöntemi.  | 34           |
| <b>Şekil 6.4:</b> Daldırarak kaplama yöntemi şematik gösterimi.   | 35           |
| <b>Şekil 6.5:</b> Döndürmeli kaplama yöntemi şematik gösterimi.   | 36           |
| <b>Şekil 7.1:</b> RB5 boyar maddesinin kimyasal yapısı.   | 40           |
| <b>Şekil 8.1:</b> Kaplama sırasında kullanılan kimyasallar.   | 41           |
| <b>Şekil 8.2:</b> Kaplama ön işlem adımları.  | 43           |
| <b>Şekil 8.3:</b> Elektrot kaplama şeması.  | 45           |
| <b>Şekil 8.4:</b> Kaplanan elektrot görselleri.   | 45           |
| <b>Şekil 8.5:</b> Deney düzeneği.   | 46           |
| <b>Şekil 8.6:</b> Servis ömrü düzeneği.   | 48           |
| <b>Şekil 8.7:</b> Klor ölçümünde kullanılan malzemeler.   | 49           |
| <b>Şekil 9.1:</b> Farklı miktarlarda Ce ile katkılanmış Ti/RuO <sub>2</sub> -IrO <sub>2</sub> elektrotlarının XRD örnekleri (●: Ti, ★: RuO <sub>2</sub> , ■: IrO <sub>2</sub> ).  | 51           |
| <b>Şekil 9.2:</b> Farklı miktarlarda La ile katkılanmış Ti/RuO <sub>2</sub> -IrO <sub>2</sub> elektrotlarının XRD örnekleri (●: Ti, ★: RuO <sub>2</sub> , ■: IrO <sub>2</sub> ).  | 51           |
| <b>Şekil 9.3:</b> 2000x büyütmede SEM görüntüleri: a) Ti/RuO <sub>2</sub> (60%)-IrO <sub>2</sub> (40%) standart elektrotu b) %10 Ce + %10 La katkılı Ti/RuO <sub>2</sub> (60%)-IrO <sub>2</sub> (20%) (Ce sarı ile renklendirilmiş), c) %10 Ce + %10 La katkılı Ti/RuO <sub>2</sub> (60%)-IrO <sub>2</sub> (20%) (La mavi ile renklendirilmiş), d) %5 Ce katkılı Ti/RuO <sub>2</sub> (60%)-IrO <sub>2</sub> (35%), e) %10 Ce katkılı Ti/RuO <sub>2</sub> (60%)-IrO <sub>2</sub> (30%), f) %20 Ce katkılı Ti/RuO <sub>2</sub> (60%)-IrO <sub>2</sub> (20%), g) %5 La katkılı Ti/RuO <sub>2</sub> (60%)-IrO <sub>2</sub> (35%), h) %10 La katkılı Ti/RuO <sub>2</sub> (60%)-IrO <sub>2</sub> (30%), i) %20 La katkılı Ti/RuO <sub>2</sub> (60%)-IrO <sub>2</sub> (20%). | 53           |
| <b>Şekil 9.4:</b> 10000x SEM görüntüleri a) Ti/RuO <sub>2</sub> (60%)-IrO <sub>2</sub> (40%), b) %5 Ce katkılandırılmış Ti/RuO <sub>2</sub> (60%)-IrO <sub>2</sub> (35%), c) %10 Ce katkılandırılmış Ti/RuO <sub>2</sub> (60%)-IrO <sub>2</sub> (30%), d) %20 Ce katkılandırılmış Ti/RuO <sub>2</sub> (60%)-IrO <sub>2</sub> (20%).   | 54           |
| <b>Şekil 9.5:</b> 10000x SEM görüntüleri a) Ti/RuO <sub>2</sub> (60%)-IrO <sub>2</sub> (40%), b) %5 La katkılandırılmış Ti/RuO <sub>2</sub> (60%)-IrO <sub>2</sub> (35%), c) %10 La katkılandırılmış elektrot Ti/RuO <sub>2</sub> (60%)-IrO <sub>2</sub> (30%), d) %20 La katkılandırılmış Ti/RuO <sub>2</sub> (60%)-IrO <sub>2</sub> (20%).  | 55           |
| <b>Şekil 9.6:</b> 10000x SEM görüntüleri a) Ti/RuO <sub>2</sub> (60%)-IrO <sub>2</sub> (40%) b) %10 Ce ve %10 La katkılandırılmış Ti/RuO <sub>2</sub> (60%)-IrO <sub>2</sub> (20%).   | 56           |
| <b>Şekil 9.7:</b> Elektrotların LSV grafikleri (3,5 mS·cm <sup>-1</sup> iletkenliğe sahip NaCl, 0,05 V·sn <sup>-1</sup> ).  | 57           |
| <b>Şekil 9.8:</b> Elektrotların CV grafikleri (3,5 mS·cm <sup>-1</sup> iletkenliğe sahip NaCl, 0,05 V·sn <sup>-1</sup> tarama hızı).  | 58           |

|   |    |
|---|----|
| <b>Şekil 9.9:</b> Servis ömrü grafiği.  | 59 |
| <b>Şekil 9.10:</b> Tüm elektrotlar için standart koşullarda TOK giderim verimi.   | 60 |
| <b>Şekil 9.11:</b> %10 ve %10 için akım yoğunluğu ve klor bazında giderim verimliliği (100 ppm RB5, 5 saat reaksiyon süresi, 3500 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ iletkenlik, 5,5 pH).                           | 62 |
| <b>Şekil 9.12:</b> %10 Ce + %10 La için pH'ya bağlı TOK verimliliği (200 $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$ akım yoğunluğu, 100 ppm RB5, 5 sa reaksiyon süresi, 3500 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ iletkenlik).      | 63 |
| <b>Şekil 9.13:</b> %10 Ce ve %10 La için akım yoğunluğu ve klor bazında giderim verimliliği (200 $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$ akım yoğunluğu, 100 ppm RB5, 5 sa reaksiyon süresi, 5,5pH).                         | 64 |
| <b>Şekil 9.14:</b> %10 Ce ve %10 La için konsantrasyona bağlı TOK verimliliği (200 $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$ akım yoğunluğu, 5 sa reaksiyon süresi, 3500 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ iletkenlik, 5,5 pH). | 66 |
| <b>Şekil 9.15:</b> 100 ppm RB5 çözeltisinin farklı sürelerde elektrooksidasyon işlemi sırasında alınan numunelerdeki renk değişimi.   | 67 |
| <b>Şekil 9.16:</b> %10 Ce ve %10 La karışık elektrotu kullanılarak RB5'in bozunmasına ait UV-Vis spektrumları (100 ppm, 200 $\text{A}/\text{m}^{-2}$ , pH 5,5, 3500 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ).           | 68 |
| <b>Şekil 9.17:</b> 10 $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$ 'de RB5 çözeltisinin 150 dakikada renk değişimi.   | 69 |
| <b>Şekil 9.18:</b> %10 ve %10 için akım yoğunluğu ve klor bazında giderim verimliliği.  | 71 |
| <b>Şekil 9.19:</b> %10 Ce ve %10 La karışık elektrotu kullanılarak tekstil atıksuyunun bozunmasına ait UV-Vis spektrumları.   | 73 |
| <b>Şekil 9.20:</b> Ti/RuO <sub>2</sub> (%60)-IrO <sub>2</sub> (%40) standart elektrot kullanılarak tekstil atıksuyunun bozunmasına ait UV-Vis spektrumları.   | 74 |
| <b>Şekil 9.21:</b> Tekstil atıksuyu renk giderimi.  | 74 |
| <b>Şekil 9.22:</b> Standart koşullarda RB5 ve atıksu TOK giderim verimleri.   | 78 |

## TABLULAR DİZİNİ

|  |    |
|--|----|
| <b>Tablo 4.1:</b> Farklı akım değerlerinde yapılan çalışmalar.   | 22 |
| <b>Tablo 4.2:</b> Farklı pH değerlerinde yapılan çalışmalar.   | 23 |
| <b>Tablo 4.3:</b> Farklı iletkenlik değerlerinde yapılan çalışmalar.   | 25 |
| <b>Tablo 4.4:</b> Farklı sıcaklık değerlerinde yapılan çalışmalar.   | 25 |
| <b>Tablo 8.1:</b> Kullanılan atıksuyun karakterizasyonu.   | 42 |
| <b>Tablo 8.2:</b> Elektrot isimleri ve kompozisyonları.  | 44 |
| <b>Tablo 9.1:</b> Elektrotların ICP sonuçları.   | 59 |
| <b>Tablo 9.2:</b> RB5 için akım yoğunluğuna göre enerji tüketimi.  | 61 |
| <b>Tablo 9.3:</b> Farklı iletkenlik değerlerindeki klor üretimi ve enerji tüketimi.                                | 65 |
| <b>Tablo 9.4:</b> Farklı akım yoğunluklarında TOK giderim verimi.  | 71 |
| <b>Tablo 9.5:</b> %10 Ce ve %10 La katkılı karışık elektrdın farklı akım yoğunluklarında enerji tüketim değerleri. | 71 |

# 1. GİRİŞ

Tekstil endüstrisi, ekonomik büyüme açısından önemli bir rol oynasa da, çevreye olan olumsuz etkileri nedeniyle dikkat çeken bir sektör olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu endüstriden kaynaklanan atıksular, yüksek miktarda organik ve inorganik kirletici içermesi, toksik kimyasallar ve boyar maddelerle yüklü olması nedeniyle çevresel sorunların başlıca nedenlerinden biridir. Özellikle, boyar maddelerle yüklenen tekstil atıksuları, sucul yaşam üzerinde çevresel sürdürülebilirlik için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır [1].

Boyar maddeler arasında Remazol grubu, suda yüksek çözünürlük ve düşük biyolojik parçalanabilirlik özellikleri ile bilinmektedir. Bu nedenle, Remazol içeren atıksuların arıtımı, geleneksel yöntemlerin sınırlarını zorlamakta ve daha ileri teknolojilere duyulan ihtiyacı artırmaktadır [2]. İleri oksidasyon yöntemleri, bu bağlamda etkili bir çözüm sunmakla birlikte, yüksek enerji tüketimi ve maliyet gibi faktörler sebebiyle geniş ölçekli uygulamalarda sınırlı kalmaktadır [3].

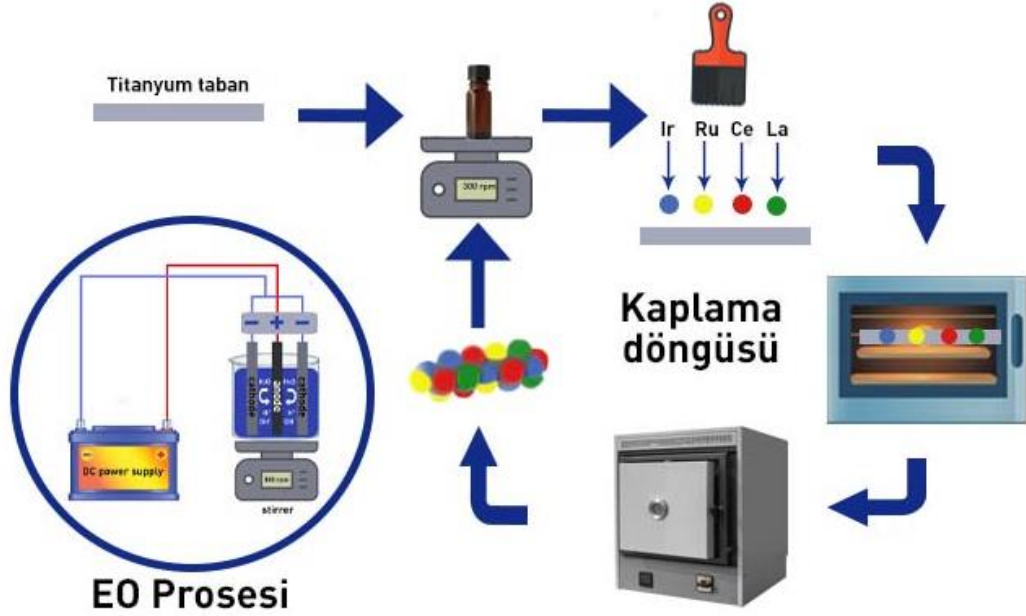
Elektrokimyasal oksidasyon, çevre dostu yeni nesil bir yöntem olarak dikkat çekmektedir ve bu teknolojinin gelişiminde elektrot malzemelerinin özellikleri belirleyici bir rol oynamaktadır. Özellikle, karışık metal oksit elektrotlar, yüksek elektrokatalitik aktivite, kararlılık ve uzun ömürlülükleri sayesinde büyük bir potansiyele sahiptir [4]. Bu çalışmada, son yıllarda arıtma verimi üzerine etkileri araştırılan nadir Toprak elementlerinden lantan (La) ve seryum (Ce) katkılı iridyum-rutenyum karışık metal oksit elektrotlar kullanılarak, hem sentetik Remazol çözeltisinin hem de gerçek tekstil atıksuyunun arıtılabilirlik performansı incelenmiştir.

Bu tez kapsamında elektrot üretiminde kullanılan termal kaplama yöntemleri, elektrot yüzeyinin homojen bir şekilde kaplanmasını ve optimize edilmiş bir elektrokatalitik aktivite sağlanmasını mümkün kılmaktadır. Bu bağlamda, çalışmada kolay uygulanabilir olması sebebiyle fırça ile termal kaplama yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem, elektrot yüzey morfolojisini ve aktivitesini iyileştirmek için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir [5].

## 1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Çalışmanın ilk aşamasında, La ve Ce katkılı elektrotların sentetik bir RB5 çözeltisi üzerindeki performansı değerlendirilmiş, ardından yüksek performans gösteren elektrotlar gerçek tekstil atıksuyu üzerinde test edilmiştir. Çalışmada, pH, akım yoğunluğu, çalışma süresi ve sıcaklık gibi çeşitli parametrelerin serbest klor üretimi, renk ve toplam organik karbon (TOK) giderim performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Bu araştırma, nadir toprak elementleri ile geliştirilmiş karışık metal oksit elektrotların ileri arıtma teknolojilerindeki potansiyelini ortaya koyarak, hem akademik hem de endüstriyel alanlarda sürdürülebilir çözümler sunmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, enerji tüketimi ve performans verimliliği açısından bu elektrotların etkinliği değerlendirilmiş ve literatürle kıyaslanmıştır. Bu kapsamda elektrot performansını artırmak, daha uzun ömürlü bir elektrot üretilmiş ve böylece EO prosesinin en büyük engeli olan arıtım maliyeti azaltılmıştır. Ayrıca çalışmada enerji tüketim ve performans verimliliği açısından bu elektrotların etkinliği değerlendirilmiş ve literatür ile karşılaştırılmıştır. Tez çalışmasının genel olaral çematik gösterimi Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1: Yapılacak çalışmanın şematik gösterimi.

## 2. İLERİ ARITMA YÖNTEMLERİ

İleri arıtma yöntemleri, geleneksel fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma yöntemlerinin yeterli olmadığı durumlarda kullanılan, yüksek etkinliğe sahip teknolojilerdir. Bu yöntemler, genellikle toksik, dirençli veya biyolojik olarak parçalanamayan organik ve inorganik kirleticilerin giderimi için tercih edilmektedir. İleri oksidasyon prosesleri (AOP), membran teknolojileri ve adsorpsiyon gibi yöntemler, atıksu içerisindeki kirleticilerin hem konsantrasyonlarını azaltmada hem de ekotoksikolojik etkilerini ortadan kaldırmada önemli rol oynamaktadır [6].

Bu süreçlerde, genellikle hidroksil radikalleri ( $\cdot\text{OH}$ ) gibi yüksek oksidasyon potansiyeline sahip reaktif türlerin üretimi hedeflenir. Bu radikaller, kirleticileri mineralize ederek karbondioksit ( $\text{CO}_2$ ) ve su gibi zararsız ürünlere dönüştürür. Bunun yanı sıra, ileri arıtma yöntemleri, mikro kirleticiler, farmasötik kalıntılar ve hormon bozucu kimyasallar gibi yeni nesil kirleticilerin gideriminde de etkili bir çözüm sunmaktadır [7].

### 2.1. Homojen Sistemler

Reaksiyonun tamamen aynı fazda gerçekleştiği yöntemlerdir. Homojen ileri oksidasyon prosesleri, çözünmüş halde bulunan kimyasalların radikal üretimi sağlayarak kirlilik giderimini hedefler. Hangi yöntemin seçileceği, suyun bileşimi, enerji gereksinimi, maliyet ve atık oluşumu gibi faktörlere bağlıdır.

#### 2.1.1. Ozonlama ( $\text{O}_3$ )

Ozonlama, ileri oksidasyon proseslerinin önemli bir bileşenidir ve su arıtımında organik kirleticilerin oksidasyonu için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ozon ( $\text{O}_3$ ), suya verildiğinde güçlü bir oksidan olarak doğrudan organik ve inorganik kirleticilerle reaksiyona girer veya dolaylı yoldan  $\cdot\text{OH}$  üreterek daha etkili bir oksidasyon süreci başlatır[8]. Ozonlama tek başına kullanıldığında belirli kirleticileri etkili bir şekilde okside edebilse de, yarı ömrü oldukça kısa olduğu için sürekli jeneratör ihtiyacı vardır ve bromür

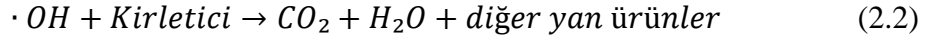
içeren sular için bromat ( $\text{BrO}_3^-$ ) oluşumu riski taşır [9]. Bu nedenle, ozon genellikle diğer ileri oksidasyon prosesleri ile kombine edilerek daha yüksek verim elde edilir.



Ozonlama sistemlerinin etkinliği, suyun pH değeri, organik madde konsantrasyonu ve mevcut diğer iyonlarla doğrudan ilişkilidir. Örneğin, yüksek alkalinite değerlerine sahip sularda ozonun parçalanma süreci değişebilir ve oksidasyon verimliliği azalabilir [10]. Ozonun endüstriyel atık su arıtımında kullanımı özellikle tekstil, deri ve kimyasal üretim tesislerinde yaygındır. Örneğin, deri endüstrisi atık sularında ozonlama ve elektro-oksidadasyon kombinasyonu, organik kirleticilerin parçalanmasını ve tuz geri kazanımını sağlayarak atık yönetimini daha sürdürülebilir hale getirir [11]. Genel olarak, ozonlama ileri oksidasyon prosesleri içinde önemli bir yere sahip olup, hem tek başına hem de diğer oksidasyon prosesleri ile birleştirilerek uygulanabilir. Ancak optimum verimlilik sağlanabilmesi için su bileşimi, ozon dozu ve proses koşullarının dikkatlice optimize edilmesi gerekmektedir.

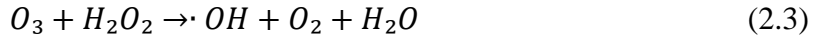
### 2.1.2. Katalitik Ozonlama

Katalitik ozonlama, metal oksitler veya aktif karbon gibi yüzeylerin kullanılmasıyla ozonun parçalanmasını hızlandırır ve düşük ozon dozlarında bile yüksek verim sağlar [12].



### 2.1.3. Hidrojen Peroksit/Ozon ( $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ )

Hidrojen peroksit ve ozonun bir arada kullanıldığı bu yöntem, güçlü oksidasyon potansiyeline sahip serbest radikallerin oluşumunu sağlar. Ozon, hidrojen peroksitle reaksiyona girerek hidroksil radikalleri üretir:



Bu süreçte üretilen hidroksil radikalleri, organik ve inorganik kirleticileri parçalayarak daha az zararlı bileşiklere dönüştürür. O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> kombinasyonu, özellikle pestisitler, fenoller ve farmasötik kalıntılar gibi toksik ve dirençli kirleticilerin gideriminde oldukça etkilidir [13].Ancak, yüksek ozon maliyeti ve sistemin karmaşıklığı uygulama sürecini sınırlayabilir.

#### 2.1.4. Ozon/UV (O<sub>3</sub>/UV)

Ozon ve ultraviyole ışığının birlikte kullanıldığı bu yöntem, ozonun UV ışık altında parçalanarak hidroksil radikalleri oluşturduğu bir oksidasyon sürecine dayanır.



Bu yöntem, özellikle mikro kirleticilerin ve renkli atık suların gideriminde yüksek etkinlik gösterir. UV ışık ile ozonun sinerjik etkisi, kirletici parçalanma hızını artırır ve işlem süresini kısaltır [14].

#### 2.1.5. Hidrojen Peroksit/UV (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV)

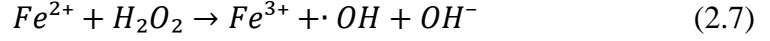
Hidrojen peroksit ve UV ışığının birleşimi, hidrojen peroksidin UV ışık altında parçalanarak hidroksil radikalleri oluşturduğu bir oksidasyon sürecidir:



Bu yöntem, biyolojik olarak parçalanamayan organik maddelerin mineralizasyonunda etkilidir. Ayrıca, UV ışığının doğrudan etkisi ile bazı organik kirleticiler de parçalanabilir. Ancak, bu yöntemin etkinliği, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonu ve UV ışık yoğunluğu gibi parametrelere bağlıdır [15].

### 2.1.6. Fenton Prosesi (FeSO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

Fenton prosesi, demir (II) iyonları ve hidrojen peroksit kullanılarak hidroksil radikallerinin üretilmesi esasına dayanır. Sürecin temel kimyasal reaksiyonu şu şekildedir:



Bu yöntem, tekstil boyaları, fenoller ve pestisitler gibi kirleticilerin gideriminde etkili bir oksidasyon teknolojisidir. Ancak, proses sırasında oluşan çamurun bertarafı ve demir iyonlarının rejenerasyonu gibi sorunlar uygulamada sınırlayıcıdır [16].

## 2.2. Heterojen Sistemler

Heterojen ileri oksidasyon prosesleri, farklı fazlara sahip sistemlerde gerçekleşen oksidatif su arıtma yöntemleridir. Genellikle katı katalizörler (metal oksitler, aktif karbon, zeolitler vb.) veya katı yüzeylerde gerçekleşen reaksiyonları içerir. Bu yöntemlerde •OH gibi güçlü oksidanları üretilerek organik ve inorganik kirleticileri parçalar.

### 2.2.1. Foto-katalitik Oksidasyon

Foto-katalitik oksidasyon, ışık enerjisi ile katalizör yüzeyinde kimyasal reaksiyonların tetiklendiği ileri bir arıtma teknolojisidir. Bu yöntemde genellikle titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>) gibi yarı iletken malzemeler, ultraviyole (UV) ışık altında aktif hale gelerek •OH oluşturur. Hidroksil radikalleri, atıksuda bulunan organik ve inorganik kirleticileri yüksek oksidasyon potansiyeli sayesinde etkili bir şekilde mineralize eder [17].

Foto-katalitik oksidasyon, özellikle boya, pestisitler ve farmasötik bileşikler gibi toksik ve dirençli organik kirleticilerin gideriminde etkili bir yöntemdir. Ayrıca, düşük enerji maliyetleri ve çevre dostu doğası nedeniyle sürdürülebilir bir alternatif yöntem olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, katalizör yüzeyinin pasifleşmesi, reaksiyon kinetiğinin düşük olması ve geniş ölçekli uygulamalardaki zorluklar bu yöntemin kısıtlamaları arasında yer alır [18].

### 2.2.2. Ultrasonik Oksidasyon

Ultrasonik oksidasyon, yüksek frekanslı ses dalgalarının (20-100 kHz) sıvı ortamda oluşturduğu akustik kavitasyon sayesinde kirleticilerin bozunmasını sağlayan bir ileri arıtma yöntemidir. Akustik kavitasyon, sıvı içerisinde hızla oluşup çöken mikroskobik gaz kabarcıklarının ortaya çıkardığı yüksek sıcaklık (>5000 K) ve basınç (>1000 atm) ile karakterize edilir. Bu ekstrem koşullar, •OH oluşumunu sağlar ve organik kirleticiler bu radikaller tarafından oksitlenir [19]. Kimyasal olarak ultrasonik oksidasyon süreci aşağıdaki gibi gösterilebilir:



Hidroksil radikalleri, su içerisindeki organik maddelerle reaksiyona girerek bu maddelerin mineralizasyonuna yol açar. Bu yöntem, toksik organik kirleticilerin yanı sıra biyolojik olarak parçalanamayan bileşiklerin gideriminde de etkilidir. Ancak, işlem sırasında enerji tüketimi yüksektir ve geniş ölçekli uygulamalar için optimizasyon gereklidir [20].

### 2.2.3. Membran Sistemi

Membran teknolojisi, atıksu arıtımında fiziksel bir ayırma süreci olarak kullanılmaktadır ve kirleticilerin membran yüzeyinden geçirilerek tutulmasını sağlar. Bu yöntem, ultrafiltrasyon (UF), nanofiltrasyon (NF), ters ozmoz (RO) ve mikrofiltrasyon (MF) gibi farklı işlemleri kapsamaktadır [21]. Membran sistemleri, uygulanan basınca bağlı olarak sıvı ve çözünmüş kirleticilerin ayrışmasını sağlayan bir çalışma prensibine sahiptir. Örneğin nanofiltrasyon ve ters ozmozda süreç genel olarak aşağıdaki bağıntıya göre ifade edilir:

$$\Delta P > \Delta \pi \quad (2.9)$$

Burada  $\Delta P$ , uygulanan hidrolik basıncı;  $\Delta \pi$ , osmotik basıncı ifade eder. Eğer uygulanan basınç, osmotik basıncı aşarsa, saf su membranın diğer tarafına geçerken kirleticiler tutulur.

Membran sistemleri, özellikle mikroplastikler, ağır metaller ve biyolojik kirleticilerin gideriminde yüksek etkinlik gösterir. Bununla birlikte, membran tıkanıklığı, enerji tüketimi ve membranların yüksek maliyeti gibi faktörler sistemin uygulanabilirliğini sınırlandırabilir [22].

#### **2.2.4. Elektrokimyasal Oksidasyon**

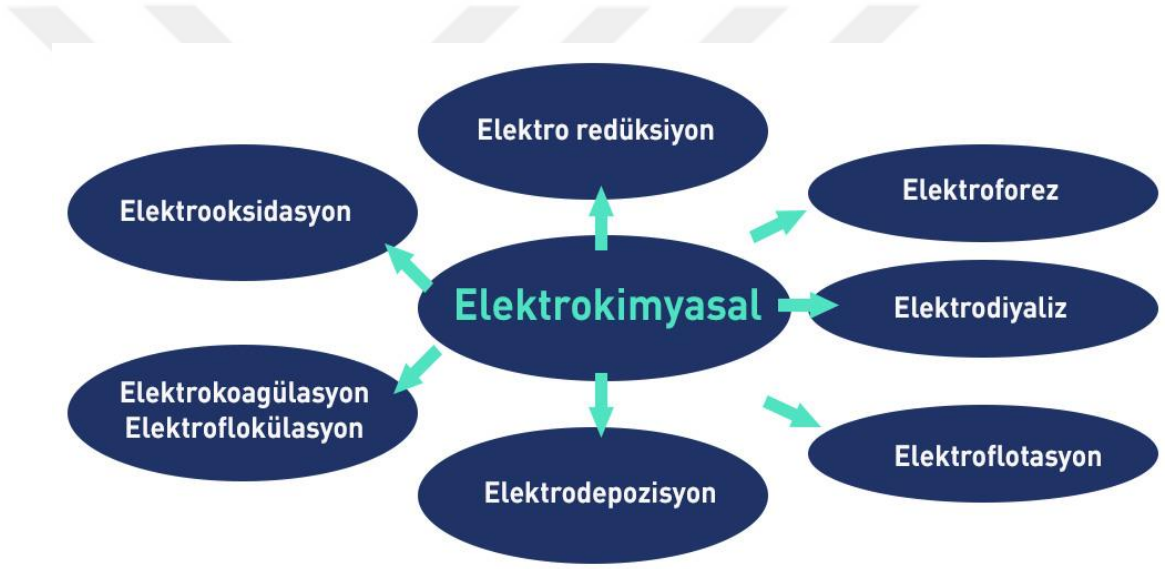
Elektrokimyasal oksidasyon, ileri oksidasyon prosesleri (AOPs) kapsamında, su arıtımında organik ve inorganik kirleticilerin oksidasyon yoluyla giderilmesini sağlayan bir yöntemdir. Bu süreç, anot ve katot arasında uygulanan elektrik potansiyeli ile gerçekleşir ve  $\bullet\text{OH}$ , sülfat radikalleri ( $\text{SO}_4\bullet^-$ ) veya diğer güçlü oksitleyici ajanların üretilmesine dayanır [23].

Elektrokimyasal oksidasyon sistemleri genellikle bor katkılı elmas (BDD),  $\text{PbO}_2$ ,  $\text{SnO}_2$  veya  $\text{RuO}_2$  gibi metal oksit elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilir ve bu anot yüzeylerinde oksitleyici türler üretilir. BDD anotlar, geniş elektrokimyasal stabilite aralığına sahip olup hidroksil radikalleri üretiminde yüksek verimlilik sunarlar [24].

Bu yöntem, ilaç atıkları, pestisitler, fenoller ve ağır metaller gibi kirleticilerin giderilmesinde etkin olup özellikle yüksek tuzluluk içeren atık suların arıtımında kullanılır [25]. Elektrokimyasal oksidasyon, geleneksel yöntemlere kıyasla kimyasal kullanımını azaltması ve atık çamur üretmemesi açısından avantaj sağlarken, yüksek enerji tüketimi ve anot malzemelerinin pahalı olması gibi bazı dezavantajlara da sahiptir. Bir sonraki başlıkta daha kapsamlı incelenmiştir.

### 3. ELEKTROKİMYASAL ARITIM YÖNTEMLERİ

Elektrokimyasal arıtım yöntemleri, kirleticilerin giderimi için elektrik akımının kullanıldığı yenilikçi ve çevre dostu bir teknolojidir. Bu yöntemler, Şekil 3.1’de gösterildiği gibi elektrokoagülasyon, elektroflotasyon ve EO gibi farklı teknikleri kapsar ve genellikle biyolojik olarak parçalanamayan veya dirençli kirleticiler için uygundur. Elektrokimyasal süreçlerin en önemli avantajları arasında çevre dostu oluşu, reaktif tüketiminin azlığı ve sistemin kolay kontrol edilebilirliği sayılabilir [3] .

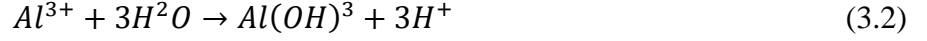


Şekil 3.1: Elektrokimyasal arıtım yöntemleri.

#### 3.1. Elektrokoagülasyon

Elektrokoagülasyon, çözünür metal elektrotların (genellikle demir veya alüminyum) elektrolitik çözünmesiyle koagülantların oluştuğu bir yöntemdir. Oluşan metal iyonları, atıksudaki kirleticilerle reaksiyona girerek çökeltiler oluşturur. Ana reaksiyonlar Alüminyum ve Demir elektrot kullanıldığında aşağıdaki şekilde gösterilebilir:

Alüminyum elektrot kullanıldığında:



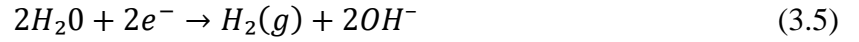
Demir elektrot kullanıldığında:



Elektrokoagülasyon, renk, ağır metaller ve yağ gibi kirleticilerin gideriminde etkili bir yöntemdir. Ancak, proses sırasında oluşan çamurun bertaraf edilmesi önemli bir sorundur [26].

### 3.2. Elektroflotasyon

Elektroflotasyon, atıksudaki askıda katı maddelerin veya yağların, elektrotlar tarafından üretilen gaz kabarcıkları (genellikle hidrojen ve oksijen) ile taşındığı bir ayrıştırma yöntemidir. Bu gaz kabarcıkları, elektrotlarda gerçekleşen su elektrolizi ile oluşturulur. Reaksiyon aşağıdaki şekilde gösterilebilir:



Oluşan hidrojen ve oksijen kabarcıkları, partiküllerin yüzeye çıkarak ayrılmasını sağlar. Elektroflotasyonun yönteminin enerji tüketimi düşük olmasına rağmen, gaz kabarcıklarının boyutlarının kontrol edilmesi ve sistemin ölçeklenebilirliği gibi konularda bazı zorluklar yaratır [27].

### 3.3. Elektrooksidasyon

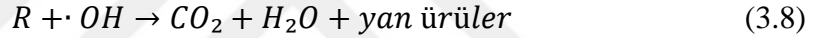
EO, su arıtımında organik kirleticilerin oksidasyonu için elektrokimyasal anot reaksiyonlarının kullanıldığı bir yöntemdir. Bu süreç, suyun içinde çözülmüş organik ve inorganik bileşiklerin, genellikle BDD, PbO<sub>2</sub>, SnO<sub>2</sub> veya RuO<sub>2</sub> gibi metal oksit anotlar

aracılığıyla oksitlenmesini sağlar [28]. Süreçte uygulanan elektrik potansiyeli, elektrot yüzeyinde  $\cdot OH$  gibi güçlü oksidanların oluşmasına neden olur ve bu reaktif türler organik kirleticileri parçalayarak zararsız bileşiklere dönüştürür. EO, diğer ileri oksidasyon yöntemleriyle hibrit olarak kullanıldığında (rneğin Fenton oksidasyonu veya ozonlama ile kombinasyon halinde), organik madde mineralizasyonunu arttırarak suyun arıtılmasını daha verimli hale getirebilir [29]. EO yönteminin anot ve katottaki temel reaksiyon denklemleri R, organik kirletici bileşiğini temsil etmek üzere aşağıda gösterilmiştir.

Anotta hidroksil radikali retimi:



BDD anotunda aktif oksidan retimi:



Organik kirleticilerin oksidasyonu:



EO prosesi bir sonraki başlıkta detaylı olarak incelenmiştir.

## 4. ELEKTROOKSİDASYON

EO, birçok endüstriyel prosesin biyolojik olarak kolayca parçalanamayan ve maliyetli fiziksel veya fiziko kimyasal ön arıtmalar gerektiren zehirli atıksular üretmesinden dolayı alternatif bir atıksu arıtma yöntemi haline gelmiştir ve geleneksel proseslerin yerini almaktadır [30].

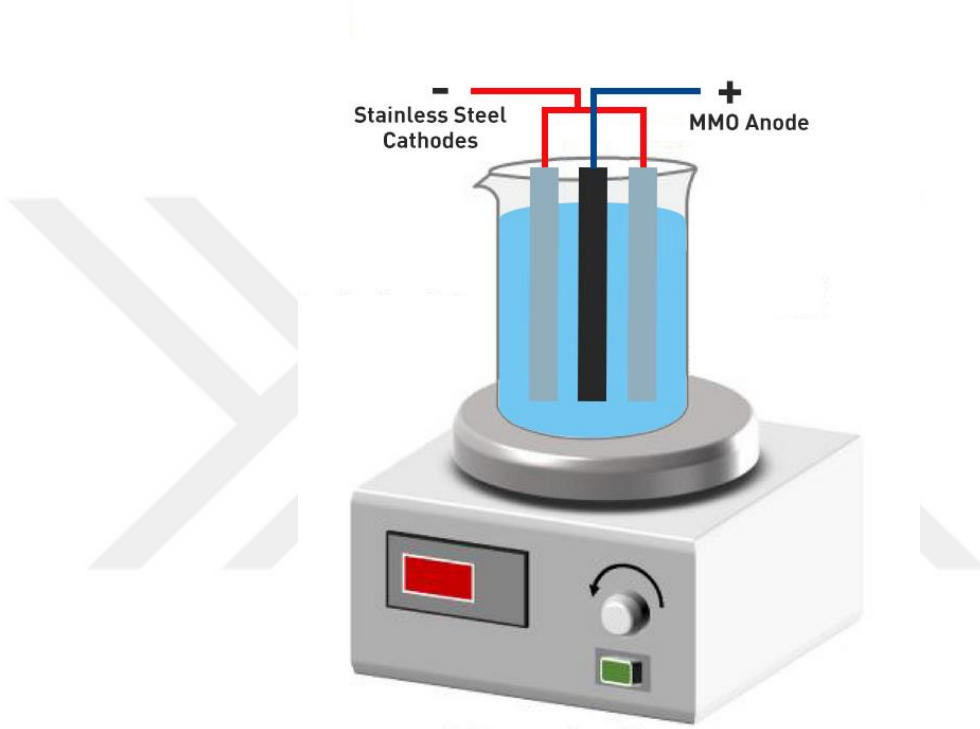
EO proseslerinde, özellikle anot türü kritik bir öneme sahiptir. Anot malzemesinin katalitik aktivitesi ve dayanıklılığı, prosesin etkinliğini belirlemektedir. Yüksek oksijen evrimi potansiyeline sahip anotlar, atık suların tamamen CO<sub>2</sub> gibi son ürünlere dönüştürülmesini sağlamaktadır. Bu tür anotlar arasında bor BDD, RuO<sub>2</sub> ve SnO<sub>2</sub> gibi malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle BDD anotları, kimyasal ve elektrokimyasal kararlılıkları sayesinde endüstriyel atık su arıtımında öne çıkmaktadır [31].

Elektrokimyasal proseslerde, organik bileşiklerin parçalanması doğrudan ve dolaylı oksidasyon olarak ikiye ayrılır. Doğrudan oksidasyon anot yüzeyinde meydana gelirkeni dolaylı oksidasyon ise aracılık eden oksidanlar tarafından sıvı kütle fazında meydana gelir [32].

Günümüzde, BDD anotlar, EO proseslerinde yaygın olarak kullanılmakta ve endüstriyel atıksulardaki organik kirleticilerin gideriminde en umut verici teknolojilerden biri olarak değerlendirilmektedir. Diğer elektrot türleriyle karşılaştırıldığında, iletken elmas anotlar hem oksijen hem de hidrojen oluşumunda üstün kararlılık ve verimlilik sergilemektedir. Bu özellikleri sayesinde BDD anotlar, elektrosentez süreçlerinde ve organik kirleticilerin, özellikle benzoik asit ve karboksilik asit gibi bileşiklerin oksidasyonunda sıklıkla tercih edilmektedir [31].

EO prosesinde kullanılan elektrot malzemelerinin, yüksek fiziksel ve kimyasal kararlılığa, korozyon direncine ve yüksek elektriksel iletkenliğe sahip olması gerekmektedir. Bunun yanı sıra, elektrotların katalitik aktivitesi, seçicilik, düşük maliyet ve uzun ömür gibi özellikler taşıması, sürecin etkinliği ve sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir

[33]. Bu özellikleri nedeniyle BDD anotlar, hem teknik hem de ekonomik avantajlar sunarak modern atıksu arıtma teknolojilerinde öne çıkmaktadır. Elektrooksidasyon prosesinin şematik gösterimi **Şekil 4.1**'de verilmiştir.



**Şekil 4.1:** Elektrooksidasyon prosesinin şematik gösterimi.

EO prosesinin etkinliği, anot malzemesinin kimyasal dayanıklılığı, elektrokimyasal aktivitesi ve uzun ömürlülüğü ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, daha etkili ve kararlı anot malzemelerinin geliştirilmesi, EO teknolojisinin performansını artırmak için kritik bir gerekliliktir [34].

EO'un başlıca avantajları arasında; biyolojik olarak parçalanamayan ve toksik kirleticilerin (örneğin pestisitler, farmasötik kalıntılar) tamamen mineralize edilmesi, reaktif gereksinimi düşük olup, genellikle sadece elektrik enerjisi ve su kullanılması, proses parametrelerinin (akım yoğunluğu, pH, sıcaklık) kolayca kontrol edilebilir olması ve farklı türde atıksulara uygulanabilir olması sayılabilir.

EO'un kısıtlayıcı özellikleri incelendiğinde ilk sırada elektrot maliyetleri gelmektedir. Yüksek performanslı elektrotlar (örneğin, BDD) maliyetlidir ve ekonomik uygulanabilirliği sınırlayabilir. Dolaylı oksidasyon sırasında, özellikle klor içeren oksidantların kullanımıyla, yan ürünlerin (örneğin, kloraminler, halojenli organik bileşikler) oluşumu çevresel riskler oluşturabilir. İşlemin enerji gereksinimi, geniş ölçekli uygulamalarda maliyet artışına yol açabilir.

EO, mevcut teknolojik ilerlemelerle daha ekonomik ve verimli hale getirilebilir. Özellikle, hibrit sistemlerin geliştirilmesi (örneğin, EO-membran teknolojileri veya EO-adsorpsiyon) ve yenilikçi elektrot malzemelerinin kullanılması, bu yöntemin daha geniş çapta benimsenmesini sağlayabilir [3]. Elektrooksidasyon prosesleri aşağıdaki iki başlıkta incelenmiştir.

#### 4.1. Direkt Oksidasyon

Direkt oksidasyon, kirleticilerin elektrot yüzeyindeki aktif oksijen M(O) ile doğrudan reaksiyona girmesiyle gerçekleşir. Bu süreç, genellikle aşağıdaki gibi tanımlanır:

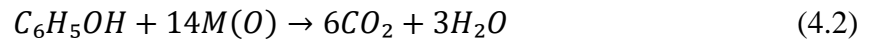


R: Organik kirletici,

M(O): Elektrot yüzeyindeki aktif oksijen türü,

R': Oksitlenmiş ürün (karbondioksit ve su gibi) olarak ifade edilir.

Özellikle BDD elektrotlar, yüksek oksidasyon potansiyelleri nedeniyle bu mekanizma için tercih edilen elektrot malzemeleridir. BDD elektrotlarla fenol gibi dirençli organik kirleticiler tamamen mineralize edilebilir:



Bu yöntem, yüksek etkinlik ve kolay kontrol avantajlarına sahiptir. Ancak, elektrot malzemesinin maliyeti ve aşınmaya karşı dayanıklılığı, uygulamayı sınırlandırabilir [4].

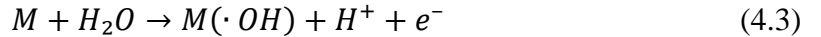
Kirleticilerin doğrudan oksidasyonu iki adımda gerçekleşmektedir. Birinci adımda kirleticilerin yığın çözeltiliden anot yüzeyine difüzyonu ve ikinci adımda kirleticilerin anot yüzeyinde oksidasyonudur.

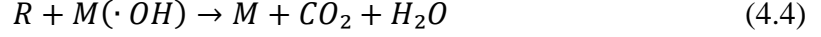
Direkt oksidasyon, elektrot yüzeyinde herhangi bir başka maddenin katılımı olmaksızın elektron transferinin gerçekleştiği bir mekanizmadır. Bu süreç, anot yüzeyinde gerçekleşir ve organik kirleticiler ile anot arasında direkt yük transfer reaksiyonlarını içerir. Direkt oksidasyon genellikle organik kirleticilerin anot yüzeyine önceden adsorpsiyonunu gerektirir. Ancak, bu adsorpsiyon süreci hız belirleyici bir adım olarak kabul edilir ve suyun oksidasyon reaksiyonundan daha düşük potansiyel farkında gerçekleştirildiğinde, elektrot yüzeyi pasifleşmesine sebep olur ve EO prosesinin etkinliğinin düşmesine karşı hassas hale gelir. Elektrokimyasal işlemin verimliliği, substratın kütle transferi ile elektrot yüzeyindeki elektron transferi arasındaki etkileşime bağlıdır.

Elektron transfer hızını belirleyen temel faktörler arasında elektrot aktivitesi ve akım yoğunluğu yer almaktadır. Organik kirleticilerin anodik oksidasyonu sırasında iki farklı mekanizma gözlemlenir. Birinci mekanizma, elektrokimyasal dönüşüm olarak adlandırılır ve organik bileşiklerin kısmi oksidasyonunu içerir. İkinci mekanizma ise elektrokimyasal yanma sürecidir; bu süreçte organik bileşikler tamamen su, karbondioksit ve diğer inorganik bileşenlere dönüştürülür.

Anodik oksidasyon teorik olarak düşük potansiyel farkında, oksijen oluşumundan önce gerçekleştirilebilir. Ancak, bu koşullarda genellikle anot yüzeyinde polimerik bir tabakanın birikmesi, yani pasivizasyon olarak adlandırılan durum, yüzeyin hızla devre dışı kalmasına yol açar. Bu deaktivasyon, anot yüzeyinin adsorpsiyon özelliklerine, organik bileşiklerin konsantrasyonuna ve kimyasal yapısına bağlıdır.

Pasivizasyondan kaçınmak için, oksijen oluşumundaki ara türlerin katılımıyla suyun deşarj potansiyel farkı bölgesinde oksidasyon gerçekleştirilir. Bu yöntem, hem anot yüzeyinin uzun süre aktif kalmasını sağlar hem de oksidasyon sürecinin etkinliğini artırır. Böylelikle, elektrokimyasal işlemlerin daha sürdürülebilir ve verimli hale getirilmesi mümkün olmaktadır [34].





Eşitlik 4.3 ve 4.4'te, M metal yüzeyi ve R organik türleri temsil etmektedir. Prosesin verimliliği, çalışma koşulları ve kullanılan elektrot malzemesinin yapısı ile doğrudan ilişkilidir. Özellikle, IrO<sub>2</sub>, RuO<sub>2</sub> ve Pt gibi düşük oksijen oluşum aşırı potansiyel farkına sahip anotlar, aktif özellikleri ile dikkat çeker ve organik kirleticilerin kısmi ve seçici oksidasyonunu destekler.

Buna karşın, SnO<sub>2</sub>, PbO<sub>2</sub> ve BDD gibi yüksek oksijen oluşum aşırı potansiyel farkına sahip anotlar, aktif olmayan davranış sergiler ve organik kirleticilerin tamamen karbondioksite dönüştürülmesi için ideal elektrotlar olarak kabul edilir. Özellikle BDD elektrotları, üstün kimyasal ve elektrokimyasal kararlılıkları, uzun ömürleri ve yüksek performansları nedeniyle atıksu arıtımında büyük ilgi görmektedir [4][33].

Bu özellikler, elektrot seçiminde kritik bir rol oynar ve farklı uygulamalar için uygun malzemenin belirlenmesine olanak tanır. Böylece, proses verimliliği artırılarak çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik sağlanabilir.

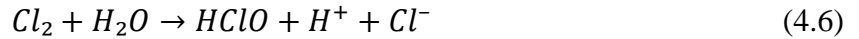
## 4.2. Dolaylı Oksidasyon

Dolaylı oksidasyonda, elektrot yüzeyinde güçlü oksidantlar (örneğin, klor gazı, hipoklorit, ozon) üretilir ve bu oksidantlar kirleticilerin oksitlenmesini sağlar. Örneğin:

Klor gazı üretimi:



Klor gazının hipoklorite dönüşümü:



Bu güçlü oksidantlar, organik kirleticilerle reaksiyona girerek onları daha az zararlı bileşiklere dönüştürür.

Dolaylı oksidasyon, yüksek oksidasyon potansiyeline sahip türlerin üretimi sayesinde geniş bir kirletici yelpazesini giderebilir. Ancak, klor gibi türlerin kullanımı sırasında yan ürün oluşumu dikkatle kontrol edilmelidir [33].

Dolaylı EO prosesi, organik kirleticilerin, anot yüzeyinde üretilen elektroaktif türlerin aracılığıyla güçlü bir oksitleyici ajanın oluşumunu sağladığı ve bu ajanın çözeltideki kirletici parçaladığı bir yöntemdir. Bu süreçte, organik maddeler ile anot yüzeyi arasında direkt elektron transferi gerçekleşmez, böylece elektrot kirlenmesi önlenir. Redoks reaktifleri, anodik ya da katodik prosesler aracılığıyla elektrokimyasal olarak üretilir ve bu da sürecin etkinliğini artırır.

Dolaylı EO'da, kirleticiler, anot üzerinde elektrokimyasal olarak üretilen oksidanlar aracılığıyla çözeltinin büyük bir kısmında oksitlenir. Anodik olarak üretilen oksidanlar arasında aktif klor, en yaygın ve geleneksel olarak kullanılan oksitleyici türlerden biridir ve özellikle atıksu arıtımı uygulamalarında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu yöntem, hem elektrot yüzeyinin uzun süreli stabilitesini korur hem de çözeltide daha geniş bir etki alanı sunarak organik kirleticilerin etkili bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlar [34].

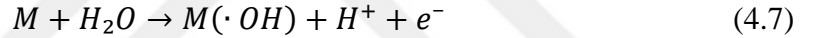
Dolaylı EO prosesinde en yaygın olarak üretilen ürün, anot yüzeyinde oluşan aktif klorudur. Aktif klorun yaygın kullanımının temel nedeni, atık sularda bulunan klorür iyonlarının bol miktarda bulunması ve aktif klorun oldukça etkili bir oksitleyici olmasıdır. Gaz halindeki klor, hipokloröz asit veya hipoklorit iyonları formundaki aktif klor, çözeltide doğal olarak mevcut olan ya da çözeltiliye eklenen klorürlerden anodik süreçler yoluyla üretilir [35].

Klor aracılığıyla oksidasyon, çok çeşitli model kirleticilerin arıtımında etkili bir yaklaşım olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem, özellikle yüksek sodyum klorür konsantrasyonlarına sahip atıksuların, örneğin zeytinyağı üretiminden kaynaklanan atıksular veya tekstil endüstrisi atıksularının arıtımında uygun bir çözümdür [35]. Literatürde aktif klor üretimi için yaygın olarak kullanılan elektrot malzemeleri arasında platin ve metal oksitlerin karışımları (örneğin  $RuO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $IrO_2$  gibi) bulunmaktadır. Bu malzemeler, klor oluşumu için yüksek elektrokatalitik aktivite, uzun vadeli kararlılık ve ekonomik avantajlar sunmaktadır [35].

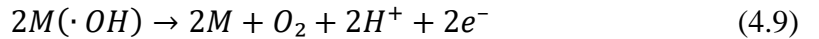
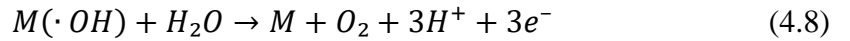
Dolaylı EO proseslerinde katot da önemli bir rol oynamaktadır. Katot, kirleticilerin doğrudan indirgenmesi ya da katodik reaksiyonlar yoluyla hidrojen üretimi sayesinde

enerji dönüşümü sağlama işlevini yerine getirir. Alternatif olarak, hidrojen peroksit elektro üretimi, katot malzemesi ile asidik veya alkali koşullarda oksijen indirgeme reaksiyonları aracılığıyla desteklenmektedir. Bu süreçte gaz difüzyon elektrotları, örneğin karbon nanotüpler ve PTFE bazlı malzemeler, katot olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Karbon-PTFE tabanlı gaz difüzyon elektrotları, diğer malzemelere kıyasla en yüksek H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonunu üretme kapasitesine sahiptir. Eğer H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, pH kontrolü yapılmayan bölünmemiş bir hücrede katodik olarak üretilirse, bu işleme "anodik oksidasyon ile birlikte H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oksidasyonu" adı verilmektedir [35].

Dolaylı EO sırasında yaygın olarak üretilen diğer oksidanlar arasında hidrojen peroksit, peroksodisülfürik asit ve ozon yer almaktadır [33]. Reaktif oksijen türlerinin üretimi, özellikle anot yüzeyine adsorbe edilen •OH elektrojenerasyonu üzerine odaklanır. Hidroksil radikalleri (E°=2,8V), dolaylı EO'un temel oksidanlarından biridir ve bu süreç, organik kirleticilerin etkili bir şekilde mineralize edilmesine olanak tanır [36].



Eşitlik 4.7'de M anodu ve M(•OH) ise adsorbe olan hidroksil radikalini belirtmektedir. Bu reaksiyonla birlikte oksijen oluşumuna sebep olan reaksiyonlar da mümkündür. Gerçekleşen reaksiyonlar Eşitlik 4.8 ve 4.9'da verilmiştir [36].



Dolaylı EO prosesinde, organik kirleticilerin giderimi için anodik olarak üretilen klor ve hipoklorit türleri yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca, kirleticiler, elektrokimyasal olarak üretilen hidrojen peroksit ile etkili bir şekilde bozunabilmektedir.

### 4.3. Elektrokimyasal Oksidasyon Prosesini Etkileyen Parametreler

Elektrokimyasal oksidasyonun etkinliği, uygulama sırasında kontrol edilen çeşitli operasyonel parametrelere bağlıdır. Bu parametreler, atıksuyunun içeriğine, kullanılan

elektrot tipine ve sistem tasarımına göre değişiklik gösterebilir. Etkin bir arıtım süreci için her bir parametrenin dikkatle optimize edilmesi gerekir.

### 4.3.1. Elektrot Tipi

Elektrot tipi, elektrokimyasal oksidasyonun en kritik parametrelerinden biridir. Elektrotlar, oksidasyon sürecinde hem doğrudan reaksiyonların gerçekleştiği yüzeyler hem de dolaylı oksidasyonun gerçekleştiği bölgeler olarak işlev görür. Sıkça kullanılan elektrot malzemeleri arasında BDD , platin, grafit ve titanyum dioksit bulunur.

**BDD Anotlar:** Yüksek oksidasyon potansiyeline sahip olup, organik kirleticilerin ve ara ürünlerin neredeyse tamamen mineralize edilmesini sağlar. Geniş bir pH aralığında kimyasal olarak kararlıdır ve uzun ömürlüdür. Elektrot yüzeyinde kirletici birikimi minimaldir, bu da elektrotun etkinliğini korur [37].



Can ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, kozmetik endüstrisi atık suyunun arıtımında BDD anot kullanılmış ve 1,5 amper akım altında 120 dakikalık işlem sonunda TOK giderim verimi %68 olarak rapor edilmiştir [38].

**Titanyum Tabanlı Anotlar:** Titanyum tabanlı anotlar, hafifliği, yüksek mukavemeti ve özellikle ıslak kloro karşı üstün korozyon direnci ile bilinir. Platin grubu metallerle kaplandığında yüksek elektrokatalitik performans sergiler ve dayanıklı yapısı sayesinde uzun çalışma ömrüne sahiptir.

Titanyum anot ve paslanmaz çelik katot kullanılarak gerçekleştirilen bir EO çalışmasında, 60 dakikalık elektroliz süresi sonunda tetrasiklin giderim verimi %55,35 olarak bulunmuştur [37].

**Platin Kaplı Anotlar:** Yüksek elektrik iletkenliğine sahiptir, bu da verimli elektrokimyasal reaksiyonlara olanak tanır. Asidik ve bazik ortamlarda kimyasal olarak kararlıdır ve birçok organik ve inorganik bileşiğin oksidasyonunda etkilidir.

Arslantaş ve arkadaşlarının yaptığı aynı çalışmada, platin kaplı anot kullanılarak yapılan deneylerde, 1,5 amper akım altında 120 dakikalık işlem sonunda TOK giderim verimi %48 olarak elde edilmiştir [37].

**PbO<sub>2</sub> Anotlar:** Yüksek oksidasyon potansiyeline sahip olup, organik kirleticilerin gideriminde etkilidir ve diğer bazı anot malzemelerine göre daha ekonomiktir.

PbO<sub>2</sub> anotlarının EO verimini artırmasına, tekstil ve farmasötik atık suların arıtımında önemli başarılar elde edilmiştir. Örneğin, PbO<sub>2</sub> anot kullanılarak yapılan bir çalışmada, organik kirleticilerin %90'ın üzerinde giderildiği bildirilmiştir. Ayrıca, PbO<sub>2</sub> anotların düşük maliyetli olması ve kimyasal dayanıklılığı sayesinde uzun süreli işlemlerde verimli bir şekilde kullanılabilirdiği gözlemlenmiştir [3].

**Karışık Metal Oksit (MMO) Kaplı Anotlar:** Yüksek korozyon direncine sahiptir ve deniz suyu gibi zorlu ortamlarda kullanılabilir. Düşük aşırı potansiyel gereksinimi sayesinde enerji tasarrufu sağlar ve dayanıklı kaplamaları sayesinde uzun süreli kullanım imkanı sunar.

Literatürde RuO<sub>2</sub>-IrO<sub>2</sub> kaplı anotların kullanıldığı bir çalışmada, 1,5 A akım altında 120 dakikalık EO prosesi sonucunda TOK giderim verimi %42,6 olarak rapor edilmiştir [38].

**Grafit Elektrotlar:** Düşük maliyetli elektrotlardır ancak yüzey korozyonuna karşı daha hassastır. Elektrot seçimi, kirleticilerin türüne ve arıtım hedeflerine bağlı olarak yapılmalıdır .

### 4.3.2. Elektrotlar Arası Mesafe

Elektrotlar arası mesafe, reaksiyon bölgesinde akım yoğunluğunun dağılımını ve kütle transferini etkiler. Elektrotlar arasındaki mesafe arttığında, çözeltideki elektrik direnci artar ve enerji tüketimi yükselir. Ancak mesafe çok düşük tutulduğunda, reaksiyon bölgeleri sınırlanabilir ve gaz kabarcıklarının birikmesi reaksiyon etkinliğini azaltabilir [27]. Optimal elektrot mesafesi, genellikle 1-3 cm arasında seçilir. Kus ve arkadaşları yerel bir tekstil firmasının atıksuyunu EO yöntemiyle arıtılmıştır. Anot olarak sprey kaplama yöntemiyle üretilen Ti/TiO<sub>2</sub>-RuO<sub>2</sub>-IrO<sub>2</sub> elektrotları reaktör içerisinde 1.2 cm aralıklar ile yerleştirmişlerdir [39].

Fu ve arkadaşları 5 cm'den 25 cm'ye kadar farklı aralıklarda yerleştirdikleri elektrotlar ile uyguladıkları EO prosesinde Ce-Graphene oxide co-doped PbO<sub>2</sub> kullanarak fenol giderimi yapmış ve benzer sonuçlar bulamarak, elektrotlar arası mesafenin değiştirilmesinin çalışma üzerine etkisi olmadığına karar vermişlerdir [40].

Başka bir çalışmada yüksek derecede aspirin içeren bir atıksuyun La-Y co-doped PbO<sub>2</sub> anot elektrotu kullanılarak uygulanan prosesinde, 14 cm<sup>2</sup> (7 cm x 2 cm) titanyum levha katot olarak kullanıldı ve elektrotlar arasındaki boşluk 4 cm olarak belirlendi [41].

### 4.3.3. Akım Yoğunluğu

Akım yoğunluğu, elektrot yüzeyine uygulanan elektrik akımı miktarını ifade eder ve oksidasyon süreçlerinde anahtar bir role sahiptir [33]. Düşük akım yoğunluğu, hidroksil radikali oluşumunu sınırlarken; çok yüksek akım yoğunluğu, yan reaksiyonların (örneğin, oksijen evrimi) artmasına neden olabilir:



Optimal akım yoğunluğu, genellikle kullanılan elektrot malzemesine ve kirletici türüne bağlıdır [4].

Tekstil atıksuyu arıtımı için EO ve kimyasal koagülasyon süreçleri optimize edilmiştir. Akım yoğunluğunun (15 mA/cm<sup>2</sup>) kimyasal oksijen ihtiyacı (COD) giderimi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir [42].

Başka bir çalışmada elektrokimyasal oksidasyonun akım yoğunluğu ile ilişkilendirilmesi incelenmiştir. 5-23 mA.cm<sup>-2</sup> aralığında farklı akım yoğunluklarının tekstil endüstrisinden kaynaklanan atık su arıtımı üzerindeki etkileri ele alınmıştır [43].

Okur ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, Ti/RuO<sub>2</sub>-IrO<sub>2</sub> elektrotlarının farklı akım yoğunluklarında (10-30 mA.cm<sup>-2</sup>) performansı incelenmiş ve BDD elektrotlarıyla kıyaslama yapılmıştır. Akım yoğunluğunun organik madde giderimi üzerindeki kritik rolü vurgulanmıştır [44].

Başka bir çalışmada ise elektrokoagülasyon ve ÊO'un kombine kullanımıyla tekstil atıksuyu arıtımı araştırılmıştır. Akım yoğunluğunun (5-25 mA.cm<sup>-2</sup>) reaksiyon kinetiği ve

verim üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir [45]. Literatürde farklı akım değerlerinde yapılan çalışmalar **Tablo 4.1**'de verilmiştir.

**Tablo 4.1:** Farklı akım değerlerinde yapılan çalışmalar.

| Kirletici                | Giderim Verimi                    | Süre   | Akım                     | pH | Elektrot tipi  | Kaynak |
|--------------------------|-----------------------------------|--------|--------------------------|----|--|--------|
| Sentetik RB5 çözeltisi   | KOİ: %52<br>TOK: %60<br>Renk: 90% | 20 dk  | 50 mA.cm <sup>-2</sup>   | 2  | Ti/ NiO elektrot   | [46]   |
| Sentetik RB5 çözeltisi   | Renk: %99<br>KOİ: %73.77          | 180 dk | 10 mA.cm <sup>-2</sup>   | 4  | Ti/(RuO <sub>2</sub> )0.8-(Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )0.2 elektrot                          | [47]   |
| RB5 içeren atıksu        | Renk: %91.6                       | 50 dk  | 28.8 mA.cm <sup>-2</sup> | 4  | Ce(IV) çözeltisi ile katkılanmış Ti elektrot   | [48]   |
| RB5 içeren atıksu        | Renk: %99<br>KOİ: %90             | 30 dk  | 50 mA.cm <sup>-2</sup>   | 2  | Si/BDD ve Nb/BDD elektrot  | [49]   |
| Sentetik RB5 çözeltisi   | Renk: 99%<br>KOİ: %80<br>TOK: %39 | 60 dk  | 50 mA.cm <sup>-2</sup>   | 7  | Ti/ZrO-RuO <sub>2</sub> -Sb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -SnO <sub>2</sub> elektrot               | [50]   |
| Reaktif Mavi 19 atıksuyu | Renk: %100<br>TOK: %79            | 30 dk  | 41 mA.cm <sup>-2</sup>   | 7  | BDD  | [51]   |
| Sentetik RB5 çözeltisi   | KOİ: %87<br>TOK: %83              | 50 dk  | 50 mA.cm <sup>-2</sup>   | 2  | Ti/PtO <sub>x</sub> -RuO <sub>2</sub> -SnO <sub>2</sub> -Sb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> elektrot | [52]   |

#### 4.3.4. pH

pH, hem doğrudan hem de dolaylı oksidasyon süreçlerini etkileyen önemli bir parametredir. Asidik ortamlarda hidrojen iyonlarının bolluğu reaksiyon hızını artırırken, bazik ortamlar genellikle dolaylı oksidasyonun (örneğin hipoklorit oluşumu) daha etkili olduğu koşullardır:



Optimal pH değeri, tekstil atıksuyunun özelliklerine bağlı olarak 3-10 arasında değişiklik gösterebilir. Ayrıca literatürde farklı pH değerlerinde yapılan çalışmalar aşağıdaki **Tablo 4.2**'de gösterilmiştir.

**Tablo 4.2:** Farklı pH değerlerinde yapılan çalışmalar.

| Kirletici                    | Giderim Verimi             | Süre   | Akım                    | pH              | Elektrot tipi  | Kaynak |
|------------------------------|----------------------------|--------|-------------------------|-----------------|--|--------|
| Ham tekstil atıksuyu         | KOİ: %87                   | 90dk   | 5.8 mA.cm <sup>-2</sup> | 7.5             | Ti/SnO <sub>2</sub> -Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> elektrot | [53]   |
| Metilen mavisi boyası        | KOİ: %62.3<br>- %46        | 50 dk  | 10 mA.cm <sup>-2</sup>  | 4.9<br>-<br>6.9 | Grafit katkılı PbO <sub>2</sub>                              | [54]   |
| metronidazole sulu çözeltisi | KOİ: %21.77                | 120 dk | 10 mA.cm <sup>-2</sup>  | 6.4             | Co modified PbO <sub>2</sub> elektrot                        | [41]   |
| Yoğun aspirin içeren atıksu  | KOİ: %55.09                | 150 dk | 50 mA.cm <sup>-2</sup>  | 4.3<br>-<br>3.1 | La-Y katkılı PbO <sub>2</sub> elektrot                       | [55]   |
| Acit Turuncu 7 azo boyası    | KOİ: %49.88<br>TOK: %44.94 | 60 dk  | 20 mA.cm <sup>-2</sup>  | 5.0             | Fe katkılı PbO <sub>2</sub> elektrot                         | [56]   |
| Fenol                        | KOİ: %87.3                 | 20 dk  | 20 mA.cm <sup>-2</sup>  | 6.0             | Ce-Grafen oksit katkılı PbO <sub>2</sub> elektrot            | [40]   |

#### 4.3.5. Süre

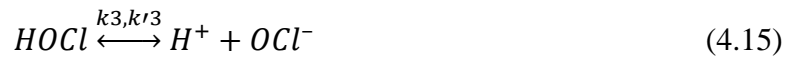
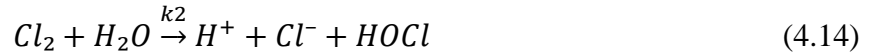
Elektrokimyasal oksidasyonun etkinliği, reaksiyon süresine doğrudan bağlıdır. Sürenin artması, daha fazla kirleticinin mineralize edilmesini sağlar. Ancak uzun süreli işlemler enerji tüketimini artırır ve ekonomik açıdan maliyetli hale gelebilir. Sürenin optimize edilmesi, hem arıtma etkinliğini hem de maliyeti dengelemek için önemlidir [4].

Reaksiyon süresi boyunca ortamda oluşan ara ürünlerin yeniden reaksiyona girme ihtimali de dikkate alınmalıdır. Özellikle uzun süreli proseslerde, bazı istenmeyen yan ürünlerin oluşabileceği rapor edilmiştir. Bu nedenle, optimum sürenin belirlenmesi sadece giderim verimliliği açısından değil, prosesin güvenliği ve çevresel etkileri bakımından da önem arz etmektedir. Ayrıca literatürdeki farklı çalışma süreleri de **Tablo 4.1** ve **Tablo 4.2**'de verilmiştir. Özellikle tablodan görüldüğü üzere aynı sürede RB5 için farklı akım yoğunlukları ve süreler etkili olmuştur.

#### 4.3.6. İletkenlik

Atıksuyun iletkenliği, elektrik akımının çözeltilerde kolaylıkla geçişini sağlar. Yüksek iletkenlik, enerji tüketimini azaltır ve reaksiyonların hızını artırır. İletkenliği artırmak için genellikle NaCl veya Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> gibi elektrolitler eklenir. Ancak fazla miktarda tuz kullanımı, yan ürünlerin oluşum riskini artırabilir [35].

Dolaylı EO'da, daha iyi iletkenlik sağlamak ve hipoklorit iyonlarının oluşumunu desteklemek amacıyla atık suya sodyum veya potasyum klorür tuzları eklenir [57]. Klorür iyonlarının anodik oksidasyon reaksiyonları sonucu klor oluşumu şu şekilde gerçekleşir:



Oluşan hipoklorit iyonları, kirleticilerin bozunmasında ana oksitleyici ajan olarak görev yapar. Organik kirleticilerin doğrudan elektro-oksidasyon hızı, anodun katalitik aktivitesine, organik bileşiklerin anodun aktif noktalarına difüzyon hızına ve uygulanan akım yoğunluğuna bağlıdır [58]. Bu sebeple iletkenlik gideriminde önemli bir parametredir. Literatür iletkenlik ile ilgili farklı çalışmalar **Tablo 4.3**'te verilmiştir.

**Tablo 4.3:** Farklı iletkenlik değerlerinde yapılan çalışmalar.

| Kirletici                 | Giderim Verimi        | Süre      | Akım                   | İletkenlik              | Elektrot tipi  | Kaynak |
|---------------------------|-----------------------|-----------|------------------------|-------------------------|--|--------|
| RB5 Çözeltisi             | KOİ: %90              | 60 dakika | 20 mA.cm <sup>-2</sup> | 5 mS.cm <sup>-1</sup>   | BDD  | [59]   |
| Reaktif Mavi 19 Çözeltisi | Renk: %92<br>KOİ: %85 | 75 dakika | 18 mA.cm <sup>-2</sup> | 5.5 mS.cm <sup>-1</sup> | BDD  | [60]   |
| Tekstil Atıksuyu          | KOİ: %90              | 120 dk    | 10 mA.cm <sup>-2</sup> | 5.5 mS.cm <sup>-1</sup> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -<br>Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -<br>Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> katkılı<br>grafen<br>elektrot | [61]   |
| RB5 Çözeltisi             | KOİ: %87              | 90 dk     | 15 mA.cm <sup>-2</sup> | 6.2 mS.cm <sup>-1</sup> | Bi-doplu<br>PbO <sub>2</sub> elektrot  | [62]   |

#### 4.3.7. Sıcaklık

Sıcaklık, elektrokimyasal reaksiyonların kinetiğini etkileyerek oksidasyon hızını artırabilir. Bununla birlikte, sıcaklık artışı, yan reaksiyonların hızını da artırabilir ve elektrot malzemelerinin korozyonuna neden olabilir. Optimal sıcaklık genellikle 20-40°C arasında tutulur [27].

Sonuç olarak, elektrokimyasal oksidasyon ile tekstil atıksuyunun arıtılabilirliği, yukarıda açıklanan parametrelerin dikkatli bir şekilde optimize edilmesiyle artırılabilir. Her bir parametrenin etkisi, sistem tasarımı ve kullanılan elektrot türüne bağlı olarak değişiklik gösterir. Bu nedenle, her bir parametre, artırım verimini ve ekonomik sürdürülebilirliği artıracak şekilde sistematik olarak analiz edilmelidir. . Literatürdeki sıcaklık ile ilgili farklı çalışmalar **Tablo 4.4**'te verilmiştir.

**Tablo 4.4:** Farklı sıcaklık değerlerinde yapılan çalışmalar.

| Kaynak | Elektrot Tipi           | Sıcaklık (°C) | Süre (dk) | Kirletici                   | KOİ (%) | TOK (%) | Renk (%) |
|--------|-------------------------|---------------|-----------|-----------------------------|---------|---------|----------|
| [3]    | PbO <sub>2</sub>        | 30            | 120       | Tekstil atıksuyu (sentetik) | 78      | -       | 94       |
| [35]   | Ti/SnO <sub>2</sub> -Sb | 40            | 90        | Tekstil boyar maddeleri     | 82      | 65      | 96       |
| [63]   | Grafit felt             | 25-35         | 60        | Renkli organikler (karışık) | 88      | 70      | 97       |

## 5. NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ VE ELEKTROT MALZEMELERİ

Nadir toprak elementleri (NTE), periyodik tablonun lantanit serisindeki 15 elementin yanı sıra skandiyum (Sc) ve itriyum (Y) ile birlikte değerlendirilen özel bir metal grubudur. Bu elementler, eşsiz elektronik, manyetik ve optik özellikleri nedeniyle ileri teknolojilerde ve endüstriyel uygulamalarda kritik bir rol oynamaktadır. NTE'ler, genellikle bastnazit, monazit ve ksenotim gibi minerallerde bulunur ve oksit formlarında ticari olarak pazarlanır. Bununla birlikte, metalik bileşikler ve alaşımlar şeklinde de kullanılmaktadır [64].

NTE'lerin benzersiz özellikleri, onları birçok teknolojik alanda vazgeçilmez kılmaktadır. Örneğin, yüksek manyetik momentleri nedeniyle neodimyum (Nd) ve samaryum (Sm) gibi elementler güçlü mıknatıs üretiminde kullanılırken, Ce ve La katalitik uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu elementler, elektrot malzemelerinde performansı artırmak ve ileri oksidasyon teknolojilerinde etkinliği yükseltmek için kritik öneme sahiptir. Özellikle Ce ve La, elektrot yüzeyinin kararlılığını ve oksidasyon kapasitesini artırarak tekstil atıksularının arıtılması gibi çevresel uygulamalarda önemli rol oynar. Ayrıca, bu elementlerin kullanımı, hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından avantajlar sunar [65].

Nadir toprak elementleri, yüksek elektriksel ve termal iletkenlik, düşük yoğunluk ve güçlü manyetik özellikler gibi ayırt edici niteliklere sahiptir. Lantanitler genellikle 3+

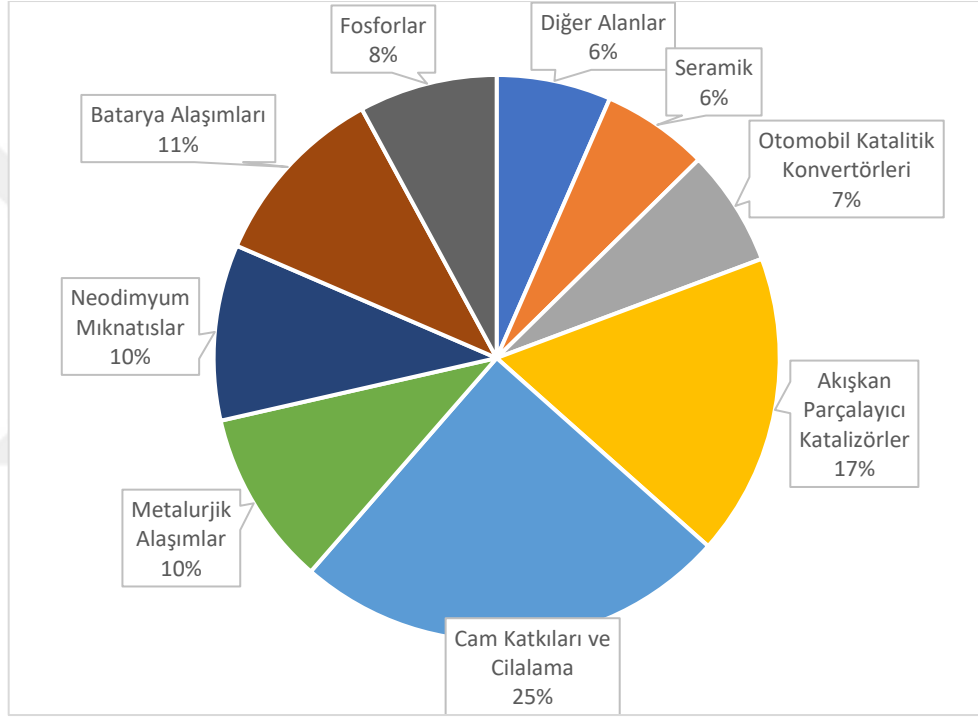
oksidasyon durumunda kararlıdır ve geniş iyonik yarıçapları sayesinde oksit, nitrat ve fosfat gibi bileşikler oluşturabilir. Bu özellikler, elektrot malzemelerinde yüzey özelliklerini iyileştirme ve katalitik aktivitelerini artırma açısından faydalıdır [66]. NTE'lerin elektrot malzemelerinde kullanılmasının temel avantajları arasında reaktif oksijen türlerinin ( $\cdot\text{OH}$ ) üretimini hızlandırarak oksijen evrimi reaksiyonlarında etkinliği artırması, elektrotların aşınmaya karşı dayanıklılığını artırarak uzun süreli performans sağlaması ve daha düşük enerji tüketimiyle yüksek verimli oksidasyon süreçlerini mümkün kılması yer alır. Özellikle seryum oksit ( $\text{CeO}_2$ ), oksijen iyonlarını taşıma kabiliyeti ve kimyasal kararlılığı ile öne çıkar. Bu özellik, reaktif oksijen türlerinin oluşumunu destekleyerek yakıt hücreleri, katalizörler ve elektrokimyasal sensörler gibi ileri teknolojilerde kullanımını mümkün kılar [67]. Ayrıca, lantanyum katkılı nikel-metal hidrür piller, enerji depolama uygulamalarında önemli bir yer tutmaktadır [68].

NTE'ler, elektronik cihazlardan yenilenebilir enerji sistemlerine kadar geniş bir uygulama yelpazesinde kritik öneme sahiptir. Örneğin, neodimyum-demir-bor ( $\text{NdFeB}$ ) mıknatıslar, yüksek enerji yoğunlukları nedeniyle rüzgar türbinlerinde ve elektrikli araçlarda kullanılırken, samaryum-kobalt ( $\text{SmCo}$ ) mıknatıslar yüksek sıcaklıklarda bile manyetik özelliklerini koruyabilmektedir [69]. Ayrıca, tekstil endüstrisinde kullanılan elektrokimyasal oksidasyon süreçlerinde, NTE katkılı elektrotlar, organik kirleticilerin tamamen mineralize edilmesine olanak tanımaktadır[36].

2014 yılı verilerine göre, dünya genelinde toplam nadir toprak elementleri rezervlerinin yaklaşık 131 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir. Bu rezervlerin büyük bir kısmını Çin Halk Cumhuriyeti elinde bulundururken, Türkiye'de yaklaşık 4 milyon ton NTE rezervi bulunmaktadır. Türkiye'deki NTE yataklarının en önemli kısmı, Eskişehir-Sivrihisar bölgesinde 15 km<sup>2</sup>'lik bir alan üzerinde yer almaktadır. Bunun yanı sıra, Malatya, Çanakkale, Kırşehir ve Van gibi illerde de NTE rezervlerine rastlanmaktadır. Eskişehir-Sivrihisar bölgesinde bulunan başlıca NTE'ler lantanyum, La ve neodimyumdur. Bölgedeki bu elementlerin kaynağının, hidrotermal çözeltiler ve bu çözeltilerin volkanik faaliyetlerle ilişkili olduğu düşünülmektedir.

NTE'lerin kullanım alanları ülkelere ve ürün çeşitliliğine bağlı olarak geniş bir yelpazeye yayılmaktadır. Gözlük camlarından telefon kulaklıklarına kadar uzanan bu kullanım

alanları, modern teknolojilerde vazgeçilmez bir yer edinmiştir. Örneğin, optik cihazlar, elektronik ürünler ve manyetik uygulamalarda yaygın olarak kullanılan NTE'ler, teknolojik gelişimin temel taşlarından biri olarak kabul edilmektedir. Farklı alanlarda kullanım oranlarını gösteren analizler, NTE'lerin çok yönlü bir malzeme grubu olduğunu ortaya koymaktadır [70]. Nadir torak elementleri kullanım alanları yüzdesi **Şekil 5.1**'de verilmiştir [71]



**Şekil 5.1:** Nadir torak elementleri kullanım alanları yüzdesi [71]

Sonuç olarak, nadir toprak elementleri, benzersiz fiziksel ve kimyasal özellikleri ile modern teknolojilerde ve çevresel uygulamalarda vazgeçilmez bir rol oynamaktadır. Yüksek manyetik moment, katalitik aktivite, oksijen depolama kapasitesi ve yüzey kararlılığı gibi özellikleri, bu elementlerin geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmasını sağlamaktadır. Ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliği destekleyen NTE'ler, hem teknolojik yeniliklerin hem de sürdürülebilir kalkınmanın temel taşlarından biridir [72].

## 5.1. Lantan'ın Elektrokimyasal ve Çevresel Uygulamalardaki Önemi

La, periyodik tabloda lantanitler grubuna adını veren, simgesi La, atom numarası 57 ve atom ağırlığı  $138,91 \text{ g.mol}^{-1}$  olan bir kimyasal elementtir. Hafif NTE grubunda yer alan La,  $920^{\circ}\text{C}$ 'lik ergime ve  $3464^{\circ}\text{C}$ 'lik kaynama noktalarına sahiptir. Fiziksel olarak metalik La mavimsi gümüş beyazlığında, kırılabilen, bükülebilen ve bıçakla kesilebilecek kadar yumuşak bir yapıya sahiptir. Mutlak sıfır derecesine yakın sıcaklıklarda süper iletkenlik özelliği göstermesi, onu dikkat çekici kılan özelliklerinden biridir. Ancak, hava ile temas ettiğinde hızla oksitlenebildiği için koruyucu önlemler alınması gerekir. Kimyasal olarak oldukça aktif olan La, soğuk suda yavaş etki ederken, suyun sıcaklığı arttıkça reaksiyon hızı artar ve hidroksit oluşumu gözlemlenir. Seyreltik asitlerde kolayca çözünür ve karbon, azot, bor, selenyum, silisyum, fosfor, kükürt ve halojenlerle doğrudan reaksiyon verir [64]. Bununla birlikte, La ve bileşiklerinin düşük ila orta seviyelerde zehirliliğe sahip olması nedeniyle, bu maddelerin deriyle temasından kaçınılmalıdır .

La, hegzagonal kristal yapıya sahip bir elementtir.  $310^{\circ}\text{C}$ 'de hegzagonal yapıdan yüzey merkezli kübik yapıya ve  $865^{\circ}\text{C}$ 'de ise hacim merkezli kübik yapıya dönüşür. Doğal La,  $138\text{La}$  ve  $139\text{La}$  olan iki kararlı izotopun karışımından oluşur ve bunun yanında on yedi farklı radyoaktif izotopu tespit edilmiştir [73]. İyonik yarıçapı  $0,104 \text{ nm}$  olan La, kimyasal olarak aktiftir ve NTE'ler arasında en aktif elementlerden biri olarak kabul edilir [74].

La, teknolojik ve endüstriyel uygulamalarda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Cam üretiminde, özellikle yüksek kırılma indisine sahip optik merceklerin imalatında önemli bir rol oynar. La oksit ( $\text{La}_2\text{O}_3$ ), camın alkali direncini artırır ve özel optik cam yapımında kullanılır. Bunun yanı sıra La, dökme demir üretiminde katkı maddesi olarak ve yüksek oksijen depolama kapasitesine sahip oksitlerin üretiminde de önemli bir yer tutar. Elektrot malzemelerinde La oksit, yüzey stabilitesini artırarak oksidasyon süreçlerini optimize eder. Bu özellik, tekstil atıksularının arıtılması gibi çevresel uygulamalarda hidroksil radikallerinin üretimini hızlandıran bir katalizör destek malzemesi olarak işlev görmesini sağlar [75]. Ayrıca, La içeren elektrotlar yüksek oksijen evrimi potansiyeli ve uzun süreli yüzey kararlılığı sağlayarak elektrokimyasal işlemlerde avantaj sunar.

La, lantanitler grubunda yer alması nedeniyle, 4f yörüngesindeki elektronlarının farklı enerji seviyelerine geçişiyle lüminesans özelliği gösterir. Bu özelliğiyle, La içeren lantanit bileşikleri ışıklandırma uygulamalarında yaygın olarak kullanılır. Özellikle film endüstrisinde stüdyo ışıklandırmaları ve projeksiyon çalışmaları gibi alanlarda önemli bir yere sahiptir. Ayrıca La, hibrit araç bataryalarında, fiber optik kablolarda veri aktarım hızını artırmak için, yüksek kaliteli kamera merceklerinde, gece görüş dürbünlerinde ve teleskoplarda kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, X-ışını cihazlarında, pH ayarının gerektiği uygulamalarda ve hava kirliliği kontrolünde de önemli bir rol oynar [76].

Sonuç olarak, La, kimyasal aktivitesi, fiziksel ve optik özellikleriyle ileri teknolojilerde kritik bir elementtir. Hem endüstriyel hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir katkı sağlayarak, modern uygulamalarda geniş bir yelpazede kullanımı ile dikkat çekmektedir.

## **5.2. Seryum'un Elektrokimyasal ve Çevresel Uygulamadaki Önemi**

Ce, eşsiz oksidasyon ve indirgenme özellikleri sayesinde elektrokimyasal ve çevresel uygulamalarda önemli bir yere sahiptir. Özellikle  $Ce_2O_3$ , oksijen iyonlarının taşınmasında kritik bir rol oynar ve bu özelliğiyle elektrokimyasal süreçlerde reaktif oksijen türlerinin oluşumunu artırır. Bu durum, Ce içeren elektrotların EO sırasında organik kirleticilerin tamamen mineralize edilmesine olanak tanıyarak çevre dostu bir çözüm sunmasını sağlar [77].

Ce'un elektrokimyasal süreçlerdeki en dikkat çekici özelliklerinden biri, +3 ve +4 oksidasyon durumlarında bulunabilmesidir. Bu özellik, Ce'un geniş bir redoks potansiyel aralığında işlev görmesini sağlarken, farklı analitlerin tespitini kolaylaştırır. Ayrıca, yüksek katalitik aktivitesi sayesinde kimyasal reaksiyonları hızlandırır ve elektrokimyasal sensörlerin verimliliğini artırır. Özellikle Ce'un yüksek kimyasal stabilitesi, sensörlerin zorlu çevresel koşullarda uzun ömürlü ve güvenilir bir şekilde çalışmasına katkıda bulunur. Ce, yüzey aktif katalizörler olarak kimyasal reaksiyonları hızlandıran bir

katalizör destek malzemesi olarak görev yapar ve elektrot yüzeyindeki kimyasal reaksiyonları hızlandırırken malzeme aşınmasını azaltarak elektrotların ömrünü uzatır.

Ce'un bir diğer avantajı ise iyi elektron transferi ve iletkenlik özellikleri sunmasıdır. Bu sayede sensörlerin hızını ve duyarlılığını artırırken, yüksek yüzey reaktivitesi ve güçlü adsorpsiyon kapasitesi sayesinde gaz ve sıvı fazlardaki analitlerin etkin bir şekilde tespit edilmesini sağlar. Bu çok yönlü özellikleri nedeniyle Ce, biyosensörler, çevresel sensörler ve su kalitesi izleme gibi birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Ekonomik avantajları da Ce'un kullanımını cazip hale getirmektedir. Doğada bol miktarda bulunması ve diğer nadir toprak elementlerine göre daha düşük maliyetli olması, Ce bazlı sensörleri maliyet etkin bir seçenek haline getirir. Ayrıca, Ce ve bileşenlerinin genellikle düşük toksisiteye sahip olması, biyosensörler ve tıbbi uygulamalarda güvenli kullanım imkânı sunar [78].

Sonuç olarak, Ce, yüksek oksijen depolama kapasitesi, katalitik aktivitesi, kimyasal stabilitesi ve çoklu oksidasyon durumları ile elektrokimyasal sensör uygulamalarında öne çıkan bir malzeme olarak değerlendirilmektedir. Bu özellikler, Ce bazlı sensörleri hassas, güvenilir ve çok yönlü bir çözüm haline getirmektedir.

## 6. ELEKTROOKSİDASYON PROSELERİNDE KULLANILAN ANOTLARIN ÜRETİMİNDEKİ TERMAL KAPLAMA YÖNTEMLERİ

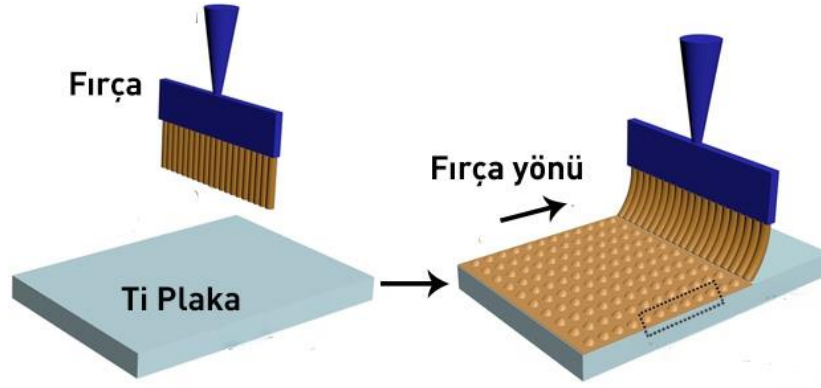
EO proseslerinde anotların yüzey özellikleri, süreç verimliliği ve dayanıklılığı açısından kritik öneme sahiptir. Anotların performansı, üretim sürecinde kullanılan kaplama yöntemleriyle doğrudan ilişkilidir. Yüksek oksidasyon potansiyeli, kimyasal dayanıklılık ve mekanik kararlılık sağlayan kaplamalar, genellikle metal oksitler, nadir toprak elementleri veya hibrit malzemelerle hazırlanır. Bu bölümde, EO anotlarının üretiminde kullanılan termal kaplama yöntemleri ve farklı teknikler ele alınmıştır.

EO anotlarının üretiminde kullanılan kaplama yöntemleri, kaplamanın türüne ve uygulama alanına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Spreyleme, döndürmeli kaplama ve daldırma gibi yöntemler, yüksek kaliteli ve dayanıklı anotlar üretmek için yaygın olarak tercih edilmektedir. Her yöntemin kendine özgü avantajları ve sınırlamaları vardır; bu nedenle, uygulanacak sistemin gereksinimlerine uygun yöntemin seçilmesi gereklidir.

Termal kaplama yöntemleri, anot yüzeyine yüksek sıcaklıkta metal oksit veya diğer malzemelerin biriktirilmesini içerir. Bu yöntem, kaplama malzemesinin yüzeye güçlü bir bağ oluşturmasını sağlar ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı anotlar üretmek için idealdir. Termal kaplama süreçlerinde genellikle platin grubu metaller ( $\text{RuO}_2$ ,  $\text{IrO}_2$ ) veya nadir toprak element oksitleri ( $\text{CeO}_2$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3$ ) gibi malzemeler tercih edilir [63].

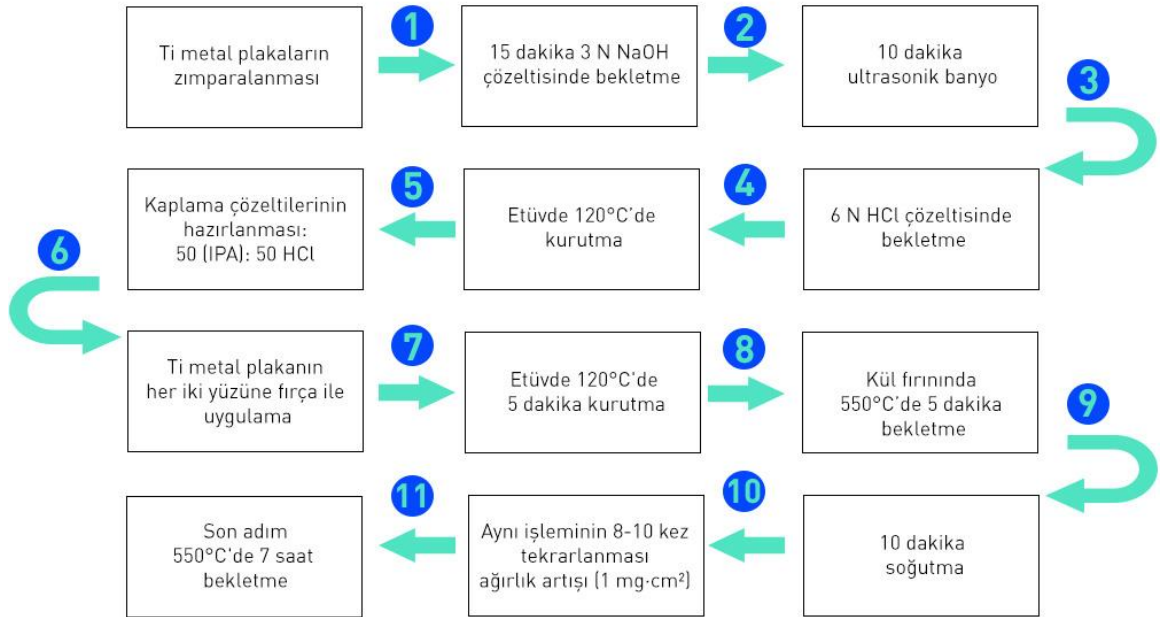
### 6.1. Fırça İle Yayma (Spread Yayma) Yöntemi

Yayma yöntemi, kaplama malzemesinin bir çözücü içerisinde dağıtılarak yüzeye manuel veya otomatik olarak uygulanmasıdır. Genellikle, düşük maliyetli ve kolay uygulanabilir olması nedeniyle tercih edilir. Bu yöntem, tekstil atıksuyu gibi dirençli organik kirleticilerin arıtımı için kullanılan grafit bazlı anotların hazırlanmasında yaygın olarak uygulanır [83]. Fırça ile yayma yöntemi şematik olarak Şekil 6.1'te gösterilmiştir.



**Şekil 6.1:** Fırça ile yajma yintemi Şematik gösterimi.

Avantajları arasında dŐuk malzeme israfı ve kontrollü kaplama kalınlığı sayılabilir. Dezavantajları ise büyük ölçekli üretim için uygun olmaması ve kaplama malzemesinin çözeltiden ayrıŐma riskidir. Fırça ile yajma yöntemindeki kaplama adımları **Şekil 6.2**'te adım adım gösterilmiştir.

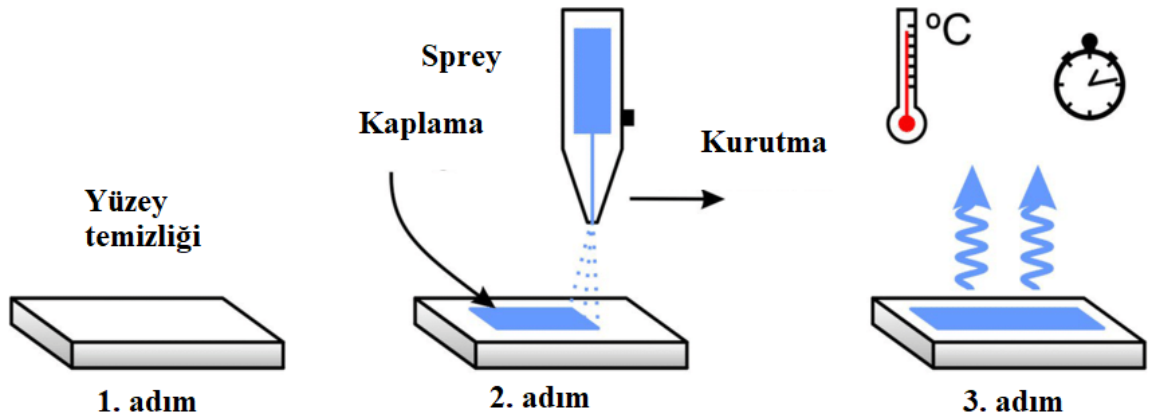


**Şekil 6.2:** Fırça ile yajma yöntemindeki kaplama adımları.

## 6.2. Spreyleme (Spraying) Yöntemi

Spreyleme yöntemi, kaplama malzemesinin ince bir tabaka halinde anot yüzeyine püskürtülmesini içerir. Bu yöntemde, metal oksit solüsyonları veya süspansiyonları kullanılır ve genellikle kaplama işlemi sonrası termal işlem uygulanır. Spreyleme yöntemi, BDD veya  $TiO_2$ -bazlı elektrotlar gibi yüksek performanslı anotların hazırlanmasında kullanılır [79]. Düşük maliyetli ve hızlı uygulama, büyük yüzey alanlarında homojen kaplama sağlama, kaplama kalınlığının kolay kontrolü avantajları arasında yer alır. Dezavantajları ise yüzey pürüzlülüğü kontrolünün zor olmasıdır.

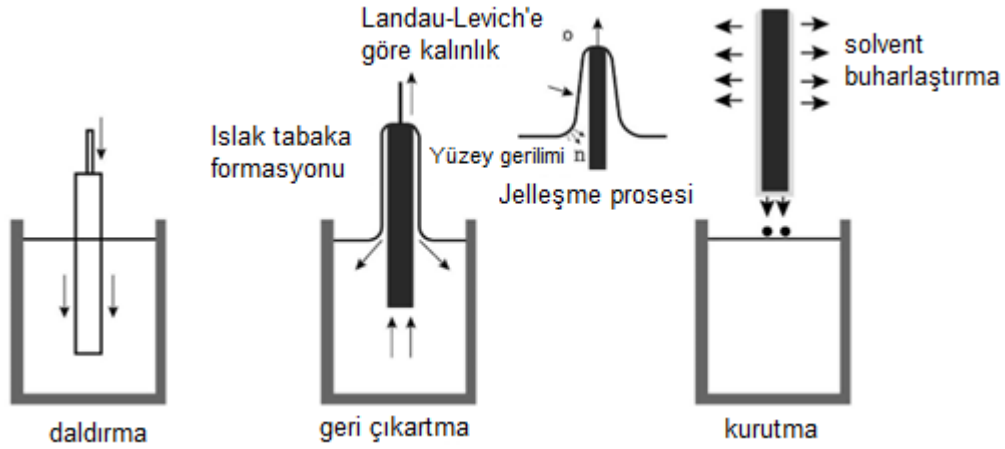
Melentiev ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, kaplama tabakası, spreyleme parçacıklarının uçuş sırasında veya yüzeye çarpma anında erimesi ve deformasyona uğramasıyla oluşur. Spreylenen tozun eritilmesi için gerekli ısı, kullanılan yöntemle ilgili olarak elektriksel, kimyasal veya kinetik enerji kaynaklarından sağlanır. Tüm yöntemlerde, kaplama işlemi için kullanılan ham madde (kaplama öncülü), bir elektrik arkı, alev, plazma veya önceden ısıtılmış gaz kullanılarak eritilen veya hızlandırılan ve hedef yüzeye yönlendirilen bir tabanca içinde işlenir. Kaplama öncülü, metal, plastik veya seramikten oluşan ve toz, tel veya çubuk formunda bulunan bir malzemedir; bu malzeme, püskürtme jetinde parçacıklara ayrılarak hedef yüzeye çarptığında yapışır. Hedef yüzey tamamen kaplanana kadar gelen parçacıklar yapışarak kaplama tabakasını oluşturur. Çeşitli termal püskürtme yöntemleri ve bunların termal püskürtme özellikleri Şekil 6.3’de gösterilmektedir [80].



Şekil 6.3: Spreyleme yöntemi.

### 6.3. Daldırma (Dipping) Yöntemi

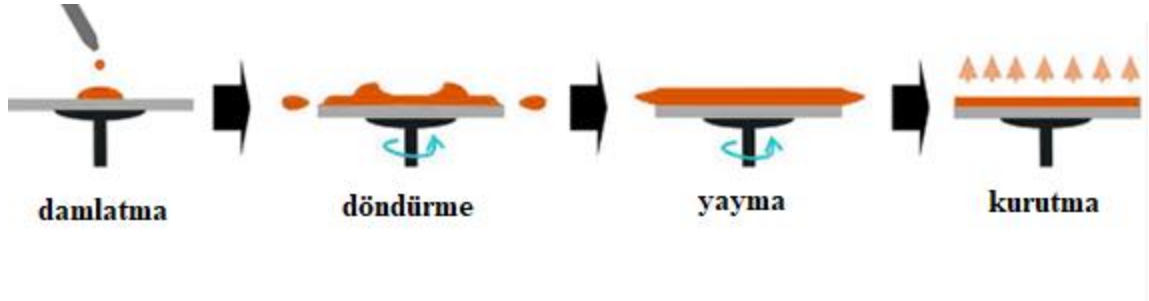
Daldırma yöntemi, anot malzemesinin kaplama solüsyonuna batırılması ve ardından kontrollü bir şekilde kurutulması esasına dayanır. Bu yöntem,  $\text{RuO}_2\text{-TiO}_2$  bazlı elektrotların hazırlanmasında yaygın olarak kullanılır. Daldırma işleminden sonra genellikle bir sinterleme işlemi uygulanarak kaplamanın yüzeye güçlü bir bağ oluşturması sağlanır [81]. Avantajları arasında homojen kaplama sağlaması, yüksek yapışma dayanıklılığı ve çok katmanlı kaplama için uygun olması sayılabilir. Dezavantajları ise kaplama kalınlığının kontrolü zor olabilir. Daldırarak kaplama yöntemi şemastik gösterimi Şekil 6.4’de gösterilmiştir.



Şekil 6.4: Daldırarak kaplama yöntemi şemastik gösterimi.

### 6.4. Döndürmeli Kaplama (Spin Coating) Yöntemi

Döndürmeli kaplama yöntemi (Şekil 6.5), kaplama çözeltisinin yüksek hızda dönen bir yüzeye uygulanmasıyla gerçekleştirilir. Bu yöntemin avantajları, ince ve homojen kaplama tabakalarının oluşturulması için idealdir.  $\text{Ti/SnO}_2\text{-Sb}$  anotların hazırlanmasında yaygın olarak kullanılır [82]. Dezavantajı ise büyük yüzey alanları için uygun değildir.



Şekil 6.5: Döndürmeli kaplama yöntemi şematik gösterimi.



## 7. TEKSTİL ENDÜSTRİSİ VE ATIKSU

Tekstil endüstrisi, küresel ekonomide önemli bir yere sahip olmasının yanında, çevresel etkileri bakımından da dikkate değer bir sektördür. Bu sektörün en çarpıcı sorunlarından biri, üretim sürecinde oluşan atıksuların çevreye olan etkileridir. Atıksular, hem fiziksel hem de kimyasal olarak çeşitli kirleticiler içerir ve bu durum, su kaynaklarının kalitesini olumsuz yönde etkiler. Bu çalışma, tekstil endüstrisinin atıksu sorununu, atıksu arıtma yöntemlerini ve çevresel yönetim stratejilerini incelemektedir.

Tekstil endüstrisi, yıllık milyarlarca dolarlık bir piyasa hacmiyle dünyanın en büyük sanayi dallarından biridir. Ancak, bu büyük ölçekli üretim faaliyetleri sırasında büyük miktarlarda su tüketilmekte ve atıksu oluşmaktadır [84]. Bu atıksular, boyalar, kimyasal katkı maddeleri ve organik yüksek yoğunluklu bileşikler [85]. Bu nedenle, tekstil atıksularının arıtılması ve yeniden kullanılabilir hale getirilmesi büyük bir önem taşımaktadır.

Tekstil üretimi süreci birçok aşamayı kapsar ve her bir aşama farklı türde atıksu oluşur. Bunlar arasında yıkama, boyama, baskı ve finisaj işlemleri yer alır. Boyama işlemi, tekstil endüstrisinde en büyük su tüketimi ve atıksu oluşumu kaynaklarından biridir. Boyalar ve kimyasal maddeler suya karışır ve bu durum çevresel sorunlara yol açar [86]. İlâveten, bu atıksular yüksek miktarda renk, kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ) içerir.

Tekstil atıksularının çevresel etkileri, su ekosistemlerini olumsuz etkileyebilir. Bu etkilerin azaltılması için etkin bir atık yönetimi şarttır. İleri arıtma teknolojileri, suyun yeniden kullanılabilir hale getirilmesini ve temiz su tüketiminin azaltılmasını sağlar [87]. Ayrıca, tekstil işletmelerinin çevre mevzuatlarına uyması ve yeşil tekstil uygulamalarını benimsemesi, sektörün çevresel etkilerini azaltabilir.

Tekstil endüstrisinin atıksu problemleri, hem çevresel hem de sosyal açıdan büyük önem taşır. Sektörün bu sorunlara etkin çözümler sunması, hem su kaynaklarını koruma hem de sürdürülebilir bir geleceği sağlama açısından önemlidir. Daha fazla bilimsel araştırma ve yenilikçi teknolojilerin uygulamaya alınması bu alanda ilerleme kaydedilmesine katkı sağlayacaktır.

## 7.1. Tekstil Endüstrisindeki Boyar Madde İçeren Atıksuların Çevre Üzerine Etkileri

Tekstil endüstrisi, yoğun su kullanımı ve kimyasal maddelerin yaygın kullanımını nedeniyle çevresel açıdan en dikkat çeken sektörlerden biridir. Ürünlerin renklendirilmesi sırasında kullanılan boyar maddeler, boyama ve yıkama süreçleri sonucunda büyük miktarda renkli atıksu oluşumuna yol açmaktadır. Bu atıksuların çevre üzerindeki etkileri, su ekosistemlerinden insan sağlığına kadar geniş bir alanda ciddi sorunlara neden olmaktadır.

Boyar madde içeren atıksuların doğal su kaynaklarına deşarj edilmesi, güneş ışığının su kolonuna nüfuz etmesini engelleyerek sucul bitkilerin fotosentez yapmasını ve dolayısıyla hayatta kalmasını olumsuz etkiler. Su kütlelerindeki ışık penetrasyonunun azalması, fotosentetik organizmaların büyümesini kısıtlar ve sucul yaşamın biyolojik dengesini bozar. Özellikle azo boyalar gibi düşük biyolojik bozunabilirliğe sahip bileşikler, kalıcı kirleticiler olarak davranır ve uzun süreli çevresel sorunlara yol açar .

Bunun yanı sıra, boyar maddeler ve parçalanma ürünleri, toksik, mutajenik veya karsinojenik özellikler taşıyabilir. Azo boyaların parçalanmasıyla oluşan aromatik amin türevleri, insan ve hayvan sağlığı üzerinde uzun vadeli olumsuz etkiler yaratabilir. Bu kimyasallar, böbrek fonksiyon bozukluğu, üreme sistemi sorunları, akciğer, beyin ve merkezi sinir sistemi hasarına neden olabileceği gibi kansere yol açma riski de taşır [88].

Boyar madde içeren atıksular, KOİ ve BOİ değerlerini artırarak su kütlelerinde oksijen eksikliğine neden olur. Bu durum, balıklar ve diğer sucul organizmalar için yaşamsal tehdit oluşturur. Ayrıca, bu tür atıksuların toksik etkileri sucul yaşamı ciddi şekilde etkileyerek ekosistemlerde geri dönüşü zor tahribatlara yol açar. İnsan sağlığı ve çevresel sürdürülebilirlik açısından bu atıksuların etkin bir şekilde arıtılması kritik bir öneme sahiptir.

Tekstil endüstrisi kaynaklı boya atıksuları, hem çevresel hem de halk sağlığı açısından ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Bu nedenle, bu atıksuların etkin arıtımı ve çevreye olan olumsuz etkilerinin azaltılması, sürdürülebilir bir çevre yönetimi için öncelikli hedeflerden biri olmalıdır.

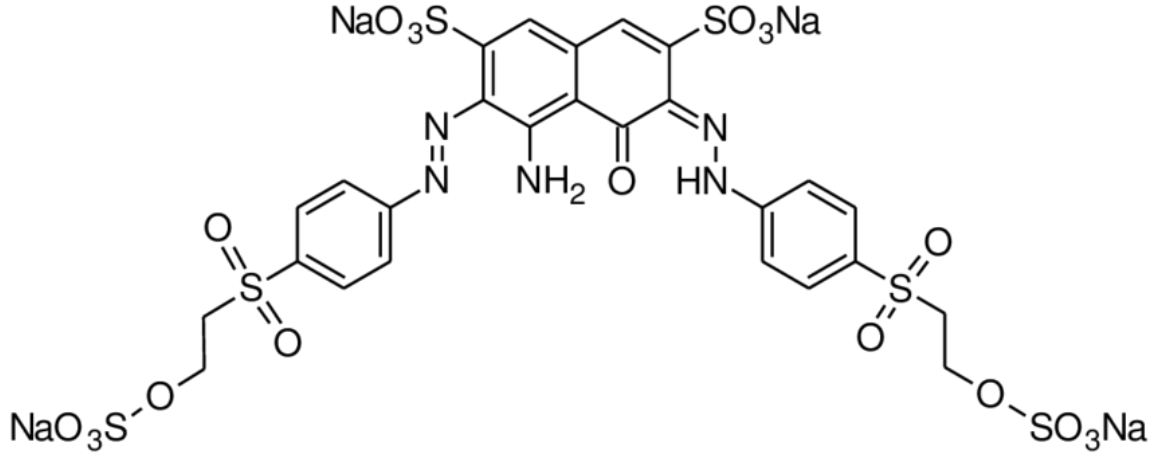
## 7.2. Reaktif Siyah 5 Boyar Maddeler

Reaktif Siyah 5 boya (reactive black 5, RB5) veya ramazol siyah B (remazol black B) olarak bilinen bu boya, tekstil endüstrisinde en yaygın kullanılan sentetik reaktif boyalar arasında yer almaktadır. RB5 boyası, suda yüksek çözünürlük göstermesi ve boya ile fiber arasında kovalent bağlar oluşturabilen reaktif gruplara sahip olmasıyla dikkat çekmektedir. Pamuk, selülozik lifler, yün ve naylon gibi malzemelerin boyanmasında sıklıkla kullanılmaktadır. RB5 boyası, azo, antrakinon, triarilmetan, ftalosiyanın, formazan ve oksazin gibi kromofor grupları içermektedir ve iki özdeş vinilsülfon reaktif grup içeren bir diazo bileşiğidir [89]. Ancak, RB5 boyası sucul ekosistemler üzerinde yüksek toksisiteye ve insan sağlığı üzerinde mutajenik etkilere neden olabilmektedir. Bunun yanı sıra, biyolojik olarak zor parçalanması ve geleneksel arıtma yöntemlerine direnç göstermesi, bu boyanın çevresel etkilerini daha da artırmaktadır.

Ramazol boyar maddeler, reaktif boyalar grubuna ait olup, özellikle pamuk ve diğer selülozik liflerin boyanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu boyalar, sulu ortamda kimyasal olarak reaktif grupları aracılığıyla liflerle kovalent bağlar oluşturur. Ancak, boyama işlemi sırasında kullanılan boyanın önemli bir kısmı (%20-50) atıksulara karışır ve çevresel sorunlara neden olur [90].

RB5 boyasının giderimine yönelik mevcut teknolojiler arasında kimyasal oksidasyon, ters ozmos ve biyolojik arıtma yöntemleri bulunmaktadır. Ancak bu yöntemler genellikle yüksek maliyet, ikincil kirletici oluşumu, rejenerasyon sorunları, çamur üretimi, uzun işlem süreleri ve düşük verimlilik gibi dezavantajlara sahiptir [91].

RB5 boyası, UV spektroskopisinde maksimum absorpsiyon dalga boyu 597 nm ( $\lambda_{max} = 597$  nm) olan bir madde olarak tanımlanır. Moleküler ağırlığı 991,8 g/mol olup kapalı formülü  $C_{26}H_{21}N_5Na_4O_{19}S_6$  olarak verilmiştir [92]. RB5 boyar maddesinin kimyasal yapısı **Şekil 7.1**'de verilmiştir.



Şekil 7.1: RB5 boyar maddesinin kimyasal yapısı.

Ramazol boyar maddeler, genellikle vinil sülfon ve triklorotriazin gibi reaktif gruplar içerir. Bu gruplar, boyaların sulu ortamda stabil kalmasını ve biyolojik olarak zor parçalanmasını sağlar. Örneğin, Ramazol Blue, yüksek moleküler ağırlıklı ve suda çözünür yapısıyla doğal ortamlarda uzun süre kalıcı olabilir.

Boyar maddeler, su kaynaklarında görsel kirlilik yaratarak estetik sorunlara ve kamuoyu endişelerine yol açar. Ayrıca, sucul bitkilerin ışık alımını engelleyerek fotosentezi kısıtlamaktadır [93].

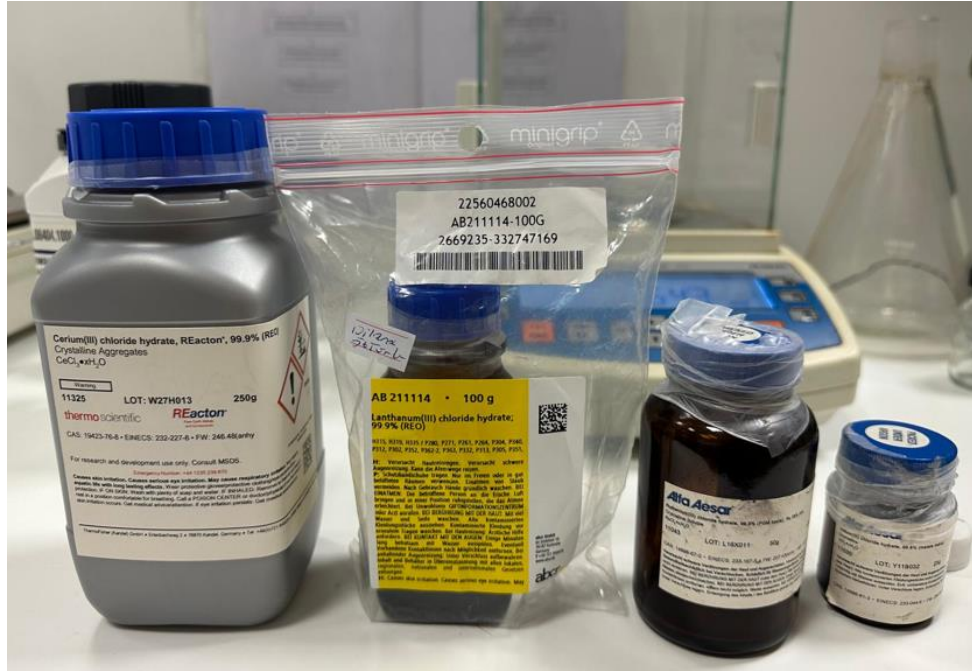
Ramazol boyalar, yüksek kimyasal dayanıklılıkları nedeniyle geleneksel biyolojik arıtma yöntemleriyle etkin bir şekilde giderilememektedir. Bu nedenle, EO, ileri oksidasyon prosesleri (AOP) ve adsorpsiyon gibi yöntemlerin birlikte kullanılması önemlidir. Özellikle EO süreci, RB5 gibi boyar maddelerin yalnızca renk giderimini değil, aynı zamanda organik yapılarını tamamen parçalayarak mineralizasyonlarını sağlamada yüksek verimlilik sunmaktadır. [94][95]

## 8. MATERYAL VE YÖNTEM

### 8.1. Kimyasallar ve Sentetik Çözeltinin Hazırlanması

RB5 ( $C_6H_{21}N_5Na_4O_{19}S_6$ ), Merck (Darmstadt, Almanya) firmasından temin edilmiştir. RB5 boyası, stok çözelti olarak 1000 ppm konsantrasyonunda hazırlanmıştır. Daha sonra deneyler, test setinin 50, 100, 300 ve 500 ppm olarak distile su ile seyreltilmesi suretiyle gerçekleştirilmiştir.

Ruthenyum (III) klorür hidrat (%99,9), iridyum (III) klorür hidrat (%99,8) ise Alfa Aesar (Massachusetts, ABD) firmasından, lantan (III) klorür hidrat (%99,8) ve seryum (III) klorür hidrat (%99,9) ise Merck (Darmstadt, Almanya) firmasından temin edilmiştir. Kullanılan tüm kimyasallar analitik saflıktadır. pH kontrollü çalışmalarda, sülfürik asit ve sodyum hidroksit çözeltileri 0.02 N olarak hazırlanmış ve çözeltilerin iletkenliğini artırmak amacıyla destek elektrolit olarak standart sodyum klorür (NaCl) eklenmiştir. Kimyasalların görselleri Şekil 8.1’de verilmiştir.



Şekil 8.1: Kaplama sırasında kullanılan kimyasallar.

## 8.2. Tekstil Atıksuyunun Temini ve Karakterizasyonu

Çalışmada kullanılan tekstil atıksuyu Çorlu/Türkiye bölgesindeki bir tekstil fabrikasından temin edilmiştir. 24 saat içerisinde analiz edilen numune ile tekstil atıksuyunun karakterizasyonu **Tablo 8.1**'de verilmiştir.

**Tablo 8.1:** Kullanılan atıksuyun karakterizasyonu.

| Parametre                         | Değer   |
|-----------------------------------|---------|
| pH                                | 8.5±0.3 |
| İletkenlik (mS.cm <sup>-1</sup> ) | 4       |
| KOİ (mgL <sup>-1</sup> )          | 1380    |
| Askıda katı (mg.L <sup>-1</sup> ) | 80±5    |
| TOK (mg.L <sup>-1</sup> )         | 445±15  |

## 8.3. Laboratuvar Üretimi Elektrot Kaplaması ve Analizleri

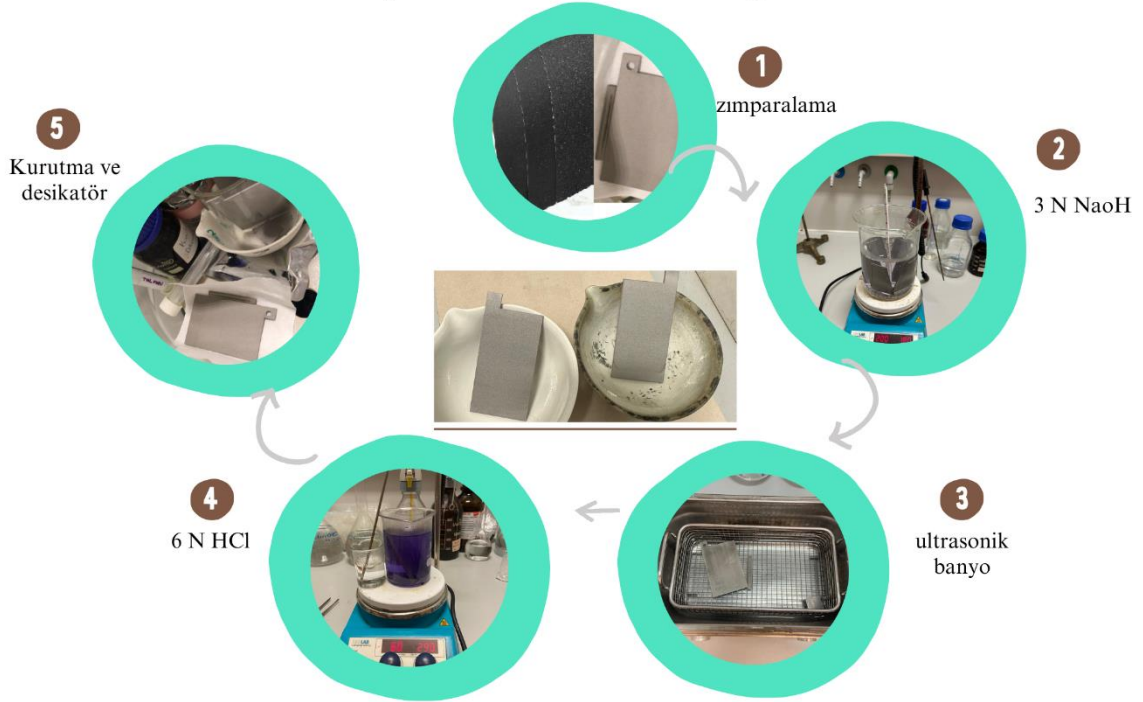
Bu çalışmada, elektrotlar fırça ile yayma yöntemi kullanılarak kaplanmıştır. Elektrot için substrat malzemesi olarak 7,5 cm × 4 cm × 0,2 cm boyutlarında yüksek saflıkta Ti metal plaka (Grade 2) seçilmiş ve kaplama çözeltilerinin hazırlanmasında kullanılan Ti:Ru:Ir:Ce:La nominal metal oranları belirlenen mol yüzdelerine göre belirlenmiştir.

Ti metal plaka, istenmeyen oksitlerin giderilmesi ve metal oksit kaplamanın yüzeye uygun şekilde yapışmasını sağlamak amacıyla ön işleme tabi tutulmuştur. Bu işlemler sırası **Şekil 8.2**'de verilmiştir.

- Ti metal plakalar yüzey pürüzlülüğünü gidermek 200-600 ve 800 numaralı silikon karbür zımpara kağıdı ile zımparalanmıştır.

- Sonrasında plakalar distile su ile yıkanmış ve yüzeyde olabilecek yağ ve kir gibi istenmeyen maddelerin uzaklaştırılması için 15 dakika boyunca 3 N NaOH çözeltisinde bekletilmiştir.
- Ti plakasının her iki yüzü 10 dakika boyunca ultrasonik banyoda işlem görmüştür.
- Ti plakaların yüzeyini pürüzlendirmek ve kaplama dayanıklılığını arttırmak için şeffaf renkten mor renge dönüşene kadar 6 N hidroklorik asit (HCl) çözeltisinde bekletilmiştir.
- Ti plakalar distile su ile durulanmış ve tekrar ultrasonik banyo işlemine tabi tutulmuştur.
- Son aşamada ise, Ti plakalar 120°C’de kurutulduktan sonra sabit ağırlık ölçümleri için desikatörde saklanmıştır.

### Kaplama Ön İşlemi Döngüsü



**Şekil 8.2:** Kaplama ön işlem adımları.

Ti plakalar ön işlemden geçirildikten sonra, fırça ile yayarak kaplama işlemi aşağıdaki adımlar takip edilerek uygulanmıştır:

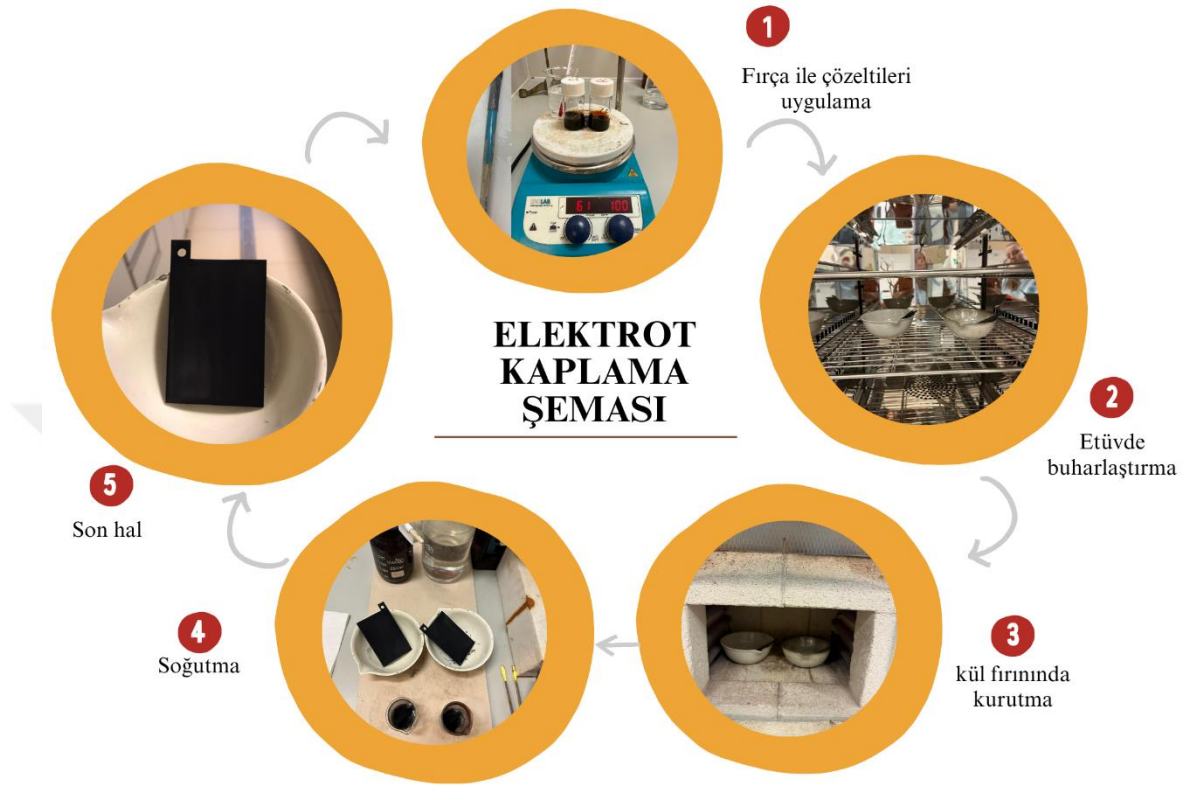
- Öncelikle kaplama çözeltileri hazırlanmıştır. Bu çözeltiler, **Tablo 8.2**'de verilen oranlara göre hazırlanan molar kütleler, 50 izopropil alkol (IPA): 50 HCl içeren çözeltilere ilave edilerek çözülmüştür.
- Hazırlanan kaplama çözeltisi, ön işlemde geçirilmiş Ti metal plakanın bir yüzüne fırça ile uygulanmıştır.
- Birinci aşamada fırça ile kaplanmış metal plakalar, çözücülerinin buharlaşması için etüvde 120°C'de 5 dakika boyunca kurutulmuş
- İkinci aşamada ise plakalar kül fırınında 550°C'de 5 dakika boyunca bekletilmiştir.
- Son adım olarak, kaplanan her Ti plaka, bir sonraki işleme geçmeden önce 10 dakika soğumaya bırakılmıştır.

Bu üç aşama, hazırlanan kaplama çözeltisi tamamen tükenene kadar plakanın her iki yüzüne de sırasıyla uygulanarak tekrarlanmıştır.

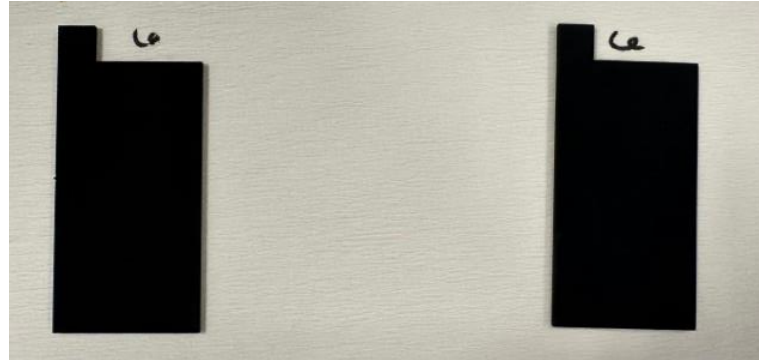
Kaplama-kurutma-ısıtma-soğutma süreci 8-10 kez tekrarlanmış ve Ti plakanın kaplamasının tamamlandığı, metal oksit yüklemesiyle ağırlık artışı ( $1 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) sağlanarak doğrulanmıştır. Ti plakalardaki oksit yükleme işlemi yeterli ağırlığa ulaştıktan sonra elektrotlar, kül fırınında 550°C'de 7 saat boyunca bekletilmiş ve ardından oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. **Şekil 8.3**'te kaplama yapılırken takip edilen adımları gösteren bir şema verilmiştir. Kaplaması tamamlanan elektrok görselleri **Şekil 8.4**'te verilmiştir.

**Tablo 8.2:** Elektrot isimleri ve kompozisyonları.

| Katkılandırılan Elektrotların Molar Yüzdeleri | Katkılandırma Yapılan Elektrotların Toplam Kompozisyonları |
|---|--|
| 5% La   | IrO <sub>2</sub> 35%- RuO <sub>2</sub> 60%- 5% La          |
| 5% Ce   | IrO <sub>2</sub> 35%- RuO <sub>2</sub> 60%- 5% Ce          |
| 10% La  | IrO <sub>2</sub> 30%- Ru O <sub>2</sub> 60%- 10% La        |
| 10% Ce  | IrO <sub>2</sub> 30%- Ru O <sub>2</sub> 60%- 10% Ce        |
| 20% La  | IrO <sub>2</sub> 20%- Ru O <sub>2</sub> 60%- 20% La        |
| 20% Ce  | I O <sub>2</sub> 20%- Ru O <sub>2</sub> 60%- 20% Ce        |
| 10% La + 10% Ce                               | IrO <sub>2</sub> 20%- RuO <sub>2</sub> 60%- 10% La- 10% Ce |



Şekil 8.3: Elektrot kaplama şeması.



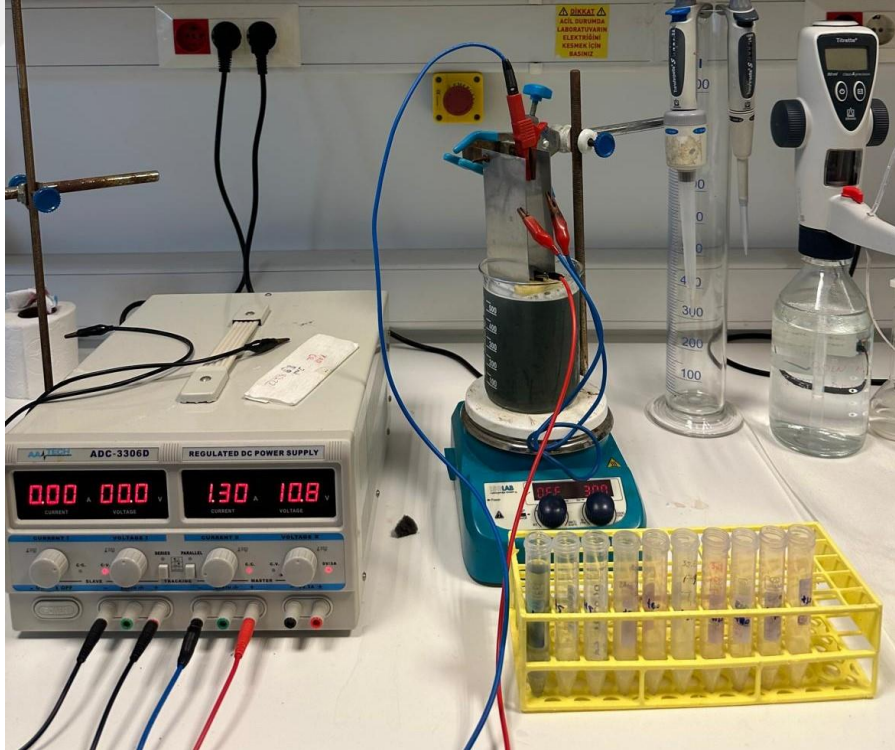
Şekil 8.4: Kaplanan elektrot görselleri.

## 8.4. Deney Düzenegi

Çalışmada 600 mL kapasiteli bir cam reaktör kullanılmıştır. Sabit akım, dijital DC güç kaynağı (ADC-3306D) ile sağlanmıştır. Elektrokimyasal oksidasyon deney düzenegi, bir

anot ve iki katot elektrottan oluşmaktadır. Çalışmada anot olarak farklı oralanlarda Ce ve/veya La ile katkılandırılmış Ti/RuO<sub>2</sub>-IrO<sub>2</sub> ile elektrotları (7,5 cm x 4 cm boyutlarında), katot olarak ise paslanmaz çelik elektrotlar (10 cm x 5 cm boyutlarında) kullanılmıştır. Elektrotlar, bir elektrot tutucu içerisinde aralarında 1'er cm mesafe olacak şekilde yerleştirilmiştir. **Şekil 8.5**, uygulanan EO prosesine ait deney düzeneğinin göstermektedir.

Her bir deneyde 600 mL farklı konsantrasyonlar RB5 içeren sentetik çözelti ve bir tekstil fabrikadan alınan gerçek tekstil atıksuyu kullanılmıştır. Tekstil atıksuyu EO proseslerinden önce askıda katı maddelerin giderilmesi için filtre kağıdından geçirilmiştir. EO proseslerinin ardından, arıtılmış numuneler ileri analizler için 0,45 µm gözenek boyutuna sahip bir filtreden geçirilerek TOK ve spektrum okuma işlemleri için hazır hale getirilmiştir. pH ayarlamaları, pH'ı düşürmek için 0.05 N ayarlı H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, yükseltmek için ise 0.05 N NaOH ile yapılmıştır. İletkenlik ayarlamaları için NaCl elektrolit olarak kullanılmıştır.



**Şekil 8.5:** Deney düzeneği.

## 8.5. Deneysel Sonuçlar ile İlgili Gerekli Hesaplamalar

TOK giderim verimliliği, aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır:

$$TOK \text{ giderim verimi (\%)} = \frac{(t_0 - t_x) \times 100}{t_0} \quad (8.1)$$

$t_0$ , sıfır zamanındaki numunenin TOK değerini;  $t_x$ , x zamanındaki numunenin TOK değerini ifade etmektedir.

Her bir deneyde, EO prosesi uygulanan çözeltilerin birim hacmi başına enerji tüketimi (EC), aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır. Burada,  $E_{cell}$  ortalama hücre voltajını (V), I uygulanan akımı (A), t elektroliz süresini (saat), ve  $V_s$  işlem gören çözeltinin hacmini (L) ifade etmektedir [95].

$$EC (kWhm^{-3}) = \frac{(E_{cell} \times I \times t)}{V_s} \quad (8.2)$$

## 8.6. Analizler sırasında kullanılan ekipman ve cihazlar

EO prosesi boyunca, numuneler belirli zaman aralıklarında toplanmış ve TOK, serbest klor ve spektrofotometrik analiz parametreleri açısından analiz edilmiştir.

TOK analizleri, SHIMADZU TOC-L analiz cihazı ile gerçekleştirilmiştir. pH/iletkenlik ölçümleri ise Mettler Toledo S700 çok parametrelili ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Renk giderimi, Merck X UV-Vis spektrofotometre ile izlenmiştir. Kaplanmış elektrotların yüzey karakterizasyonu, SEM (Thermoscientific Axia ChemiSEM) ve XRD (RIGAKU X-Ray Diffractometer D-Max 2200 PCI) analizleri ile sağlanmıştır.

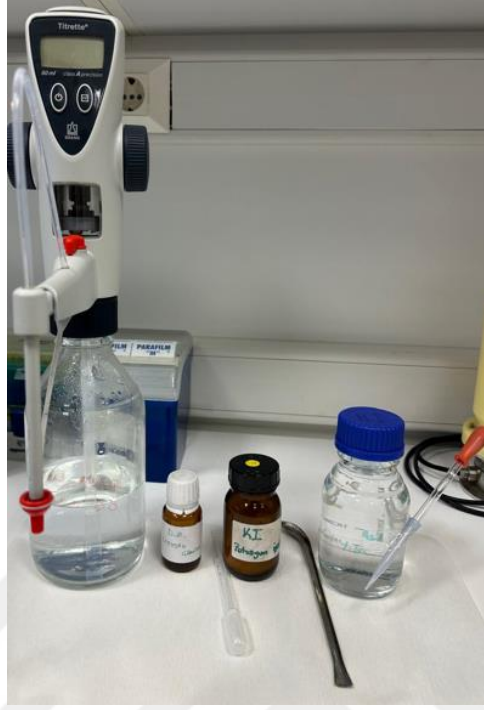
Dönüşümlü voltametre (CV) ve Lineer taramalı voltametre (LSV) ölçümleri, bilgisayar kontrollü bir potansiyostat/galvanostat (CH Instruments elektrokimyasal analiz cihazı) kullanılarak gelişmiş bir elektrokimyasal sistem ile gerçekleştirilmiştir. Çalışma elektrotu olarak, 5 cm x 0.5 cm boyutlarında hazırlanan elektrotlar kullanılmıştır. Karşıt elektrot platin tel, referans elektrot ise gümüş/gümüş klorür (Ag/AgCl) olmuştur. Elektrot potansiyelleri, farklı elektrolit çözeltileri ile doldurulmuş üç elektrotlu silindirik cam

hücre içerisinde ölçülmüştür. **Şekil 8.6**'da gösterildiği gibi CV'ler,  $0.05 \text{ V.s}^{-1}$  tarama hızı ve  $0.001 \text{ A.V}^{-1}$  hassasiyet ile kaydedilmiştir.



**Şekil 8.6:** Servis ömrü düzeneği.

Klor ölçümleri, **Şekil 8.7**'te gösterildiği şekilde Standart Metot 4500-Cl B Yöntemi'ne göre gerçekleştirilmiştir.



Şekil 8.7: Klor ölçümünde kullanılan malzemeler.

## 9. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 9.1. Karakterizasyon

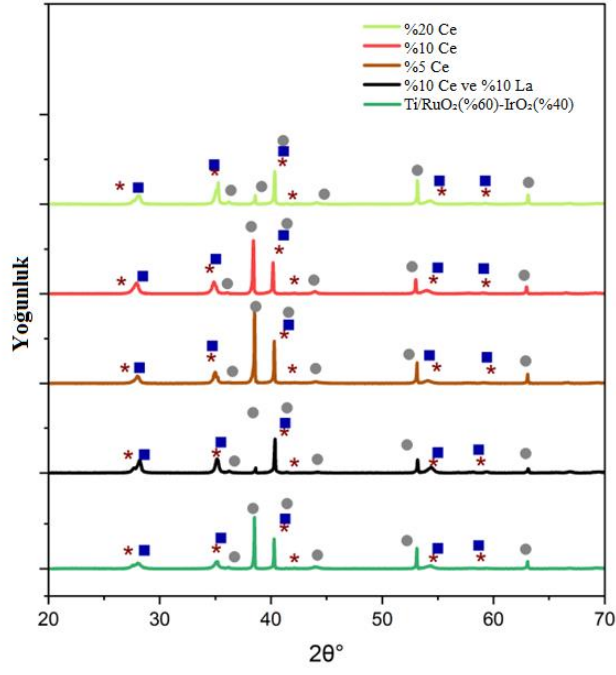
Elektrokimya alanında, anotların elektrokimyasal performansının büyük ölçüde elektrot yüzeyinin bileşimi ve kristal yapısına bağlı olduğu iyi bilinmektedir[96].

Elektrotların performansının değerlendirilmesi için XRD, SEM, LSV, CV ve elektrot kullanım ömrü analizleri yapılmıştır.

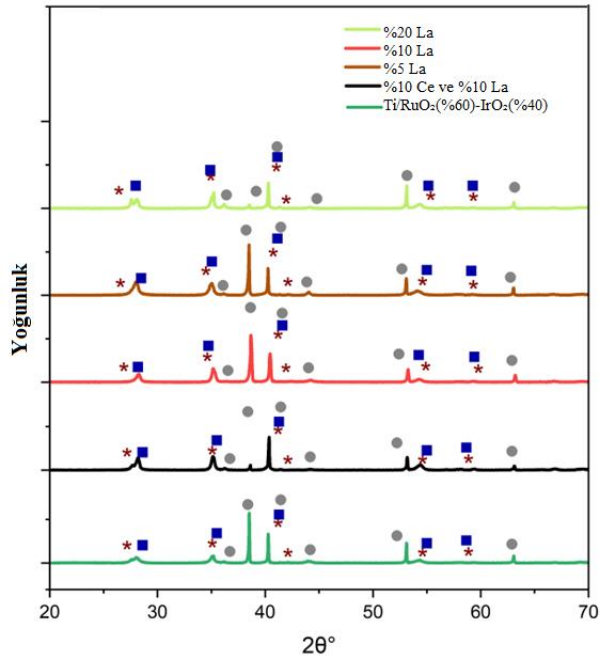
#### 9.1.1. X-Işını Difraktometresi (XRD)

550 °C işleme koşullarında çeşitli miktarlarda Ce ve La ile katkılanmış Ti/RuO<sub>2</sub>-IrO<sub>2</sub> elektrotlar, kristal fazların, saflığın ve kristal yapının incelenmesi amacıyla üretilmiştir. Ce ve La'nın sırasıyla %5, %10 ve %20 oranlarında katkılı olduğu Ti/RuO<sub>2</sub>-IrO<sub>2</sub> elektrotlar, Şekil 9.1'de görülebilen kendine özgü bir dizi tepe noktası sergilemektedir. Literatürle uyumlu olarak, Ce katkılanmış elektrotlarda, Ti/RuO<sub>2</sub>(%60)-IrO<sub>2</sub>(%40) (JCPDS No: RuO<sub>2</sub> 40-1027, IrO<sub>2</sub> 43-1019, Ti 44-1294) için bildirilen  $2\theta = 28.10^\circ, 35.05^\circ, 36.25^\circ, 38.5^\circ, 40.33^\circ, 44.26^\circ, 53.12^\circ, 54.16^\circ, 63.02^\circ, 70.77^\circ, 76.3^\circ$  ve  $77.48^\circ$  değerlerinde tepe noktaları gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, La katkılanmış elektrotlarda  $2\theta = 27.57^\circ, 28.10^\circ, 35.05^\circ, 35.21^\circ, 36.15^\circ, 38.5^\circ, 41.42^\circ, 43.3^\circ, 44.26^\circ, 53.12^\circ, 54.48^\circ, 63.02^\circ, 70.77^\circ, 76.3^\circ$  ve  $77.48^\circ$  tepe noktaları tespit edilmiştir[97]. Grafikler **Şekil 9.1** ve **Şekil 9.2**'de verilmiştir.

La ve Ce elementleri ile katkılanma sonrasında alınan sonuçlar Ti/RuO<sub>2</sub>(%60)-IrO<sub>2</sub>(%40) kaplamanın karakteristik tepe noktalarının neredeyse değişmeden kaldığı görülmüştür. Bu durum, La ve Ce elementlerinin IrO<sub>2</sub> ve RuO<sub>2</sub> kristal kafeslerine düzgün bir şekilde yerleştiğini ya da gömüldüğünü göstermektedir. Ayrıca, safsızlıklara ait karakteristik kırınım tepe noktalarının yokluğu, numunelerin daha saf olduğunu göstermektedir. Numunelerdeki güçlü ve belirgin tepe noktaları, bu elektrotların yüksek kristalinliğe sahip olduğuna da işaret etmektedir [98].



**Şekil 9.1:** Farklı miktarlarda Ce ile katkılanmış Ti/RuO<sub>2</sub>-IrO<sub>2</sub> elektrotlarının XRD örnekleri (●: Ti, ★: RuO<sub>2</sub>, ■: IrO<sub>2</sub>).

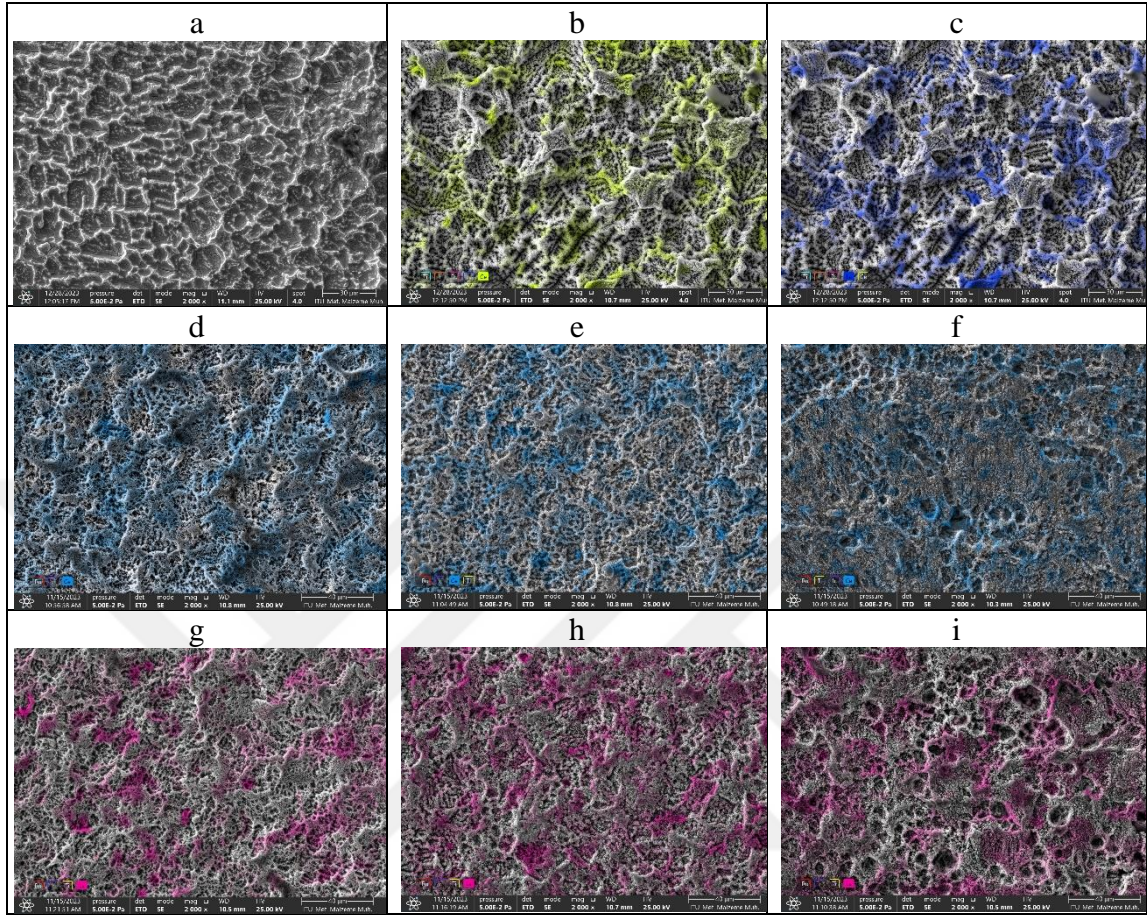


**Şekil 9.2:** Farklı miktarlarda La ile katkılanmış Ti/RuO<sub>2</sub>-IrO<sub>2</sub> elektrotlarının XRD örnekleri (●: Ti, ★: RuO<sub>2</sub>, ■: IrO<sub>2</sub>).

### 9.1.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Geliştirdiğimiz elektrotlat ikinci olarak, bu bağlamda SEM mikroanalizi, bu elektrotların sergilediği belirgin yüzey özelliklerini etkili bir şekilde değerlendirmek ve karakterize etmek için bir yöntem olarak kullanılmıştır. SEM, farklı oranlarda Ce ve/veya La içeren Ti/RuO<sub>2</sub>-IrO<sub>2</sub> elektrotların morfolojisini karakterize etmek amacıyla kullanılmıştır (**Şekil 9.2 b-i**). Elektrotlar arasında önemli farklılıklar gözlemlenmiştir. Buna ek olarak, Ce ve La'nın etkisini daha ayrıntılı bir şekilde analiz etmek için Ce yada La katkısı bulunmayan Ti/RuO<sub>2</sub>(%60)-IrO<sub>2</sub>(%40) standart elektrodun SEM görüntüsü de eklenmiştir (**Şekil 9.3 a**). **Şekil 9.3 d-i**, Ce ve/veya La ile katkılanmış elektrotların yüzeyinde bu elementlerin düzgün ve homojen bir şekilde dağıldığı gözlemlenmiştir. Bu durum standart Ti/RuO<sub>2</sub>(60%)-IrO<sub>2</sub>(40%) elektroda olumsuz etki yapmadığı aksine, elektrotun korozyon direncini artırabileceği düşünülmektedir [99].

Hem Ce hem La'ın birlikte olarak katkılanırma yapıldığı elektrotta, Ce ve La on yapısı incelenmek istendiğinde; **Şekil 9.3 a**'da bulunan katkılanırılma yapılmamış standart elektrota göre karşılaştırma yapıldığında **Şekil 9.3 b**'de Ce sarı renk ile **Şekil 9.3 c**'de La mavi renk ile gösterilerek homojen ve yoğun olarak bu NTE'nin elektrot üzerinde varlıkları görüntülenmiştir. Ayrıca, literatürde elektrotun yüzey yapısının, EO prosesinin elektrokatalitik etkinliğini önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir [100]. Literatüre göre, Ce değişiminin PbO<sub>2</sub> tabakasının yapısını nasıl etkilediğini değerlendirmek için, Ti-PbO<sub>2</sub> elektrodun mikro yapısı, Ce modifikasyonu uygulanmadan önce ve sonra SEM ile incelenmiştir [101]. Bu tez kapsamında %10 Ce ve %10 La ile katkılanmış elektrotların diğer kaplamalara kıyasla çok daha pürüzlü ve gözenekli bir yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir. Kaplama nedeniyle yüzey pürüzlülüğünde ve yüzey alanında artış olması, daha fazla OH radikalının üretilmesini sağlamış ve bu da giderim verimliliğini artırmıştır [102]. Sonuç olarak, bu Ce ve La katkılı elektrotların daha yüksek giderim verimliliği sağladığı düşünülmektedir.



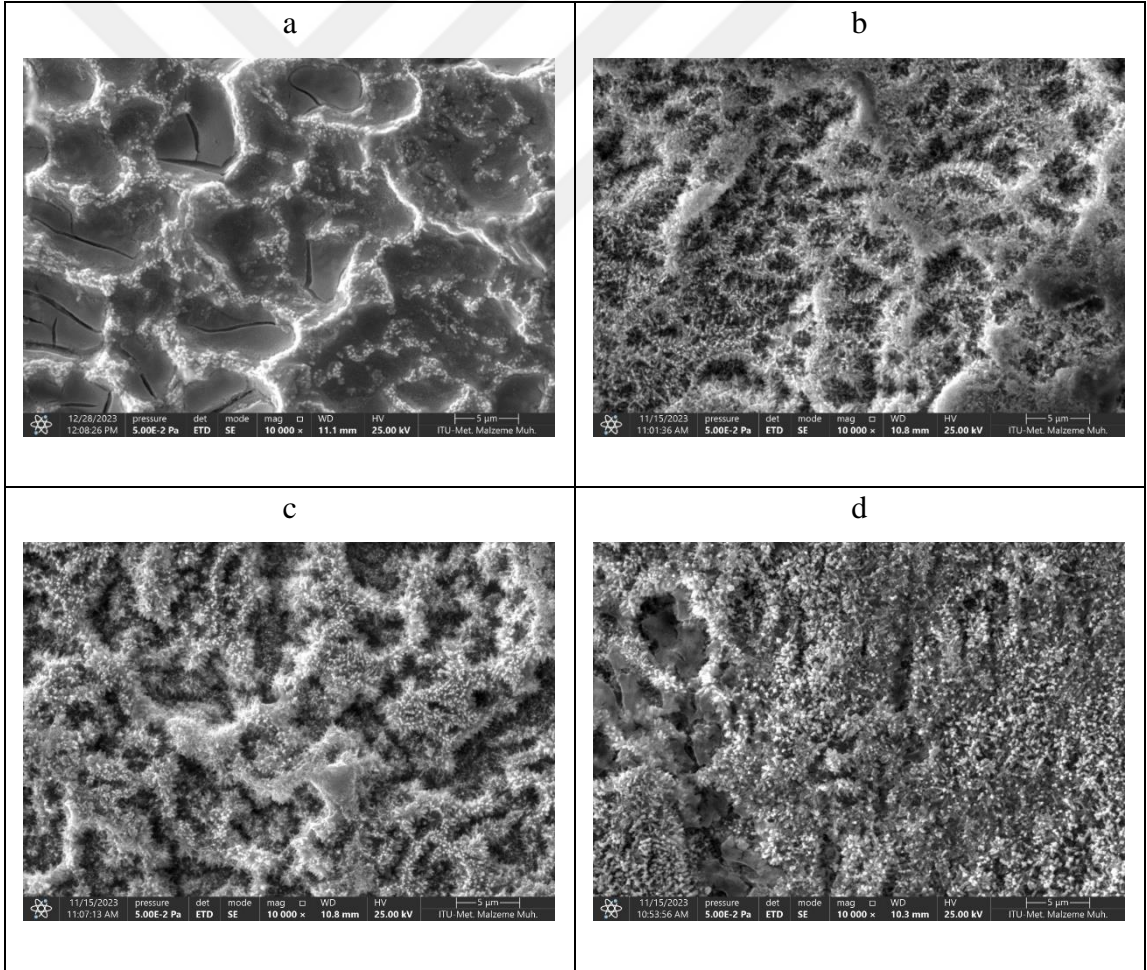
**Şekil 9.3:** 2000x büyütmede SEM görüntüleri: a)  $\text{Ti/RuO}_2(60\%)-\text{IrO}_2(40\%)$  standart elektrotu b) **%10 Ce + %10 La** katkılı  $\text{Ti/RuO}_2(60\%)-\text{IrO}_2(20\%)$  (Ce sarı ile renklendirilmiş), c) **%10 Ce + %10 La** katkılı  $\text{Ti/RuO}_2(60\%)-\text{IrO}_2(20\%)$  (La mavi ile renklendirilmiş), d) **%5 Ce** katkılı  $\text{Ti/RuO}_2(60\%)-\text{IrO}_2(35\%)$ , e) **%10 Ce** katkılı  $\text{Ti/RuO}_2(60\%)-\text{IrO}_2(30\%)$ , f) **%20 Ce** katkılı  $\text{Ti/RuO}_2(60\%)-\text{IrO}_2(20\%)$ , g) **%5 La** katkılı  $\text{Ti/RuO}_2(60\%)-\text{IrO}_2(35\%)$ , h) **%10 La** katkılı  $\text{Ti/RuO}_2(60\%)-\text{IrO}_2(30\%)$ , i) **%20 La** katkılı  $\text{Ti/RuO}_2(60\%)-\text{IrO}_2(20\%)$ .

Farklı oranlarda katkılanan Ce elektrotlar 10000x kat büyütülerek alınan görüntüler üzerinde değerlendirildiğinde, katkılanılmamış  $\text{Ti/RuO}_2(60\%)-\text{IrO}_2(40\%)$  elektrotta göre farklı bir yapı göstermiştir. Bu iğne uçlu oksit yapılar yüzey alanını artırarak arıtım veriminin artmasını sağlamıştır. %5 katkıdan %10 katkıya geçildiğinde iğne uçlu yapıların artması daha iyi bir giderim verimini sağlamıştır.

Atıksu TOK giderimiacısından değerlendirildiğinde %20 Ce katkılı elektrotta daha az iğne uçlu yapı olmuş ve bu durum yüzey alanının azalmasından kaynaklı giderim veriminin düşmesine neden olduğu düşünülmüştür. Bu sonuçlar literatürde de TOK

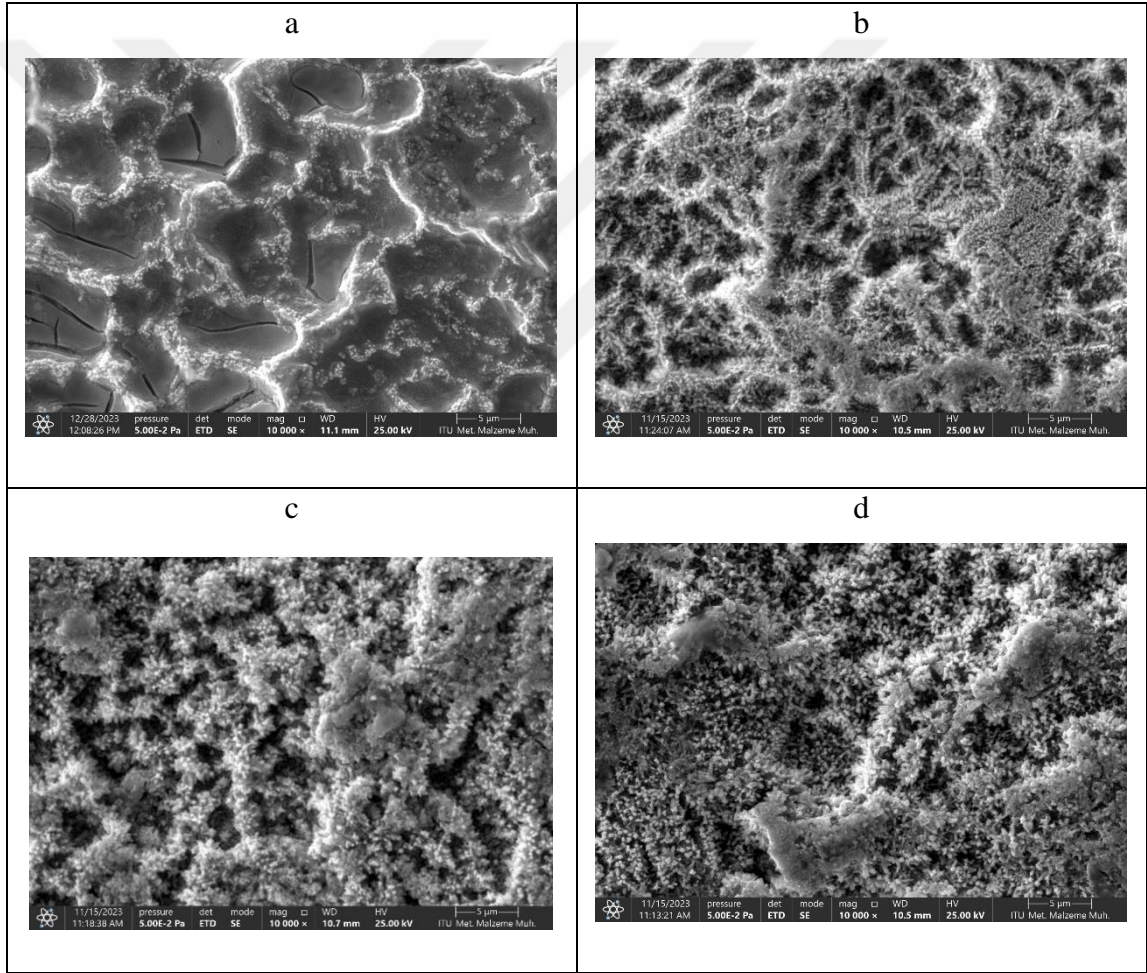
giderim verimlerine göre benzer sonuçlar ile teyit edilmiştir[103]. Fakat %20 Ce'da yüzey değişikliği RB5 gideriminde benzer sonuçlar vermiştir. Aynı zamanda iğne uçlu oksit yapılar her ne kadar yüzey alanını artırarak giderim verimini artmasını sağlasada, katkıların plakaya tutunmasını zorlaştırarak, elektrot dayanıklılığını dolayısıyla servis ömrünü düşürmüştür.

Yapılar servis ömrü çalışmaları ile de desteklenmiştir. Ce konsantrasyonu arttıkça yüzeyde daha belirgin yapısal değişikliklere yol açtığını gösterebilir. Fazla katkı, mekanik dayanımı ve stabiliteyi olumsuz etkileyebildiği literatürde de görülmektedir [104]. Elektrotların SEM görüntüleri **Şekil 9.4**'te verilmiştir.



**Şekil 9.4:** 10000x SEM görüntüleri a) Ti/RuO<sub>2</sub>(60%)-IrO<sub>2</sub>(40%), b) %5 Ce katkılanmış Ti/RuO<sub>2</sub>(60%)-IrO<sub>2</sub>(35%), c) %10 Ce katkılanmış Ti/RuO<sub>2</sub>(60%)-IrO<sub>2</sub>(30%), d) %20 Ce katkılanmış Ti/RuO<sub>2</sub>(60%)-IrO<sub>2</sub>(20%).

Benzer görüntüler La katkılanmış SEM görüntülerinde de alınmasına rağmen, Ce katkılanmış olanlar kadar bariz bir değişiklik görülmemiştir. Elde edilen sonuçlar ilerde verilen TOK giderim sonuçları ile de desteklenmiştir. La konsantrasyonunun yüksek olması, yüzeydeki gözenek yapısını daha düzensiz hale getirmiştir. Bu durum, fazla NTE katkı maddesinin yüzeyin mekanik ve kimyasal özelliklerini olumsuz etkileyebileceğini düşündürmektedir[105]. Elektrotların SEM görüntüleri **Şekil 9.5**'te verilmiştir.

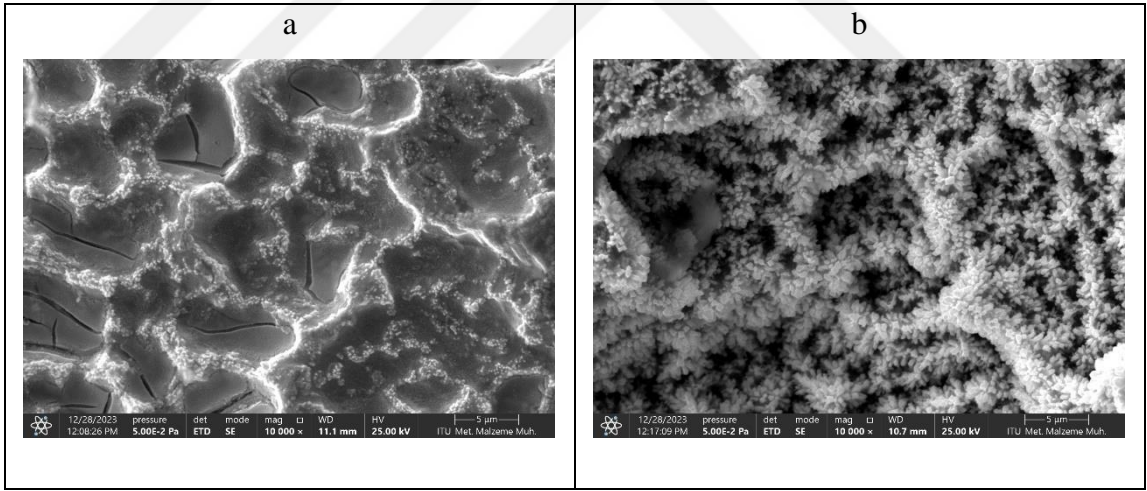


**Şekil 9.5:** 10000x SEM görüntüleri a) Ti/RuO<sub>2</sub>(60%)-IrO<sub>2</sub>(40%), b) %5 La katkılanmış Ti/RuO<sub>2</sub>(60%)-IrO<sub>2</sub>(35%) , c) %10 La katkılanmış elektrot Ti/RuO<sub>2</sub>(60%)-IrO<sub>2</sub>(30%), d) %20 La katkılanmış Ti/RuO<sub>2</sub>(60%)-IrO<sub>2</sub>(20%).

Ti/RuO<sub>2</sub>(60%)-IrO<sub>2</sub>(40%) katkılı standart elektrot yüzeyi ile %10 Ce ve %10 La katkılandırılarak üretilen karışık elektrot yüzeyi karşılaştırıldığında, standart elektrot daha stabil görünmesine rağmen, karışık elektrottaki iğne uçlu yapılar yüzey alanını artırarak standart elektrottan daha iyi bir TOK giderim performansı göstermiştir. Fakat bu iğne uçlu yapılar diğer üretilen elektrotlarda olduğu gibi ve yapılan kullanım ömrü deneyleri ile de desteklenerek elektrodun ömrünü azalttığı görülmüştür. Elektrotların SEM görüntüleri **Şekil 9.6**'te verilmiştir.

Karışık elektrotta, elektrot yüzeyi belirgin bir şekilde daha gözenekli hale gelmiş olup, bu durum elektrokimyasal aktiviteyi artırarak EO prosesini hızlandırabilmektedir [106].

Literatürde de artan gözeneklilik, organik kirleticilerin yüzeye adsorbe olmasını kolaylaştırarak TOK giderim verimini artırabilir. Ayrıca, reaksiyon kinetiğini hızlandırarak giderim süresinin azalmasını sağlayabilir[107].

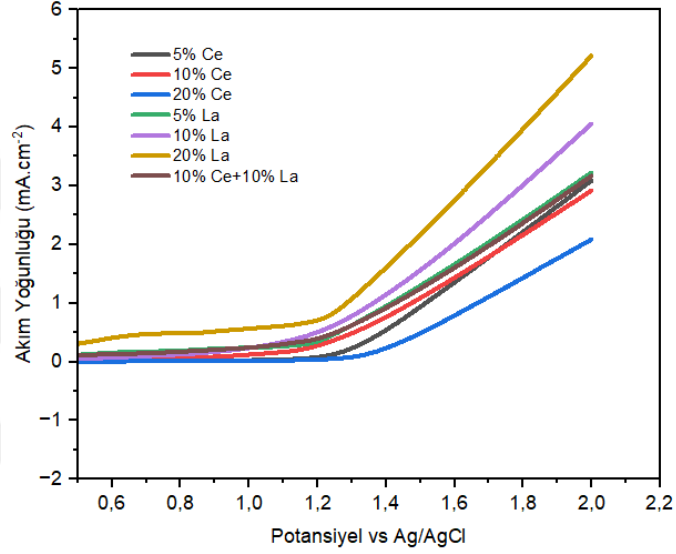


**Şekil 9.6:** 10000x SEM görüntüleri a) Ti/RuO<sub>2</sub>(60%)-IrO<sub>2</sub>(40%) b) %10 Ce ve %10 La katkılandırılmış Ti/RuO<sub>2</sub>(60%)-IrO<sub>2</sub>(20%).

### 9.1.3. Doğrusal Taramalı Voltametri (LSV)

Elektrokimyasal karakterizasyon çalışmaları, elektrotların oksijen evrim potansiyelini (OEP) ve klor oluşum zirvelerini gözlemlemek açısından önemlidir. Özellikle OEP'yi incelemek için doğrusal taramalı voltametri (LSV) kullanılmıştır. LSV testleri, 0.05 V.s<sup>-1</sup>

tarama hızında gerçekleştirilmiş olup, sonuçlar **Şekil 9.7**'de sunulmuştur. LSV sonuçlarına göre, tüm kaplanmış elektrotlarda elektrolit olarak NaCl kullanılmış ve en yüksek OEP değerinin %20 Ce katkılı elektrotlarda elde edildiği görülmüştür. Ce katkılanmış elektrotların daha yüksek OEP değerlerine sahip olduğu ve diğer değerlerin literatürle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir [108].

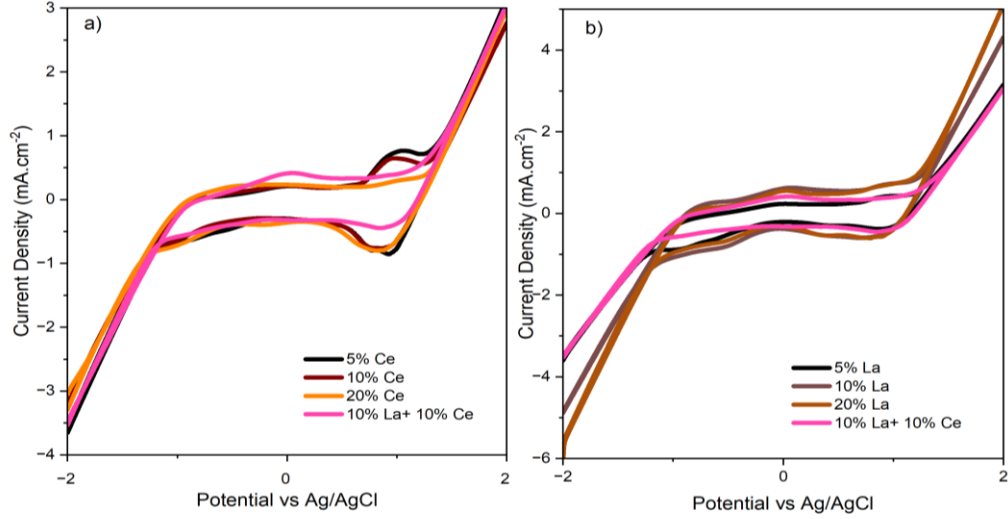


**Şekil 9.7:** Elektrotların LSV grafikleri (3,5 mS·cm<sup>-1</sup> iletkenliğe sahip NaCl, 0,05 V·sn<sup>-1</sup>).

#### 9.1.4. Dönüşümlü Voltametri (CV)

Elektrotlarla elde edilen CV sonuçları **Şekil 9.8**'de gösterilmiştir. CV çalışmalarında, Ce içeren elektrotlarda oldukça yüksek klor oluşum zirveleri gözlenmiştir. Bu durum, takip eden bölümlerde sunulan klor üretim sonuçlarını da desteklemektedir. %10 Ce ve %10 La katkılı karışık elektrot profili, La katkılanmış elektrotlarla daha benzer bir yapı sergilemiştir. Ayrıca La katkılanmış elektrotların akım yoğunluklarının daha iyi olduğu tespit edilmiştir. %10 Ce ve %10 La katkılı elektrotlarda, pik genişliğinin daha düşük olduğu, bunun da diğer elektrotlara göre daha iyi kütle transferi ile açıklanabileceği belirtilmiştir [95].

Ancak, RB5 varlığında yapılan taramalarda farklı bir durum gözlenmiştir. RB5 varlığında gerçekleştirilen CV analizlerinde herhangi bir oksidasyon zirvesi oluşmadığı için, sistemin dolaylı oksidasyon olduğu literatür ile uyumlu olarak gerçekleştiği anlaşılmıştır[109].



**Şekil 9.8:** Elektrotların CV grafikleri ( $3,5 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$  iletkenliğe sahip NaCl,  $0,05 \text{ V} \cdot \text{sn}^{-1}$  tarama hızı).

### 9.1.5. ICP-OES

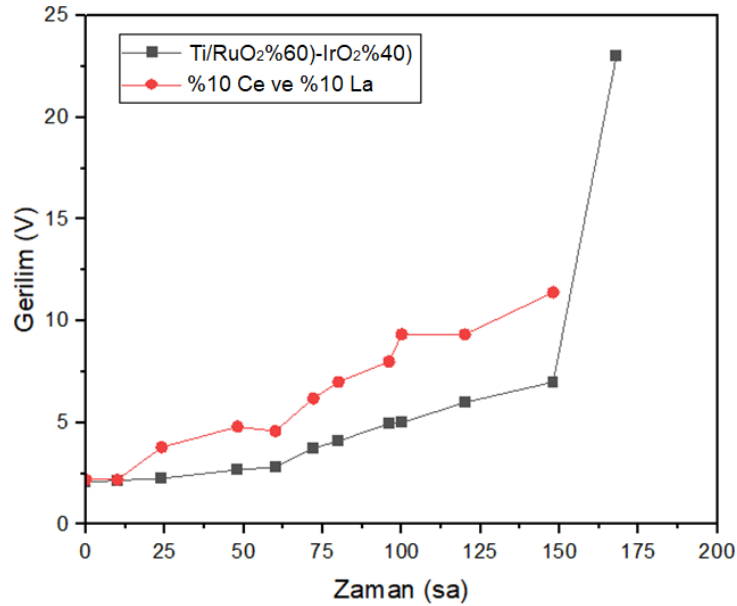
Elektrotun dayanıklılığını değerlendirmek amacıyla, elektrottan herhangi bir kaplama malzemesinin çözünüp çözünmediğini belirlemek için İndüktif Eşleşmiş Plazma element analizi gerçekleştirilmiştir. EO prosesinin ardından, elektrot malzemesinin olası çözünmesini değerlendirmek için çözelti üzerinde ICP-OES analizi yapılmış ve sonuçlar **Tablo 9.1**'de sunulmuştur. Hem ICP hem de CV analizlerinden elde edilen sonuçlar, Ce ve La içeren hiçbir elektrotun çözünme veya kaplama ayrılması yaşamadığını göstermiştir. Bu bulgular, yüksek performanslı ve uzun ömürlü bir elektrotun başarılı bir şekilde geliştirildiğini doğrulamaktadır[110].

**Tablo 9.1:** Elektrotların ICP sonuçları.

| Kaplanan elektrotların oranları                            | Ir   | Ru   | La   | Ce   |
|--|------|------|------|------|
| IrO <sub>2</sub> 35%- RuO <sub>2</sub> 60%- 5% La          | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| IrO <sub>2</sub> 35%- RuO <sub>2</sub> 60%- 5% Ce          | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| IrO <sub>2</sub> 30%- Ru O <sub>2</sub> 60%- 10% La        | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| IrO <sub>2</sub> 30%- Ru O <sub>2</sub> 60%- 10% Ce        | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| IrO <sub>2</sub> 20%- Ru O <sub>2</sub> 60%- 20% La        | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| I O <sub>2</sub> 20%- Ru O <sub>2</sub> 60%- 20% Ce        | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| IrO <sub>2</sub> 20%- RuO <sub>2</sub> 60%- 10% La- 10% Ce | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

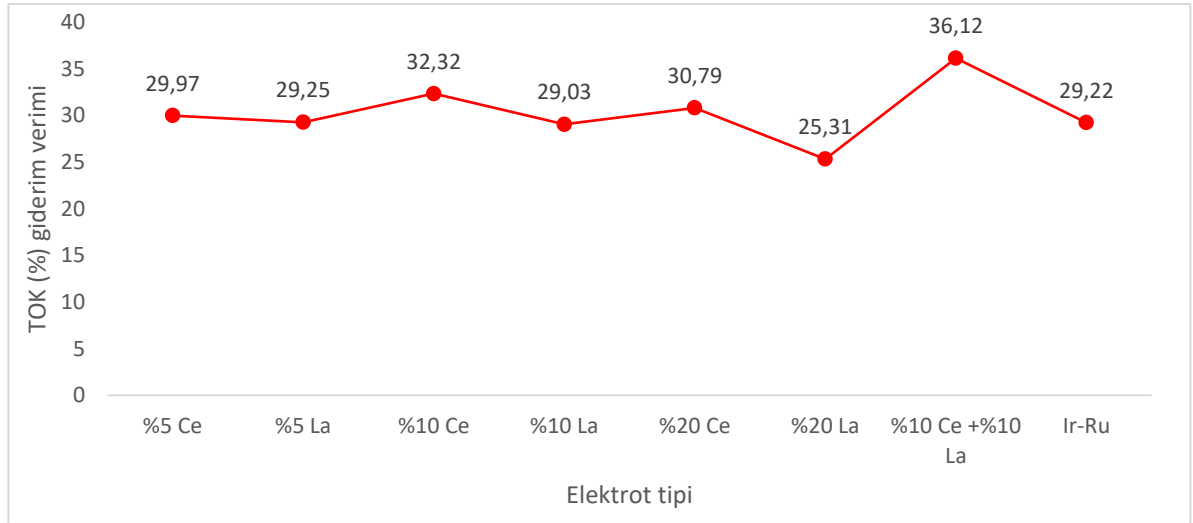
### 9.1.6. Elektrot kullanım ömrü

Elektrot kullanım ömrü analizleri için elektrokatalitik en verimli sonuç veren %10 Ce ve %10 La karışık kaplanmış elektrot ile Ti/RuO<sub>2</sub>(%60)-IrO<sub>2</sub>(%40) standart elektrot test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre daha iyi bir giderim verimi elde edilmesine rağmen kullanım ömrünün kısaldığı gözlenmiştir. Bu sonuçlar SEM analizleri ile de örtüşerek yüzey porozitesinin artmasına bağlı olarak katatilik aktivitesi artmasına rağmen, Ce ve La katkıları ile stabilitesinin düşerek, daha hızlı bir şekilde ömrünün tükendiği görülmüştür. Servis ömrü analiz grafikleri Şekil 9.9'de verilmiştir. Bu grafiğe göre karışık katkılı elektrot literatüre göre ise 11 saate göre daha iyi elektrot ömrü sonuçları vermiştir.

**Şekil 9.9:** Servis ömrü grafiği.

## 9.2. RB5 Giderim Çalışmaları

Üretilen elektrotlar, gerçek bir tekstil atıksuyunda denenmeden önce optimize etmek için bir tekstil boyar maddesi olan RB5 ile hazırlanan sentetik bir çözelti ile çalışılmıştır. Bu kapsamda ilk olarak elektrotların performansı belirlemek için literatürden araştırmalar yapılarak, çalışma koşulları standart olarak  $200 \text{ A.m}^{-2}$ , 100 ppm, 5.5 pH,  $3500 \mu\text{S}$ , 300 dk olarak belirlenmiş ve EO prosesi uygulanmış ve en iyi elektrokatalitik sonucu veren elektrot, proses parametrelerini optimize edilmek üzere farklı pH, iletkenlik, konsantrasyon ve akım yoğunluğunda ayrı ayrı optimize edilmiştir. Karışık katkıli elektrot %10 Ce ve %10 La karışık katkılandırılmış elektrot %36.12 TOK giderim verimi ile en verimli elektrot olarak belirlenmiştir. Elektrotların kendi içerisindeki değerlendirilmesi sonrasında standart bir elektrot ile performansının karşılaştırılması üzerine aynı koşullarda Ti/RuO<sub>2</sub>(%60)-IrO<sub>2</sub>(%40) standart elektrotun TOK giderim verimi %29.22 olarak bulunmuştur. Tüm elektrotlar için TOK giderim verimi sonuçları Şekil 9.10'da verilen grafikte gösterilmiştir.



Şekil 9.10: Tüm elektrotlar için standart koşullarda TOK giderim verimi.

### 9.2.1. Akım Yoğunluğunun Etkisi

Akım yoğunluğunun hem performans hem maliyet açısından elektrokimyasal proseslerde önemli bir rol oynadığı bilinmektedir. Bu nedenle, çalışmanın ilk bölümünde, akım yoğunluğunun etkisi RB5 içeren sentetik bir çözelti üzerinden araştırılmıştır. **Şekil 9.11**, 1RB5 içeren sentetik çözeltinin akım yoğunluğunun artmasıyla birlikte TOK ve renk giderim oranlarında bir artış olduğunu göstermektedir. Özellikle  $200 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  akım yoğunluğunda, TOK giderim verimliliğinde %36.12'lik belirgin bir artış görülmüştür. Bu çalışma koşulları altında, renk ilk 5 dakika içinde tamamen kaybolmuştur.

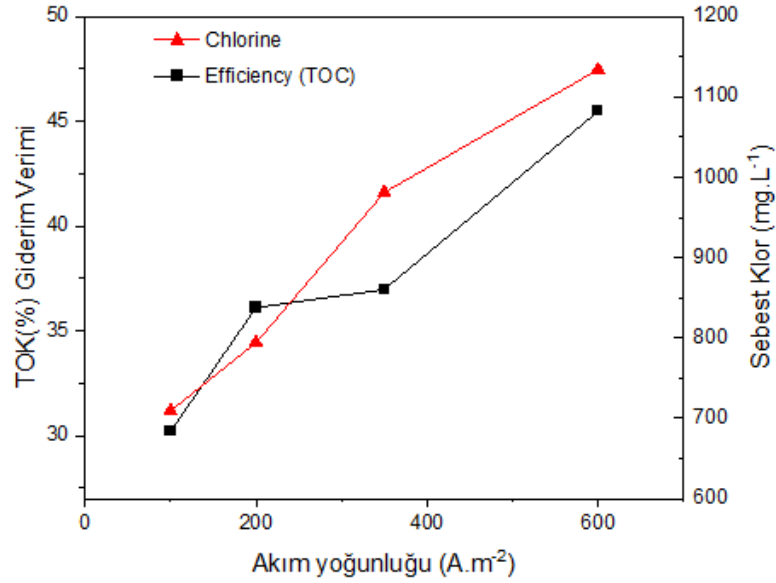
RB5 çözeltisinde akım yoğunluğu  $100 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 'den  $600 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 'ye artırıldığında, elde edilen TOK giderim verimi %45.48'e yükselmiştir. Ancak enerji verimliliği göz önüne alındığında,  $200 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$ 'de elde edilen sonucun daha optimal olduğu düşünülmektedir.  $200 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$ 'den sonra, akım yoğunluğundaki artışlarla birlikte giderim oranları daha yavaş bir yükselme göstermiştir. Birim enerji başına TOK giderimi akım yoğunluğu ile azalmıştır.

Bu sonuç, iki ana faktöre bağlanabilir. İlk olarak, akım yoğunluğundaki artış, klor oluşum reaksiyonunun ivmesini artırarak aktif klor konsantrasyonunu yükseltmektedir. Bu artış, aktif türlerin organik maddelerle etkileşme olasılığını artırmakta, böylece boya moleküllerinin EO'unu teşvik ederek arıtma etkinliğini iyileştirmektedir. Artan akım yoğunluğunun enerji tüketimine olan etkisi **Tablo 9.2**'de gösterilmiştir.

**Tablo 9.2:** RB5 için akım yoğunluğuna göre enerji tüketimi.

| Akım yoğunluğu ( $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$ ) | Enerji tüketimi ( $\text{kWhm}^{-3}$ ) |
|---|--|
| 100   | 43.93                                  |
| 200   | 112.12                                 |
| 350   | 269.77                                 |
| 600   | 832.02                                 |

Elde edilen sonuçlara göre, akım yoğunluğu organik madde gideriminde etkili bir parametre olmakla birlikte, enerji tüketimi açısından  $200 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$  seçilmesi önemli ölçüde tasarruf sağlayarak maliyet açısından makul bir sonuç sunmuştur.



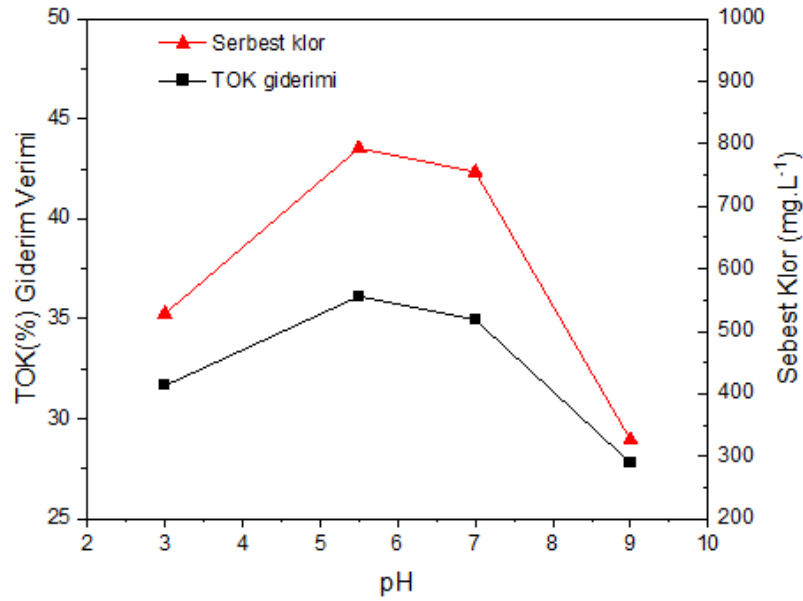
**Şekil 9.11:** %10 ve %10 için akım yoğunluğu ve klor bazında giderim verimliliği (100 ppm RB5, 5 saat reaksiyon süresi, 3500  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  iletkenlik, 5,5 pH).

### 9.2.2. pH'm Etkisi

Şekil 9.12'de sunulan verilere göre, pH değişimlerinin TOK giderimi üzerinde farklı etkileri olduğu anlaşılmaktadır. Farklı pH seviyelerinde TOK giderim verimlilikleri şu şekilde kaydedilmiştir: pH 3'te %29.85, pH 5.5'te %36.12, pH 7'de %34.95, ve pH 9'da %27.79. Bu sonuçlar doğrultusunda, TOK'nin genel giderim verimliliği dikkate alındığında, optimum pH değerinin 5.5 olduğu belirlenmiştir. pH ayarlamaları, pH'ı düşürmek için 0.05 N ayarlı  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , yükseltmek için ise 0.05 N NaOH ile yapılmıştır.

Literatürde yapılan araştırmalara göre, 50  $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$  akım yoğunluğunda, pH 2'de 100 ppm RB5 içeren bir çözeltide gerçekleştirilen bir EO prosesi incelenmiştir [44]. Karışık Metal Oksit (MMO) elektrotlarla tekstil atık sularının EO'unda, pH 4'ün optimum değer olarak belirlendiği tespit edilmiştir. Başka bir reaktif azo boyar madde içeren çözeltide, pH 7'nin ekonomik olarak en uygun değer olduğu belirtilmiştir. Farizoğlu ve çalışma arkadaşları, RB5 ile yaptıkları çalışmalarında, pH değeri arttıkça giderim verimliliğinin azaldığını not etmişlerdir [111].

Asidik ve nötr pH aralığının, klor ve hipoklorit ( $\text{HClO}^-$ ) iyonları gibi önemli oksitleyici ajanların üretimi için en elverişli ortam olduğu ve bu ajanların renk giderim sürecine önemli katkı sağladığı görülmüştür [112]. Literatürde farklı pH değerlerinde başarılı sonuçların elde edildiği belirtilmiş olsa da, çalışmamızda boyaların EO prosesinden pH değerine çok bağımlı olmadığı gözlemlenmiştir. Alkali koşullarda bu kritik maddelerin üretimi sınırlı olsa da, bulgularımız, pH'ın 15 dakika sonrasında işlem etkinliğini önemli ölçüde etkilemediğini göstermektedir.



**Şekil 9.12:** %10 Ce + %10 La için pH'ya bağlı TOK verimliliği (200  $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$  akım yoğunluğu, 100 ppm RB5, 5 saat reaksiyon süresi, 3500  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  iletkenlik).

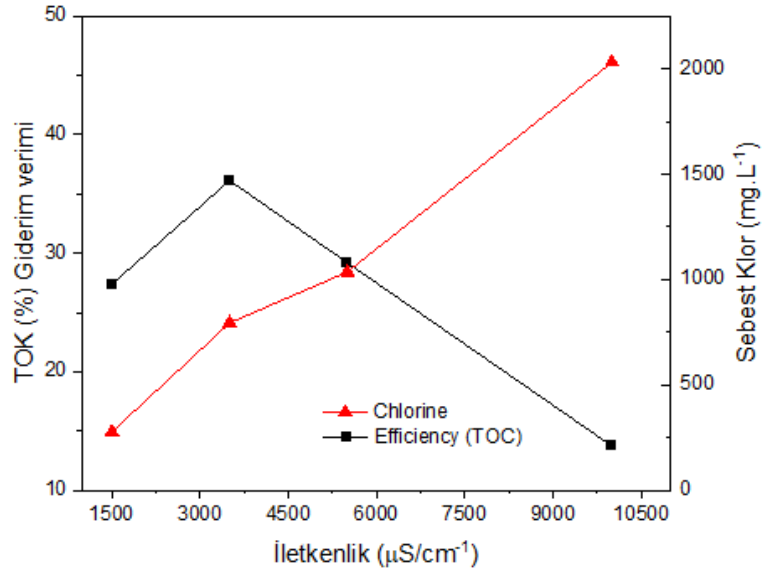
### 9.2.3. İletkenliğin Etkisi

İletkenlik artışı ile TOK giderimi arasındaki ilişki incelenmiş ve bu bağlamda, deneyler 1500  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , 3500  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , 5500  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  ve 10000  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  iletkenlik seviyelerinde gerçekleştirilmiştir. İletkenlik, NaCl kullanılarak ayarlanmıştır. TOK giderim verimleri sırasıyla %27,37, %36,12, %29,2 ve %13,72 olarak elde edilmiştir. 3500  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 'den sonra iletkenlik arttıkça TOK gideriminin azaldığı, ancak klor üretiminin arttığı

gözlemlenmiştir (**Şekil 9.13**). Buna göre, yüksek klor içeriği, EO prosesinde daha düşük enerji tüketimini sağlamakta, TOK giderimini düşürmekte bununla birlikte enerji verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olmaktadır (**Tablo 9.3**). Kullanılan kimyasalların maliyetleri dikkate alındığında, daha yüksek iletkenlik değerlerinde çalışmanın enerji tasarrufunu sağladığını görülmüştür.

Elektrokimyasal arıtma yöntemleri bağlamında, atık suyun iletkenliği kritik bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Yüksek iletkenlik seviyeleri genellikle elektrokimyasal hücrenin direncinin azalmasıyla ilişkilendirilmektedir [113]. Bu direnç düşüşü, elektrokimyasal sürecin verimliliğinde bir artış ile doğrudan bağlantılıdır. Bu ilişki, elektrokimyasal arıtma işlemlerinin optimize edilmesinde iletkenliğin kilit bir parametre olduğunu vurgulamaktadır [114].

Bu durum, potansiyel fark ile çözeltinin elektriksel iletkenliği arasındaki ters ilişkiye dayandırılabilir. Özellikle sabit akımda, elektriksel iletkenlik arttıkça gerekli uygulanan potansiyel fark azalmaktadır. Daha düşük potansiyel fark ile enerji tüketiminin azalması prensibi, deneysel çalışmamızın sonuçlarıyla da doğrulanmaktadır.



**Şekil 9.13:** %10 Ce ve %10 La için akım yoğunluğu ve klor bazında giderim verimliliği (200 A·m<sup>-2</sup> akım yoğunluğu, 100 ppm RB5, 5 saat reaksiyon süresi, 5,5 pH).

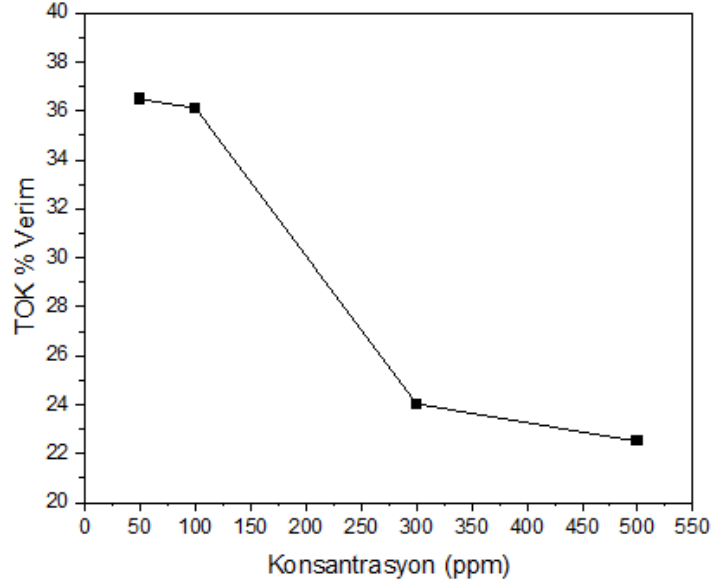
**Tablo 9.3:** Farklı iletkenlik değerlerindeki klor üretimi ve enerji tüketimi.

| İletkenlik ( $\mu\text{S.cm}^{-1}$ ) | % 10 Ce +% 10 La serbest klor ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) | % 10 Ce ve % 10 La Enerji tüketimi ( $\text{kWhm}^{-3}$ ) |
|--------------------------------------|--|---|
| 1500                                 | 276  | 210,27  |
| 3500                                 | 794  | 112.12  |
| 5500                                 | 1035   | 93.16   |
| 10000                                | 2031   | 62.10   |

#### 9.2.4. Konsantrasyonun Etkisi

Çalışmamızda boya konsantrasyonunun etkisi incelenmiştir. **Şekil 9.14**'te görüldüğü gibi, başlangıç konsantrasyonu arttıkça TOK giderim veriminde bir azalma gözlemlenmiştir. Başlangıç konsantrasyonu 50 ppm'den 500 ppm'e kademeli olarak arttıkça, TOK giderimi de azalmaktadır. Bu değerler sırasıyla; 50 ppm için %36,48, 100 ppm için %36,12, 300 ppm için %24,03 ve 500 ppm için %22,50 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, sentetik RB5 çözeltilisinin başlangıç konsantrasyonu arttıkça TOK gideriminin azaldığı görülmektedir.

Her elektrotun belirli bir oksitleme ve radikal oluşturma kapasitesi olduğu için, konsantrasyon miktarının artması kapasitenin daha hızlı dolmasına neden olmuş ve bu durum verimliliğin düşmesine yol açmıştır. Başka bir çalışmada da konsantrasyon arttıkça TOK giderim veriminin azaldığı gözlemlenmiştir [115].



**Şekil 9.14:** %10 Ce ve %10 La için konsantrasyona bağlı TOK verimliliği ( $200 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$  akım yoğunluğu, 5 saat reaksiyon süresi,  $3500 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$  iletkenlik, 5,5 pH).

### 9.2.5. Renk Giderimi

EO prosesi, Ce ve/veya La katkılı  $\text{Ti}/\text{IrO}_2\text{-RuO}_2$  kullanılarak 100, 200, 350 ve  $600 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$  olmak üzere 4 farklı akım yoğunluğunda gerçekleştirilmiştir. Görünür ışık ve UV bölgesi boyalar içinde kromofor gruplarının ve karbon atomlarının ( $\text{C}=\text{C}$ ) geçişlerini işaret etmektedir [116]. 300 dakikalık işlem sonrasında UV-görünür absorpsiyonunda önemli bir azalma gözlemlenmiştir.

Optimum deney koşullarında ( $200 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$  akım yoğunluğu,  $3500 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$  iletkenlik, 5.5 pH, 100 ppm konsantrasyon ve 300 dakika işlem süresi) rengin ilk 5 dakikada kaybolmaya başladığı belirlenmiştir. Açık sarı renk 5 dakika boyunca kalmış ve ardından 300 dakikalık işlem sonunda tamamen yok olmuştur. Renk hızla kaybolmasına rağmen, 250-300 nm bölgesinde ara ürün oluşumunun arttığı gözlemlenmiştir. Görseller **Şekil 9.15**'te gösterilmiştir.

$\text{RuO}_2\text{-IrO}_2\text{-TiO}_2$  elektrotu, elektrot yüzeyinde oksitleyici ajan görevi gören klor üreterek oksidasyon sürecini hızlandırmaktadır. Atık su arıtımında ana oksitleyici ajan olarak

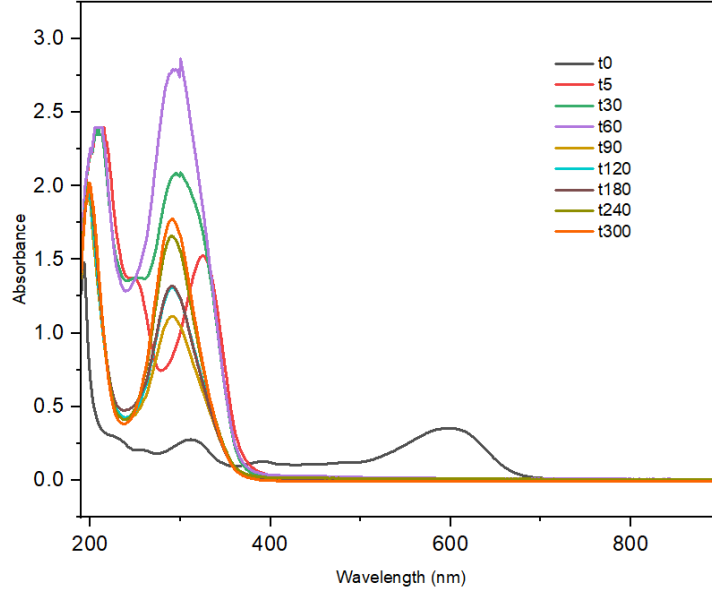
klorun önemli bir rol oynadığı bildirilmektedir [117]. Klor, azo boyalar içinde bulunan azot atomlarına hızlı bir şekilde saldırarak tekstil atık suyunda bulunan bileşenlerin daha ileri düzeyde oksidasyonunu sağlamaktadır. EO prosesinde renk giderek azalmaktadır. Çalışmamızda, farklı akım yoğunluklarında yaptığımız deneylerde, daha yüksek akım değerlerinin sentetik suyun rengini daha kısa sürede giderdiğini fiziksel gözlemlerimizle belirledik. En yüksek akım yoğunluğu olan  $600 \text{ A.m}^{-2}$ 'de, rengin ilk 5 dakika içinde tamamen kaybolduğu tespit edilmiştir.



**Şekil 9.15:** 100 ppm RB5 çözeltisinin farklı sürelerde elektrooksidasyon işlemi sırasında alınan numunelerdeki renk değişimi.

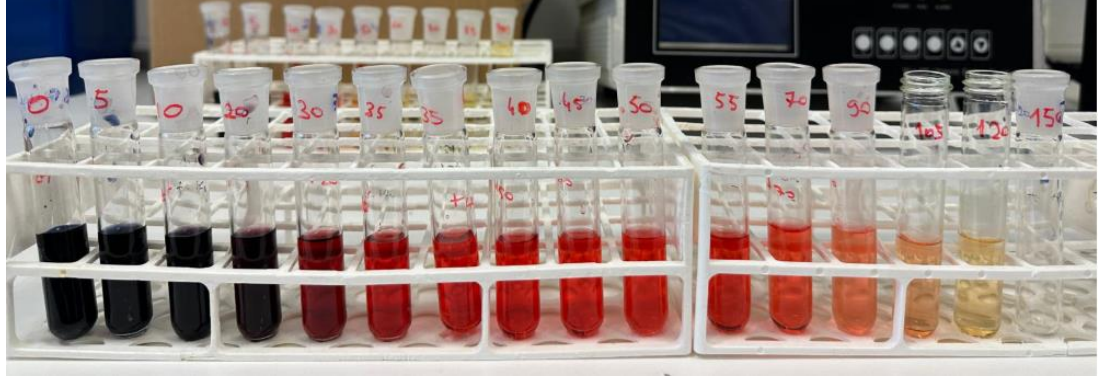
EO prosesinde farklı değişken koşullar altında uygulanan RB5, 597 nm'de bir tepe noktası oluşturmaktadır. Literatür araştırmalarına göre [49], bu tepe noktası sudaki rengi oluşturan azo bağlarına karşılık gelmektedir. 597 nm'nin ötesinde bu tepe noktalarının kaybolduğu gözlemlenmiştir, çünkü azo bağlarının parçalandığı belirlenmiştir. Genel olarak, çoğu çalışmada, işlem koşullarına bağlı olarak 10 dakika sonra suda genellikle renk kalmadığı

görülmektedir [112]. Diğer tepe noktalarının RB5 yapısına bağlı olduğu düşünülmektedir; 265 nm'de vinil sülfon (para-baz ester vinil sülfon) ve 236 nm'de H-asit (1-amino-8-hidroksinaftalen-3,6-disülfonik asit) ve 310 nm'de antrakinin oluşumu tekrar gözlemlenmiştir. Tez çalışmasında **Şekil 9.16**'te verilen grafiğe göre farklı zaman aralıklarında 292 nm ve 302 nm'de tepe noktaları oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu tepe noktalarının, RB5'in c-kompleks yapısından kaynaklanan ara ürünler olabileceği düşünülmektedir.



**Şekil 9.16:** %10 Ce ve %10 La karışık elektrotu kullanılarak RB5'in bozunmasına ait UV-Vis spektrumları (100 ppm, 200 A/m<sup>-2</sup>, pH 5,5, 3500 µS·cm<sup>-1</sup>).

Ayrıca çalışmada düşük akımda çalışılarak yavaş bir şekilde renk giderim profili gözlemlenmiştir. Zamana karşı alınan numunelerde renk giderimi **Şekil 9.17**'de verilmiştir.



Şekil 9.17: 10 A.m<sup>-2</sup>'de RB5 çözeltisinin 150 dakikada renk değişimi.

### 9.3. Tekstil Atıksuyu Giderim Çalışmaları

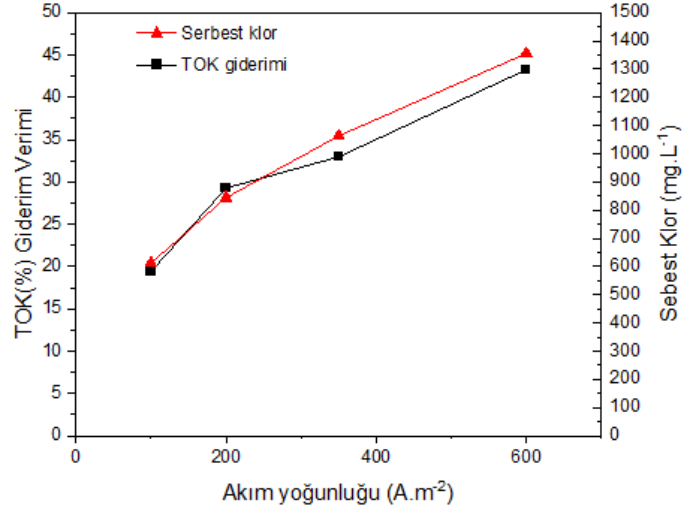
RB5 sentetik çözeltisi ile optimizasyon çalışmaları sonucunda %10 Ce ve %10 La katkılı karışık elektrot 200 A.m<sup>-2</sup>, 100 ppm konsantrasyon, 3500  $\mu$ S.cm<sup>-1</sup>, 5.5 pH ve 5 saatlik çalışma süresi ile katalitik en verimli elektrot olarak belirlenmiştir. Elektrotların endüstriye uygulanabilirliğinin en önemli etkeninin enerji verimliliği ve ekonomik olması dikkate alınarak 7 elektroda da tekstil atıksuyunda farklı akım yoğunluklarında EO prosesi uygulanmıştır. Atıksuyun karakterizasyonunda ölçülen iletkenlik değerinin 4 mS.cm<sup>-2</sup> ve pH değerinin 8,5 olması RB5 çözeltisinin optimum koşullarına yakın olması ve kimyasal sarfiyatının önlenerek ekstra bir maliyet oluşumunun önüne geçmek için pH ve iletkenlik etkisi araştırılmamış sadece farklı akım yoğunluklarında çalışılmıştır. Optimum elektrot tekstil atıksuyu için de 200 A.m<sup>-2</sup>'de %10 Ce ve %10 La karışık elektrot %29.26 TOK giderim verimi ile katalitik olarak en iyi elektrot olarak belirlenmiştir. RB5 sentetik çözeltisinde yapıldığı gibi çalışmanın bu bölümünde de elektrotların performansının standart bir elektrot ile karşılaştırılması için Ti/RuO<sub>2</sub>(%60)-IrO<sub>2</sub>(%40) standart elektrotun TOK giderim verimi ölçülmüş ve %25.73 bulunmuştur. Bu sonuç ile Ce ve La'nın birlikte kullanımı, elektrot yüzeyinde radikallerin oluşumunu artırarak daha etkili bir oksidasyon süreci sunabilir.

### 9.3.1. Akım Yoğunluğunun Etkisi

Tekstil atıksuyu optimum giderim verimi %10 Ce ve %10 La karışık elektrotta 200 A.m<sup>-2</sup>'de %29.26 olarak hesaplanmıştır. 600 A.m<sup>-2</sup> 'de verim %43.17'ye çıkmasına rağmen maliyet verim dengesi açısından 200 A.m<sup>-2</sup>'lik sonuçların daha uygun olduğuna karar verilmiştir. Çalışmadaki diğer elektrotlarında aynı akım değerlerindeki TOK giderim verimleri, klor üretim değerleri ve enerji tüketimleri aşağıdaki **Tablo 9.4**'te verilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, %5 La katkılı elektrot, düşük akımda en düşük katalitik verime sahipken, yüksek akımlarda büyük bir artış göstermiştir. %20 La katkılı elektrot ise %11.83 ile %27.3 arasında değişiklik göstermiştir. Bu durum, La'nın oksidasyon sürecine daha az katkı sağladığını, ancak yüksek akımlarda stabilitesini koruyarak verimi artırdığını gösterdiği düşünülmüştür.

%10 Ce ve %10 La katkılı karışık elektrot, tüm akım yoğunluklarında en yüksek giderim oranını sergilemiştir. Sonuçlar **Şekil 9.18**'de verilmiştir. Yüksek akım yoğunluklarında (350-600 A.m<sup>-2</sup>), %20 Ce katkılı elektrot, %10 Ce ve %10 La katkılı karışık kompozisyonlu elektroda yakın TOK giderim verimi sağlamıştır. Fakat 100 A.m<sup>-2</sup> ve 200 A.m<sup>-2</sup>'de tüm elektrotlarda karışık kompozisyonlu elektrot en iyi TOK giderim verimini sağlamıştır. Elde edilen sonuçlara göre çalışmada düşük akım yoğunluklarında Ce ve La'ın karışık kompozisyonlu kullanılması daha iyi bir sonuç vermektedir.



Şekil 9.18: %10 ve %10 için akım yoğunluğu ve klor bazında giderim verimliliği.

Tablo 9.4: Farklı akım yoğunluklarında TOK giderim verimi.

| Elektrot tipi            | 100 A.m <sup>-2</sup> | 200 A.m <sup>-2</sup> | 350 A.m <sup>-2</sup> | 600 A.m <sup>-2</sup> |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| %5 Ce TOK (%)            | 15                    | 26.6                  | 25.6                  | 12                    |
| %5 La TOK (%)            | 9.52                  | 19.59                 | 33.39                 | 32                    |
| %10 Ce TOK (%)           | 15                    | 20                    | 16                    | 27.83                 |
| %10 La TOK (%)           | 18.81                 | 17.08                 | 21.21                 | 26                    |
| %20 Ce TOK (%)           | 8.32                  | 16.79                 | <b>34.82</b>          | 42.3                  |
| %20 La TOK (%)           | 11.83                 | 19.17                 | 26                    | 27.3                  |
| %10 Ce ve %10 La TOK (%) | <b>19.4</b>           | <b>29.26</b>          | 32.95                 | <b>43.27</b>          |

En iyi giderim verimine sahip karışık elektrodun enerji tüketim değerleri de **Tablo 9.5**'te verilmiştir.

Tablo 9.5: %10 Ce ve %10 La katkılı karışık elektrdın farklı akım yoğunluklarında enerji tüketim değerleri.

| Akım Yoğunluğu (A.m <sup>-2</sup> ) | Enerji Tüketmi (kWhm <sup>-3</sup> ) |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 100                                 | 89.3                                 |
| 200                                 | 162.28                               |
| 350                                 | 264.65                               |
| 600                                 | 756.12                               |

### 9.3.2. Renk Giderimi

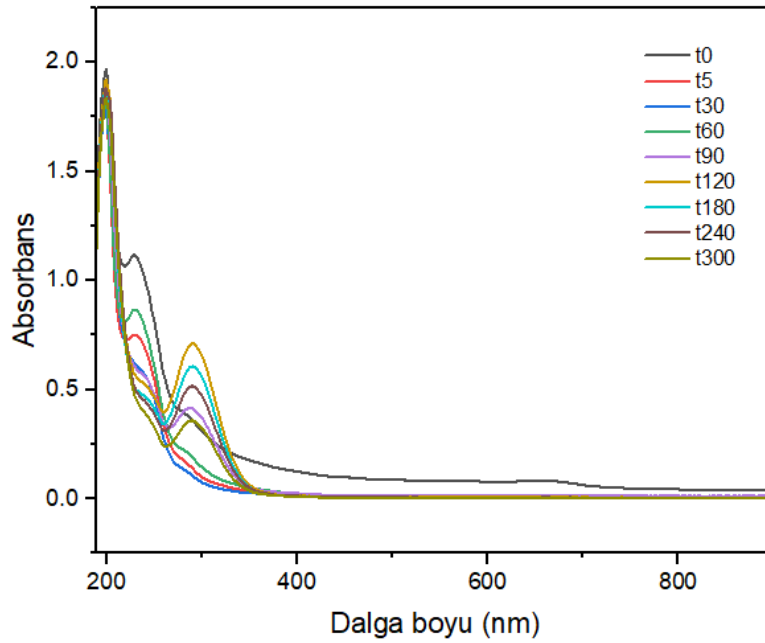
Çalışmada kullanılan tekstil atıksuyu, gri ile açık mavi arasında değişen, ancak çok yoğun olmayan bir renk aralığına sahiptir. EO prosesinin başlangıcında, ilk 5 dakika içinde bu renk hızla kaybolmuş ve çözelti açık sarı bir ton almıştır. Standart koşullar altında en iyi giderim verimi, %10 Ce ve %10 La katkılı karışık elektrot ile elde edilmiş olup, bu elektrot ile yapılan çalışmalarda en hızlı renk giderimi sağlanmıştır.

EO prosesinde elde edilen UV-Vis absorpsiyon spektrumları, süreç boyunca renk gideriminin nasıl gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Başlangıç spektrumunda ( $t=0$ ), özellikle 597 nm dalga boyunda yoğun bir absorpsiyon gözlemlenmiştir. Bu, tekstil boyalarının temel yapısında bulunan azo bağlarına karşılık gelmektedir ve bu bağların parçalanmasıyla birlikte spektrumda belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Beşinci dakikada absorpsiyonun önemli ölçüde düştüğü ve 250-350 nm aralığında ara ürünlerin varlığını gösteren küçük piklerin oluştuğu görülmektedir. Literatürde yer alan çalışmalar da benzer sonuçlara işaret etmektedir. Okur ve arkadaşları (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, La ve Ce katkılı metal oksit elektrotların tekstil boyalarının EO prosesinin etkinliği incelenmiş ve renk gideriminin oldukça hızlı gerçekleştiği belirtilmiştir [118].

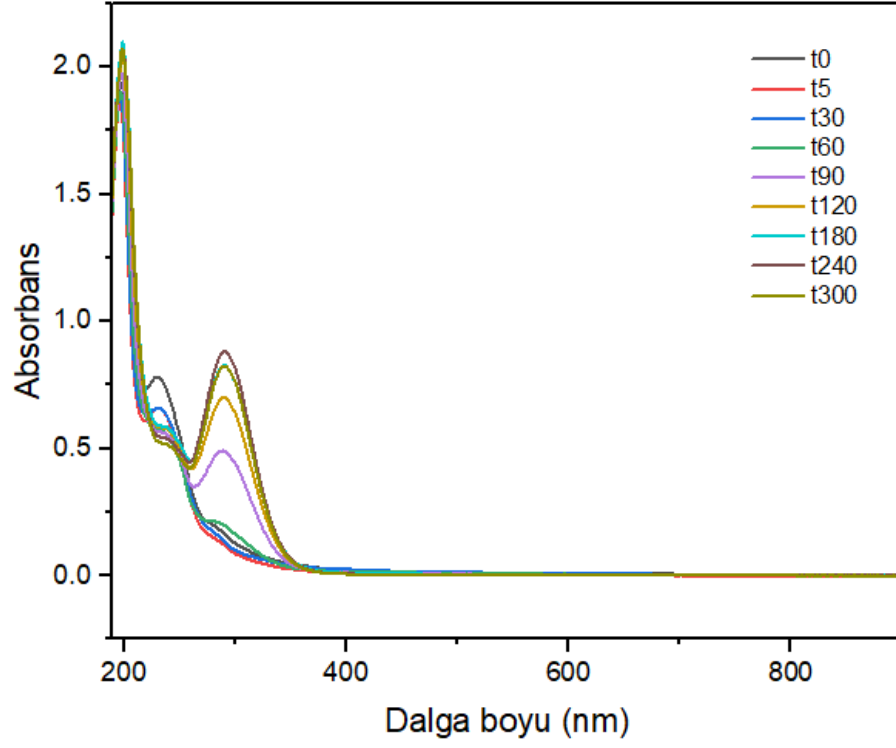
Elektrokimyasal oksidasyon sürecinin temel mekanizması, anot yüzeyinde güçlü oksidanların üretilmesiyle gerçekleşmektedir. Ti/IrO<sub>2</sub>-RuO<sub>2</sub> tabanlı elektrotlar, hidroksil radikalleri ve aktif klor türlerinin (Cl<sub>2</sub>, HOCl) oluşumuna katkı sağlayarak azo bağlarının parçalanmasını hızlandırmaktadır. Sathishkumar ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalar da, klor içeren ortamlarda hipokloröz asit ve hipoklorit iyonlarının, tekstil boyalarının hızla oksitlenmesinde önemli bir rol oynadığını ortaya koymaktadır [117]. Özellikle EO prosesinde klor bazlı oksidantların oluşması, renk gideriminin hızlanmasına katkıda bulunmakta ve 300 dakikanın sonunda UV-Vis spektrumundaki absorpsiyon neredeyse tamamen ortadan kalkmaktadır. Başka çalışmalarda ise benzer şekilde, azo boyalarının parçalanmasının 597 nm üzerindeki absorpsiyon pikinin kaybı ile doğrulandığı ve bu sürecin elektrotun kimyasal yapısına bağlı olarak değişebileceği belirtilmiştir. [49][112]

Bu çalışmada elde edilen bulgular, EO prosesinin tekstil atıksularında renk giderimi açısından oldukça etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir. . **Şekil 9.19** ve **Şekil 9.20**'de verilen spektrum analizleri, 250-300 nm aralığında ara ürün oluşumuna işaret etmekte olup, bu ara ürünlerin genellikle vinil sülfon ve H-asit türevleri olduğu düşünülmektedir. Sonuç olarak, tekstil atıksularının EO yöntemi ile arıtımı, hızlı ve yüksek verimli bir renk giderim süreci sunmakta ve ileri oksidasyon teknolojileri arasında önemli bir alternatif oluşturmaktadır.

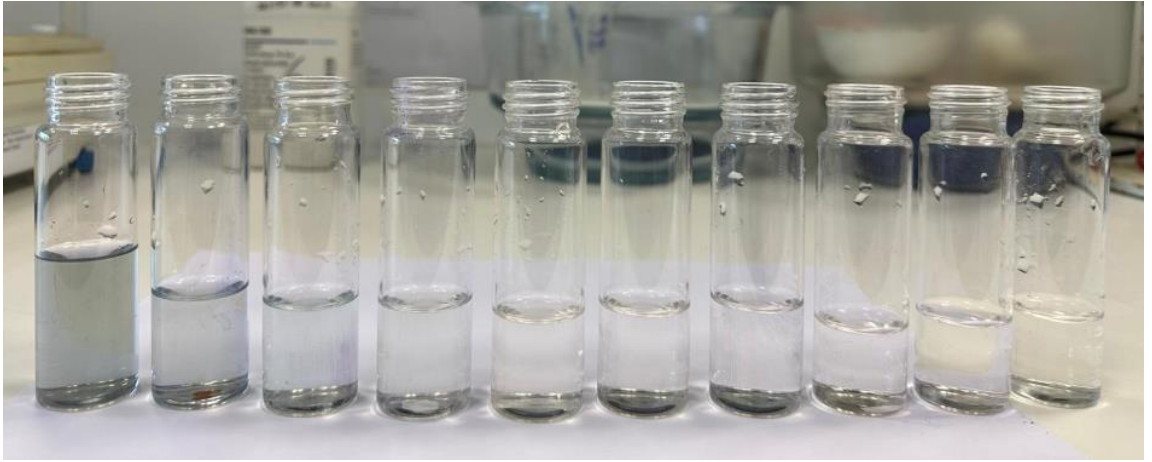
Kullanılan La ve Ce katkılı elektrotlar, literatürdeki en yüksek verimli elektrotlardan biri olarak, ilk 5 dakika içinde gözle görülür bir renk değişimi sağlamış (**Şekil 9.21**) ve işlem süresi boyunca azo bağlarının tamamen parçalanmasına neden olmuştur.



**Şekil 9.19:** %10 Ce ve %10 La karışık elektrotu kullanılarak tekstil atıksuyunun bozunmasına ait UV-Vis spektrumları.



**Şekil 9.20:** Ti/RuO<sub>2</sub>(%60)-IrO<sub>2</sub>(%40) standart elektrot kullanılarak tekstil atıksuyunun bozunmasına ait UV-Vis spektrumları.



**Şekil 9.21:** Tekstil atıksuyu renk giderimi.

## 9.4. Elektrotların karşılaştırılması

Bu tez çalışmasının amacı, Ti/RuO<sub>2</sub>(%60)-IrO<sub>2</sub>(%40) standart elektrot kaplamasına sahip olan elektrotun maliyetini azaltmak ve EO prosesi arıtma verimliliğini artırmaktır. Bu hedef doğrultusunda, Ru'a kıyasla daha pahalı bir malzeme olan Ir'un oranını azaltma kararı verilmiştir. Ce ve La'nın %5 ile %20 arasında değişen oranlarda katkılanmasıyla maliyet ve arıtma verimliliği üzerindeki etkiler araştırılmıştır.

Bu amaçla, Ce ve La'nın çeşitli oranlarla katkılı olduğu yedi farklı elektrot, standart koşullar altında (200 A·m<sup>-2</sup>, 100 ppm, 5 saat, 3500 µS·cm<sup>-1</sup>, 5.5 pH) EO prosesine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, RB5 sentetik çözeltisinde %10 Ce ve %10 La ile kaplanmış karışık kompozisyonlu elektrodu %36.12 TOK giderim verimliliği ile en yüksek performansı sağlamıştır. Serbest klor miktarı ise 794.08 mg·L<sup>-1</sup> olarak ölçülmüştür. Ti/RuO<sub>2</sub>(%60)-IrO<sub>2</sub>(%40) standart elektrot için TOK giderim verimliliği %29.22, serbest klor miktarı ise 333.23 mg·L<sup>-1</sup> olarak tespit edilmiştir. Aynı koşullarda gerçek tekstil atıksuyunda uygulanan EO prosesinde %10 Ce ve %10 La katkılı karışık kompozisyonlu elektrodun %29.26 TOK giderim verimliliği ile en yüksek performansı sağlamıştır. Serbest klor miktarı ise 843.71 mg·L<sup>-1</sup> olarak ölçülmüştür. Ti/RuO<sub>2</sub>(%60)-IrO<sub>2</sub>(%40) standart elektrot için TOK giderim verimliliği %25.73, serbest klor miktarı ise 482.17 mg·L<sup>-1</sup> olarak tespit edilmiştir.

RB5 sentetik çözeltisinde Ce oranı %5'ten %10'a artırıldığında, klor miktarının 496.3 mg·L<sup>-1</sup>'den 613.29 mg·L<sup>-1</sup>'ye yükseldiği, TOK giderim verimliliğinin ise %29.97'den %32.32'ye çıktığı gözlemlenmiştir. Ancak, oran %10'dan %20'ye çıkarıldığında, klor miktarı 613.29 mg·L<sup>-1</sup>'den 694.82 mg·L<sup>-1</sup>'ye yükselmesine rağmen TOK giderim performansının artmadığı ve aşırı klor oluşumunun negatif sönümlenme etkisi nedeniyle verimliliğin azaldığı görülmüştür ve TOK giderim verimi %29.2 olarak ölçülmüştür. Şekil 28'e göre, optimum Ce oranı %10 olarak bulunmuş ve ikinci en verimli elektrot %10 katkılı Ce olarak belirlenmiştir.

La'nın farklı oranlardaki katkılandırma etkisinin klor oluşumu ve dolayısıyla TOK giderim verimliliği açısından olumlu bir etki sağlamadığı, ancak Ce ile birlikte katkılandırıldığında çok yüksek bir sinerjik etki gösterdiği belirlenmiştir. Ce

katkılandırılması ile TOK giderim verimliliği değeri %29.03'ten %36.12'ye yükselmiştir. TOK giderim verimliliği ile klor seviyeleri karşılaştırıldığında, La ile katkılanmış elektrotların daha az klor ürettiği, Ce ile katkılanmış elektrotların ise daha yüksek klor üretimi sergilediği gözlemlenmiştir.

Benzer bir çalışmada, nadir toprak elementi Ce ile zenginleştirilmiş bir PbO<sub>2</sub> anodu elektrokimyasal kaplama yöntemiyle üretilmiştir. Bu elektrotların yapısal ve elektrokimyasal özellikleri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Sonuçlar, Ce'nin PbO<sub>2</sub> kristal yapısına başarılı bir şekilde dahil edildiğini ve bunun kristalinliği ve parçacık boyutunu artırmasının yanı sıra elektrokatalitik oksidasyon kapasitesini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir [119]. Ce<sup>+3</sup> ile kaplanan elektrotların elektrokimyasal performansı artırdığı ve Ce döngüsünün kapasitesini genişlettiği rapor edilmiştir [120]. Benzer şekilde, nadir toprak elementlerinin eklenmesinin elektrot yapısını güçlendirdiği, yüzey morfolojisini iyileştirerek daha kompakt ve daha az çatlak içeren bir yapı oluşturduğu anlaşılmıştır. Bu elementler arasında La, Ce ve Pr karşılaştırıldığında, La'nın en iyi yüzey morfolojisini sağladığı bulunmuştur [121].

Başka bir çalışmada, La katkılandırılmış Ti/Sb-SnO<sub>2</sub>'nin elektrokimyasal işlemlerin performansını artırmada etkili bir araç olduğu ve atıksu arıtımı için üstün bir anot olduğu anlaşılmıştır. La katkısının kristal yapıya dahil edilmesi, yer değiştirme, arayer pozisyonlarının doldurulması veya dağılım yoluyla gerçekleşebilir. Bu süreç, kafesin genişlemesine ve bir yük dengesizliği oluşmasına neden olur. Sonuç olarak, elektrot kaplamasında boşluklar ve boş alanlar oluşur, bu da elektrotun katalitik oksidasyon kapasitesini artırır [122].

Ce ve La ile katkılanmış elektrotlar, EO proseslerinde önemli avantajlar sunarak Pb gibi toksik elementlere alternatif olarak umut vadeden bir seçenek oluşturmaktadır. Bu katkı maddeleri, özellikle kalıcı kirleticilerin ve boyaların gideriminde etkili olup, yüksek renk giderim verimliliği sağlamaktadır. %10 La ve %10 Ce katkılı elektrot, en yüksek TOK giderim performansı sergilemiştir. SEM görüntülerinde gözlemlendiği üzere, kaplamalar yüzeye iyi bir şekilde tutunmakta ve bu durum elektrotların stabilitesini ve dayanıklılığını artırmaktadır.

La ve Ce'nin dâhil edilmesi, oksijen evrim potansiyelini artırarak ve yük transfer direncini azaltarak elektrokimyasal özellikleri iyileştirmekte ve genel performansı optimize etmektedir. Ancak, Ir ve Ru gibi değerli metallerin kullanımı, Ce ve La'nın eklenmesine rağmen yüksek maliyetlerine neden olmaktadır.

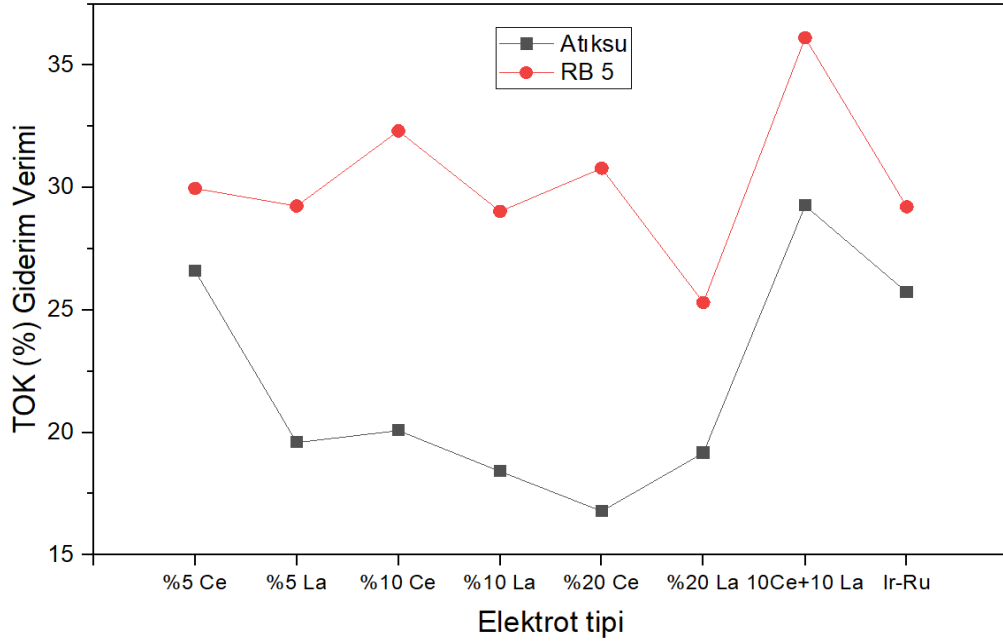
Bu elektrotların giderim performansı, akım yoğunluğu, pH ve iletkenlik gibi işletim parametrelerinin optimize edilmesine büyük ölçüde bağlıdır. Ayrıca, yüksek akım yoğunluklarında uzun süreli kullanım, elektrotların yapısal bütünlüğünü olumsuz etkileyerek uzun vadeli etkinliklerini azaltabilmektedir.

Bu bilgiler ışığında 7 farklı kaplanan elektrottan %10 Ce ve %10 La en yüksek giderim verimini sağlarken ikinci yüksek giderim verimini RB5 sentetik çözeltisinde %32,32 TOK giderim verimi ile %10 Ce katkılı elektrot, tekstil atıksuyunda ise %26.6 TOK giderim verimi ile %5 Ce katkılı elektrot sağlamıştır.

RB5 sentetik çözeltisinde görülen eğilimlere benzer şekilde, atıksuda da da Ce ve La katkısının TOK giderimi üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Ancak, atıksuyun içerdiği ek kirleticiler ve bileşenler nedeniyle giderim verimlilikleri genel olarak RB5 sentetik çözeltisine kıyasla daha düşük seviyelerde kalmıştır. Ce katkısı, %5 Ce'den %10 Ce'ye çıkıldığında TOK giderim verimliliği %26.6'dan %20.08'e düşmüştür. Bu durum, sentetik çözelti ile benzer şekilde, Ce'nin artan katalitik aktivitesinin belli bir noktada yan reaksiyonlara neden olabileceğini ve bu yüzden etkinliğin azalabileceğini göstermektedir. Atıksu içinde bulunan organik ve inorganik kirleticiler nedeniyle Ce katkısı, beklenen etkiyi tam olarak göstermemiştir. Kaplamada Ce içeriği %10 Ce'den %20 Ce'ye artırıldığında ise RB5 çözeltisinde olduğu gibi Ce oranı %20'ye çıkarıldığında klor üretimi artsa da, atıksuda TOK giderim verimi azalmıştır. Yüksek Ce oranları, klor oluşumunu artırsa bile burada TOK giderimi açısından belirgin bir iyileşme sağlamamıştır. Bu negatif etki, aşırı klor oluşumunun atıksu içerisindeki bazı organik bileşenlerle reaksiyona girerek pasif hale gelmesine bağlı olabilir. Weng ve Yu, nadir toprak elementi katkılı elektrotların elektrokimyasal oksidasyonda kinetik mekanizmasını incelemiş ve PbO<sub>2</sub> bazlı elektrotların klor üretimini artırarak aşırı oksidasyonu tetikleyebileceğini belirlemiştir [123]. La katkısının etkisi değerlendirildiğinde, %5 La içeren elektrotun TOK verimi %19.59, %10 La içeren elektrotun verimi ise %18.41 olarak

gözlemlenmiştir. %20 La katkısında ise giderim TOK verimi %19.17 olarak belirlenmiştir, yani La içeriği artırıldığında giderim açısından önemli bir değişiklik olmamıştır. Bu durum, La'nın klor üretimi üzerinde Ce kadar etkili olmadığını ve elektrokimyasal oksidasyon sürecindeki rolünün Ce'a göre daha zayıf kaldığını göstermektedir. En iyi performans gösteren elektrot %10 Ce ve %10 La karışık kaplanan olmuştur. Bu da Ce ve La'nın birlikte kullanıldığında daha yüksek bir sinerji yarattığını, ancak tek başlarına kullanıldıklarında bu kadar etkili olmadıklarını göstermektedir. Bu eğilim sentetik çözeltilerde de gözlemlenmişti ve aynı durum atıksu için de geçerli olmuştur. Ti/RuO<sub>2</sub>(%60)-IrO<sub>2</sub>(%40) standart elektrodu, %25.73 giderim verimi katkılı elektrotların giderim değerlerinin arasında yer almıştır. Tüm sonuçlar **Şekil 9.22**'de verilmiştir.

Sonuç olarak elektrotların performansları hem sentetik RB5 boyar maddesi içeren çözelti ile hemde gerçek bir tekstil atıksuyu ile denenmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında Ce katkılı elektrotların göreceli olarak La'a göre daha iyi bir performans gösterdiği düşünülmüştür. Ce ve La'nın karışık kompozisyonlu kullanılması ile daha her iki ortamda da en iyi TOK giderim performansını vermiştir.



**Şekil 9.22:** Standart koşullarda RB5 ve atıksu TOK giderim verimleri.

## 10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında nadir toprak elementlerinde olan Ce ve La'nın farklı oranlarda katkılandırılması ile üretilen Ti/IrO<sub>2</sub>-RuO<sub>2</sub> elektrotların EO prosesinde yüksek giderim verimi elde edilmesi amaçlanmıştır. Buna göre ön deneyler tekstil endüstrisinde sıkça kullanılan bir boyar madde olan RB5'in sentetik çözeltilerinin hazırlanması ile yapılmıştır. Literatürden elde edilen sonuçlar ışığında optimum olacağı öngörülen deney koşullarında (200 A.m<sup>-2</sup>, 100 ppm, 5.5 pH, 3500 µS.cm<sup>-1</sup>, 300 dk) üretilen katkılandırma yapılan 7 farklı elektrot ve katkılandırılma yapılmamış Ti/RuO<sub>2</sub>(%60)-IrO<sub>2</sub>(%40) standart elektroduna EO prosesi uygulanmıştır. Sonuçlar TOK, renk ve klor üretimi olarak incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, farklı oranlarda La ve Ce katkılı Ti/IrO<sub>2</sub>-RuO<sub>2</sub> elektrotların TOK giderim verimi karşılaştırılmıştır. La katkılı, Ce katkılı ve La ve Ce karışık katkılı kompozisyonlu elektrotlar arasında, %10 Ce ve %10 La içeren karışık katkılı kompozisyona sahip elektrot, 200 A.m<sup>-2</sup> akım yoğunluğu, 5.5 pH değeri ve 100 ppm konsantrasyonunda %36.12 TOK giderim verimi ile en yüksek giderim verimine sahip elektrot olarak belirlenmiştir. Aynı koşullarda , Ti/RuO<sub>2</sub>(%60)-IrO<sub>2</sub>(%40) standart elektrodun TOK değeri %29.22 olarak ölçülmüştür. Ayrıca, RB5 çözeltilinde %10 Ce ve %10 La içeren karışık katkılı elektrot 794.08 mg.L<sup>-1</sup> artık klor miktarı ile doğrudan kirletici giderim verimini etkileyen en yüksek klor üretimini sağladığı gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Ce ve La katkıları ile elektrodun giderim veriminin temel elektroda göre artırılması sonucu ile daha iyi bir elektrot geliştirildiği kabul edilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümü olarak aynı elektrotlar bir tekstil fabrikasından tedarik edilen atıksu ile test edilmiştir. Bu çalışmada 100 A.m<sup>-2</sup>, 200 A.m<sup>-2</sup>, 350 A.m<sup>-2</sup> ve 600 A.m<sup>-2</sup> olmak üzere elektrotlara EO prosesi uygulanmıştır. Atıksuyun pH 8.5, iletkenlik değeri ise 4000 µS.cm<sup>-1</sup>'dir. Gereksiz kimyasal kullanımı önlemek ve ön denemelerde elde edilen sonuçlara göre bu değerlere müdahale edilmiştir. En iyi giderim verimi yine %10 Ce ve %10 La katkılandırma yapılan karışık kompozisyonlu elektrotta sağlanmış olup, TOK giderim verimliliği %29.26 olarak ölçülürken, klor üretimi 843.71 mg.L<sup>-1</sup> olarak belirlenmiştir. Yine aynı koşullarda Ti/RuO<sub>2</sub>(%60)-IrO<sub>2</sub>(%40) standart elektrodun TOK

değeri %25.73 olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar SEM ve XRD görüntüleri ile desteklenmiştir. En yüksek giderim verimi, beklenildiği gibi diğer değişkenler sabit tutulurken akımın  $600 \text{ A.m}^{-2}$ 'ye çıkarıldığı deneylerde elde edilmiş olup, %10 Ce ve %10 La karışık kompozisyonlu elektrot ile yapılan deneylerde RB5 sentetik çözeltisinde TOK giderim verimi %45.48 ve klor miktarı  $1134.4 \text{ mg.L}^{-1}$  olarak ölçülmüş, tekstil atıksuyunda ise %43.17 ve klor miktarı  $1355.12 \text{ mg.L}^{-1}$  olarak ölçülmüştür. Enerji tüketimi ve maliyetler göz önünde bulundurulduğunda, optimum deney koşulları  $200 \text{ A.m}^{-2}$  akım yoğunluğundaki TOK giderim verimleri RB5 sentetik çözeltisi için %36.12, klor üretimi ise  $794.08 \text{ mg.L}^{-1}$ , tekstil atıksuyu için ise, TOK giderim verimliliği %31,55, klor üretimi  $843.71 \text{ mg.L}^{-1}$  olarak kabul edilmiştir.

Mevcut literatürde önemli bir eksiklik, elektrotların sınırlı kullanım ömrü ve kirlilik giderim verimi performansıdır. La ve Ce kombinasyonu, bu sınırlamayı aşmayı amaçlamaktadır. Çalışmanın yeniliği, La ve Ce'un karışık kompozisyonlu kullanılması ile daha verimli sonuçlar elde edilmesidir. Yapılan çalışmalar ile karışık kompozisyonlu kaplanan elektrotun hem sentetik çözeltide hemde gerçek tekstil atıksuyunda en yüksek verimi göstermesi Ce ve La'ın karışık kompozisyonlu kullanılmasının daha verimli bir elektrot üretildiğini göstermektedir.

Bu kapsamda, gelecekte yapılacak çalışmalarda Ce ve La oranlarının katkılandırılmasının yanında diğer NTE'lerin (örneğin Pr, Nd, Y) tek başına ya da karışık katkılar halinde elektrot kompozisyonuna dahil edilerek oluşturulacak yeni çeşitlerinin değerlendirilmesi önerilmektedir. Ayrıca, EO prosesinin adsorpsiyon, fotokataliz veya membran filtrasyon gibi diğer arıtma yöntemleriyle hibrit sistemler şeklinde entegre edilmesi, sistemin hem giderim verimi hem de enerji-maliyet dengesini iyileştirme yönünde önemli katkılar sunabilir. Bununla birlikte, MMO katkılı elektrotlar ile birlikte farklı NTE oranlarının kombinasyonunun denenmesi, elektrot ömrünü ve yüzey aktivitesini daha da artırabilecek yeni elektrot materyallerinin geliştirilmesine olanak tanıyabilir. Böylece, hem laboratuvar ölçeğinde hem de gerçek saha koşullarında uygulanabilirliği yüksek, sürdürülebilir ve etkin EO sistemlerinin geliştirilmesi mümkün olabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Gözükızı M. F., Özbay N., (2024). Ayçiçeği biyosorbenti kullanılarak Remazol Red RR boyar maddesi içeren tekstil atık sularından biyosorpsiyon yöntemiyle renk gideriminin optimizasyonu ve kinetik modellenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30 (5), 700-706.
- [2] Bhatt P. V., Vyas, B., (2015). Production and characterization of biopolymer by plant growth promoting bacterial strain *Cronobacter malonaticus* BR-1. *Int J Adv Biotech Res*, 6, 21-32.
- [3] Panizza M., Cerisola G., (2004). Electrochemical oxidation as a final treatment of synthetic tannery wastewater. *Environmental Science & Technology*, 38 (20), 5470-5475.
- [4] Martínez-Huitle C. A., Brillas, E., (2008). Electrochemical alternatives for drinking water disinfection. *Angewandte Chemie International Edition*, 47 (11), 1998-2005.
- [5] Kahvecioğlu Ö., (2010). “Farklı Yöntemlerle Rutenyum ve İridyum Oksit Esaslı Elektroaktif Titanyum Elektrotların Üretimi ve Oksijen Deşarj Mekanizmasının İncelenmesi”, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [6] Esplugas S., Bila D. M., Krause L. G. T., Dezotti M., (2007). Ozonation and advanced oxidation technologies to remove endocrine disrupting chemicals (EDCs) and pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in water effluents. *Journal of Hazardous Materials*, 149 (3), 631-642.
- [7] Zwain H. M., Vakili M., Dahlan I., (2014). Waste material adsorbents for zinc removal from wastewater: a comprehensive review. *International Journal of Chemical Engineering*, 2014(1), 347912.
- [8] Skalska-Tuomi K., Kaijanen L., Monteagudo J. M., Mänttari M., (2025). Efficient removal of pharmaceuticals from wastewater: Comparative study of three advanced oxidation processes. *Journal of Environmental Management*, 375, 124276.
- [9] Marino L., Todesco R., Gagliano, E., Santoro D., Roccaro P., (2025). Real-time wastewater quality monitoring by fluorescence sensors: Validation for COD and CEC monitoring and implication for carbon footprint reduction. *Science of The Total Environment*, 963, 178464.
- [10] Zhao Z., Liu Y., Yu X., Wang C., Li B., Liu Y., Jiao W., (2025). Self-decomposition and catalytic decomposition of ozone in a high-gravity rotating packed bed. *Chemical Engineering Science*, 305, 121120.

- [11] Chen Y., Chai D., Zhang X., Jiang Z., Yao H., Yuan X., Wang Y., (2025). Iron-loaded Chinese herbal medicine residue biochar for heterogeneous catalytic ozonation of malathion wastewater. *Separation and Purification Technology*, 362, 131880.
- [12] Tian M., Chang J., Ding J., Yin Y., (2025). Impact of coexisting components on the catalytic ozonation of emerging contaminants in wastewater. *Separation and Purification Technology*, 131847.
- [13] Kurniawan T. A., Lo W. H., (2009). Removal of refractory compounds from stabilized landfill leachate using an integrated H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidation and granular activated carbon (GAC) adsorption treatment. *Water Research*, 43 (16), 4079-4091.
- [14] Beltran F. J., (2003). "Ozone Reaction Kinetics for Water and Wastewater Systems", 1st Edition, CRC Press.
- [15] Andreozzi R., Caprio V., Insola A., Marotta R., (1999). Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery. *Catalysis Today*, 53 (1), 51-59.
- [16] Neyens E., Baeyens J., (2003). A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique. *Journal of Hazardous Materials*, 98 (1-3), 33-50.
- [17] Chong M. N., Jin B., Chow C. W., Saint C., (2010). Recent developments in photocatalytic water treatment technology: a review. *Water Research*, 44 (10), 2997-3027.
- [18] Noureen L., Wang Q., Humayun M., Shah W. A., Xu Q., Wang, X., (2023). Recent advances in structural engineering of photocatalysts for environmental remediation. *Environmental Research*, 219, 115084.
- [19] Gogate P. R., Pandit A. B., (2004). A review of imperative technologies for wastewater treatment I: oxidation technologies at ambient conditions. *Advances in Environmental Research*, 8 (3-4), 501-551.
- [20] Mason T. J., Peters, D., (2002), "Practical sonochemistry: Power ultrasound uses and applications", Woodhead Publishing.
- [21] Baker R. W., (2023), "Membrane technology and applications", John Wiley & Sons.
- [22] Judd S., (2010), "The MBR book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment", Elsevier.
- [23] Zhang Z., Guo Y., Long F., Zhang X., Wan, J., Ren Y., (2025). Continuous fabrication of hollow photocatalytic CNT/TiO<sub>2</sub>/calcium alginate microfibers via needle-based microfluidic device for environmental remediation in NO removal. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 115750.

- [24] Aidli W., Comis S., Falcioia L., Pifferi V., (2025). Benzoquinone-Modified Vertically Aligned Mesoporous Silica for Ratiometric Electrochemical Detection of Diclofenac. *Talanta*, 127711.
- [25] Dong H., Zheng L., Wang Z., Xu K., Chen W., Liu Z., Xu M., (2025). Dual-Mode Ratiometric Electrochemical and Turn-on Fluorescent Probe for Reliably Detecting H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in Parkinson's Disease Serum. *Sensors and Actuators Reports*, 100305.
- [26] Mollah M. Y. A., Schennach R., Parga J. R., Cocke D. L., (2001). Electrocoagulation (EC)—science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 84 (1), 29-41.
- [27] Chen G., (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and purification Technology*, 38 (1), 11-41.
- [28] Alnaimat S., Mohsen O., Elnakar H., (2024). Perfluorooctanoic Acids (PFOA) removal using electrochemical oxidation: A machine learning approach. *Journal of Environmental Management*, 370, 122857.
- [29] Pang R., Duan P., Li M., Li D., Zheng L., Zhang Y., Qian F., (2024). Enhancing electrocatalytic oxidation via spatial confinement in Ti<sub>4</sub>O<sub>7</sub> Nanopore Membranes: Synthesis, Characterization, and Mechanistic insights. *Chemical Engineering Journal*, 500, 157346.
- [30] Körbahti B. K., (2007). Response surface optimization of electrochemical treatment of textile dye wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 145 (1-2), 277-286.
- [31] Linares-Hernández I., Barrera-Díaz C., Bilyeu B., Juárez-GarcíaRojas P., Campos-Medina E., (2010). A combined electrocoagulation–electrooxidation treatment for industrial wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 175 (1-3), 688-694.
- [32] Körbahti B. K., Taşyürek S., (2015). Electrochemical oxidation of ampicillin antibiotic at boron-doped diamond electrodes and process optimization using response surface methodology. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 3265-3278.
- [33] Anglada A., Urriaga A., Ortiz I., (2009). Contributions of electrochemical oxidation to waste-water treatment: fundamentals and review of applications. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 84 (12), 1747-1755.
- [34] Altıncı O. C., (2022), “Pt-Ir Elektrot Üzerine Kaplanmış Grafen Oksit Katkılı Polianilin'in Glikozun Elektrokimyasal Oksidasyonunda Kullanımının İncelenmesi”, Doktora Tezi, Mersin Üniversitesi.
- [35] Martínez-Huitle C. A., Panizza M., (2018). Electrochemical oxidation of organic pollutants for wastewater treatment. *Current Opinion in Electrochemistry*, 11, 62-71.

- [36] Garcia-Segura S., Ocon J. D., Chong M. N., (2018). Electrochemical oxidation remediation of real wastewater effluents—A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 113, 48-67.
- [37] Arslantaş H., M., (2021), “Anodik Oksidasyon Yöntemi ile Atıksulardan Tetrasiklin Giderimi”, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi.
- [38] Can O. T., Gündoğdu H., Keyikoğlu R., Elibol P. S., Aygün A., İşleyen M., (2024). Kozmetik sanayi atıksularının boron doped diamond, platin ve metaloksit elektrotlar ile elektrooksidasyon prosesinde arıtılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30 (1), 81-86.
- [39] Kus B., Sezer M., Isgoren M., Veli S., (2025). Anodic electrooxidation of textile wastewater by using spray coating Ti/TiO<sub>2</sub>-RuO<sub>2</sub>-IrO<sub>2</sub> anode: Response surface optimization of the process. *Journal of the Indian Chemical Society*, 101595.
- [40] Fu X., Han Y., Xu H., Su Z., Liu L., (2022). Electrochemical study of a novel high-efficiency PbO<sub>2</sub> anode based on a cerium-graphene oxide co-doping strategy: electrodeposition mechanism, parameter optimization, and degradation pathways. *Journal of Hazardous Materials*, 422, 126890.
- [41] Dai Q., Xia Y., Chen J., (2016). Mechanism of enhanced electrochemical degradation of highly concentrated aspirin wastewater using a rare earth La-Y co-doped PbO<sub>2</sub> electrode. *Electrochimica Acta*, 188, 871-881.
- [42] GilPavas E., Dobrosz-Gómez I., Gómez-García M. Á., (2018). Optimization of sequential chemical coagulation-electro-oxidation process for the treatment of an industrial textile wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 22, 73-79.
- [43] Radha K. V., Sridevi V., Kalaivani K., (2009). Electrochemical oxidation for the treatment of textile industry wastewater. *Bioresource Technology*, 100 (2), 987-990.
- [44] Okur M. C., Akyol A., Nayir T. Y., Kara S., Ozturk D., Civas, A., (2022). Performance of Ti/RuO<sub>2</sub>-IrO<sub>2</sub> electrodes and comparison with BDD electrodes in the treatment of textile wastewater by electro-oxidation process. *Chemical Engineering Research and Design*, 183, 398-410.
- [45] Raju G. B., Karuppiyah M. T., Latha S. S., Parvathy S., Prabhakar S., (2008). Treatment of wastewater from synthetic textile industry by electrocoagulation–electrooxidation. *Chemical Engineering Journal*, 144 (1), 51-58.
- [46] Soni B. D., Ruparelia J. P., (2013). Decolourization and mineralization of Reactive black-5 with transition metal oxide coated electrodes by electrochemical oxidation. *Procedia Engineering*, 51, 335-341.

- [47] Viana D. F., Salazar-Banda G. R., Leite M. S., (2018). Electrochemical degradation of Reactive Black 5 with surface response and artificial neural networks optimization models. *Separation Science and Technology*, 53 (16), 2647-2661.
- [48] Feng L., Liu J., Guo Z., Pan T., Wu J., Li X., Zheng H., (2022). Reactive black 5 dyeing wastewater treatment by electrolysis-Ce (IV) electrochemical oxidation technology: Influencing factors, synergy and enhancement mechanisms. *Separation and Purification Technology*, 285, 120314.
- [49] Soni B. D., Patel U. D., Agrawal A., Ruparelia J. P., (2017). Application of BDD and DSA electrodes for the removal of RB 5 in batch and continuous operation. *Journal of Water Process Engineering*, 17, 11-21.
- [50] Saxena P., Ruparelia J., Saxena, P., (2022). Comparative study of 4-dimensional DSA on electrochemical treatability of a reactive dye. *Materials Today: Proceedings*, 57, 2457-2464.
- [51] Vasconcelos V. M., Ponce-de-León C., Rosiwal S. M., Lanza M. R., (2019). Electrochemical Degradation of Reactive Blue 19 Dye by Combining Boron-Doped Diamond and Reticulated Vitreous Carbon Electrodes. *ChemElectroChem*, 6 (13), 3516-3524.
- [52] Soni B. D., Patel U. D., Agrawal A., Ruparelia J. P., (2020). Electrochemical destruction of RB5 on Ti/PtO<sub>x</sub>-RuO<sub>2</sub>-SnO<sub>2</sub>-Sb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> electrodes: A comparison of two methods for electrode preparation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17, 903-916.
- [53] Nhan N. T., Le Luu T., (2023). Fabrication of novel Ti/SnO<sub>2</sub>-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> electrode in comparison with traditional doping metal oxides for electrochemical textile wastewater treatment. *Environmental Technology & Innovation*, 32, 103292.
- [54] Samarghandi M. R., Dargahi A., Shabanloo A., Nasab H. Z., Vaziri Y., Ansari A., (2020). Electrochemical degradation of methylene blue dye using a graphite doped PbO<sub>2</sub> anode: optimization of operational parameters, degradation pathway and improving the biodegradability of textile wastewater. *Arabian Journal of Chemistry*, 13 (8), 6847-6864.
- [55] Dai Q., Xia Y., Chen J., (2016). Mechanism of enhanced electrochemical degradation of highly concentrated aspirin wastewater using a rare earth La-Y co-doped PbO<sub>2</sub> electrode. *Electrochimica Acta*, 188, 871-881.
- [56] Xia Y., Wang G., Guo L., Dai Q., Ma X., (2020). Electrochemical oxidation of Acid Orange 7 azo dye using a PbO<sub>2</sub> electrode: Parameter optimization, reaction mechanism and toxicity evaluation. *Chemosphere*, 241, 125010.
- [57] Rajeshwar K., Ibanez, J. G., (1997), "Environmental Electrochemistry: Fundamentals and Applications in Pollution Sensors and Abatement", 1st Edition, Elsevier.

- [58] Mohan N., Balasubramanian N., Basha C. A., (2007). Electrochemical oxidation of textile wastewater and its reuse. *Journal of Hazardous Materials*, 147 (1-2), 644-651.
- [59] Nie Y., Li N., Hu C., (2015). Enhanced inhibition of bromate formation in catalytic ozonation of organic pollutants over Fe–Al LDH/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Separation and Purification Technology*, 151, 256-261.
- [60] Hao X., Wang X., Liu R., Li S., Van Loosdrecht M. C., Jiang H., (2019). Environmental impacts of resource recovery from wastewater treatment plants. *Water Research*, 160, 268-277.
- [61] Sharma R., Kumar H., Saini C., Gupta A., Pandit V., (2024). Exploring the collaborative wonders of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles embedded in reduced graphene oxide matrices. *Inorganic Chemistry Communications*, 162, 112275.
- [62] Naje A. S., “I Electrocoagulation Using Novel Configurations Electrodes for Treatment of Textile Wastewater”, 2016.
- [63] Gupta C. K., Krishnamurthy N., (1992). Extractive metallurgy of rare earths. *International Materials Reviews*, 37 (1), 197-248.
- [64] Sato M., Kim S. W., Shimomura Y., Hasegawa T., Toda K., Adachi G., (2016). Rare earth-doped phosphors for white light-emitting diodes. In *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths* (Vol. 49, pp. 1-128). Elsevier.
- [65] Charalampides G., Vatalis K. I., Apostoplos B., Ploutarch-Nikolas B., (2015). Rare earth elements: industrial applications and economic dependency of Europe. *Procedia Economics and Finance*, 24, 126-135.
- [66] Rao C. N. R., (1989). Transition metal oxides. *Annual Review of Physical Chemistry*, 40 (1), 291-326.
- [67] Kanazawa Y., Kamitani M., (2006). Rare earth minerals and resources in the world. *Journal of Alloys and Compounds*, 408, 1339-1343.
- [68] Harris I. R., Jewell G. W., (2012). Rare-earth magnets: properties, processing and applications. In *Functional Materials For Sustainable Energy Applications* (pp. 600-639). Woodhead Publishing.
- [69] Ünal F., (2019). Farklı Lantanit Grubu Elementler Doplanarak Elde Edilen Lüminesans Malzemelerin Üretimi Ve Karakterizasyonu.
- [70] Öztürk H., Hanilçi N., Altuncu S., Kasapçı C., (2019). Türkiye'nin Nadir Yer Element (NYE) Kaynakları: Özelliklerine Ve Kökenlerine Genel Bir Bakış Rare Earth Element (REE) Resources of Turkey: An Overview of Their Characteristics and Origin.

- [71] Özen Öner E., (2023), “Gadolinium Nadir Toprak Elementinin Nimsn Manyetik Şekil Hatırlamalı Alaşımların Dönüşüm Sıcaklığı Ve Fiziksel Özellikleri Üzerine Etkisinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi.
- [72] Güldalı Ö., (2017), “Lantanit Katkılı Yarıiletken İnce Filmlerin Optik Özelliklerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi.
- [73] Web 1, (2020), <https://www.lenntech.com/periodic/elements/la.htm>, (Erişim Tarihi: 16.03.2025).
- [74] Madhav S., Ahamad A., Singh P., Mishra P. K., (2018). A review of textile industry: Wet processing, environmental impacts, and effluent treatment methods. *Environmental Quality Management*, 27 (3), 31-41.
- [75] Web 2, (2022), <http://www.rareelementresources.com/rare-earth-elements/rare-earths-at-bearlodge>, (Erişim Tarihi: 10.02.2025).
- [76] Trovarelli A., (2002). “Catalysis By Ceria and Related Materials”, 2nd Edition, World Scientific.
- [77] Kösemen A., (2016), “Yarı İletken Metal Oksit Nanoyapıların Üretimi, Karakterizasyonu ve Ters Hibrit Güneş Piline Uygulamaları”, Doktora Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.
- [78] Jiang Y., Zhao H., Liang J., Yue L., Li T., Luo Y., Sun X., (2021). Anodic oxidation for the degradation of organic pollutants: anode materials, operating conditions and mechanisms. A mini review. *Electrochemistry Communications*, 123, 106912.
- [79] Djatoubai E., & Su J., (2021). First spray pyrolysis thin film fabrication of environment-friendly Cu<sub>2</sub>BaSnS<sub>4</sub> (CBTS) nanomaterials. *Chemical Physics Letters*, 770, 138406.
- [80] Melentiev R., Yudhanto A., Tao R., Vuchkov T., Lubineau G., (2022). Metallization of polymers and composites: State-of-the-art approaches. *Materials & Design*, 221, 110958.
- [81] Qu G., Zhou Y., Zhang J., Xiong L., Yue Q., Kang Y., (2020). Alternately dipping method to prepare graphene fiber electrodes for ultra-high-capacitance fiber supercapacitors. *IScience*, 23 (8).
- [82] Tajima K., Kubota T., Jeong C. Y., (2022). Preparation of electrochromic thin films by humidity-controlled spin coating. *Thin Solid Films*, 758, 139412.
- [83] Zeng Y., Pei X., Yang S., Qin H., Cai H., Hu S., Wang J., (2016). Graphene oxide/hydroxyapatite composite coatings fabricated by electrochemical deposition. *Surface and Coatings Technology*, 286, 72-79.

- [84] Stone C., Windsor F. M., Munday M., Durance I., (2020). Natural or synthetic—how global trends in textile usage threaten freshwater environments. *Science of the Total Environment*, 718, 134689.
- [85] Azanaw A., Birlie B., Teshome B., Jemberie M., (2022). Textile effluent treatment methods and eco-friendly resolution of textile wastewater. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6, 100230.
- [86] Lyu Y., Liu Y., Guo Y., Tian J., Chen L., (2021). Managing water sustainability in textile industry through adaptive multiple stakeholder collaboration. *Water Research*, 205, 117655.
- [87] Patel D., Singh A., Ambati S. R., Singh R. S., Sonwani R. K., (2024). An overview of recent advances in treatment of complex dye-containing wastewater and its techno-economic assessment. *Journal of Environmental Management*, 370, 122804.
- [88] Salleh M. A. M., Mahmoud D. K., Karim W. A. W. A., Idris, A., (2011). Cationic and anionic dye adsorption by agricultural solid wastes: a comprehensive review. *Desalination*, 280 (1-3), 1-13.
- [89] El Bouraie M., El Din W. S., (2016). Biodegradation of Reactive Black 5 by *Aeromonas hydrophila* strain isolated from dye-contaminated textile wastewater. *Sustainable Environment Research*, 26 (5), 209-216.
- [90] Forgacs E., Cserhádi T., Oros G., (2004). Removal of synthetic dyes from wastewaters: a review. *Environment International*, 30 (7), 953-971.
- [91] Yao L., Lua S. K., Zhang L., Wang R., Dong Z., (2014). Dye removal by surfactant encapsulated polyoxometalates. *Journal of Hazardous Materials*, 280, 428-435.
- [92] Topaloğlu A. K., (2020), “Çok Oksitli Metal İçerikli Polimer Malzemelerin Hazırlanması Ve Karakterize Edilmesi”, Doktora Tezi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi.
- [93] Mohan D., Pittman Jr C. U., (2007). Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents—a critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 142 (1-2), 1-53.
- [94] Babu B. R., Parande A. K., Raghu S., Kumar T. P., (2007). Cotton textile processing: Waste generation and effluent treatment.
- [95] Lauzurique Y., Miralles-Cuevas S., Godoy M., Sepúlveda P., Bollo S., Cabrera-Reina, A., Salazar-González R., (2023). Elimination of sulfamethoxazole by anodic oxidation using mixed metal oxide anodes. *Journal of Water Process Engineering*, 54, 103922.
- [96] Meng J., Guo H., Niu C., Zhao Y., Xu L., Li Q., Mai L., (2017). Advances in structure and property optimizations of battery electrode materials. *Joule*, 1 (3), 522-547.

- [97] Wang Q., Wu F., Wang N., Wang L., Zhang X., (2012). Electrochemical behavior of  $\text{Ir}_x\text{Ru}_{1-x}\text{O}_2$  oxides as anodic electrocatalyst for electrosynthesis of dinitrogen pentoxide. *Electrochimica Acta*, 74, 227-234.
- [98] Subba Rao A. N., Venkatarangaiah V. T., (2014). Metal oxide-coated anodes in wastewater treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 21, 3197-3217.
- [99] Feng L., Liu J., Guo Z., Pan T., Wu J., Li X., Zheng H., (2022). Reactive black 5 dyeing wastewater treatment by electrolysis-Ce (IV) electrochemical oxidation technology: Influencing factors, synergy and enhancement mechanisms. *Separation and Purification Technology*, 285, 120314.
- [100] Vishnoi M., Murtaza Q., Kumar P., (2024). Mechanical and surface wettability analysis of rare earth modified composite coating developed using metal spraying. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49 (2), 2065-2076.
- [101] Lyu J., Han H., Wu Q., Ma H., Ma C., Dong X., Fu Y., (2019). Enhancement of the electrocatalytic oxidation of dyeing wastewater (reactive brilliant blue KN-R) over the Ce-modified Ti-PbO<sub>2</sub> electrode with surface hydrophobicity. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 23, 847-859.
- [102] Bi Q., Xue J., Tang C., Yu L., Li G., Zhang X., (2016). The modification mechanism of lanthanum doping in Ti/Sb-SnO<sub>2</sub> electrode and its electrocatalytic behavior of degradation of p-nitrophenol. *International Journal of Electrochemical Science*, 11(9), 7412-7429.
- [103] Xu M., Wang Z., Wang F., Hong P., Wang C., Ouyang X., Fang W., (2016). Fabrication of cerium doped Ti/nanoTiO<sub>2</sub>/PbO<sub>2</sub> electrode with improved electrocatalytic activity and its application in organic degradation. *Electrochimica Acta*, 201, 240-250.
- [104] Yang K., Lei T., Liu Y., Qiao J., (2017). Preparation of Ce doped Ti-based SnO<sub>2</sub>/Sb electrode and its application in dyestuff wastewater degradation with improved treatment efficiency. In *2017 6th International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development (ICEESD 2017)* (pp. 945-949). Atlantis Press.
- [105] Nie J., Mo Y., Zheng B., Yuan H., Xiao D., (2013). Electrochemical fabrication of lanthanum-doped TiO<sub>2</sub> nanotube array electrode and investigation of its photoelectrochemical capability. *Electrochimica Acta*, 90, 589-596.
- [106] Bi Q., Wang Z., Dang C., Zhang Z., Wu G., Cheng W., Xue J., (2021). A study on the effect of introducing S-doped GO into the active layer on the performance of wire mesh Ti/Ce-Mn/SnO<sub>2</sub>-Sb-La electrodes. *Journal of Alloys and Compounds*, 862, 158033.
- [107] Ma J., Wang T., Zhao Y., Chang F., (2024). Fabrication of Ti/SnO<sub>2</sub>-Sb electrodes containing RuO<sub>2</sub> interlayer for efficient electrocatalytic oxidation of caprolactam wastewater. *International Journal of Electrochemical Science*, 19 (2), 100460.

- [108] Zhu F. L., Meng Y. S., Huang X. Y., (2016). Electro-catalytic degradation properties of Ti/SnO<sub>2</sub>-Sb electrodes doped with different rare earths. *Rare Metals*, 35, 412-418.
- [109] Treviño-Reséndez J., Medel A., Cárdenas J., Meas Y., (2024). Electrooxidation using SnO<sub>2</sub>-RuO<sub>2</sub>-IrO<sub>2</sub>|Ti and IrO<sub>2</sub>-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>|Ti anodes as tertiary treatment of oil refinery effluent. *Applied Research*, 3 (3), e202300038.
- [110] Reynoso A. J., Iriarte-Velasco U., Gutiérrez-Ortiz M. A., Ayastuy J. L., (2022). Ce-doped cobalt aluminate catalysts for the glycerol hydrodeoxygenation (HDO) with in-situ produced hydrogen. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10 (3), 107612.
- [111] Farizoğlu B., Fil B. A., Uzuner S., Bicakci S., Er E., Kara E. N., (2018). Reactive black 5 removal with electro-oxidation method using Ti/IrO<sub>2</sub>/RuO<sub>2</sub> anode and stainless steel cathode. *International Journal of Electrochemical Science*, 13 (4), 3288-3296.
- [112] Gallios G., Violintzis X., Voinovskii I., Voulgaropoulos A., (2012). Electrochemical Oxidation of Synthetic Dyes in Simulated Wastewaters: Electrochemical Oxidation of Dyes in Wastewaters. In *Technological Innovations in Sensing and Detection of Chemical, Biological, Radiological, Nuclear Threats and Ecological Terrorism* (pp. 277-286). Springer Netherlands.
- [113] Ogundele O. D., Oyegoke D. A., Anaun T. E., (2023). Exploring the potential and challenges of electro-chemical processes for sustainable waste water remediation and treatment. *Acadlore Trans. Geosci*, 2 (2), 80-93.
- [114] Bachiri B., Ayyoub H., Tahaikt M., Elmidaoui A., Taky M., (2024). Optimizing water hardness removal through electrodialysis: A comprehensive exploration using Box-Behnken design analysis. *Kuwait Journal of Science*, 51 (2), 100175.
- [115] Titchou F. E., Zazou H., Afanga H., El Gaayda J., Ait Akbour R., Lesage G., Hamdani M., (2022). Electrochemical oxidation treatment of Direct Red 23 aqueous solutions: Influence of the operating conditions. *Separation Science and Technology*, 57 (9), 1501-1520.
- [116] Pandiyan R., Rajagopal R., (2023). Fabrication and characterisation of silver and lead nanoparticles and application upon synthetic azo dye degradation. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-6.
- [117] Sathishkumar K., Sathiyaraj S., Parthipan P., Akhil A., Murugan K., Rajasekar A., (2017). Electrochemical decolorization of methyl red by RuO<sub>2</sub>-IrO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> electrode and biodegradation with *Pseudomonas stutzeri* MN1 and *Acinetobacter baumannii* MN3: An integrated approach. *Chemosphere*, 183, 204-211.
- [118] Okur M. C., Öztürk D., Akyol, A., (2024). Next-Generation Electrode Materials: La/Ce Doping for Superior Anodic Oxidation. *ChemistrySelect*, 9 (47), e202403672.

- [119] Ni Y., Yue W., Liu F., Bi W., Sun Z., Wu Y., (2023). Efficient electrochemical oxidation of cephalosporin antibiotics by a highly active cerium doped PbO<sub>2</sub> anode: Parameters optimization, kinetics and degradation pathways. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 666, 131318.
- [120] Anjali P., Vani R., Sonia T. S., Nair A. S., Ramakrishna S., Ranjusha, R., Balakrishnan A., (2014). Cerium doped NiO nanoparticles: a novel electrode material for high performance pseudocapacitor applications. *Science of Advanced Materials*, 6 (1), 94-101.
- [121] Guo J. I. N., Bingwen L. U., Dingding H. O. U., Xiufang C. U. I., Jiahui S. O. N. G., Erbao L. I. U., (2016). Influence of rare earths addition on residual stress of Fe-based coating prepared by brush plating technology. *Journal of Rare Earths*, 34 (3), 336-340.
- [122] Bi Q., Xue J., Tang C., Yu L., Li G., Zhang X., (2016). The modification mechanism of lanthanum doping in Ti/Sb-SnO<sub>2</sub> electrode and its electrocatalytic behavior of degradation of p-nitrophenol. *International Journal of Electrochemical Science*, 11 (9), 7412-7429.
- [123] Weng M., Yu X., (2019). Electrochemical oxidation of para-aminophenol with rare earth doped lead dioxide electrodes: Kinetics modeling and mechanism. *Frontiers in Chemistry*, 7, 382.

## ÖZGEÇMİŞ

Melike Ceren Okur 2007 yılında Hitit Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü'ne başlamıştır. 2011 yılında Lisans Araştırma Projesi olarak “Sulu Çözeltilerden Klinoptilolit İle Demir Ve Mangan Giderimi” konusu çalışmış olup, 1. Ulusal Kimya Mühendisliği Öğrenci Kongresi 'nde sunarak aynı yıl mezun olmuştur.

2014 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisansa başlamış ve 2018 yılında “BDD ve KMO Farklı Elektrotlar Kullanılarak Elektrokimyasal Oksidasyon Prosesi İle Tekstil Atıksuyunun Arıtılabilirliğini Araştırılması” başlıklı tez konusu ile mezun olmuştur.

2022 yılında Performance of Newly Developed Ti/RuO<sub>2</sub>-IrO<sub>2</sub> Electrodes and Comparison with BDD Electrodes in the Treatment of Textile Wastewater by Electro-Oxidation Process ve 2024 yılında Next-Generation Electrode Materials: La/Ce Doping for Superior Anodic Oxidation başlıklı makaleleri çalışmıştır.

2013 yılından beri Jumo Ölçü Sistemleri ve Otomasyon firmasında Pazarlama Yöneticisi olarak çalışmaya devam etmektedir.

## TEZ METNİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR

Okur M. C., Öztürk D., Akyol A., (2024). Next-Generation Electrode Materials: La/Ce Doping for Superior Anodic Oxidation. *ChemistrySelect*, 9(45), 10.1002/slct.202403672.

