



I.BİLSEL ULUSLARARASI SÜTÇÜ İMAM BİLİMSEL ARAŞTIRMALAR KONGRESİ

06-07 KASIM

2025



BİLSEL
YAYINCILIK

KAHRAMANMARAŞ

KONGRE KİTABI



1. BİLSEL INTERNATIONAL SÜTÇÜ İMAM SCIENTIFIC RESEARCHES CONGRESS BOOK

November 06-07, 2025

KAHRAMANMARAŞ/TÜRKİYE

EDITOR

Assoc. Prof. Dr. Davut ATILGAN

ISBN: 978-625-8531-00-8

All rights of this book belong to BİLSEL PUBLISHING.

The book is not intended for commercial profit.

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.

Bu kitabın tüm hakları BİLSEL YAYINCILIK yayınevine aittir.

Kitap ticari bir kar amacı gütmemektedir.

Yayın etiği kurallarına uymak yazarın sorumluluğundadır.

<https://bilselkongreleri.com/>

20.11.2025

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, distributed or transmitted in any form or by any means, including photocopying, recording or other electronic or mechanical methods, without the prior written permission of the publisher, except in the case of brief quotations embodied in critical reviews and certain other noncommercial uses permitted by copyright law.



CONGRESS ID
CONGRESS TITLE

1. BİLSEL INTERNATIONAL SÜTÇÜ İMAM
SCIENTIFIC RESEARCHES CONGRESS

DATE and PLACE

November 06-07, 2025

KAHRAMANMARAŞ/TÜRKİYE

GENERAL COORDINATOR

Dr. Ömer DURSUN

ORGANIZING COMMITTEE

Chairman of the Organizing Committee

Assoc. Prof. Dr. Davut ATILGAN

University Academician Representative

Prof. Dr. Mehmet Murat KARAOĞLU

Atatürk Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet BAYIRLI

Balıkesir Üniversitesi

Prof. Dr. Hatice Burçin ŞOLT

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Prof. Dr. Alaeddin BOBAT

Kocaeli Üniversitesi

Prof. Dr. Süleyman GÖKSOY

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Yavuz Selim KAFKASYALI

Kafkas Üniversitesi

Doç. Dr. Şermin KOÇYİĞİT

Dicle Üniversitesi

Dr. Onur OKTAYSOY

Kafkas Üniversitesi



CONGRESS ORGANIZING COMMITTEE MEMBERS

Prof. Dr. Ardita Dylgjeri
Prof. Dr. Benahmed Abdelillah
Prof. Dr. Boualam Abderrahmane
Prof. Dr. Elman Guliyev
Prof. Dr. Hassan ZARIOUH
Prof. Dr. Ivan Pavlovic
Prof. Dr. Iheanyi Omezuruike Okonko
Prof. Dr. Karim KREIT
Prof. Dr. Mohammed Waheeb
Prof. Dr. Nana Jincharadze
Prof. Dr. Shemsije Demiri
Prof. Dr. Tinatin Mshvidobadze
Prof. Dr. Valbon Ademi
Prof. Dr. Valentina Marinescu
Prof. Dr. Fatih Mehmet KANDEMİR
Prof. Dr. İbrahim CAN
Prof. Dr. Özlem KARABULUTLU
Doç. Dr. İlyas ERPAY
Doç. Dr. Adem DOĞAN
Doç. Dr. Bahadır ÇOKAMAY
Doç. Dr. Recep BÜYÜKTOLU
Doç. Dr. Nilay ERDEM AYYILDIZ
Doç. Dr. Aziz Barış BAŞYİĞİT
Doç. Dr. Fuat LEBE
Doç. Dr. Özlem ONUK NATONSKI
Assoc. Dr. Abdullayeva Gultekin
Assoc. Dr. Məmmədova Könül Ələddin qızı
Assoc. Prof. Dr. John Noel S. Nisperos
Assoc. Prof. Dr. Daniela Matušiková
Assoc. Prof. Dr. Abderrahmane Raji
Assoc. Prof. Dr. Enida KUME
Dr. Eylem BEKTAŞ BİLGİÇ
Dr., Murat KORKMAZ
Dr. Eyüp SIRAMKAYA
Dr. Meryem Pir
Dr. Alan Reed Libert
Dr. Ihor Ponomarenko
Dr. Ülker Baxşıyeva
Dr. sci. Džana Rahimić Ramić

PARTICIPANTS COUNTRY

Albania/Algeria/ Azerbaijan /Canada/India/Indonesia/Iran/Jordan/Morocco/

Nigeria/North Macedonia/Pakistan/Romania/



SCIENTIFIC COMMITTEE

Prof. Dr. Ünal TÜRKÇAPAR

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Prof. Dr. Dciparkul ABDIRAHMANOVA

Kırgızistan-Türkiye Manas Üniversitesi

Prof. Dr. Hüseyin EROĞLU

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Prof. Dr. Hakkı ULUCAN

Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Hasan ŞAHAN

Akdeniz Üniversitesi

Prof. Dr. Çağrı ÇELENK

Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Özer YILDIZ

Necmettin Erbakan Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet Çağrı ÇETİN

Mersin Üniversitesi

Prof. Dr. Selçuk AKPINAR

Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi

Prof. Dr. Fikret ALINCAK

Gaziantep Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa YILDIZ

Akdeniz Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet ILKIM

İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. Osman PEPE

Süleyman Demirel Üniversitesi

Prof. Dr. Karim KREIT

Cadi Ayyad University, Morocco

Prof. Dr. Mohammed Waheeb

Hashemite University, Jordan

Prof. Dr. Nana Jincharadze

European University Georgia

Prof. Dr. Shemsije Demiri

High Economic School- Gostivar North Macedonia

Prof. Dr. Tinatin Mshvidobadze

Gori State University (Georgia)

Prof. Dr. Valbon Ademi

University of Tetovo, North Macedonia

Prof. Dr. Valentina Marinescu

University of Bucharest

Prof. Dr. Ivan Pavlovic

Scientific Institute of Veterinary Medicine of Serbia

Prof. Dr. Iheanyi Omezuruoke Okonko

University Of Port Harcourt, Nigeria

Prof. Dr. Elman Guliyev

Azərbaycan Devlet Pedogoji

Prof. Dr. Ardita Dylgjeri

University of Elbasan "Aleksandër Xhuvani" Albania

Prof. Dr. Benahmed Abdelillah

University of Blida1, Algeria

Prof. Dr. Boualam Abderrahmane

Higher Institute of Nursing and Health Professions, Morocco

Prof. Dr. Hassan ZARIOUH

Mohammed I University, Oujda Morocco

Doç. Dr. Davut ATILGAN

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Doç. Dr. Yalçın TÜKEL

Necmettin Erbakan Üniversitesi

Doç. Dr. Emre SERİN

Mersin Üniversitesi

Doç. Dr. Adem DOĞAN

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Assoc. Prof. Dr. Ganaoui Maroua

*University of Chadli Ben Djedid El-tarf and Souk
Ahras university, Algeria*

Assoc. Prof. Dr. Abdullayeva Gultekin

Azerbaijan State Pedagogical University

Assoc. Prof. Dr. Postolache Victoria

Alecu Russo Balti State University, Moldova

Assoc. Prof. Dr. Irina-Teodora MANOLESCU

Alexandru Ioan Cuza University of Iasi, Romania

Assoc. Prof. Dr. Silviya Ivanova

*Institute of Cryobiology and Food Technology,
Bulgaria*

Assoc. Prof. Dr. Rozina Khattak

*Shaheed Benazir Bhutto Women University,
Pakistan*

Assoc. Prof. Dr. Mokhtar NEBAB

University of Boumerdes ALGERIA

Assoc. Prof. Dr. Gergana Gozanska Plovdiv

University "Paisii Hilendarski", Bulgaria

Assoc. Prof. Dr. Məmmədova Könül Ələddin qızı

ADPU-Azerbaijan

Assoc. Prof. Dr. Naseem Akhter Khattak

*Shaheed Benazir Bhutto Women University
Peshawar Pakistan*

Assoc. Prof. Dr. John Noel S. Nisperos

*Don Mariano Marcos Memorial State University-
Philippines*

Assoc. Prof. Dr. Daniela Matušková

University of Prešov, Slovakia

Assoc. Prof. Dr. Abderrahmane Raji

Sultan Moulay Slimane University, Morocco

Assoc. Prof. Dr. Enida KUME

Aleksander Moisiu" University, Durrës, Albania

Assoc. Prof. Dr. BELOUFA

Nabil, IHFR, Algeria

Doç. Dr. Ebülfəz Ezimli

Naxçıvan Devlet Universiteti

Assoc. Prof. Dr. Farida Safaraliyeva

Azerbaijan State Pedagogical University

Assoc. Prof. Dr. Kamal Koochi

University of Tabriz, Iran

Assoc. Prof. Dr. Ghizlane Bouazza

Ministry of Health, Morocco

Doç. Dr. Mehmet Vakıf DURMUŞOĞLU

Bağımsız Araştırmacı

Dr. Abdullah Sencer TEMEL

Bağımsız Araştırmacı

Dr. Onur ÖZTÜRK

Bağımsız Araştırmacı

Dr. Taner AKARSU

Çankırı Karatekin Üniversitesi

Dr. Zarifa NAZIRLI

Baku State University

Dr. Solomon Uchechukwu Eze

Nnamdi Azikiwe University

Dr. Mirjeta Cenaj

Sports University of Tirana, Albania

Dr. Israr Ali Khan

Institute of Numerical Sciences, Pakistan

Dr. Blerina Xhelaj

University "Ismael Qemali" Vlora- Albania

Dr. Sohayb Abdulkerim

Gaziantep University

Dr. Muhammad Faisal

Ministry of State and Frontier Region Govt of Pakistan

Dr. M.K.Ganeshan

M.I.E.T. Engineering College

Dr. R. THIRUCHELVI

Aman Aqua Bio Chemical free plant Activator Manufacturer, India

Dr. sci. Džana Rahimić Ramić

University of Sarajevo, Bosnia and Herzegovina

Dr. Mokhnane Tarek

Center for Scientific and Technical Research on Arid Regions (CRSTRA) Omar El BERNAOUI, Algeria

Dr. K. Vignesh

Palar Agricultural College, Vellore, Tamil Nadu, India

Dr. Vo Trung Hau

Binh Duong Mot University, Vietnam

Dr. Le Thi Minh

Thu Dau Mot University, Vietnam

Dr. Amina Yahia

University of Oum El Bouaghi. Algeria

Dr. Haneen Vassel

Beit Berl College

Dr. Elmassi SAID

Cadi Ayyad University

Dr. Sahnoun ZENGAH

University of Mustapha Stambouli Mascara, Algeria

Dr. Leila Bijos

Universidade Federal da Paraíba (UFPB),Brazil

Dr. Elharrar Noureddine

Higher Institute of Nursing Professions and Health Techniques "ISPITS", Safi

Dr. Vicente Pironti

Open University Humaniza, Brazil

Dr. Vijay Singh

Himachal Pradesh University Shimla India

Dr. Abdelaati Soufiani

Higher Institute of Nursing and Health Technology (ISPITS) of Kenitra

***Dr. Alketa Çaushi*
Sport University of Tirana,Albania**

Dr. Drita AVDYLI

Mediterranean University of ALBANIA

Dr. Vijay Singh

Himachal Pradesh University Shimla India

Dr. Alireza Moghaddasi

Imam Reza International University,Iran

Dr. Haneen Vassel

Beit Berl College

Dr. Ülker Baxşiyeva

Azerbaijan State Pedagogical University

Dr. Alan Reed Libert

*University of Newcastle, Australia and Khazar
University, Baku*

Dr. Ihor Ponomarenko

State University of Trade and Economics, Ukraine

Dr. Irina-Ana DROBOT

*Technical University of Civil Engineering
Bucharest, Romania*

Dr. Chems Eddine BOUKHEDIMI

University of Tizi Ouzou, Algeria

Dr. Onwudebelu Ugochukwu

*Alex Ekwueme Federal University of Ndufu-Alike
Ikwo (AE-FUNAI),Nigeria.*

Dr. Ioana Ioancio

*Faculty of Medicine “Carol Davila” Bucharest,
Romania*

Dr. Sharmistha Roy

University of Nevada, Las Vegas, USA

Dr. Mirela Kapo

New york tirana University, Albania



1. BİLSEL INTERNATIONAL SÜTÇÜ İMAM SCIENTIFIC RESEARCHES CONGRESS 06-07 November 2025,
KAHRAMANMARAŞ/TÜRKİYE

**1. BİLSEL INTERNATIONAL SÜTÇÜ
İMAM
SCIENTIFIC RESEARCHES CONGRESS
06-07 November, 2025
Kahramanmaraş/TÜRKİYE**

CONGRESS PROGRAM

Join Zoom Meeting ID: **895 9628 4250**

Passcode: **981482**

Join Zoom Meeting

<https://us06web.zoom.us/j/89596284250?pwd=xwFlpaxFDw3ZQnRUxlvJwQMbGOSpUm.1>

PARTICIPATING COUNTRIES

*Azərbaycan /Albania/ Belarus/ Bulgaria/ Hungary/ France
India/Indonesia/Morocco/Nigeria/ Naxçıvan/North Macedonia/Pakistan/Romania/Serbia*

Before you login to Zoom indicate hall number and your surname
Zoom'a girişte sırayla salon numarasını ve ad soyadınızı yazınız.



SİO₂ DESTEKLİ SOL-JEL YÖNTEMİYLE SENTEZLENEN CU/TİO₂ NANOYAPILARININ OER PERFORMANSINA YÜZEY MORFOLOJİSİNİN ETKİSİ

Arş. Gör. Dr. Doğan ÇİRMİ¹/ Prof. Dr. Belgin GÖZMEN SÖNMEZ²

1Mersin Üniversitesi, Kimya Bölümü, dogancirmi@mersin.edu.tr, 0000-0002-5608-398X

2Mersin Üniversitesi, Kimya Bölümü, bgozmen@mersin.edu.tr, 0000-0002-1751-8960

Özet

Bu çalışmada, elektrokatalitik oksijen çıkış reaksiyonu (OER) için yüksek performanslı bir Cu/TiO₂ elektrotun sentezi, karakterizasyonu ve elektrokimyasal özellikleri araştırılmıştır. Cu/TiO₂ nanoyapısı, SiO₂ ara tabakasının yönlendirdiği çok aşamalı bir sol-jel yöntemiyle hazırlanmıştır. İlk olarak SiO₂ nanoparçacıkları sentezlenmiş, ardından TiO₂ kaplama ve Cu yükleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Son aşamada SiO₂ tabakası NaOH çözeltisiyle uzaklaştırılarak yüzey morfolojisinde belirgin değişim elde edilmiştir.

Elde edilen malzemelerin yapısal özellikleri X-ışını kırınımı (XRD), Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. XRD sonuçları, Cu/TiO₂'nin baskın olarak anataz fazında kristalize olduğunu göstermiştir. SEM görüntüleri, SiO₂ uzaklaştırılması sonrası partiküllerin daha sıkı paketlenildiği, çubuksu nanoyapıların yüzey düzeninde artış ve pürüzlülük oluşturduğu bir morfoloji ortaya koymuştur. Bu değişim, yüzey etkileşimlerinin ve iyon taşınımının kolaylaşmasına katkı sağlamaktadır.

Elektrokimyasal ölçümler 1.0 M KOH çözeltisinde üç elektrotlu sistemde gerçekleştirilmiştir. Cu/TiO₂ elektrodu, 10 mA cm⁻² akım yoğunluğuna 1.58 V (vs. RHE) potansiyelde ulaşmış ve yaklaşık 350 mV aşırı potansiyel göstermiştir. Ayrıca, 105.2 mV dec⁻¹ Tafel eğimi ve düşük yük transfer direnci, hızlı OER kinetiğine işaret etmektedir. 20 saatlik kronoamperometri testi boyunca yüksek akım stabilitesi korunmuştur.

Sonuç olarak, Cu kaplamasının TiO₂'nin elektriksel iletkenliğini artırdığı ve yüzey morfolojisindeki düzenlenmenin OER aktivitesini geliştirdiği belirlenmiştir. Bu yaklaşım, metal oksit tabanlı elektrokatalizörlerin yapısal optimizasyonu için etkili bir strateji sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Cu/TiO₂, Sol-jel yöntemi, Oksijen çıkış reaksiyonu (OER)



EFFECT OF SURFACE MORPHOLOGY ON THE OER PERFORMANCE OF Cu/TiO₂ NANOSTRUCTURES SYNTHESIZED VIA SiO₂-ASSISTED SOL-GEL METHOD

Arş. Gör. Dr. Doğan ÇİRMİ¹/ Prof. Dr. Belgin GÖZMEN SÖNMEZ²

¹Mersin University, Department of Chemistry, dogancirmi@mersin.edu.tr, 0000-0002-5608-398X

²Mersin University, Department of Chemistry, bgozmen@mersin.edu.tr, 0000-0002-1751-8960

Abstract

In this study, a high-performance Cu/TiO₂ electrode was synthesized and characterized to investigate its electrocatalytic activity toward the oxygen evolution reaction (OER). The Cu/TiO₂ nanostructure was prepared through a multi-step sol-gel process directed by a SiO₂ interlayer. Initially, SiO₂ nanoparticles were synthesized, followed by TiO₂ coating and Cu incorporation steps. The final NaOH treatment removed the SiO₂ template, leading to a notable change in surface morphology.

The structural properties of the materials were examined by X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), and scanning electron microscopy (SEM). XRD patterns revealed that the Cu/TiO₂ crystallized predominantly in the anatase phase. SEM images showed that after the removal of SiO₂, the Cu/TiO₂ sample exhibited a more compact arrangement of rod-like nanoparticles with increased surface roughness and improved textural order. These morphological modifications are expected to enhance surface interactions and facilitate ion transport.

Electrochemical measurements were performed in 1.0 M KOH solution using a three-electrode configuration. The Cu/TiO₂ electrode achieved a current density of 10 mA cm⁻² at 1.58 V vs. RHE, corresponding to an overpotential of approximately 350 mV. It also exhibited a low Tafel slope of 105.2 mV dec⁻¹ and a reduced charge-transfer resistance, indicating rapid OER kinetics. The electrode maintained stable current density over a 20-hour chronoamperometric test, demonstrating excellent durability.

Overall, Cu incorporation improved the electrical conductivity of TiO₂, while surface reorganization following SiO₂ removal enhanced the catalytic activity. This strategy offers an effective route for structural optimization of metal oxide-based electrocatalysts toward efficient water oxidation.

Keywords: Cu/TiO₂, Sol-gel method, Oxygen evolution reaction (OER)

GİRİŞ

Son yıllarda sürdürülebilir enerji üretimi ve çevre dostu teknolojiler, küresel ölçekte giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu bağlamda, suyun elektrolizi yoluyla oksijen ve hidrojen üretimi, temiz enerji dönüşümü için umut vadeden bir yöntem olarak değerlendirilmektedir. Oksijen çıkış reaksiyonu (OER), suyun elektroliz sürecindeki kinetik olarak en yavaş basamak olup, yüksek aşırı potansiyel gereksinimi nedeniyle sistemin genel verimliliğini sınırlamaktadır (Zhou ve ark., 2022). Bu nedenle, yüksek aktif yüzey alanına, iyi elektriksel iletkenliğe ve kimyasal kararlılığa sahip verimli elektrokatalizörlerin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Titanyum dioksit (TiO_2), kimyasal kararlılığı, çevre dostu yapısı ve düşük maliyeti nedeniyle yaygın olarak araştırılan bir yarı iletken malzemedir. Ancak, TiO_2 'nin düşük elektriksel iletkenliği elektrokatalitik performansını sınırlamaktadır. Bu sorunun üstesinden gelmek için, TiO_2 'nin yüzeyine geçiş metali (örneğin Cu) katkılanması, elektron iletkenliğini artırarak katalitik aktiviteyi iyileştirebilir (Han ve ark., 2016). Sentez aşamalarında geçici bir SiO_2 tabakasının kullanılması, yüzeyin morfolojik olarak yönlendirilmesini sağlayarak partikül düzeni ve pürüzlülük üzerinde kontrol imkânı sunmaktadır (Chen ve ark., 2016).

Bu çalışmada, Cu ile modifiye edilmiş TiO_2 nanoyapılarının sentezi, karakterizasyonu ve oksijen gelişim reaksiyonu (OER) performanslarının incelenmesi amaçlanmıştır. Yapının oluşturulmasında geçici bir SiO_2 tabakası kullanılmış, son aşamada bu tabakanın kontrollü olarak uzaklaştırılmasıyla yüzey düzeninde belirgin değişim ve çubuksu morfolojiye sahip bir Cu/ TiO_2 yapısı elde edilmiştir. Çalışmanın temel amacı, bu yapısal modifikasyonun elektrokatalitik OER aktivitesine katkısını ortaya koymaktır.

1. KURAMSAL ÇERÇEVE

OER süreci genellikle dört elektronluk bir transfer basamağından oluşur ve bu süreçte ara oksijen türlerinin ($\text{M}-\text{OH}$, $\text{M}-\text{O}$, $\text{M}-\text{OOH}$) oluşumu gerçekleşir. Bu basamakların enerji bariyerlerinin azaltılması, katalizörün aktivitesini belirleyen temel unsurdur (Lyle ve ark., 2021).

Cu katkılı TiO_2 yapıları, $\text{Ti}-\text{O}-\text{Cu}$ bağları üzerinden elektron taşınımını kolaylaştırarak hem yüzey aktivitesini ve kararlılığı artırmaktadır. Ayrıca, geçici SiO_2 şablonu, yapısal modifikasyonu kontrol ederek iyon difüzyonunu iyileştirmekte ve aktif merkezlerin daha erişilebilir hale gelmesini sağlamaktadır (Yang ve ark., 2017).

2. YÖNTEM

2.1. Kullanılan Kimyasallar ve Malzemeler

Titanyum (IV) bütoksit (TBOT, $\text{C}_{16}\text{H}_{36}\text{O}_4\text{Ti}$), tetraetil ortosilikat (TEOS), etanol (EtOH), ve polivinilpirolidon (PVP360) kimyasalları Sigma Aldrich (Almanya) firmasından temin edilmiştir. Bakır (II) klorür ($\text{CuCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH , $\geq 85\%$), asetonitril ve amonyak (NH_3 , 28%) ise Merck (Almanya) firmasından satın alınmıştır. Ayrıca, Titanyum levha (1 x 1 cm, Baoji Qixin Titanium Co., Ltd., Çin), N-metilpirolidon (NMP, $99,5\%$, Sigma Aldrich), poliviniliden florür (PVDF, Sigma Aldrich) karbon siyahı (CB, Alfa Aesar, $99,9\%$) elektrot hazırlamada kullanılmıştır.

2.2. Cu/ TiO_2 ve SiO_2 @Cu/ TiO_2 @ SiO_2 Sentezi

Cu/ TiO_2 'nin çok aşamalı sentezi, Lee ve ark. tarafından bildirilen yöntemine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. SiO_2 nanoparçacıklarının sentezi, sol-jel yöntemiyle yapılmıştır. Bu işlemde 0,86 mL TEOS, 23 mL etanol (EtOH), 4,3 mL ultra saf su (H_2O) ve 0,6 mL sulu amonyak (NH_3) çözeltisi kullanılmıştır. Karışım 6 saat boyunca manyetik karıştırıcıda karıştırılmış, ardından elde edilen ürün su ve etanol ile yıkanarak kurutulmuştur.

Elde edilen SiO_2 , 40 mL susuz etanol içerisinde dağıtılmış; ardından 14 mL asetonitril ve 0,4 mL amonyak eklenerek bu karışım Çözelti 1 olarak adlandırılmıştır. SiO_2 'nin homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak amacıyla Çözelti 1, 10 dakika süreyle sonikasyona tabi tutulmuştur.

Çözelti 2, 6 mL susuz etanol ve 2 mL asetonitril içeren bir ortama 0,8 mL titanyum (IV) bütoksid (TBOT) eklenerek hazırlanmıştır. Çözelti 2, Çözelti 1'e eklendikten sonra karışım, SiO_2 yüzeyinin TiO_2 ile kaplanmasını sağlamak için 3 saat boyunca karıştırılmıştır. Sentezlenen $\text{SiO}_2@\text{TiO}_2$, santrifüj ile ayrılmış, su ve etanol ile yıkanmış ve kurutulmuştur (Liu ve ark., 2015).

Cu metal yükleme adımı kapsamında, sentezlenen $\text{SiO}_2@\text{TiO}_2$ yapısı 40 mL saf su içerisinde dağıtılmış ve üzerine 4 mg $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ eklenmiştir. Karışım 3 saat boyunca kuvvetli şekilde karıştırılmış, ardından elde edilen $\text{SiO}_2@\text{Cu}/\text{TiO}_2$ santrifüj ile ayrılarak su ve etanol ile yıkanmış ve kurutulmuştur.

Elde edilen $\text{SiO}_2@\text{Cu}/\text{TiO}_2$ nanoparçacıkları 40 mL su içerisinde yeniden dağıtılmış, üzerine 0,4 g PVP eklenmiş ve karışım bir gece bekletilmiştir. Sonrasında ürün santrifüj ile ayrılmış ve 46 mL etanol ile 8,6 mL sudan oluşan karışımda 10 dakika sonikasyona tabi tutulmuştur. Üzerine 1,2 mL amonyak ve 1,6 mL TEOS eklenerek SiO_2 dış kaplama tabakası oluşturulmuştur. Dört saat karıştırma işleminin ardından nanoparçacıklar santrifüj ile ayrılmış, yıkanmış ve 80 °C'de kurutulmuştur.

Elde edilen $\text{SiO}_2@\text{Cu}/\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$ yapısı, 900 °C'de 2 saat süreyle kalsine edilmiştir. Kalsinasyon sonrası yapıda bulunan SiO_2 tabakasının uzaklaştırılması için numune, 90 °C'de 6 saat boyunca 0,5 M NaOH çözeltisiyle muamele edilmiştir. Son aşamada, elde edilen Cu/TiO_2 nanoyapısı santrifüjle ayrılmış, su ve etanol ile yıkanarak 80 °C'de kurutulmuştur.

2.2. Cu/TiO_2 ve $\text{SiO}_2@\text{Cu}/\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$ elektrotların hazırlanması

Katalizör mürekkebi hazırlamak için, %80 oranında aktif bileşen (Cu/TiO_2 ve $\text{SiO}_2@\text{Cu}/\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$), %10 karbon siyahı ve %10 PVDF, NMP içerisinde karıştırılmıştır (Rani & Han, 2025). Karışım, manyetik karıştırıcı kullanılarak 30 dakika boyunca homojen bir süspansiyon hâline getirilmiştir. Daha sonra elde edilen mürekkep, Ti plaka yüzeyine damlatılmış ve cm^2 başına 2 mg olacak biçimde yükleme yapılarak 50 °C'de kurutulmuştur.

2.3. Karakterizasyonlar

Sentezlenen Cu/TiO_2 katalizörlerinin kristal yapısı, X-ışını kırınımı (XRD, Malvern PANalytical EMPYREAN, ABD) tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Analiz, $\text{Cu K}\alpha$ ışınımı altında, 4°/dakika tarama hızında ve $2\theta = 10^\circ - 80^\circ$ aralığında gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin yüzey morfolojisi, taramalı alan emisyon elektron mikroskobu (FESEM, FEI Quanta 650 Field Emission, ABD) ile ayrıntılı olarak incelenmiştir. Ayrıca, Cu/TiO_2 yapılarında bulunan fonksiyonel grupların tanımlanması amacıyla Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR, Jasco 6700, Japonya) analizi yapılmıştır.

2.4. Elektrokimyasal Ölçümler

Elektrokimyasal deneyler, üç elektrotlu klasik hücre sisteminde ve 1.0 M KOH çözeltisi içinde yürütülmüştür. Çalışma elektrodu olarak aktif materyal ile kaplanmış Ti (1 cm^2), karşı elektrot olarak Pt elektrot (2 cm^2) ve referans elektrot olarak Ag/AgCl (3.5 M KCl) kullanılmıştır. Tüm ölçümler CHI 660D elektrokimyasal çalışma istasyonu ile gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen potansiyel değerleri, Denklem (1) kullanılarak geri dönüşümlü hidrojen elektrotu (RHE) referansına çevrilmiştir. (Çirmi ve ark., 2023):

$$E_{\text{RHE}} = E_{\text{Ag}/\text{AgCl}} + 0.0591 \times \text{pH} + E^\circ_{\text{Ag}/\text{AgCl}} \quad (1)$$



Burada; E_{RHE} , RHE'ye göre düzeltilmiş potansiyeli; $E_{Ag/AgCl}$, deneyde ölçülen ham potansiyel değerini; $E^{\circ}_{Ag/AgCl}$ ise 25°C'de 0.1976 V olan Ag/AgCl elektrodunun standart potansiyelini ifade eder.

Aşırı potansiyel (η), aşağıda verilen Denklem (2) ile hesaplanmıştır (Raveendran vd., 2023):

$$\eta = E_{RHE} - 1.23 \text{ V} \quad (2)$$

Doğrusal tarama voltametri (LSV) ölçümleri, katalitik aktivitenin belirlenmesi amacıyla 1.0–1.7 V (RHE'ye göre) potansiyel aralığında ve 10 mV s⁻¹ tarama hızıyla yapılmıştır. Elde edilen verilerden Tafel eğrileri, aşağıdaki denklem (3) temel alınarak oluşturulmuştur:

$$\eta = a + b \cdot \log j \quad (3)$$

Burada; a Tafel sabitini, b Tafel eğimi ve j ise akım yoğunluğunu ifade etmektedir. (Balun Kayan ve Turunç, 2021).

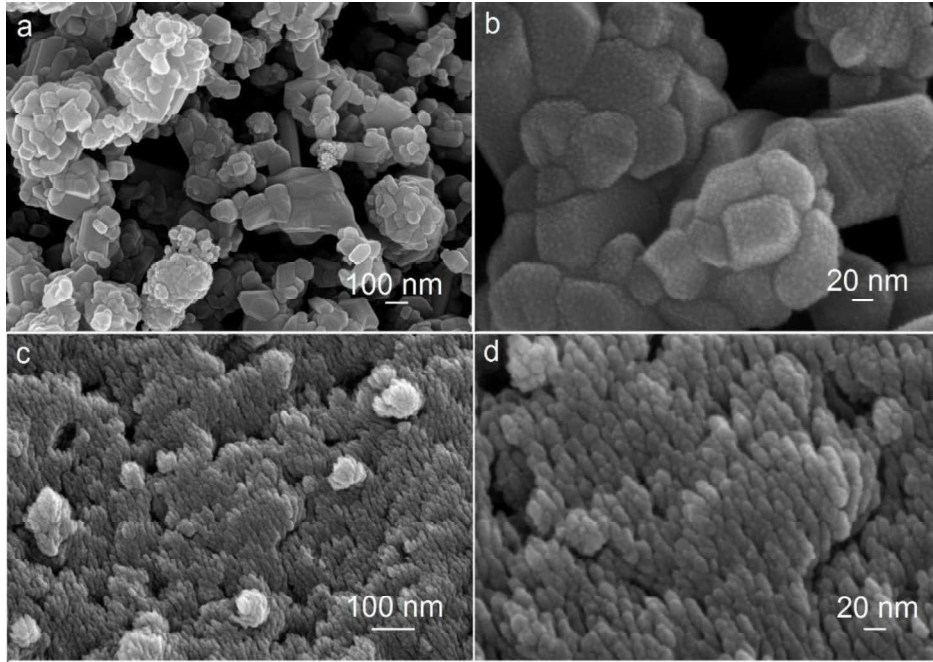
Çift katman kapasitansı (C_{dl}), 1.4–1.5 V vs. RHE aralığında ve 5–50 mV s⁻¹ hızlarda alınan CV eğrilerinden hesaplanmıştır. 1.45 V' taki $\Delta j = (j_a - j_c)$ değerleri tarama hızı ile ilişkilendirilmiş, doğrunun eğimi kullanılarak Denklem (4) ile C_{dl} belirlenmiştir (Rosely ve John, 2025):

$$C_{dl} = \frac{\Delta j = (j_a - j_c)}{2v} \quad (4)$$

Elektrokatalizörün uzun süreli kararlılığı, sabit bir aşırı potansiyel altında zamanla elde edilen akım değişiminin izlendiği kronoamperometri (CA) yöntemi ile değerlendirilmiştir. Ayrıca, ara yüzey özellikleri ve yük transfer direncini incelemek amacıyla elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) uygulanmıştır. Bu ölçümler, 10⁻²–10⁵ Hz frekans aralığında ve 10 mV genlik kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

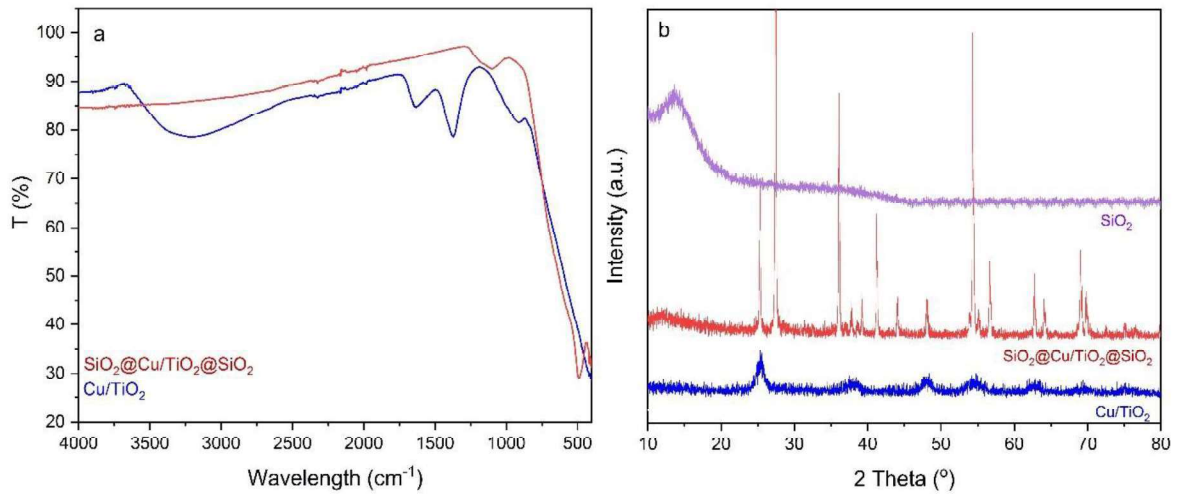
3. BULGULAR

Cu/TiO₂ yapısına ait SEM görüntüleri, sentez aşamalarında elde edilen SiO₂@Cu/TiO₂@SiO₂ yapısına ait görüntülerle birlikte Şekil 1'de sunulmuştur. SiO₂ varlığında, malzeme nispeten düz yüzeyli ve kübik yapılar sergilemektedir (Şekil 1a, b). Buna karşılık, Cu/TiO₂ örneği yoğun bir şekilde paketlenmiş ve homojen bir nanoyapılı yüzey göstermektedir (Şekil 1c, d). Parçacıklar, birbirine sıkıca temas eden, çubuk benzeri uzamış bir morfolojiye sahip olup, düşük aglomerasyon oranı sergilemektedir. Bu tür düzenli bir nanoyapının, yüzey alanını artırarak, elektrokimyasal reaksiyonlar için bol miktarda aktif bölge sağlaması beklenmektedir.



Şekil 1. a-b) $\text{SiO}_2@\text{Cu}/\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$ ve c-d) Cu/TiO_2 yapılarına ait SEM görüntüleri.

Cu/TiO_2 ve $\text{SiO}_2@\text{Cu}/\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$ örneklerine ait FT-IR spektrumları Şekil 2a’da sunulmuştur. Her iki örnekte de yaklaşık 3400 cm^{-1} civarında geniş bir soğurma bandı gözlenmekte olup, bu bant yüzeydeki hidroksil gruplarının ($-\text{OH}$) gerilme titreşimlerine ve yüzeye adsorplanmış su moleküllerine karşılık gelmektedir. $\text{SiO}_2@\text{Cu}/\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$ spektrumunda $1100\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ civarında gözlenen güçlü pik, Si-O-Si bağlarının asimetrik gerilme titreşimlerine atfedilmekte olup, silika tabakasının başarılı bir şekilde oluştuğunu doğrulamaktadır (Demirok, Atılgan, & Li, 2025). $600\text{--}500\text{ cm}^{-1}$ aralığında görülen karakteristik bantlar ise Ti-O ve Ti-O-Cu titreşimleriyle ilişkilidir (Hitam ve ark., 2016); bu titreşimler TiO_2 iskeletine ve Cu-O etkileşimlerine özgüdür. SiO_2 kaplamasından sonra Ti-O ile ilişkili piklerin şiddetinde hafif bir azalma gözlenmiştir; bu durum, silika kabuğunun Cu/TiO_2 yüzeyini kısmen kapladığını ve yüzey reaktivitesini etkilediğini göstermektedir.



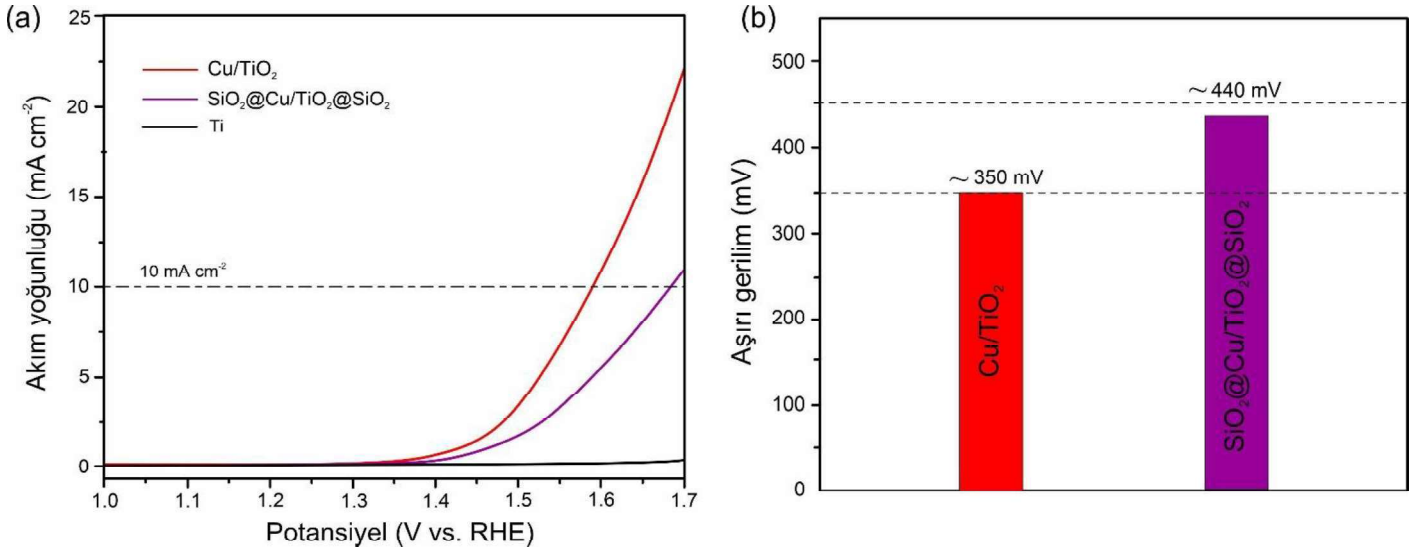
Şekil 2. a) FT-IR spektrumu ve b) XRD desenleri

Cu/TiO₂ sentez aşamalarından elde edilen yapıların XRD kırınım desenleri Şekil 2b’de gösterilmiştir. $2\theta = 22^\circ$ civarında gözlenen geniş tepe, SiO₂ kürelerine özgü bir özelliktir (Liang ve ark., 2012). Cu/TiO₂ yapısının XRD deseninde ise anatase kristal fazına karşılık gelen belirgin kırınım zirveleri 2θ değerlerinde 25.34° (101), 38.1° (004), 48.0° (200), 54.8° (211), 62.7° (204), 70.0° (220) ve 75.4° (215) olarak gözlemlenmiştir. Buna karşılık, ara aşamadaki SiO₂@Cu/TiO₂@SiO₂ yapısında 27.5° (110), 36.1° (101) ve 41.3° (002) değerlerinde brookit fazına ait ek kırınım zirveleri, anatase fazına özgü yansımalarla birlikte görülmektedir (John ve ark., 2020). Anatase ve brookit fazlarının birlikte bulunması, SiO₂’nin sentez süreci sırasında TiO₂’nin kristalleşme davranışını etkilediğini göstermektedir.

Cu/TiO₂ örneğinin XRD deseninde metalik Cu veya CuO fazlarına ait belirgin bir kırınım zirvesi gözlenmemiştir. Bu durum, Cu türlerinin TiO₂ kafesi içinde yüksek oranda dağılmış olmasına bağlanmaktadır. Lee ve ark. (2019) tarafından bildirilen EXAFS analizine göre, Cu K-kenar spektrumu Ti’ye oldukça benzer olup, Cu atomlarının ayrı bir metalik veya oksit faz oluşturmaktan ziyade TiO₂ kafesinde Ti atomlarının yerine geçtiğini göstermektedir. Bu yer-özlü konfigürasyon, doğrudan Cu–O bağlarının oluşumuna ve küçük bir Cu–Ti katkısına yol açarak, Cu türlerinin atomik düzeyde dağılmış ve TiO₂ örgüsüne entegre olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle, Cu derişimi XRD’nin algılama sınırının altında kalmakta ve karakteristik Cu kırınım zirveleri gözlenmemektedir.

Cu/TiO₂ ve SiO₂@Cu/TiO₂@SiO₂ elektrotların elektrokatalitik oksijen çıkış reaksiyonu (OER) performansları Şekil 3a ve Şekil 3b’de karşılaştırılmıştır. Cu/TiO₂ elektrodu, 10 mA cm^{-2} akım yoğunluğuna yaklaşık 1.58 V (vs. RHE) potansiyelde ulaşırken, SiO₂@Cu/TiO₂@SiO₂ elektrodu aynı akım yoğunluğuna ulaşmak için daha yüksek bir potansiyele (1.67 V) ihtiyaç duymuştur (Şekil 3a). Bu durum, yüzeydeki SiO₂ tabakasının uzaklaştırılmasıyla elde edilen çubuksu nanoyapıların yüzey düzenini ve pürüzlülüğünü artırarak aktif yüzey alanını genişlettiğini göstermektedir. Böylece elektron transferi kolaylaşmış ve OER aktivitesi önemli ölçüde artmıştır.

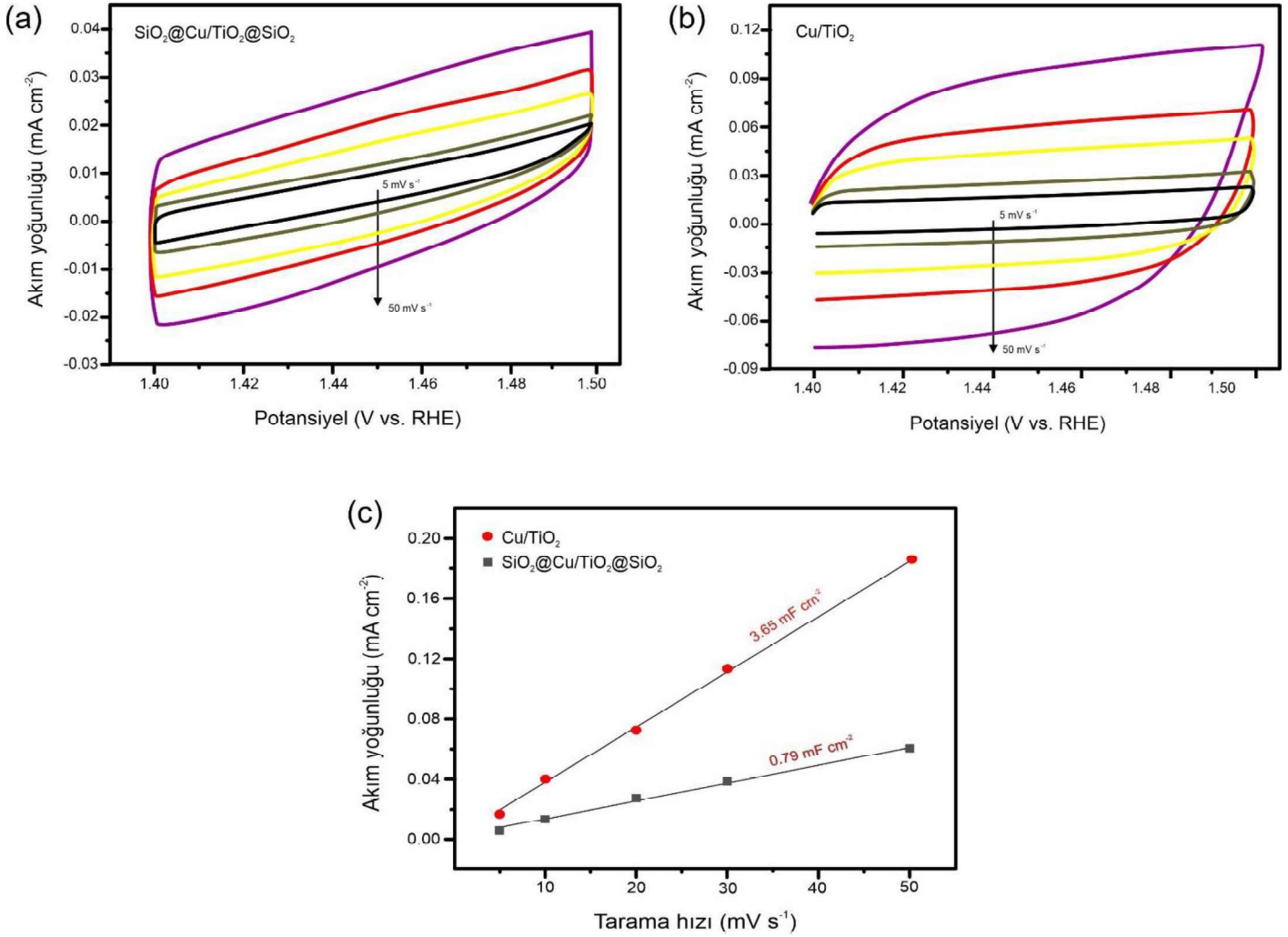
Aşırı gerilim (overpotential) değerleri incelendiğinde, 10 mA cm^{-2} akım yoğunluğu için Cu/TiO₂ elektrodunun $\sim 350 \text{ mV}$, SiO₂@Cu/TiO₂@SiO₂ elektrodunun ise $\sim 410 \text{ mV}$ aşırı gerilime ihtiyaç duyduğu belirlenmiştir (Şekil 3b). Bu değerler, Cu/TiO₂ elektrodunun daha düşük enerji gereksinimiyle OER’i gerçekleştirdiğini ve daha etkin bir katalitik yüzeye sahip olduğunu göstermektedir. SiO₂ yapıdaki varlığı kısa vadede elektron ve iyon transferini kısmen kısıtlasa da, yapısal modifikasyon aşamasında aktif yüzey alanının artırmasında kritik bir rol oynadığı düşünülmektedir.



Şekil 3. a) Cu/TiO₂ ve SiO₂@Cu/TiO₂@SiO₂ elektrotlarının 1 M KOH ortamındaki LSV eğrileri, v: 10 mV/s b) 10 mA cm⁻² akım yoğunluğunda hesaplanan aşırıpotansiyel (η_{10}) değerlerinin karşılaştırılması.

Cu/TiO₂ ve SiO₂@Cu/TiO₂@SiO₂ elektrotların yüzey özelliklerini değerlendirmek amacıyla, 1.40–1.50 V (vs. RHE) potansiyel aralığında çevrimsel voltametri (CV) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4a ve 4b’de sunulan voltamogramlar, her iki elektrodun 5–50 mV s⁻¹ tarama hızlarında gösterdiği elektrokimyasal davranışı ortaya koymaktadır. Bu potansiyel aralığı, çift katman yüklenmesi ile sınırlı olup, herhangi bir Faradayik reaksiyonun gerçekleşmediği aralıktır (Tang vd., 2025). Her iki elektrot için de tarama hızı arttıkça kapasitif akımda belirgin bir artış gözlenmiştir. Bu durum, elektrot yüzeyinde iyon adsorpsiyonu ve yük birikiminin hızlandığını göstermektedir.

CV eğrilerinden elde edilen veriler kullanılarak, elektrotların elektrokimyasal aktif yüzey alanlarını temsil eden çift katman kapasitansı (C_{dl}) değerleri hesaplanmıştır. Farklı tarama hızlarında kaydedilen ortalama katodik ve anodik akım yoğunluklarının mutlak değerlerinin yarısı alınarak elde edilen akım yoğunluğu–tarama hızı grafikleri Şekil 4c’de verilmiştir. Bu doğrusal grafiklerin eğimleri, C_{dl} değerlerini ifade etmektedir. Hesaplamalar sonucunda, Cu/TiO₂ elektrodu için C_{dl} değeri 3.75 mF cm⁻², SiO₂@Cu/TiO₂@SiO₂ elektrodu için ise 0.79 mF cm⁻² olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, Cu/TiO₂ elektrodunun SiO₂@Cu/TiO₂@SiO₂ elektroda kıyasla çok daha yüksek bir elektrokimyasal aktif yüzey alanına sahip olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

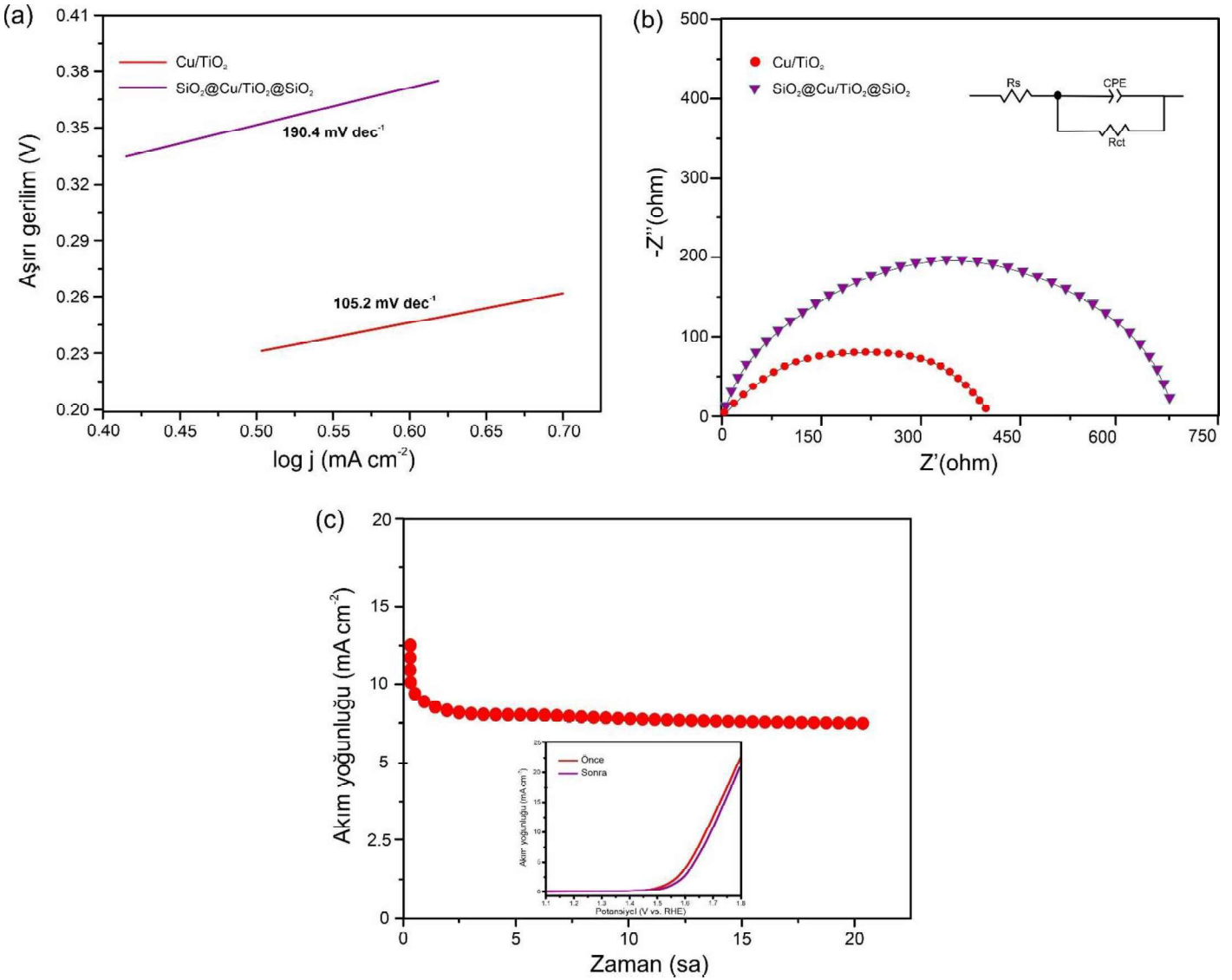


Şekil 4. a) Cu/TiO_2 ve b) $\text{SiO}_2@\text{Cu}/\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$ elektrotların 1 M KOH ortamında farklı tarama hızlarında (5–50 mV s^{-1}) 1.40–1.50 V (vs. RHE) aralığında kaydedilen CV eğrileri. c) farklı tarama hızlarında elde edilen akım yoğunluklarının tarama hızına karşı çizilen grafikleri.

OER kinetiğini değerlendirmek amacıyla elde edilen Tafel eğrileri Şekil 5a’da verilmiştir. Cu/TiO_2 elektrodu $105.2 \text{ mV dec}^{-1}$, $\text{SiO}_2@\text{Cu}/\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$ elektrodu ise $190.4 \text{ mV dec}^{-1}$ Tafel eğimine sahiptir. Daha düşük Tafel eğimi, Cu/TiO_2 elektrodunun oksijen çıkış reaksiyonu sırasında daha hızlı kinetiklere sahip olduğunu ve elektron transferinin daha kolay gerçekleştiğini göstermektedir. $\text{SiO}_2@\text{Cu}/\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$ elektrodunun yüksek Tafel değeri ise yüzeydeki SiO_2 tabakasının elektron ve iyon taşınımını kısmen kısıtladığını ifade ederken, SiO_2 ’nin uzaklaştırılmasıyla oluşan modifiye yapı, aktif bölgeleri açığa çıkararak reaksiyon hızını artırmıştır.

Elektrotların yük transfer dirençleri (R_{ct}) elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ile değerlendirilmiş olup, Nyquist diyagramları Şekil 5b’de sunulmuştur. Her iki eğriye de uygun eşdeğer devre modeli sağ üst köşede gösterilmiştir. Cu/TiO_2 elektrodu, $\text{SiO}_2@\text{Cu}/\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$ ’ye göre çok daha küçük yarım daire çapı sergilemiştir; bu da Cu/TiO_2 ’nin çok daha düşük bir yük transfer direncini işaret etmektedir. Dolayısıyla, Cu kaplamasının TiO_2 ’nin iletkenliğini artırmış ve OER sürecinde elektron transferini kolaylaştırmıştır (Inoue vd., 2024). Buna karşılık, SiO_2 ’nin varlığı elektrot–elektrolit ara yüzünde direnç oluşturarak kinetik süreçleri yavaşlatmıştır.

Katalizörlerin kararlılığını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen 10 mA cm^{-2} akım yoğunluğundaki kronoamperometrik test sonuçları Şekil 5c’de sunulmuştur. Cu/TiO₂ elektrodu, 20 saatlik süre boyunca akım yoğunluğunu büyük oranda koruyarak yüksek yapısal ve elektrokimyasal stabilite sergilemiştir. Test öncesi ve sonrası LSV eğrilerinin (iç grafikte gösterilmiştir) neredeyse çakışması, katalizörün morfolojik ve kimyasal bütünlüğünü koruduğunu doğrulamaktadır. Bu bulgular, Cu/TiO₂ elektrodunun hem yüksek aktiviteye hem de uzun süreli kararlılığa sahip bir OER katalizörü olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 5. (a) Cu/TiO₂ ve SiO₂@Cu/TiO₂@SiO₂ elektrotlarının Tafel eğrileri. (b) Elektrotlara ait Nyquist diyagramları ve eşdeğer devre modeli. (c) Cu/TiO₂ elektrodunun 10 mA cm^{-2} ’de 20 saatlik kronoamperometrik testi (iç grafik: Test öncesi ve sonrası LSV eğrileri).

4. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, geçici SiO₂ tabakası kullanılarak sol-jel yöntemiyle sentezlenen Cu/TiO₂ nanoyapılarının OER performansı incelenmiştir. SiO₂’nin uzaklaştırılmasıyla oluşan çubuksu morfoloji, yüzey düzenini ve aktif alanı artırarak iyon ve elektron taşınımını kolaylaştırmıştır. Cu katkısı, TiO₂’nin elektriksel iletkenliğini artırmış ve 10



mA cm^{-2} akım yoğunluğuna 1.58 V potansiyelde ulaşarak 350 mV aşırı potansiyel ile yüksek OER aktivitesi sağlamıştır. Ayrıca, düşük Tafel eğimi ve düşük yük transfer direnci hızlı kinetiği desteklemiştir. 20 saatlik kararlılık testi, Cu/TiO₂ elektrodunun yapısal bütünlüğünü koruduğunu göstermiştir.

Sonuç olarak, geçici SiO₂ tabakasının yönlendirdiği yüzey morfolojisi ve Cu katkısı, OER için verimli ve kararlı bir elektrokatalizör elde edilmesini sağlamıştır. Bu yaklaşım, metal oksit tabanlı elektrotların yüzey optimizasyonu için etkili bir strateji sunmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Mersin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimi tarafından desteklenen 2020-1-TP2-4047 nolu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

- Balun Kayan, D., & Turung, E. (2021). Bio-reduced GO/Pd nanocomposite as an efficient and green synthesized catalyst for hydrogen evolution reaction. *International Journal of Energy Research*, 45(7), 11146-11156. <https://doi.org/10.1002/er.6597>
- Chen, A., Chen, Y., Wang, Y., & Qin, J. (2016). Silica abrasives containing solid cores and mesoporous shells: Synthesis, characterization and polishing behavior for SiO₂ film. *Journal of Alloys and Compounds*, 663, 60–67. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.12.109>
- Çirmi, D., Görmez, Ö., Saçlı, B., Çağlayan, U., & Kunduracı, M. (2023). Interplay between synthesis conditions, crystal structure, morphology and OER activity of AgFeO₂ delafossite materials. *Journal of Polytechnic*, 26(2), 625-630. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1023907-2082510>
- Demirok, G., Atilgan, S., & Li, H. (2025). FTIR-ATR spectroscopic study and statistical modeling of composition–structure–property of MgO–CaO–Al₂O₃–SiO₂ glasses with and without boron. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 648, 123324. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2024.123324>
- Han, L., Dong, S., & Wang, E. (2016). Transition-metal (Co, Ni, and Fe)-based electrocatalysts for the water oxidation reaction. *Advanced Materials*, 28(42), 9266–9291. <https://doi.org/10.1002/adma.201602696>
- Hitam, C. N. C., Jalil, A. A., Triwahyono, S., Ahmad, A., Jaafar, N. F., Salamun, N., Fatah, N. A. A., Teh, L. P., Khusnun, N. F., & Ghazali, Z. (2016). Synergistic interactions of Cu and N on surface altered amorphous TiO₂ nanoparticles for enhanced photocatalytic oxidative desulfurization of dibenzothiophene. *RSC Advances*, 6(80), 76259–76268. <https://doi.org/10.1039/C6RA06684D>
- Inoue, Y., Miyahara, Y., Miyazaki, K., Lee, C., Sakamoto, R., & Abe, T. (2024). Tracking activity behavior of oxygen evolution reaction on perovskite oxides in alkaline solution via 3-dimensional electrochemical impedance spectroscopy. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 962, 118270. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2024.118270>
- John, A.K., Palaty, S., Sharma, S.S. (2020). Greener approach towards the synthesis of titanium dioxide nanostructures with exposed {001} facets for enhanced visible light photodegradation of organic pollutants. *J Mater Sci: Mater Electron* 31:20868–20882. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-04602-1>
- Lee, B-H., Park, S., Kim, M., Sinha, A.K., Lee, S.C., Jung, E., Chang, W.J., Lee, K-S., Kim, J. H., Cho, S-H., Kim, H., Nam, K.T., Hyeon, T. (2019). Reversible and cooperative photoactivation of single-atom Cu/TiO₂ photocatalysts. *Nature Materials* volume 18, 620–626. <https://doi.org/10.1038/s41563-019-0344-1>



- Liang, Y., Ouyang, J., Wang, H., Wang, W., Chui, P., Sun, K. (2012). Synthesis and characterization of core-shell structured $\text{SiO}_2@\text{YVO}_4:\text{Yb}^{3+}, \text{Er}^{3+}$ microspheres. *Applied Surface Science* 258, 3689–3694. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.12.006>
- Liu, H., Joo, J. B., Dahl, M., Fu, L., Zeng, Z., Yin, Y. (2015). Crystallinity control of TiO_2 hollow shells through resinprotected calcination for enhanced photocatalytic activity. *Energy Environ. Sci.* 8, 286–296. <https://doi.org/10.1039/C4EE02618G>
- Lyle, H., Singh, S., Paolino, M., Vinogradova, I., & Cuk, T. (2021). The electron-transfer intermediates of the oxygen evolution reaction (OER) as polarons by in situ spectroscopy. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 23, 24984–25002. <https://doi.org/10.1039/D1CP01760H>
- Rani, L., & Han, J. I. (2025). Designing of MnV_2O_6 nanorods adorned with multi-walled carbon nanotubes for enhanced performance of aqueous asymmetric supercapacitor. *Applied Surface Science*, 704, 163498. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2025.163498>
- Raveendran, A., Chandran, M., & Dhanusuraman, R. (2023). A comprehensive review on the electrochemical parameters and recent material development of electrochemical water splitting electrocatalysts. *RSC Advances*, 13, 3843–3876. <https://doi.org/10.1039/d2ra07642j>
- Tang, Z., Chen, D., Li, W., Li, H., Tu, J., Zhang, X., Wang, B., & Yu, R. (2025). Enhanced oxygen evolution reaction through improved lattice oxygen activity via carbon dots incorporation into MOFs. *Journal of Colloid and Interface Science*, 685, 361–370. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2025.01.133>
- Yang, X., Qing, W., Feng, C., Yin-Wei, M., & Dong-liang, Q. (2017). Sol-gel process and high-temperature property of $\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2\text{-SiO}_2$ composites. *Ceramics International*, 43(1, Part A), 854–859. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.10.020>
- Zhou, B., Gao, R., Zou, J.-J., & Yang, H. (2022). Surface design strategy of catalysts for water electrolysis. *Small*, 18(27), 2201590. <https://doi.org/10.1002/sml.202201590>