



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Elektrodepozisyon yöntemiyle üretilen Ag-CdO nanokompozit kaplamalarda CdO miktarının mekanik ve elektriksel özelliklere etkisi

Effect of CdO content on the mechanical and electrical properties of Ag-CdO nanocomposite coatings produced by electrodeposition

Yazarlar (Authors): Ramazan KARSLIOGLU¹, Dila COSMUS²

ORCID¹: 0000-0001-5490-3449

ORCID²: 0000-0002-4255-5173

To cite to this article: Karslıoglu R. ve Cosmos D., “Elektrodepozisyon Yöntemiyle Üretilen Ag-CdO Nanokompozit Kaplamalarda CdO Miktarının Mekanik ve Elektriksel Özelliklere Etkisi”, *Journal of Polytechnic*, 28(6): 1793-1800, (2025).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Karslıoglu R. ve Cosmos D., “Elektrodepozisyon Yöntemiyle Üretilen Ag-CdO Nanokompozit Kaplamalarda CdO Miktarının Mekanik ve Elektriksel Özelliklere Etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 28(6): 1793-1800, (2025).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1656679

Elektrodepozisyon Yöntemiyle Üretilen Ag-CdO Nanokompozit Kaplamalarda CdO Miktarının Mekanik ve Elektriksel Özelliklere Etkisi

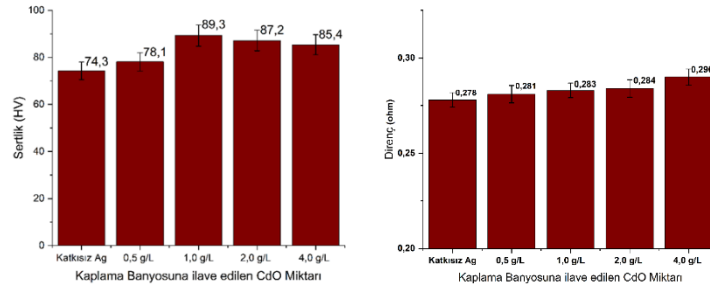
Effect of CdO Content on the Mechanical and Electrical Properties of Ag-CdO Nanocomposite Coatings Produced by Electrodeposition

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ İkinci faz, mekanik özellikleri artırmış ve tane yapısını değiştirmiştir. (The secondary phase improved mechanical properties and altered grain structure.)
- ❖ 1.0 g/L CdO, sertliği artırmış, elektriksel etkisi ihmal edilebilir düzeyde kalmıştır. (1.0 g/L CdO increased hardness with negligible effect on electrical properties.)

Grafik Özet (Graphical Abstract)

1,0 g/L CdO ilavesiyle üretilen Ag-CdO kaplamalar, optimum mekanik ve elektriksel özellikler göstermiştir. (Ag-CdO coatings with 1.0 g/L CdO addition exhibited optimal mechanical and electrical properties.)



Şekil. Ag-CdO kaplamaların sertlik ve dirençleri./Figure. Hardness and resistivity of Ag-CdO coatings.

Amaç (Aim)

Bu çalışma, elektrodepozisyon yöntemiyle üretilen Ag-CdO nanokompozit kaplamaların mikroyapısal, mekanik ve elektriksel özelliklerini incelemeyi amaçlamaktadır. (This study aims to investigate the microstructural, mechanical, and electrical properties of Ag-CdO nanocomposite coatings produced by the electrodeposition method.)

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Kaplamalar farklı CdO konsantrasyonlarıyla üretilmiş, SEM, EDS, XRD, mikrosertlik ve elektriksel direnç analizleriyle karakterize edilmiştir. (Coatings were produced by the electrodeposition method using different CdO concentrations and characterized by SEM, EDS, XRD, microhardness, and electrical resistivity analyses.)

Özgünlük (Originality)

Nano boyutta CdO içeren elektrodepozit kaplamaların sistematik olarak incelendiği ve optimum CdO miktarının belirlendiği ilk çalışmalardan biridir. (This is one of the first studies systematically analyzing electrodeposited coatings with nano-sized CdO and determining the optimum CdO content.)

Bulgular (Findings)

1,0 g/L CdO en yüksek sertliği sağlamış, iletkenliği büyük ölçüde korumuştur. Daha yüksek CdO, aglomerasyon nedeniyle mekanik özellikleri bozmuştur. (1.0 g/L CdO provided the highest hardness while largely preserving electrical conductivity, but higher CdO concentrations negatively affected mechanical properties due to agglomeration.)

Sonuç (Conclusion)

1,0 g/L CdO içeren Ag-CdO kaplamalar, elektrik kontaktları için en uygun performansı sunmaktadır. (Ag-CdO nanocomposite coatings with 1.0 g/L CdO offer the best mechanical and electrical performance for electrical contact applications.)

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Yazarlar, çalışmada kullanılan yöntemlerin etik kurul izni veya yasal özel izin gerektirmediğini beyan eder. (The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.)

Elektrodepozisyon Yöntemiyle Üretilen Ag-CdO Nanokompozit Kaplamalarda CdO Miktarının Mekanik ve Elektriksel Özelliklere Etkisi

Araştırma Makalesi / Research Article

Ramazan KARSLIOĞLU¹, Dila COSMUŞ²

¹Department of Industrial Design, Faculty of Architecture and Fine Arts, Ankara Yıldırım Beyazıt University, 06760 Ankara, Turkey.

²Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara Yıldırım Beyazıt University, 06760 Ankara, Turkey.

(Geliş/Received : 20.03.2025 ; Kabul/Accepted : 09.04.2025 ; Erken Görünüm/Early View : 14.04.2025)

ÖZ

Bu çalışmada, gümüş (Ag) ve kadmiyum oksit (CdO) takviyeli Ag matrisli nanokompozit kaplamalar, elektrodepozisyon yöntemi ile bakır altlıklar üzerine başarıyla kaplanmıştır. Kaplama elektrolitine eklenen CdO'nun miktarının, Ag matrisinin mikroyapı, mekanik ve elektriksel özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Mikroyapı karakterizasyonu, taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji saçınımlı X-ışınları spektroskopisi (EDS) ve X-ışınları difraktometresi (XRD) ile gerçekleştirilmiştir. Mekanik özellikler, mikrosertlik yöntemi kullanılarak değerlendirilmiş, elektriksel direnç ölçümleri ise katkısız Ag ve Ag-CdO nanokompozit kaplamalar üzerinde iki prop yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, elektrodepozisyon banyosuna eklenen CdO miktarının mikro yapı üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu göstermiştir. CdO ilavesi mekanik özellikleri önemli ölçüde iyileştirirken, matris malzemesinin elektriksel direncinde kayda değer bir artışa neden olmamıştır. 1,0 g/L CdO ilavesiyle sertlik 74,3 HV'den 89,3 HV'ye yükselirken, direnç değeri 0,278 ohm'dan 0,283 ohm'a çıkmıştır. Sonuç olarak, bu çalışmada 1,0 g/L CdO içeren Ag-CdO nanokompozit kaplamaların, en iyi mekanik ve mikroyapısal özellikleri sunduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrodepozisyon, Nanokompozit kaplama, Gümüş-kadmiyum oksit (Ag-CdO), Mikrosertlik, Elektriksel direnç.

Effect of CdO Content on the Mechanical and Electrical Properties of Ag-CdO Nanocomposite Coatings Produced by Electrodeposition

ABSTRACT

In this study, silver (Ag) and cadmium oxide (CdO) reinforced Ag matrix nanocomposite coatings were successfully deposited onto copper substrates using the electrodeposition method. The effect of CdO content in the coating electrolyte on the microstructure, mechanical, and electrical properties of the Ag matrix was investigated. Microstructural characterization was carried out using scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), and X-ray diffraction (XRD). Mechanical properties were evaluated using the microhardness method, while electrical resistance measurements were conducted on pure Ag and Ag-CdO nanocomposite coatings using the two-probe method. The obtained results showed that the CdO content in the electrodeposition bath had a significant effect on the microstructure. The addition of CdO considerably improved the mechanical properties while causing no significant increase in the electrical resistance of the matrix material. With the addition of 1.0 g/L CdO, the hardness increased from 74.3 HV to 89.3 HV, while the resistance rose slightly from 0.278 ohm to 0.283 ohm. Consequently, it was determined that Ag-CdO nanocomposite coatings containing 1.0 g/L CdO exhibited the best mechanical and microstructural properties in this study.

Keywords: Electrodeposition, Nanocomposite coating, Silver-cadmium oxide (Ag-CdO), Microhardness, Electrical resistance.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik kontakları, elektrik devrelerini bağlayan, elektrik iletimini sağlayan ve devrelerin açılıp kapanmasına olanak tanıyan sistemlerdir. Bu sistemler, elektrik güç sistemleri, uçaklar, uzay mekikleri ve otomasyon gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrik kontak sistemlerinde kullanılan malzemelerin özellikleri, sistemlerin performansı ve kullanım ömrü üzerinde doğrudan

etkilidir. Bu nedenle, elektrik kontak malzemelerinin yüksek elektriksel ve termal iletkenlik, yüksek kaynaklanma direnci ve yüksek ark direnci gibi özelliklere sahip olması gerekmektedir[1-4].

Elektrik kontak butonlarının çalışması sırasında, devre açma-kapama işlemi sırasında ark oluşmaktadır. Bu ark, kontak yüzeylerinin aşırı ısınmasına neden olarak erime ve buharlaşma yoluyla malzeme kaybına sebep olmaktadır. Sonuç olarak, kontak yüzeyleri zamanla

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : rkarslioglu@aybu.edu.tr

bozulmakta ve sistemin performansı düşmektedir[5-8]. Geçmişte, elektrik kontaklarında platin, tungsten, bakır ve gümüş gibi malzemeler yaygın olarak kullanılmıştır. Bu malzemeler arasında gümüş, oda sıcaklığında en yüksek elektrik iletkenliğine sahip olmasıyla öne çıkmaktadır. Ancak gümüş, yüksek sıcaklıklarda mekanik dayanım açısından zayıf bir malzemedir. Elektrik kontaklarının açılıp kapanması sırasında meydana gelen ark, kontak yüzey sıcaklığını artırarak mekanik bozulmaya yol açmaktadır. Bu nedenle, son yıllarda araştırmacılar gümüşün yüksek sıcaklık mekanik dayanımını artırmak amacıyla farklı malzemelerle takviye edilerek yeni nesil kompozit kontak malzemeleri geliştirmeye yönelmişlerdir[9-13].

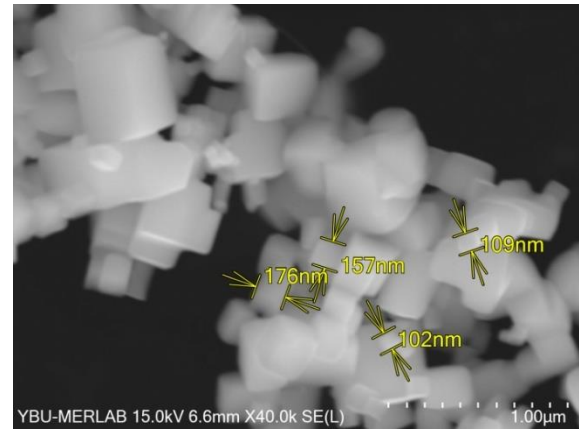
Gümüş matrisli elektrik kontak malzemeleri arasında özellikle Ag-CdO kontak malzemeleri, yüksek kontak performansları ile dikkat çekmektedir. CdO takviyesi, ark sırasında oluşan yüksek sıcaklık nedeniyle meydana gelen ergime ve kaynaklanma problemlerini azaltarak kaynaklanma direncini artırmakta, böylece kontak performansını iyileştirerek kullanım ömrünü uzatmaktadır[14-16]. Ag-CdO nanokompozitleri, yüksek elektriksel ve termal iletkenlik, yüksek ark direnci, yüksek kaynaklanma direnci ve düşük kontak direnci gibi özellikleri nedeniyle 1950’li yıllardan bu yana “evrensel kontak” (universal contact) olarak kabul edilmiştir [17-20].

Son yıllarda yapılan araştırmalar, Ag-CdO kompozitlerinin performansını daha da artırmak ve çevresel açıdan daha güvenli hale getirmek amacıyla nano mühendislik yaklaşımlarının kullanılmasının büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Nano boyutlu CdO takviyesi, mikron ölçekli CdO içeren geleneksel kompozitlere kıyasla daha homojen bir mikro yapı sunarak mekanik ve elektriksel özelliklerde iyileşme sağlamaktadır. Bu noktada, literatürde nano CdO içeren elektrodepozit kaplamalar üzerine kapsamlı bir çalışma bulunmamaktadır ve bu çalışma, bu alandaki bilgi boşluğunu doldurmayı amaçlamaktadır.

Bu çalışmada, geleneksel Ag-CdO kompozitlerinde kullanılan mikron boyutundaki CdO yerine nano boyutlu CdO kullanılarak, CdO takviyeli Ag matrisli nanokompozit elektriksel kontak malzemeleri geliştirilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, farklı miktarlarda CdO içeren Ag matrisli nanokompozit kaplamalar, doğru akım elektrodepozisyon yöntemi kullanılarak bakır altlıklar üzerine kaplanmıştır. Çalışmada, nano boyutlu CdO miktarının mikroyapı, mekanik ve elektriksel özellikler üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Özellikle, CdO ilavesinin tane yapısı ve büyüklüğü üzerindeki etkisi, mikrosertlik değişimi ve elektriksel direnç üzerindeki etkileri detaylandırılarak, en uygun CdO miktarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu yönüyle çalışma, nano boyutlu CdO içeren Ag matrisli elektrodepozit kaplamaların performansını sistematik olarak değerlendiren ilk araştırmalardan biri olması açısından özgünlük taşımaktadır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışmada kullanılan nano boyuttaki (ortalama 100 nm) CdO ticari bir firmadan temin edilmiştir. CdO nanotozunun mikroyapısal özellikleri, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiş olup, SEM görüntüsü Şekil 1’de verilmiştir. Katkısız Ag ve CdO takviyeli Ag matrisli nanokompozit kaplamalar, elektrodepozisyon yöntemi kullanılarak bakır altlıklar üzerine kaplanmıştır. Altlık malzemesi olarak 8 mm çapında bakır silindirler kullanılmıştır. Bakır altlıkların yüzey pürüzlülüğü, farklı grit numaralarına sahip zımparalarla düşürülerek mekanik temizleme işlemi uygulanmıştır. Daha sonra, kaplama banyosuna daldırılabilmesi için bakır altlıklar bakır teller ile lehimlenmiştir. Kaplanması istenmeyen bölgeler, yalnızca kaplama uygulanacak yüzey açık kalacak şekilde iletken olmayan boya ile maskelenmiştir. Kaplama öncesinde, yüzeyler seyreltik asit solüsyonu ve saf su ile kimyasal olarak temizlenmiştir. Kaplama öncesi yüzey hazırlığı tamamlanan bakır altlıkların görselleri Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 1. CdO nanoparçacıklarının SEM görüntüsü (SEM image of CdO nanoparticles)



Şekil 2. Kaplama için hazırlanmış bakır altlıklar (Copper substrates which are prepared for deposition)

Katkısız Ag ve Ag-CdO nanokompozit kaplamaları için hazırlanan kaplama banyosunun bileşimi Tablo 1’de verilmiştir. Kaplama banyosunda gümüş kaynağı olarak gümüş nitrür (AgNO_3) kullanılmıştır. Potasyum siyanür (KCN), anot pasivasyonunu önlemek ve anot malzemesi olan saf Ag’ün çözünmesini sağlamak amacıyla eklenmiştir. Nanokompozit kaplama üretimi için nano boyutta CdO kaplama banyosuna ilave edilmiştir. CdO takviyesinin mikroyapı, mekanik ve elektriksel özelliklere etkisini incelemek amacıyla, farklı oranlarda CdO içeren çözeltiler hazırlanmıştır. Banyo bileşimine ayrıca, sodyum dodesil sülfat ($\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{OSO}_2\text{ONa}$) eklenmiştir. Bu bileşen, CdO parçacıklarının aglomere (topaklaşma) olmasını engellemek ve banyo içerisinde askıda kalarak homojen bir dağılım sağlaması için kullanılmıştır.

Tablo 1. CdO takviyeli Ag matrisli nanokompozit kaplama banyosu içeriği (Bath composition of CdO reinforced Ag matrix nanocomposite coatings)

Malzeme	Miktar
Gümüş Nitrür (AgNO_3)	10 g/L
Potasyum Siyanür (KCN)	10 g/L
Sodyum Dodesil Sülfat ($\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{OSO}_2\text{ONa}$)	0,1 g/L
Kadmiyum Oksit (CdO)	0,0 / 0,5 / 1,0 / 2,0 ve 4,0 g/L

Hazırlanan nanokompozit kaplama banyosu, kaplama öncesinde CdO parçacıklarının homojen dağılmasını sağlamak amacıyla 30 dakika boyunca ultrasonik homojenizatör kullanılarak karıştırılmıştır. Elektrodepozisyon yöntemiyle katkısız Ag ve farklı miktarlarda (0,5, 1,0, 2,0 ve 4,0 g/L) CdO içeren Ag-CdO nanokompozit kaplamalar üretilmiştir.

Kaplama işlemi doğru akım elektrodepozisyon yöntemi kullanılarak 10 mA akım altında, 120 dakika boyunca gerçekleştirilmiştir. Kaplama sürecinde, bakır silindirler katot, gümüş anot ise kaplama çözeltisine Ag iyonu sağlayan kaynak elektrot olarak kullanılmıştır.

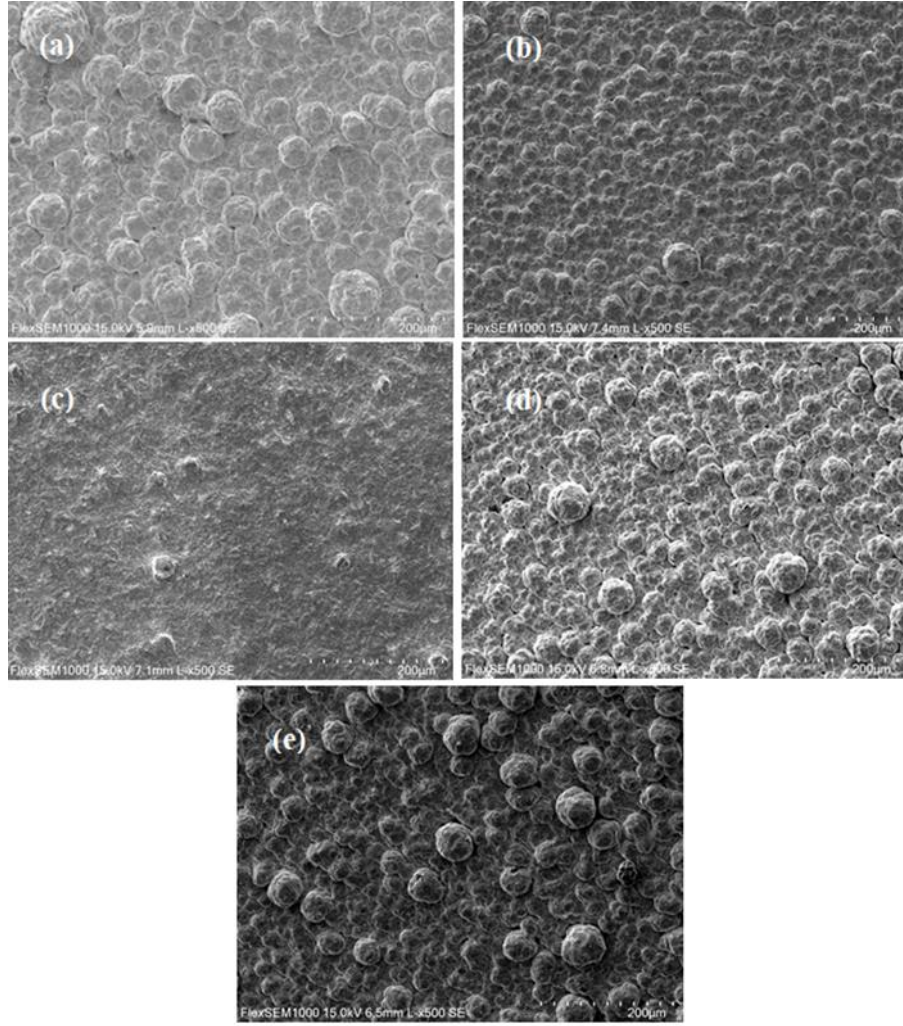
Kaplamaların mikroyapısal karakterizasyonu için taramalı elektron mikroskopu (SEM) (Hitachi FlexSEM) ve enerji saçınımlı X-ışınları spektrometresi (EDS) (Oxford X-MaxN 80) kullanılmıştır. CdO ilavesinin Ag kristal yapısı üzerindeki etkileri, X-ışınları difraktometresi (XRD) (Rigaku Miniflex) ile analiz edilmiştir. XRD analizleri, $\text{CuK}\alpha$ ışını (1.54059 Å dalga boyu) kullanılarak, 2 θ açısı 35°-90° aralığında, 2°/dakika hızında gerçekleştirilmiştir. Kaplamaların mekanik özellikleri, Vickers mikrosertlik yöntemi ile ölçülmüştür. Mikrosertlik ölçümleri, 50 g yük altında, 10 saniye süreyle kesit yüzeylerden alınmıştır. Elektriksel özelliklerin belirlenmesi amacıyla, katkısız Ag ve Ag-CdO nanokompozit kaplamaların öz dirençleri ölçülmüştür. İki prob yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen ölçümler, CdO miktarının elektriksel direnç üzerindeki etkisini analiz etmek için değerlendirilmiştir.

Bu deneysel çalışma, elektrodepozisyon yöntemiyle nano CdO içeren Ag matrisli nanokompozit kaplamaların üretimi ve karakterizasyonuna yönelik kapsamlı bir analiz sunmaktadır. Çalışma kapsamında, kaplama banyosundaki CdO içeriğinin mikroyapıya, mekanik dayanıklılığa ve elektriksel iletkenliğe etkileri sistematik olarak değerlendirilmiştir. Özellikle, 1,0 g/L CdO içeren kaplamaların en iyi mekanik ve mikroyapısal özellikleri bulunduğunu belirlenmiştir.

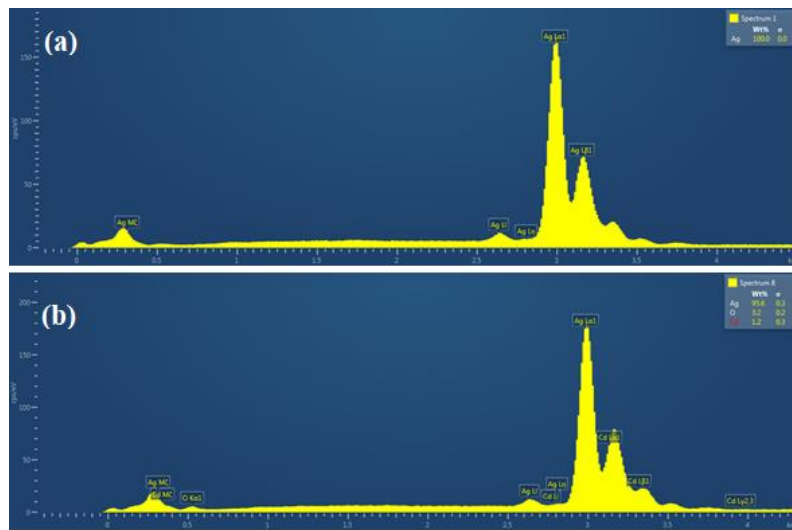
3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

SEM analizleri, doğru akım elektrodepozisyon yöntemi ile kaplanan katkısız Ag ve Ag-CdO nanokompozit kaplamaların yüzey morfolojisini ortaya koymuştur (Şekil 3). Şekil 3-a’da katkısız Ag’ün mikroyapısı incelendiğinde küresel formda taneler ve tane öbekleri görülmektedir. Şekil 3-b’de banyo bileşimine 0,5 g/L nano CdO ilave edilmiş nanokompozit kaplamanın yüzey yapısı incelendiğinde, katkısız Ag kaplama yüzeyinde görülen tane öbeklerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 3-c’de 1,0 g/L CdO ilave edilen nanokompozit kaplamanın yüzey görüntüsü incelendiğinde, tane yapısının değiştiği, daha homojen bir yüzey yapısı elde edildiği görülmektedir. Banyo bileşimine 1,0 g/L üzerinde CdO ilavesi yüzeyde yeniden tanelerin topaklaşmasına ve yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olmuştur. Bu artış, artan CdO miktarı ile birlikte daha da artmıştır.

EDS, elementel analiz sağlayan bir yüzey karakterizasyon tekniğidir ve yaklaşık 1 µm derinliğe kadar sinyal algılayabildiği için esas olarak yüzeye yakın bölgedeki kimyasal bileşimi yansıtır. Bu bağlamda, EDS analizleri, nano CdO’nun Ag matrise başarılı bir şekilde nüfuz ettiğini ve banyo bileşimine eklenen CdO miktarının kaplamadaki Cd içeriğini artırdığını doğrulamıştır. Örnek olarak, katkısız Ag ve banyo bileşimine 1,0 g/L CdO ilave edilerek üretilen Ag-CdO nanokompozit kaplamalara ait EDS sonuçları Şekil 4’te sunulmuştur. EDS elementel sonuçlar verdiği için katkısız Ag kaplamada sadece Ag EDS piki elde edilmiştir. Ag-CdO nanokompozit EDS sonuçlarında ise Ag pikinin yanında Cd ve O pikleride elde edilmiştir. EDS sonuçlarında elde edilen O miktarı ortam şartlarından etkilenebileceği göz önüne alınarak nanokompozit kaplamadaki Cd element miktarı dikkate alınmıştır. Ayrıca kaplama banyosuna ilave edilen CdO miktarı arttıkça Ag matris içerisine giren CdO miktarının ’da attığı tespit edilmiştir. EDS sonuçlarına göre banyo bileşimine ilave edilen 0,5, 1,0, 2,0 ve 4,0 g/L CdO nano parçacığına karşın nanokompozit içerisindeki ağırlıkça % Cd miktarı sırası ile 0,9, 1,2, 1,3 ve 1,7 olarak tespit edilmiştir. Bu durum bize Banyo bileşimine ilave edilen nano boyuttaki CdO miktarının artması ile birlikte yapı içerisine giren CdO miktarının da arttığını göstermektedir. Literatür incelendiğinde yapıya giren ikinci faz miktarının benzer şekilde ölçüldüğü görülmüştür[21-21].



Şekil 3. (a) katkısız gümüş, (b) 0,5 g/L, (c) 1,0 g/L, (d) 2,0 g/L ve (e) 4,0 g/L CdO takviyeli Ag matrisli nanokompozit kaplamaların SEM görüntüleri. (SEM images of (a) pure silver, (b) 0,5 g/L, (c) 1,0 g/L, (d) 2,0 g/L and 4,0 g/L CdO reinforced Ag matrix nanocomposite coatings)



Şekil 4. (a) Katkısız gümüş ve (b) 1,0 g/L CdO takviyeli Ag matrisli nanokompozit kaplamaların EDS grafikleri. (EDS spectra of (a) pure silver and (b) Ag matrix nanocomposite coatings reinforced with 1.0 g/L CdO.)

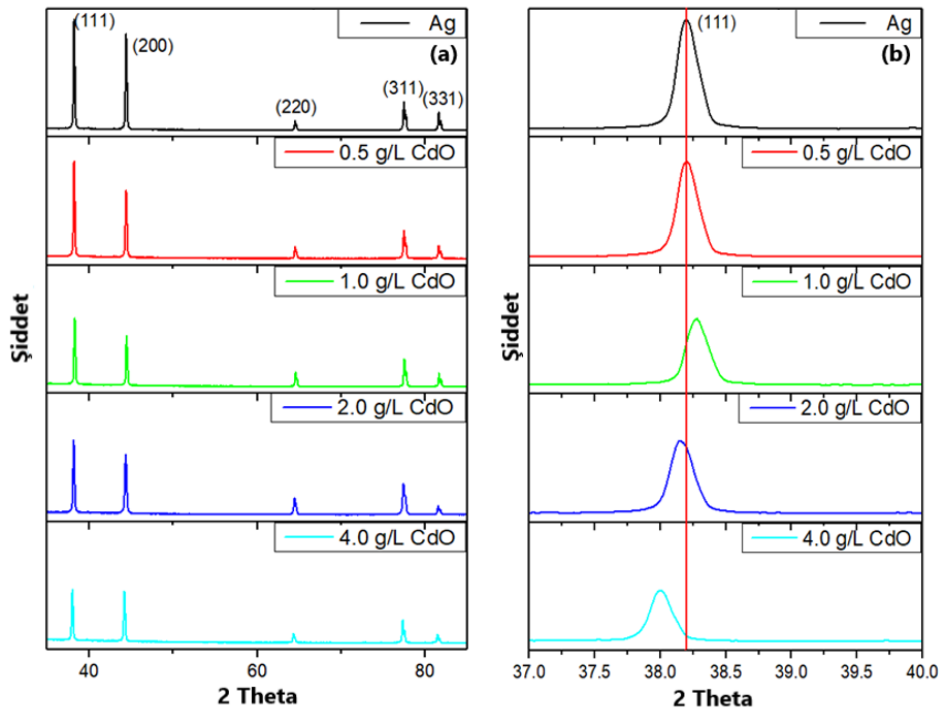
Katkısız Ag ve Ag-CdO nanokompozit kaplamalarına ait XRD analiz sonuçları Şekil 5'te verilmiştir. XRD pikleri,

JCPDS 04-0783 referans alınarak değerlendirilmiştir. Nanokompozit kaplamalarda, Ag (111), Ag (200), Ag

(220), Ag (311) ve Ag (331) düzlemlerine karşılık gelen piklerin belirgin şekilde büyüdüğü gözlemlenmiştir. Tüm kompozisyonlar için baskın büyüme yönünün Ag (111) düzleminde olduğu belirlenmiştir. Banyo bileşimine CdO ilavesinin artmasıyla birlikte XRD pik şiddetlerinde azalma gözlenmiştir. Ancak XRD analizlerinde CdO'ya ait herhangi bir pik tespit edilememiştir. Bunun sebebi, CdO miktarının XRD ile tespit edilebilecek minimum eşik değerinin altında olmasıdır[22-24].

XRD sonuçlarını daha ayrıntılı inceleyebilmek için Ag (111) piki detaylı olarak analiz edilmiştir (Şekil 5b). Yapılan incelemede, en yüksek pik şiddeti katkısız Ag kaplamada elde edilirken, en düşük pik şiddeti ise 4,0 g/L CdO içeren kaplamada gözlemlenmiştir. Ayrıca, banyo bileşimine eklenen CdO miktarının artışıyla birlikte Ag (111) pikinin genişlediği belirlenmiştir. Bu genişleme, CdO'nun ikinci faz olarak yapı içerisine dağılmasıyla birlikte, kristal büyüme sırasında tane sınırlarının hareketini fiziksel olarak engelleyen bir bariyer etkisi oluşturmasıyla açıklanabilir. Bu engelleyici etki, tane sınırlarının serbestçe ilerlemesini zorlaştırarak, mevcut tanelerin büyümesini sınırlamaktadır. Aynı zamanda, CdO parçacıkları kristalleşme sürecinde heterojen çekirdeklenme bölgeleri oluşturarak, yeni tanelerin oluşumunu teşvik etmektedir [25]. Bu çift yönlü mekanizma hem çekirdeklenme sayısının artması hem de tane büyümesinin kısıtlanması sonucu olarak ortalama tane boyutunun küçülmesine yol açmıştır. Dolayısıyla, CdO ikinci faz takviyesi, hem mikro yapının homojenliğini artırmış hem de tane inceltici etkisiyle mekanik özelliklerin iyileştirilmesine katkı sağlamıştır

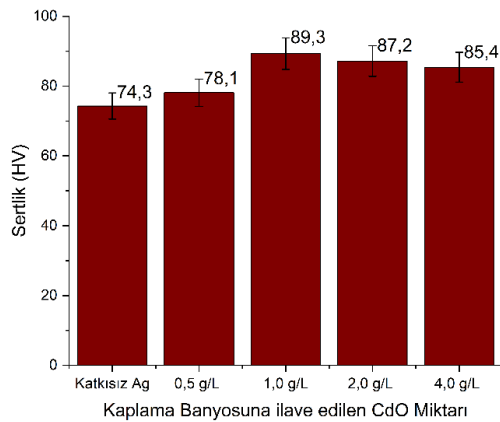
[26]. Banyo bileşimine eklenen CdO miktarı arttıkça, tane küçülmesi de belirginleşmiştir. Özellikle, 1,0 g/L CdO ilavesi, Ag (111) pikinin sağa kaymasına neden olmuş, CdO miktarının daha fazla artırılmasıyla bu kayma daha da belirginleşmiştir. Ancak, 1,0 g/L üzerindeki CdO ilavelerinde kaplama içerisinde CdO parçacıklarının topaklanması (aglomerasyon) meydana gelmiş, bu da yapı içindeki gerilmeleri azaltarak XRD piklerinin sol tarafa kaymasına neden olmuştur. Literatür incelemelerinde, matris içerisine nano parçacık eklendiğinde XRD piklerinde benzer kaymaların rapor edildiği görülmektedir[27-29]. XRD piklerinde gözlenen sağa ve sola kaymalar, kristal yapıda meydana gelen iç gerilmelerin ve kafes parametrelerindeki değişimlerin bir göstergesidir. Piklerin sağa kayması, genellikle kristal yapıda oluşan basma gerilmeleriyle ilişkilidir. Bu durum, atom düzlemleri arasındaki mesafenin azalmasına ve Bragg yasasına göre daha yüksek 2θ değerlerinde piklerin gözlenmesine neden olur [30]. Özellikle düşük miktarda CdO takviyesi (örneğin 1,0 g/L) sırasında CdO nanoparçacıkları Ag matrisine homojen şekilde dağılır ve kristal yapı içerisinde sıkı paketlenmeye yol açarak basma gerilmeleri oluşturur. Buna karşılık, piklerin sola kayması ise çekme (gevşeme) gerilmeleri ile ilişkilidir. CdO miktarının artmasıyla birlikte, CdO parçacıklarının aglomerasyona uğraması sonucu yapıda düzensizlikler oluşur ve bu durum atom düzlemleri arasındaki mesafenin artmasına neden olur. Böylece, XRD pikleri daha düşük 2θ değerlerine kayar [31]. Bu değişimler, kaplama yapısındaki iç gerilme durumunun ve ikinci faz dağılımının doğrudan bir yansımasıdır.



Şekil 5. Katkısız Ag ve farklı miktarlarda CdO takviyeli Ag matrisli nanokompozit kaplamaların (a) tam spektrum ve (b) Ag(111) XRD grafikleri. (Figure 5. (a) Full spectrum and (b) Ag(111) XRD patterns of pure Ag and Ag matrix nanocomposite coatings reinforced with different amounts of CdO.)

Üretilen kaplamaların mikrosertlik ölçüm sonuçları Şekil 6'da verilmiştir. Yapılan analizler, katkısız Ag kaplamanın mikrosertlik değerinin 74,3 HV olduğunu, 0,5 g/L CdO ilavesiyle üretilen nanokompozit kaplamanın sertliğinin 78,1 HV'ye yükseldiğini göstermektedir. CdO'nun yapı içerisine girmesi, dislokasyon ilerlemesini durdurarak etrafında dislokasyon bulutları oluşturmuş ve bu durum sertlik artışına neden olmuştur [32-35]. Bu artış, 1,0 g/L CdO ilavesiyle maksimum seviyeye ulaşmış ve sertlik değeri 89,3 HV olarak ölçülmüştür. Ancak 1,0 g/L'nin üzerindeki CdO ilaveleri, sertlik değerlerinde düşüşe neden olmuştur. CdO miktarının artmasıyla birlikte tane küçülmesi gözlemlense de, 1,0 g/L'nin üzerindeki CdO ilavelerinde yapı içerisinde CdO parçacıkları topaklanmaya (aglomerasyona) başlamıştır. Bu CdO topaklaşması, kaplama esnasında Ag matrisinin bu bölgeler arasına nüfuz edememesine neden olmuş, dolayısıyla kaplama içerisinde boşluklar oluşmuştur. Bu boşluklar, mekanik dayanımın azalmasına ve sertlik değerinin düşmesine sebep olmuştur [9, 36-37].

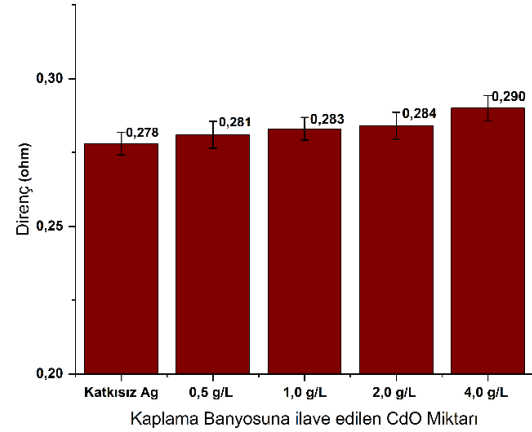
Katkısız Ag ve Ag-CdO nanokompozit kaplamaların elektriksel direnç ölçümleri gerçekleştirilmiş olup, elde edilen sonuçlar Şekil 7'de verilmiştir. Yapılan analizler, Ag matrisine eklenen CdO takviyesinin, beklenildiği gibi, malzemenin elektriksel direncini yalnızca çok az miktarda artırdığını göstermektedir.



Şekil 6. Katkısız Ag ve CdO takviyeli nanokompozit kaplamaların mikrosertlik değerleri (Microhardness values of pure Ag and CdO-reinforced nanocomposite coatings.)

Bu artışın temel nedenleri, yapı içerisine giren CdO ikinci fazının miktarı ve CdO'nun tane inceltici etkisidir. Kristal yapı içerisinde, tane içlerinde atomlar düzenli bir yapı sergilediği için elektron hareketi kararlı ve düzensiz saçılmalar minimum düzeydedir. Literatürde de benzer şekilde metal matrisli kompozitler ilave ikinci fazların elektriksel direnç artışına düşük etkisi olduğu bildirilmektedir [38]. Ancak tane sınırlarında atomlar düzensiz bir yapıya sahip olup, atomlar arası mesafeler tane içlerine kıyasla daha büyüktür. Bu düzensizlik, elektron hareketini zorlaştırarak elektriksel direncin artmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla, tane küçülmesi elektriksel direnci artıran bir faktördür [39]. SEM ve

XRD analizleri incelendiğinde, banyo bileşimine CdO ilavesiyle birlikte tane boyutunun küçüldüğü (tane sınırlarının arttığı) belirlenmiştir. Bu sonuçlar, elektriksel direnç ölçümleriyle tutarlı olup, CdO ilavesinin elektriksel özelliklere olan etkisinin, tane inceltici rolü ile doğrudan bağlantılı olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 7. Katkısız Ag ve Ag-CdO nanokompozit kaplamalarının elektriksel direnç değerleri (Electrical resistivity values of pure Ag and Ag-CdO nanocomposite coatings.)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, doğru akım elektrodpozisyon yöntemi kullanılarak katkısız Ag ve farklı miktarlarda CdO içeren Ag matrisli nanokompozit kaplamalar başarıyla üretilmiş ve detaylı bir karakterizasyon gerçekleştirilmiştir.

XRD ve SEM analizleri, banyo bileşimine CdO ilavesinin mikro yapıyı önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. CdO ilavesiyle birlikte Ag tanelerinin boyutu küçülmüş, tane sınırları artmış ve yüzey morfolojisi belirgin şekilde değişmiştir. Bu etki, CdO miktarının artmasıyla daha da belirginleşmiştir. Ancak, 1,0 g/L'nin üzerindeki CdO ilavelerinde, yüzeyde CdO parçacıklarının aglomerasyon (topaklaşma) eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir.

Mekanik özelliklerin değerlendirilmesi amacıyla yapılan mikrosertlik testleri, CdO takviyesinin sertliği önemli ölçüde artırdığını ortaya koymuştur. Katkısız Ag kaplamanın mikrosertlik değeri 74,3 HV olarak ölçülürken, 1,0 g/L CdO içeren nanokompozit kaplamada bu değer 89,3 HV'ye kadar yükselmiştir. Bu artış, CdO'nun dislokasyon hareketini engelleyerek sertliği artırmasından kaynaklanmaktadır. Ancak, 1,0 g/L'nin üzerindeki CdO ilavelerinde sertlik değerinde düşüş meydana gelmiş, bu durum CdO parçacıklarının aşırı aglomerasyonu sonucu yapıda boşluklar oluşması ve mekanik dayanımın azalmasıyla ilişkilendirilmiştir.

EDS analizleri, CdO parçacıklarının Ag matrisine başarıyla entegre olduğunu ve banyo bileşimine eklenen CdO miktarının artışıyla birlikte Ag matristeki Cd konsantrasyonunun arttığını doğrulamıştır. Ancak, 1,0 g/L üzerindeki CdO ilavelerinde, CdO'nun homojen dağılmak yerine belirli bölgelerde yoğunlaşarak yerel

konsantrasyon farklarına yol açtığı belirlenmiştir. Elektriksel direnç ölçümleri, CdO takviyesinin malzemenin elektriksel direncini yalnızca çok küçük bir miktarda artırdığını (0,278 ohm'dan 0,283 ohm'a) ortaya koymuştur. Direnç artışının temel sebebi, ikinci faz olarak yapı içerisine giren CdO'nun yanı sıra, tane küçülmesi sonucu oluşan artan tane sınırlarıdır. Daha küçük taneler, tane sınırlarını artırarak elektron hareketini zorlaştırmış ve dolayısıyla elektriksel direncin hafifçe yükselmesine neden olmuştur. Ancak, bu artış ihmal edilebilir düzeydedir ve kaplamanın elektriksel iletkenliğini belirgin şekilde olumsuz etkilememektedir.

Bu çalışma sonucunda, elektrodepozisyon yöntemiyle üretilen Ag-CdO nanokompozit kaplamalar arasında optimum mikroyapısal, mekanik ve elektriksel performansın, 1,0 g/L CdO içeren kaplamalarda elde edildiği belirlenmiştir. 1,0 g/L CdO takviyesi, taneleri küçültmekte, mekanik sertliği artırmakta ve elektriksel iletkenliği büyük ölçüde koruyarak optimize bir yapı sunmaktadır. Daha yüksek CdO miktarları ise, aglomerasyon eğilimi nedeniyle mikro yapının homojenliğini bozmuş ve sertlik değerlerinde düşüşe yol açmıştır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma 2019-30-07-25-001 numaralı proje kapsamında Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu – Bor Araştırma Enstitüsü (TENMAK-BOREN) tarafından desteklenmiştir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Dila COSMUS: Deneyleri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiş, Makalenin yazımında katkıda bulunmuştur.

Ramazan KARSLIOĞLU: Sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] J. Ding, W. Tian, P. Zhang, M. Zhang, J. Chen, Y. Zhang, Z.M. Sun, "Preparation and arc erosion properties of Ag/Ti2SnC composites under electric arc discharging", *J. Adv. Ceram.*, 8(1): 90-101, (2019).
- [2] X. Zhang, Y. Zhang, B. Tian, J. An, Z. Zhao, A. A. Volinsky, "Arc erosion behavior of the Al2O3-Cu/(W, Cr) electrical contacts", *Compos. Part B Eng.*, 160: 110-118, (2019).
- [3] X. Huang, Y. Feng, L. Li, ve Z. Li, "Erosion Behavior of a Cu-Ti3AlC2 Cathode by Multi-Electric Arc", *Materials*, 12(18): 2947, (2019).
- [4] Z.-X. Qi, L.-H. Li, H. Yi, W.-G. Liang, J.-Q. Liu, ve M.-C. Wei, "Effect of SnO2 particulate characteristics on mechanical properties of Ag/SnO2 electrical contact materials", *Int. J. Solids Struct.*, 314: 113338 (2025).
- [5] J. Ding, W. Tian, P. Zhang, M. Zhang, J. Chen, Y. Zhang, Z.M. Sun, "Corrosion and degradation mechanism of Ag/Ti3AlC2 composites under dynamic electric arc discharge", *Corros. Sci.*, 156: 147-160, (2019).
- [6] S. Biyik, F. Arslan, ve M. Aydin, "Arc-Erosion Behavior of Boric Oxide-Reinforced Silver-Based Electrical Contact Materials Produced by Mechanical Alloying", *J. Electron. Mater.*, 44(1): 457-466 (2015).
- [7] H. Nie, Z. Wang, X. Xue, C. Yu, J. Wang, K. Wen, C. Xu, "Designing sandwich-structured Ag-SnO2 contact materials Overcoming the trade-off between erosion resistance and mechanical properties", *Ceram. Int.*, 50(2): 2950-2962, (2024).
- [8] T. Zhou, X. Wang, L. Qin, W. Qiu, S. Li, Y. Jiang, Y. Jia, Zhou Li, "Electrical sliding friction wear behaviors and mechanisms of Cu-Sn matrix composites containing MoS2/graphite", *Wear*, 548-549: 205388, (2024).
- [9] R. Karslıoğlu, "Akımsız Kaplama Yöntemi ile Üretilmiş Grafen Takviyeli Gümüş Matrisli Nanokompozitlerin Yapısal Özelliklerine Banyo Bileşiminin Etkisi", *Int. J. Eng. Res. Dev.*, 11(2): 637-642, (2019).
- [10] H. Yılmaz, Y. Altın, ve A. Bedeloğlu, "Grafen Takviyeli Epoksi Nanokompozitlerin Özelliklerinin İncelenmesi", *Politek. Derg.*, 24(4): 1719-1727, (2021).
- [11] Comstock G.J., "Electrical Contact Element", **United States Patent Office**, Patent no: 2.365.249, (1944).
- [12] Y. Qiu, X. Wang, Y. Liang, Z. Li, Y. Fei, ve L. Wang, "Arc erosion behavior and mechanism of AgZrO2 electrical contact materials", *J. Alloys Compd.*, 976: 172966, (2024).
- [13] C.-Z. Zhang, F. Shen, ve L.-L. Ke, "A comparative study on the electrical contact behavior of CuZn40 and AgCu10 alloys under fretting wear Effect of current load", *Tribol. Int.*, 194: 109523, (2024).
- [14] X. Huang, Y. Feng, G. Qian, ve Z. Zhou, "Arc ablation properties of Ti3SiC2 material", *Ceram. Int.*, 45(16): 20297-20306, (2019).
- [15] J. Ding, W. Tian, P. Zhang, M. Zhang, J. Chen, Y. Zhang, Z.M. Sun, "Microstructure evolution, oxidation behavior and corrosion mechanism of Ag/Ti2SnC composite during dynamic electric arc discharging", *J. Alloys Compd.*, 785: 1086-1096, (2019).
- [16] X. Yuan, F. Fu, ve R. He, "Graphene-enhanced silver composites for electrical contacts: a review", *J. Mater. Sci.*, 59(9): 3762-3779, (2024).
- [17] D. Guzmán, C. Aguilar, P. Rojas, J. M. Criado, M. J. Diáñez, R. Espinoza, A. Guzmán, C. Martínez, "Production of Ag-ZnO powders by hot mechanochemical processing", *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 29(2): 365-373, (2019).
- [18] M. Hou, L. Li, ve M. Zhuang, "Research on application mechanism of cadmium in new energy vehicle charging group", *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, 227: 052046, (2019).

- [19] J. Jaćimović, L. Felberbaum, E. Giannini, ve J. Teyssier, “Electro-mechanical properties of composite materials for high-current contact applications”, *J. Phys. Appl. Phys.*, 47(12): 25501, (2014).
- [20] C. Wu, D. Yi, W. Weng, S. Li, ve J. Zhou, “Influence of alloy components on arc erosion morphology of Ag/MeO electrical contact materials”, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 26(1): 185-195, (2016).
- [21] X. C. Ma, G. Q. He, D. H. He, C. S. Chen, ve Z. F. Hu, “Sliding wear behavior of copper-graphite composite material for use in maglev transportation system”, *Wear*, 265(7): 1087-1092, (2008).
- [22] R. Karslioglu ve H. Akbulut, “Comparison microstructure and sliding wear properties of nickel-cobalt/CNT composite coatings by DC, PC and PRC current electrodeposition”, *Appl. Surf. Sci.*, 353: 615-627, (2015).
- [23] Y. Liu, L. Zheng, X. Li, ve S. Xie, “SEM/EDS and XRD characterization of raw and washed MSWI fly ash sintered at different temperatures”, *J. Hazard. Mater.*, 162(1): 161-173, (2009).
- [24] C. F. Holder ve R. E. Schaak, “Tutorial on Powder X-ray Diffraction for Characterizing Nanoscale Materials”, *ACS Nano*, 13(7): 7359-7365, (2019).
- [25] R. Karslioglu, M. Akçil, A. Alp, ve H. Akbulut, “Effect of Current Type and Density on Tribological Properties of Electrodeposited Ni-Co/MWCNT Nanocomposite Coatings”, *JOM*, 75(12): 5114-5125, (2023).
- [26] R. Karslioglu, L. Al-Falahi, “Electrical contact performance of various electro-deposited graphene reinforced silver-based nanocomposites”, *Mater. Test.*, 62(4): 401-407, (2020).
- [27] A. M. Yilmaz, F. Songur, E. Arslan, ve B. DiKiCi, “PEO Kaplamalara CeO₂ Nanopartikül İlavesinin Korozyon Davranışına Etkisi”, *Politek. Derg.*, 23(4): 1285-1295, (2020).
- [28] M. H. Maneshian, A. Simchi, ve Z. R. Hesabi, “Structural changes during synthesizing of nanostructured W-20 wt% Cu composite powder by mechanical alloying”, *Mater. Sci. Eng. A*, 445-446: 86-93, (2007).
- [29] H. H. R. Liu, G. X. Shao, J. F. Zhao, Z. X. Zhang, Y. Zhang, J. Liang, X. G. Liu, H. S. Jia, B. S. Xu, “Worm-Like Ag/ZnO Core-Shell Heterostructural Composites: Fabrication, Characterization, and Photocatalysis”, *J. Phys. Chem. C*, 116(30): 16182-16190, (2012).
- [30] B. S. Clausen, H. Topsøe, ve R. Frahm, “Application of Combined X-Ray Diffraction and Absorption Techniques for *in Situ* Catalyst Characterization”, *Advances in Catalysis*, 42: 315-344, (1998).
- [31] P. Zhang, Z. Yao, K. Lu, S. Lin, Y. Liu, S. Lu, X. Wu, “Tuning strength-ductility combination on two-phase FeCrAlTi_x high entropy alloy coating through grain refinement induced the generation of a second phase”, *J. Alloys Compd.*, 1004: 175924, (2024).
- [32] R. Karslioglu, M. Uysal, A. Alp, ve H. Akbulut, “Wear Behavior of Bronze Hybrid MMCs Coatings Produced by Current Sintering on Steel Substrates”, *Tribol. Trans.*, 53(5): 779-785, (2010).
- [33] M. Okumuş, E. Kaya, ve M. Gögebakan, “Microstructure, Hardness and Thermal Properties of Al_{4.5}Cu/TiO₂ Composites Produced by Mechanical Alloying”, *Politek. Dergisi*, 27(1): 1-10, (2024).
- [34] N. Çankaya ve Ö. Sökmen, “Kitosan-Kil Biyonanokompozitleri”, *Politeknik Dergisi*, 19(3): 283-295, (2016).
- [35] M. Taşyürek ve N. Tarakcıoğlu, “Karbon Nanotüp ile Modifiye Edilmiş Filaman Sarım Boruların İç Basınç Altındaki Hasar Davranış”, *Politeknik Dergisi*, 18(4): 211-217, (2015).
- [36] M. Pul ve V. Baydaroğlu, “B₄C/SiC Katkılı Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Mekanik Özelliklerin İncelenmesi ve Balistik Performanslarının Modellenmesi”, *Politek. Dergisi*, 23(2): 383-392, (2020).
- [37] R. Casati ve M. Vedani, “Metal Matrix Composites Reinforced by Nano-Particles—A Review”, *Metals*, 4(1): 65-83, (2014).
- [38] M. Tabandeh-Khorshid, Ajay Kumar, E. Omrani, C. Kim, ve P. Rohatgi, “Synthesis, characterization, and properties of graphene reinforced metal-matrix nanocomposites”, *Compos. Part B Eng.*, 183: 107664, (2020).
- [39] R. Karslioglu, M. Uysal, ve H. Akbulut, “The effect of substrate temperature on the electrical and optic properties of nanocrystalline tin oxide coatings produced by APCVD”, *J. Cryst. Growth*, 327(1): 22-26, (2011).