

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK KONTAK MALZEMELER İÇİN GRAFEN OKSİT
TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELER**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gülden ATALAY

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

EYLÜL 2025

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK KONTAK MALZEMELER İÇİN GRAFEN OKSİT
TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELER**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gülden ATALAY

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç Dr. Mehmet UYSAL

EYLÜL 2025

Gülden ATALAY tarafından hazırlanan “ELEKTRİK KONTAK MALZEMELER İÇİN GRAFEN OKSİT TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELER” adlı tez çalışması 19.09.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Bařkanı :	Prof. Dr. Hatem AKBULUT Sakarya Üniversitesi	
Jüri yesi :	Doç. Dr. Mehmet UYSAL (Danışman) Sakarya Üniversitesi	
Jüri yesi :	Doç. Dr. Harun GL Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi	



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “ELEKTRİK KONTAK MALZEMELER İÇİN GRAFEN OKSİT TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELER” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, etik kurul onay belgesi aldığımı çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(19/09/2025).

Gülden ATALAY





Aileme...



TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca rehberlik eden ve bilgi birikimiyle destek olan danışman hocam Doç. Dr. Mehmet Uysal’a şükranlarımı sunarım.

Hayatımın her anında yanımda olan sevgili aileme teşekkür ederim.

Ayrıca, tez sürecimde katkı sağlayan Arş. Gör. Sezer Tan’a ve değerli arkadaşım Yağmur Kelemci’ye teşekkür ederim.



Gülden ATALAY



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Kapsamı.....	2
1.2. Tezin Amacı	2
1.3. Literatür Araştırması	3
2. METALİK KAPLAMALAR	5
2.1. Akımlı Kaplamalar	6
2.1.1. Akımlı nikel kaplama	7
2.1.2. Akımlı bakır kaplama	8
2.2. Akımsız Kaplamalar	8
2.3. Termal Sprey Kaplamalar	9
3. GRAFEN OKSİT TAKVİYELİ KAPLAMALAR	11
3.1. Grafen Oksit (GO) ve Üretim Yöntemleri	11
3.2. Grafen Oksit Takviyeli Bakır Kaplamalar	11
4. DENEYSEL SONUÇLAR.....	13
KAYNAKLAR	23
ÖZGEÇMİŞ.....	27



KISALTMALAR

APS	: Atmosferik Plazma Sprey
CEC	: Kompozit Elektrokimyasal Kaplamalar
°C	: Santigrat derece
COF	: Sürtünme Katsayısı
CU-GO	: Bakır Grafen Oksit Kaplamalar
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
DAH	: Değer Akış Haritası
ECRS	: Eliminate – Combine – Rearrange – Simplify
EDS	: Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi
EIS	: Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi
FESEM	: Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu
GO	: Grafen Oksit
gr	: Gram
HVOF	: Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt
mm	: Mikrometre
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	: X-Işınları Difraktometresi



SİMGELER

°C : Santigrat derece

A : Amper

Gpa : Gigapascal





TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Dış etkiler ile malzeme yüzeyinde meydana gelen değişimler [16].	5
Tablo 4.1. Cu-Go kompozit kaplamaların kimyasallar ve deneysel parametreleri ...	13
Tablo 4.2. Numune kodları ve içerikleri	14





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.2. Akımlı ve Akımsız Kaplama Yönteminde Kaplama Düzgünlüğü	9
Şekil 4.1. Cu-GO Kaplamaların FESEM Yüzey Morfolojileri.....	15
Şekil 4.2. Kaplamaların XRD Eğrileri	16
Şekil 4.3. Numunelerin tane boyutu-mikrogerinim eğrileri	17
Şekil 4.4. Kaplamaların tekstür katsayıları grafiği	19
Şekil 4.5. Kaplamaların sertlik-elastik modül eğrileri	20
Şekil 4.6. Kaplamaların sürtünme katsayıları ve aşınma hızları grafikleri.....	21



ELEKTRİK KONTAK MALZEMELER İÇİN GO TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELER

ÖZET

Son yıllarda elektronik sistemler, enerji depolama teknolojileri ve ulaşım sektörlerinde yaşanan hızlı gelişmeler, çok işlevli, yüksek performanslı ve sürdürülebilir mühendislik malzemelerine olan ihtiyacı büyük ölçüde artırmıştır. Özellikle elektrik kontak malzemeleri, bir sistemin güvenilirliği, verimliliği ve uzun ömürlülüğü açısından kritik bileşenler arasında yer almaktadır. Bu tür malzemelerde hem yüksek elektriksel iletkenlik hem de yüksek mekanik dayanımın bir arada bulunması beklenmektedir. Gümüş ve altın, mükemmel iletkenlik özellikleri göstermelerine rağmen yüksek maliyetleri nedeniyle endüstriyel uygulamalarda sınırlı kullanılmaktadır. Buna karşın, bakır ekonomik oluşu, kolay işlenebilirliği ve yüksek iletkenliği sayesinde tercih edilen en yaygın metalik iletkenlerden biridir. Ancak saf bakır, düşük sertlik ve sınırlı korozyon direnci nedeniyle yüksek akım altında oksitlenme, aşınma ve yüzey deformasyonu gibi problemlere maruz kalmaktadır. Bu sorunlar, özellikle uzun süreli çalışma koşullarında sistem performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu çalışmada, söz konusu dezavantajların giderilmesi amacıyla grafen oksit (GO) takviyesi ile güçlendirilmiş bakır kompozit kaplamalar (Cu-GO) akımlı kaplama yöntemiyle üretilmiştir. GO, geniş yüzey alanı, yüksek mekanik dayanım, kimyasal kararlılık ve katı yağlayıcı özellikleri sayesinde metal matris kompozitlerde dikkat çekici bir takviye fazı olarak öne çıkmaktadır. Bu özellikleri sayesinde GO, bakır matris içerisinde homojen olarak dağılmış, böylece kaplamanın mikro yapısal bütünlüğünü güçlendirmiş ve yüzey özelliklerini iyileştirmiştir. Üretilen Cu-GO kaplamaların FESEM görüntüleri, GO ilavesiyle birlikte tane incelmesinin meydana geldiğini, yüzeyin daha yoğun ve düzgün bir morfoloji kazandığını göstermiştir. XRD analizleri, grafen oksidin kristal yapı içinde tane büyümesini engelleyici etki gösterdiğini, bu sayede kristalit boyutunun küçüldüğünü ve iç gerilmelerin azaldığını ortaya koymuştur. Williamson-Hall analizi sonucunda en düşük mikrogerinim değerinin 0,5 A akım yoğunluğunda üretilen CuGO₂ numunesinde elde edildiği belirlenmiştir. Nanoindentasyon testleri, aynı numunenin 2,53 GPa sertlik ve 282 GPa elastik modül ile en iyi mekanik performansı gösterdiğini doğrulamıştır. EIS (Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi) test sonuçları, GO takviyesinin kaplama yapısında koruyucu bir bariyer tabakası oluşturarak elektrokimyasal reaksiyonları yavaşlattığını ve korozyon direncini artırdığını ortaya koymuştur. Ayrıca tribolojik testlerde, GO takviyesiyle birlikte sürtünme katsayısının (COF) 0,26'ya, aşınma hızının ise $2,82 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ seviyesine kadar düştüğü tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, GO'nun tabakalı yapısı sayesinde yüzeyde katı yağlayıcı bir film oluşturduğunu ve temas yüzeyindeki sürtünmeyi azalttığını göstermektedir.

Özet olarak, GO takviyeli Cu kompozit kaplamalar; yüksek iletkenlik, gelişmiş mekanik dayanım, düşük aşınma oranı ve üstün korozyon direnciyle, elektrik kontak malzemeleri için yüksek performanslı ve ekonomik bir alternatif sunmaktadır. Bu çalışma, mikroelektronik, otomotiv, savunma ve enerji sektörlerinde kullanılabilecek,

Çevresel açıdan sürdürülebilir yeni nesil Cu-GO kompozit kaplama teknolojilerine önemli bir katkı sağlamaktadır.



GO-REINFORCED COMPOSITE MATERIALS FOR ELECTRICAL CONTACT APPLICATIONS

SUMMARY

The continuous advancement of modern technology, particularly in electronics, energy systems, and electrical engineering, has increased the need for materials that combine high electrical conductivity, mechanical robustness, and environmental stability. Electrical contact materials play a crucial role in determining the reliability, performance, and lifetime of electromechanical systems, as they must endure severe operating conditions such as high current density, elevated temperature, and corrosive atmospheres. Copper is one of the most commonly used metals in this field owing to its outstanding electrical and thermal conductivity, excellent formability, and relatively low cost compared with noble metals such as silver and gold. However, the inherent softness and chemical reactivity of pure copper significantly limit its long-term functionality. Under conditions of high current flow and temperature, copper tends to oxidize rapidly, which leads to an increase in electrical resistance, surface degradation, and contact failure. This issue has motivated intensive research into copper-based composite coatings that can retain the electrical advantages of copper while improving its mechanical and corrosion performance.

In this study, graphene oxide (GO), a two-dimensional carbon nanomaterial derived from the oxidation of graphite, was incorporated into a copper matrix to form Cu–GO composite coatings using an electrochemical (current-assisted) deposition method. GO exhibits a unique combination of large surface area, excellent chemical stability, high mechanical strength, and the presence of oxygen-containing functional groups that promote good dispersibility in aqueous electrolytes and strong interfacial bonding with metallic matrices. By integrating GO within copper coatings, it was anticipated that the mechanical and tribological performance of the copper surface could be significantly improved through mechanisms such as grain refinement, dislocation pinning, and solid lubrication, while the oxygen barrier effect of GO could enhance corrosion resistance. The coatings were fabricated via pulse electroplating under different current densities (0.25, 0.5, and 1 A/cm²) using an electrolyte containing CuSO₄·5H₂O, H₂SO₄, and sodium dodecyl sulfate as a surfactant, with a GO concentration of 0.15 g/L. Prior to deposition, the GO particles were dispersed in the electrolyte by mechanical stirring followed by ultrasonication to minimize agglomeration. Steel substrates (St37) served as cathodes and copper plates as anodes. The coatings were designated as CuGO0 (pure Cu), CuGO1 (GO-reinforced at 0.25 A/cm²), CuGO2 (GO-reinforced at 0.5 A/cm²), and CuGO3 (GO-reinforced at 1 A/cm²). The structural, microstructural, and mechanical features of the coatings were systematically characterized using Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM), Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS), and X-ray Diffraction (XRD). Mechanical and tribological tests were performed via nanoindentation and ball-on-disc wear testing, respectively, while Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) was employed to evaluate corrosion behavior in 3.5 wt% NaCl solution. FESEM analysis revealed that GO incorporation substantially modified the

surface morphology and grain structure of the electrodeposited coatings. The pure copper coating exhibited a relatively coarse and nodular surface with irregular grain boundaries, whereas the addition of GO resulted in the formation of finer grains due to the creation of additional heterogeneous nucleation sites on the cathode surface. At an optimum current density of 0.5 A/cm² (CuGO2), the coating displayed a compact, uniform, and defect-free microstructure with the most homogeneous GO distribution. Conversely, increasing the current density to 1 A/cm² (CuGO3) led to local GO agglomerations and irregular grain growth due to excessive deposition rates. XRD patterns confirmed the face-centered cubic (fcc) structure of copper, with dominant reflections from (111), (200), and (220) planes. The incorporation of GO caused a reduction in peak intensity and an increase in the full width at half maximum (FWHM), implying lattice strain and crystallite size refinement. The Williamson–Hall analysis indicated that internal microstrain reached its minimum value at 0.5 A/cm², correlating with the finest crystallite size (~50 nm). These structural changes confirmed that GO effectively restricted excessive crystal growth by hindering dislocation movement and promoting a dense, refined grain structure. Mechanical characterization by nanoindentation demonstrated a remarkable enhancement in hardness and elastic modulus with GO reinforcement. The hardness increased from 1.4 GPa for pure Cu (CuGO0) to 2.53 GPa for CuGO2, while the elastic modulus improved from 212 GPa to 282 GPa. The enhancement was attributed to the synergistic effects of grain refinement and load transfer between the copper matrix and the well-dispersed GO sheets. However, further increasing the current density to 1 A/cm² resulted in a slight reduction in hardness (2.1 GPa) and modulus (256 GPa) due to the appearance of microvoids and structural defects caused by rapid metal ion deposition. Electrochemical analysis revealed that the addition of GO dramatically enhanced corrosion resistance. The EIS spectra exhibited larger capacitive loops and higher charge transfer resistance (*R*_{ct}) for the GO-containing coatings compared to pure copper, confirming that GO acts as an efficient physical barrier that restricts the diffusion of chloride ions and retards electrochemical reactions. Among the tested samples, CuGO2 demonstrated the best corrosion resistance due to its uniform microstructure and well-dispersed GO network, which effectively reduced electrolyte penetration through the coating. Tribological tests performed under a 2 N load and a sliding speed of 0.1 m/s revealed that GO incorporation substantially reduced both the coefficient of friction (COF) and the wear rate. The COF decreased from 0.51 for CuGO0 to 0.26 for CuGO2, while the wear rate was reduced from 4.1×10^{-5} mm³/N·m to 2.82×10^{-5} mm³/N·m. These results were attributed to the formation of a continuous GO-based tribofilm on the surface, which acted as a solid lubricant minimizing adhesive and abrasive wear. Furthermore, the increase in hardness and structural compactness contributed to reduced material removal during sliding. The highest current density (1 A/cm²) again led to slight deterioration due to non-uniform GO distribution and localized surface roughness. The overall results indicated that the synergistic interaction between copper and GO generated coatings with enhanced microstructural integrity, mechanical strength, and corrosion protection without compromising electrical conductivity. The optimum coating, CuGO2, combined the advantages of a refined microstructure, high hardness and modulus, low friction coefficient, and superior electrochemical stability. The study also highlighted the importance of controlling deposition parameters such as current density, duty cycle, and GO dispersion to achieve consistent coating quality.

In summary, the incorporation of graphene oxide into electrodeposited copper coatings significantly improved their tribological and electrochemical behavior. GO not only

functioned as a strengthening and lubricating phase but also acted as a barrier layer that prevented corrosion initiation and propagation. The findings confirm that GO-reinforced Cu coatings can serve as promising, cost-effective, and environmentally sustainable alternatives to traditional copper coatings in electrical contact applications. Such coatings can extend the service life of components operating in aggressive environments while maintaining excellent electrical performance. The present research provides valuable insight into the design of multifunctional metal–carbon nanocomposite coatings, offering potential applications across a wide range of industries including microelectronics, energy transmission, automotive systems, and defense technologies. By combining superior conductivity, wear resistance, and corrosion protection, the developed Cu–GO coatings represent a significant advancement toward next-generation functional materials for sustainable engineering systems.





1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin hızlı gelişimi, malzeme mühendisliği alanında iletkenlik, dayanıklılık ve korozyon direnci gibi çoklu performans kriterlerini aynı anda sağlayabilen yeni nesil malzemelere olan ihtiyacı artırmıştır. Özellikle elektronik, elektrikli ulaşım sistemleri ve enerji iletim teknolojilerinde kullanılan iletken kaplamaların performansı; sistemin genel verimliliği, ömrü ve güvenilirliği üzerinde doğrudan etkili olmaktadır.

Elektrik kontak malzemeleri, elektrik devresinde akımı kontrol etmek için kullanılan elektromekanik bileşenlerdir. Bu malzemelerin dayanıklılığı ve performansı, cihazın genel çalışma süresi ve güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Çalışma sırasında kontak yüzeylerinde aşınma oluşabilir, bu nedenle elektrik kontak malzemelerinin sadece iyi iletkenlik değil, aynı zamanda yüksek mekanik dayanım özelliklerine de sahip olması gerekir [1].

Bakır metali; iyi düzeydeki iletkenliği, işlenebilirliği ve ekonomikliği sayesinde öne çıkan malzemelerden biridir. Gümüş ve altına kıyasla daha düşük maliyetli olması, bakırın sanayide daha geniş bir kullanım alanına sahip olmasını sağlamaktadır. Fakat bakır ve bakır bazlı malzemeler, düşük sertlik ve aşınma direncine sahip olmaları nedeniyle elektrik kontak malzemesi olarak kullanıldıklarında yüzey aşınması oluşur ve servis süreleri kısalmır. Bu sebeple, elektrik kontak uygulamalarında kullanılan bakırın mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu da kütleli sertlik artırma ve yüzey geliştirme işlemleri ile yapılmaktadır. Özellikle elektrikli temasın kritik olduğu sistemlerde malzemenin iletkenlik değeri; performans, güvenilirlik ve enerji verimliliği açısından belirleyici bir rol oynamaktadır. Bu sorunu aşmak amacıyla geliştirilen yüzey modifikasyon yöntemleri arasında, özellikle kompozit kaplama teknikleri ön plana çıkmaktadır [3].

Son yıllarda, karbon temelli nanomalzemelerden biri olan grafen oksit (GO), sahip olduğu üstün mekanik dayanım, büyük yüzey alanı ve kimyasal kararlılığı sayesinde, iletken kaplamalara takviye malzemesi olarak ilgi görmektedir [2].

Bu tez çalışmasında, akımlı kaplama yöntemiyle GO katkılı bakır (Cu-GO) kompozit kaplamalar üretilmiş ve bu kaplamaların yapısal, elektrokimyasal ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen bulgular, GO katkısının bakır kaplamaların korozyon direnci ve aşınma dayanımı üzerindeki etkilerini ortaya koymakta ve özellikle elektriksel temas elemanları gibi uygulamalar için alternatif oluşturabilecek yeni nesil kaplama teknolojilerine katkı sağlamaktadır [2].

1.1. Tezin Kapsamı

Bu tez çalışması, yüksek elektriksel iletkenliğe sahip olmakla birlikte korozyon ve aşınmaya karşı nispeten zayıf performans sergileyen bakır kaplamaların, grafen oksit (GO) takviyesi ile mekanik ve kimyasal dayanımının iyileştirilmesini hedeflemektedir. Çalışmanın temel amacı, GO katkılı bakır kaplamalar geliştirerek, özellikle elektriksel ve elektronik uygulamalarda kritik öneme sahip olan iletkenlik, korozyon direnci ve aşınma dayanımı gibi performans parametrelerini optimize etmektir. Bu bağlamda, GO takviyeli bakır kaplamaların üretimi gerçekleştirilmiş; kaplamaların mikroyapısal, elektrokimyasal ve tribolojik özellikleri detaylı karakterizasyonlarla incelenmiş ve geleneksel saf bakır kaplamalar ile karşılaştırmalı analizler yapılmıştır.

1.2. Tezin Amacı

Tez kapsamında, akımlı kaplama yöntemi kullanılarak bakır ve grafen oksit takviyeli bakır (Cu-GO) kompozit kaplamalar hazırlanmıştır. Üretilen kaplamaların yüzey morfolojisi, yapısal ve kimyasal bileşenleri, taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) ve X-ışını kırınımı (XRD) gibi gelişmiş karakterizasyon teknikleri ile detaylı biçimde analiz edilmiştir. Kaplamaların korozyon dayanımı, elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) yöntemi kullanılarak değerlendirilirken, aşınma performansı ise sürtünme katsayısı (COF) ölçümleri ve aşınma oranı analizleriyle belirlenmiştir. Elde edilen deneysel veriler ışığında, GO katkısının bakır kaplamaların elektriksel ve mekanik performansına olan etkisi ortaya konarak, bu malzemenin ileri teknoloji uygulamalarında kullanım potansiyeli araştırılmıştır.

1.3. Literatür Araştırması

Bakır kaplamalar, yüksek elektrik ve ısı iletkenlikleri nedeniyle elektronik cihazlar, enerji iletim sistemleri ve elektromekanik bileşenler başta olmak üzere çeşitli endüstrilerde yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak bakırın doğal olarak düşük korozyon ve aşınma direnci, uzun vadeli dayanıklılık sorunlarına yol açmakta ve bu durum özellikle zorlu çevresel koşullarda kullanımını kısıtlamaktadır [1,2]. Bu nedenle literatürde, bakır kaplamaların yüzey dayanımını artırmaya yönelik farklı stratejiler geliştirilmiştir. Son dönemde öne çıkan ve giderek popülerlik kazanan yöntemlerden biri, metal matris kaplamalara karbon bazlı nanomalzemelerden grafen oksit (GO) eklenmesidir [3,4].

Grafen oksit, geniş yüzey alanı, yüksek kimyasal kararlılık ve zengin oksijenli fonksiyonel grupları sayesinde, metal matrisler ile güçlü etkileşimler geliştirmekte ve kaplama yapısında etkin bir bariyer görevi üstlenmektedir. Bu durum, kaplamaların elektrokimyasal korozyon direncini artırmakta ve oksitleyici ortamlarla temasını engellemektedir. Ayrıca literatürde, GO katkısının sürtünme katsayısını düşürdüğü ve aşınma oranını anlamlı biçimde azalttığı deneysel çalışmalarla gösterilmiştir [5,6]. Bu özellikler, Cu-GO kompozit kaplamaların hem koruyucu hem de fonksiyonel açıdan geleneksel saf bakır kaplamalara kıyasla üstün olduğunu ortaya koymaktadır.

Yapılan araştırmalar, GO takviyesinin sadece korozyon ve aşınmaya karşı koruma sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda kaplamanın mekanik stabilitesini ve elektriksel performansını da iyileştirdiğini göstermektedir. Bu yönleriyle grafen oksit destekli bakır kaplamalar, özellikle elektronik, otomotiv, savunma ve enerji depolama alanlarında yeni nesil iletken kaplama malzemeleri olarak büyük potansiyel taşımaktadır.



2. METALİK KAPLAMALAR

Metal esaslı malzemeler, günlük yaşantımızdan sanayiye kadar pek çok alanda temel yapı elemanları olarak kullanılmaktadır. Endüstriyel üretimde ve ürün imalatında yaygın olarak kullanılan bu malzemelerin dayanıklılıkları, genellikle karşılaştıkları çalışma koşulları ve kullanım biçimleri tarafından belirlenir. Özellikle birbirine temas eden parçalar arasında oluşan mekanik etkileşimler, beraberinde kimyasal ve elektrokimyasal süreçleri de tetikleyerek malzemenin yüzeyinde olumsuz değişimlere neden olabilir. Bu değişiklikler, malzemenin fonksiyonel özelliklerinde bozulmaya yol açarak ciddi performans kayıplarına sebep olabilir [16,17].

Yüzeyler, atomik düzeydeki yapıları itibarıyla dış etkilere karşı en hassas bölgeler olarak değerlendirilir. Bu etkiler; aşınma, kimyasal korozyon, elektrokimyasal reaksiyonlar veya yüksek sıcaklık gibi faktörlerden kaynaklanabilir ve genellikle birden fazla etki aynı anda görülebilir. Malzeme yüzeyinde gerçekleşen bu çeşitli değişimler ve hasar mekanizmaları, Tablo 2.1’de kapsamlı biçimde ele alınmıştır [16,17].

Tablo 2.1. Dış etkiler ile malzeme yüzeyinde meydana gelen değişimler [16].

Temas Eden Yüzey	Yüzeyde Meydana Gelen Değişim
Hava Atmosferi	Kirlenme ve Aşınma
Sıcak Gazlar	Oksidasyon ve tufal oluşumu
Akış Halindeki Sıvılar	Kavitasyon ve erozyon
Mikroorganizmalar	Mikrobiyolojik hasar
Kimyasallar	Kimyasal ya da elektrokimyasal korozyonlar
Mekanik Temas	Kimyasal/elektrokimyasal olaylar, aşınma ve tribolojik hasarlar

Endüstriyel metal üretim süreçleri yüksek miktarda enerji ve ham madde tüketimine yol açmaktadır; bu da hem ekonomik kaynakların israfı hem de çevresel sorunlar açısından risk oluşturmaktadır [18]. Bu nedenle, malzemelerin ömrünü uzatmak ve kaynak verimliliğini artırmak amacıyla, yüzeylerin dış etkilere karşı dayanıklılığını artırmak büyük önem kazanmıştır.

Bu bağlamda, yüzeylerin koruyucu bir metal tabakası ile kaplanması, malzemenin maruz kaldığı ortamın olumsuz etkilerine karşı etkin bir çözüm sunmaktadır. Günümüzde metal kaplamalar, artık sadece estetik amaçlarla değil, endüstriyel süreçlerde malzemelerin işlevselliğini artırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Kaplama materyalinin özellikleri, alt tabaka metalin karakteristiklerinden farklı olarak özel gereksinimlere göre seçilip optimize edilmekte ve böylece yüzey performansı istenilen şekilde iyileştirilebilmektedir.

Sonuç olarak, metal kaplama teknolojileri, korozyon dayanımı, aşınma direnci, sertlik ve yüzey sürtünme gibi kritik parametreleri iyileştirerek, pek çok sektörde kullanılan metal parçaların dayanıklılığını ve verimliliğini artırmaktadır.

2.1. Akımlı Kaplamalar

Akımlı kaplama, malzeme yüzey kalitesini artırmak amacıyla yaygın şekilde uygulanan elektrokimyasal bir prosestir. Literatürde sıklıkla *elektrokimyasal kaplama* veya *elektroforetik biriktirme (EPD)* olarak da anılmaktadır. Bu yöntemde, elektrolitik bir hücre içerisinde, kaplama malzemesi iyonik formda çözeltide bulunur ve bir dış elektrik akımı uygulanarak metal veya alaşım yüzeyine biriktirilir. Böylece, koruyucu veya fonksiyonel özellikler kazandırılmış bir kaplama elde edilir.

Kaplama işlemine başlamadan önce, yüzeyin kaplamaya uygun hale getirilmesi kritik öneme sahiptir. Bu amaçla, alt tabaka temizlenir, yağdan arındırılır, durulanır ve gerekirse yüzey aktivasyonu uygulanır. Hazırlanan alt tabaka, elektrolit içeren bir banyo içerisine daldırılır. Elektrolit genellikle yüklü boya parçacıkları ya da iyonlar içeren sulu bir çözeltidir. Kaplanacak alt tabaka katot (negatif elektrot), karşı elektrot ise anot (pozitif elektrot) olarak işlev görür. Anot genellikle paslanmaz çelik gibi inert bir malzemeden seçilir.

Sisteme bir elektrik gerilimi uygulandığında, elektrolit içerisindeki yüklü parçacıklar elektrik alanı etkisiyle alt tabakaya doğru hareket eder ve burada birikerek sürekli bir kaplama oluşturur. Bu işlem, istenen kaplama kalınlığı elde edilene kadar devam eder. Kaplama sonrası, malzeme durulama, kurutma ve sertleştirme gibi ek işlemlere tabi tutularak kaplamanın performansı artırılabilir [13].

Akımlı kaplama yönteminin başlıca avantajları; düşük sıcaklıklarda (20°C–60°C) ve atmosfer basıncında uygulanabilir olması, sulu çözelti kullanımı sayesinde çevre dostu

ve ekonomik oluşudur [13]. Ayrıca, karmaşık geometrilere sahip parçaların bile homojen şekilde kaplanmasına olanak tanır. İşlem parametreleri (gerilim, süre, banyo bileşimi vb.) üzerinde hassas kontrol sağlanarak kaplama kalınlığı ve kalitesi optimize edilebilir.

Akımlı kaplama; korozyon direnci, estetik görünüm, aşınma dayanımı gibi özelliklerin önemli olduğu otomotiv, havacılık, elektronik, beyaz eşya ve inşaat gibi pek çok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle çelik, alüminyum gibi iletken metallerin kaplanmasında etkin bir yöntemdir [13,14].

2.1.1. Akımlı nikel kaplama

Nikel kaplama, metal yüzeylerin aşınma, korozyon ve oksidasyon gibi dış etkenlere karşı korunmasında yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Akımlı (elektrolitik) nikel kaplama, elektrik akımı uygulanarak metal iyonlarının çöktürülmesine dayalı klasik galvanik bir kaplama tekniğidir. Bu yöntemde, nikel anot iletken bir elektrolit içinde çözünürken, nikel iyonları katoda yönelerek yüzeyde bir film tabakası oluşturur.

Elektrolitik nikel kaplamalarda genellikle sülfamat, klorür veya sülfat esaslı elektrolitler kullanılmakta; katkı maddeleri ile parlaklık, düzgünlük ve sertlik gibi yüzey özellikleri kontrol edilmektedir. Nikel kaplama banyosunda akım yoğunluğu, sıcaklık, pH ve katkı maddelerinin türü kaplama kalitesini doğrudan etkilemektedir.

Ghosh ve arkadaşları (2019), 3–5 A/dm² aralığında uygulanan akım yoğunluklarında düzgün ve mikro çatlak içermeyen nikel kaplamalar elde edildiğini; 6 A/dm² üzerindeki değerlerde ise dendritik yapılar ve yüzey pürüzlülüğü gözlemlendiğini rapor etmişlerdir. Ayrıca kaplama kalınlığı, kaplama süresi ve akım yoğunluğu ile doğru orantılı olup, Faraday yasaları ile teorik olarak hesaplanabilir.

Nikel kaplamaların mekanik özellikleri bakımından da avantajlı olduğu bildirilmektedir. Özellikle sertlik ve aşınma direnci açısından, parlak katkılı elektrolitik nikel kaplamalar, mat elektrolitlerden daha yüksek performans göstermektedir.

Elektrolitik nikel kaplamaların yaygın uygulama alanları arasında otomotiv parçaları, elektronik bileşenler, dekoratif donanımlar ve mühendislik amaçlı yüzey modifikasyonları bulunmaktadır. Ancak, kaplama kalınlığının karmaşık geometrilere homojen dağılması ve yüksek gözeneklilik, yöntemin sınırlayıcı faktörlerindendir.

2.1.2. Akımlı bakır kaplama

Elektrolitik bakır kaplama, özellikle yüksek iletkenlik gerektiren elektronik uygulamalarda kritik öneme sahiptir. Bu yöntem, bir bakır anotun elektrolitik çözeltiye yerleştirilerek çözünmesi ve bakır iyonlarının bir katot üzerine çöktürülmesi esasına dayanır. Bakır kaplamalarda genellikle sülfat ve flüoroborat esaslı elektrolit sistemleri kullanılmaktadır.

Çözeltideki bakır sülfat (CuSO_4) ve sülfürik asit (H_2SO_4) konsantrasyonu, kaplama hızı ve kaplama kalitesini belirleyen en kritik parametreler arasındadır. Ayrıca, katkı maddeleri (parlatıcılar, tane incelticiler ve seviyelendiriciler) sayesinde kaplamaların mikroyapısal özellikleri düzenlenebilmektedir.

Kim ve arkadaşları (2020), akım yoğunluğunun bakır kristal morfolojisi üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermiştir. Düşük akım yoğunluklarında ($1\text{--}2 \text{ A/dm}^2$) ince taneli, düzgün kaplamalar elde edilirken; yüksek akım yoğunluklarında (5 A/dm^2 ve üzeri) çukurlaşma, kabarcık oluşumu ve yapışma problemleri gözlenmiştir. Bu bağlamda optimum akım yoğunluğu ve banyo kimyası seçimi, kaplama kalitesinin belirleyici unsurudur.

Elektrolitik bakır kaplamalar, baskılı devre kartları (PCB), elektromanyetik kalkanlama, elektrikli bağlantı elemanları ve difüzyon bariyeri gibi birçok uygulamada tercih edilmektedir. Bakırın yüksek elektriksel iletkenliği sayesinde, bu kaplamalar elektronik sistemlerde sinyal kayıplarını minimize eder (Yılmaz ve Arıkan, 2019).

Ancak, bakır kaplamaların atmosferik koşullarda hızlı oksidasyona uğraması nedeniyle kaplama sonrası pasivasyon veya çok katmanlı kaplama çözümleri (örneğin bakır-nikel veya bakır-kalay sistemleri) tercih edilmektedir. Ayrıca, düşük yapışma mukavemeti ve mikroporozite, bazı kritik uygulamalarda sınırlayıcı olabilir.

2.2. Akımsız Kaplamalar

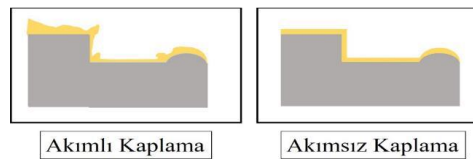
Akımsız kaplama tekniği ilk olarak 1946 yılında Brenner ve Riddell tarafından keşfedilmiştir [7]. Zamanla bu yöntem daha geniş bir uygulama alanı bulmuş ve üstün mekanik ve fizikokimyasal özelliklere sahip kaplamaların üretilmesini sağlamıştır. Akımsız kaplama, iletken olmayan yüzeylerin kaplanabilmesi ve tüm yüzeylerde homojen bir kaplama kalınlığı elde edilebilmesi gibi birçok geleneksel kaplama yöntemine göre önemli avantajlar sunmaktadır. Bu özellikleriyle fonksiyonel

malzemelerin üretiminde tercih edilen bir yöntem haline gelmiş ve özellikle istenilen mekanik ve fiziksel özelliklerin elde edilmesinde etkili bir çözüm sunmuştur. Günümüzde akımsız kaplama, elektrik-elektronik sektöründe kullanılan ileri teknoloji malzemelerin üretiminde de yaygın olarak kullanılmaktadır [8].

Akımsız kaplama, indirgeyici maddeler içeren bir sıvı çözeltide metal iyonlarının kimyasal reaksiyonla yüzeye çökmesi esasına dayanır. Bu yöntemde dışarıdan elektrik uygulanmaz, bu nedenle klasik galvanik kaplama tekniklerinden ayrılır [9].

Malzemelerin tribolojik ve mekanik özelliklerini artırma amacıyla tercih edilen bu yöntem her geçen gün daha geniş bir uygulama alanında kullanılmaktadır. Ayrıca çok katmanlı kaplama sistemleri gibi çeşitli teknikler geliştirilmiş ve aynı yapıda birden fazla işlevsel özelliği bir araya getirmek için başarıyla çalışmaktadır [8,10].

Akımsız ve akımlı kaplama teknikleri karşılaştırıldığında, akımsız kaplamaların yüzey üzerinde daha düzgün ve homojen bir kalınlık sağladığı görülmektedir. Bu durum, akımsız yöntemde kimyasal reaksiyonun tüm yüzeye eşit şekilde gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır. Öte yandan, akımlı kaplama yöntemlerinde özellikle keskin kenar ve çıkıntılı yüzeylerde kaplama kalınlığında düzensizlikler meydana gelmektedir. Bu sorun, akım yoğunluğunun yüzey geometrisine göre değişkenlik göstermesiyle ilişkilidir. Sabit akım altında çalışan bir sistemde, dar alanlı keskin bölgelerde akım yoğunluğu daha fazla olmakta ve bu da o bölgelerde metalin aşırı birikmesine yol açmaktadır. Bu nedenle, akımlı kaplamalarda homojen bir kaplama elde etmek daha zordur. Söz konusu fark, Şekil 1.'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur [11,12].



Şekil 2.1. Akımlı ve Akımsız Kaplama Yönteminde Kaplama Düzgünlüğü Farkları [11, 12]

2.3. Termal Sprey Kaplamalar

Termal spreycaplama teknolojisi, malzemelerin yüzey özelliklerini geliştirmek, aşınma ve korozyon gibi yüzey kaynaklı hasarları önlemek amacıyla geliştirilen ileri yüzey modifikasyon yöntemlerinden biridir. Bu teknoloji, metalik, seramik, sermet ve bazı polimerik malzemelerin toz, tel veya çubuk formunda bir ısı kaynağı ile

ergitilerek ya da yumuşatılarak yüksek hızlı gaz akışıyla alt tabaka yüzeye püskürtülmesini içeren bir grup proses için kullanılan genel bir tanımdır.

Termal sprej prosesinin en temel avantajı, çok geniş bir malzeme yelpazesine uygulanabilir olmasıdır. Yaklaşık olarak süblimleşmeden ya da bozunmadan eriyebilen her tür malzeme, bu yöntemde kaplama malzemesi olarak kullanılabilir. Termal sprej teknolojisi, zorlu çalışma koşullarına maruz kalan mühendislik parçalarında dayanıklı ve özel yüzey kaplamaları sağlamak için vazgeçilmez bir yöntemdir.

Termal sprej yöntemleri, kullanılan enerji kaynağı, partikül hızı, işlem sıcaklığı ve taşıyıcı gaz özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır. Bu doğrultuda en yaygın kullanılan teknikler şunlardır:

- **Alev Sprej (Flame Spray):** Oksijen ve yanıcı gazın (propilen, asetilen vb.) yanmasıyla elde edilen ısı kaynağı kullanılarak kaplama tozunun eritilmesi sağlanır. Ekonomik olmasına rağmen gözeneklilik oranı yüksektir.
- **Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt (HVOF):** Alev sprej yönteminin gelişmiş versiyonu olan HVOF, yüksek basınçta yanıcı gazların yakılmasıyla oluşan alevin içine tozların enjekte edilmesiyle gerçekleştirilir. Elde edilen kaplamalar yüksek yoğunluk ve düşük gözeneklilik sunar.
- **Plazma Sprej (APS):** Elektrik arkı ile iyonize edilen gazların oluşturduğu yüksek sıcaklıklı plazma ortamında kaplama tozu eritilir ve yüzeye püskürtülür. Özellikle seramik malzemelerin kaplanması tercih edilir ve çok yüksek sıcaklıklara ulaşılabilir (yaklaşık 10.000–15.000 K)
- **Elektrik Ark Sprej:** İki metal telin elektrik arkı ile eritilerek püskürtülmesi esasına dayanır. Özellikle çinko ve alüminyum gibi korozyon önleyici kaplamalarda kullanılır.

3. GRAFEN OKSİT TAKVİYELİ KAPLAMALAR

3.1. Grafen Oksit (GO) ve Üretim Yöntemleri

Grafen oksit (GO), oksijen içeren fonksiyonel gruplarla (hidroksil, epoksi, karboksil vb.) zenginleştirilmiş, tek katmanlı karbon atomlarından oluşan iki boyutlu bir nanomalzemedir. Altıgen kafes yapısına sahip olan bu yapı, grafitin kimyasal olarak oksidasyonu ile elde edilir. GO, grafene benzer şekilde yüksek yüzey alanı, üstün mekanik dayanım ve iyi düzeyde termal iletkenliğe sahiptir. Ancak yapısında bulunan oksijenli gruplar sayesinde suda kolaylıkla dağılabilir, bu da işlenebilirliğini artırarak kompozit ve kaplama teknolojilerinde önemli bir avantaj sağlar [15,17].

Grafen oksit üretimi genellikle grafit malzemenin güçlü oksitleyici ajanlarla reaksiyona sokulmasıyla gerçekleştirilir. Bu amaçla sıklıkla potasyum permanganat (KMnO_4), sodyum nitrat (NaNO_3) ve hidrojen peroksit (H_2O_2) gibi oksidanlar kullanılır. Bu reaktifler, grafit katmanları arasına oksijenli grupların yerleşmesini sağlayarak yapının oksitlenmesine neden olur. Sonuç olarak, GO tabakalar halinde oluşur ve bu tabakalar mekanik veya kimyasal yöntemlerle birbirinden ayrılabilir.

Literatürde GO üretimi için farklı kimyasal yöntemler geliştirilmiştir. En çok bilinenler arasında Brodie, Staudenmaier, Offeman, Hummers, geliştirilmiş Hummers ve elektrokimyasal yöntemler arasındadır. Bunlar arasında en yaygın kullanılanı, Hummers yöntemidir. Bu yöntemde grafit, konsantre sülfürik asit (H_2SO_4), sodyum nitrat (NaNO_3) ve potasyum permanganat (KMnO_4) içeren bir ortamda oksidasyona tabi tutulur. Reaksiyon karışımı belirli sıcaklık ve süre koşullarında karıştırılarak grafit yapısının kontrollü şekilde oksitlenmesi sağlanır. Bu yöntemle elde edilen GO, başlangıçta elektriksel olarak yalıtkan yapıdadır. Ancak indirgeme işlemleri sonucunda (örneğin termal veya kimyasal indirgeme) iletkenliği önemli ölçüde artırılabilir [16,17].

3.2. Grafen Oksit Takviyeli Bakır Kaplamalar

Son yıllarda, metal yüzeylerin özelliklerini geliştirmek amacıyla geliştirilen hibrit kaplama sistemleri içinde bakır-grafen oksit (Cu-GO) kompozit kaplamalar öne

çıkılmaktadır. Bakırın yüksek elektriksel ve termal iletkenliğine ek olarak, grafen oksit (GO) malzemesinin olağanüstü mekanik, kimyasal ve fiziksel özellikleriyle birleştirilmesi, çok işlevli kaplama sistemlerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

Cu-GO kaplamalar, genellikle bakır alt tabakalar üzerine grafen oksit dispersiyonlarının elektrodpozisyon, kimyasal indirgeme veya termal sprej gibi tekniklerle uygulanmasıyla elde edilir. Bu kaplamaların başlıca avantajlarından biri, bakırın korozyon hassasiyetini önemli ölçüde azaltmalarıdır. GO tabakası, gözeneksiz yapısı sayesinde yüzeye sızan oksitleyici ajanlara karşı fiziksel bir bariyer oluşturarak, bakırın çevresel etkilerle bozunmasını önler. Bu yapı, özellikle nemli ve agresif kimyasal ortamlarda Cu yüzeyinin servis ömrünü anlamlı biçimde uzatmaktadır.

Bununla birlikte, Cu-GO kaplamalar yalnızca korozyon direnci açısından değil, aynı zamanda termal yönetim uygulamaları için de değerlidir. GO'nun iki boyutlu yapısı, ısıyı yüksek verimlilikle taşıyabilecek kanallar oluşturarak, bakır alt tabakanın termal iletkenliğini iyileştirir. Ayrıca literatürde, GO içeren kaplamaların antibakteriyel özellikler sergilediği ve mikroorganizmalara karşı yüzey koruması sağladığı da belirtilmiştir. Bu nedenle Cu-GO kaplamalar, tıbbi cihazlar ve biyomedikal implantlar gibi hijyenik yüzey gerektiren uygulamalarda da potansiyel taşımaktadır. Ek olarak, GO'nun yüzey alanı geniş yapısı ve elektrokimyasal stabilitesi, enerji depolama sistemlerinde, özellikle de süperkapasitör ve batarya elektrotlarında, Cu-GO kaplamaların kullanımını mümkün kılmaktadır.

Sonuç olarak, Cu-GO kaplamalar, paslanmaya karşı dayanıklı, ısıyı iyi ileten, antibakteriyel özelliklere sahip ve elektrokimyasal açıdan etkili malzemeler olarak yüksek teknoloji alanlarında giderek popülerleşmektedir. Bu özellikler, söz konusu kaplamaları özellikle mikroelektronik, enerji, biyomedikal ve savunma sanayii gibi stratejik alanlar için önemli malzeme sistemleri haline getirmektedir.

4. DENEYSEL SONUÇLAR

Cu-GO kompozit kaplamalar akımlı yöntemle (elektrolitik) kesikli akım kullanılarak üretilmiştir. Kaplama işlemleri için kesikli akım, Plating Electronic GmbH (Almanya) tarafından sağlanan bir güç kaynağı ile uygulanmıştır. Kaplama süresince banyo sıcaklığı ve pH sabit tutulmuştur. Kaplama öncesinde, GO takviyeleri, elektrolitte aglomerasyonu önlemek amacıyla önce 24 saat boyunca mekanik olarak karıştırılmış, ardından 1 saat süreyle ultrasonik olarak dağılmıştır. Ultrasonik jeneratör olarak, 20 kHz frekansında ve 750 W gücünde çalışan UP200S tipinde horn uçlu bir ultrasonik işlemci kullanılmıştır. Uygulanan ultrasonik güç, 40 kHz frekansında ve 75 W'a ayarlanmış, titanyum bir prob ($\varnothing$ 8 mm) aracılığıyla aktarılmıştır. Katot olarak 5 cm² boyutlarında çelik bir levha (ST37), anot olarak ise katot boyutundan daha büyük bir bakır plaka kullanılmış olup elektrotlar arasındaki mesafe 30 mm olarak belirlenmiştir. Katot yüzeyi, 180'den 1000'e kadar derecelendirilmiş zımpara kağıtları ile mekanik olarak parlatılmış, ardından sırasıyla aseton içinde ultrasonik olarak temizlenmiş ve son olarak 1 M hidroklorik asit içinde işlem görerek kaplama öncesi yüzey kontaminasyonlarından arındırılmıştır. Kompozit kaplama işlemlerinde kullanılan banyo ve kaplama parametreleri Tablo 4.1.'de verilmiştir. Tüm kimyasallar, Sigma Aldrich firmasından temin edilen analitik saflıkta reaktiflerdir. Deney sonuçlarının ve analizlerin açıklanmasında kolaylık olması için üretilen numunelere kodlar verilmiş ve Tablo 4.2.' de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Cu-Go kompozit kaplamaların kimyasallar ve deneysel parametreleri

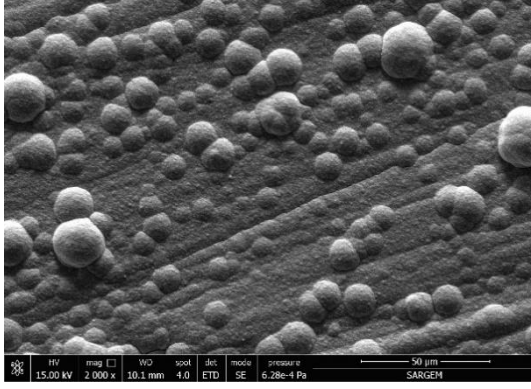
Kimyasallar		Parametreler	
CuSO ₄ ·5H ₂ O	200 gL ⁻¹	Akım Yoğunluğu	0.25, 0.5 ,1 A/cm ²
H ₂ SO ₄ (10 wt%)	40 gL ⁻¹	Görev Döngüsü	Ton:60 Toff:40
Sodyum dodesil sülfat	0.05 gL ⁻¹	Sıcaklık	25°C
Grafen Oksit	0.15 gL ⁻¹	pH	2.5 ± 0.2

Tablo 4.2. Numune kodları ve içerikleri

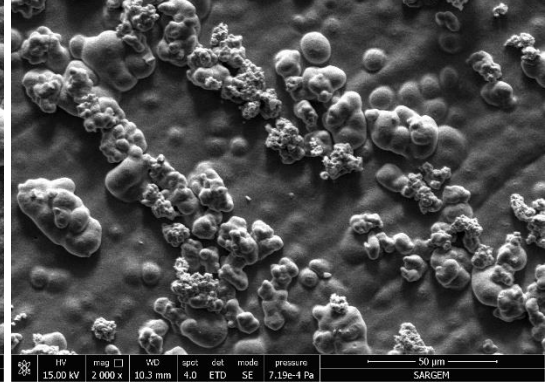
Numune Kodu	GO içeriği	Akım yoğunluğu
CuGO0	0.15 gL ⁻¹	0.5 A/cm ²
CuGO1	0.15 gL ⁻¹	0.25 A/cm ²
CuGO2	0.15 gL ⁻¹	0.5 A/cm ²
CuGO3	0.15 gL ⁻¹	1 A/cm ²

Kaplamaların yüzey morfolojisi ve mikroyapısı, alan yayımlı taramalı elektron mikroskobu (FESEM, JEOL 7600F) ile karakterize edilmiştir. Kaplamaların faz bileşimi, kristalit boyutu ve faz yapıları, Cu ışını kaynağı (1.5405 Å) kullanılarak 10°–100° aralığında ve 3°/dk artışla yapılan X-ışını kırınımı (XRD, Rigaku D/max-2400) analiziyle belirlenmiştir. Mikrogerilme ve kristalit boyutu hesaplamaları Williamson-Hall denkleminde göre yapılmıştır. Aynı zamanda tekstür katsayısı hesabı’da XRD sonuçlarından elde edilen verilere yapılmıştır.

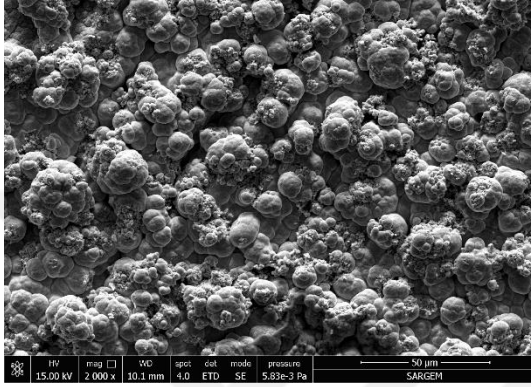
Kaplamaların elastik modülü ve nanoyüzey sertliği, kesit üzerinde nanoindentasyon tekniği (Nano Indentation Tester-NHT³, Anton Paar) ile 70 mN yük altında, 10 saniye süreyle Berkovich uç kullanılarak ölçülmüştür. Her numune için farklı bölgelerde en az beş tekrar yapılmıştır. Tribolojik testler, yaklaşık 60 HRc sertliğe sahip Ø 10 mm çapında M50 çelik bilye ile kuru kayma koşullarında, oda sıcaklığında, karşılıklı kayma tipi bilye-disk test cihazı (CSM Instruments) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Testler 2 N yük altında, 0.1 m/s kayma hızıyla ve 250 m toplam kayma mesafesi boyunca uygulanmıştır. Numunelerin elementel bileşimi ve aşınma mekanizmaları, EDS ile donatılmış SEM cihazı ile incelenmiştir. Numunelerin aşınma oranı, Archard denklemi kullanılarak hesaplanmıştır. Aşınma oranı formülü $S = V / PS$ ’dir; burada V: aşınan hacim (mm³), P: uygulanan yük (N), S: kayma mesafesi (m) olarak tanımlanmıştır [2].



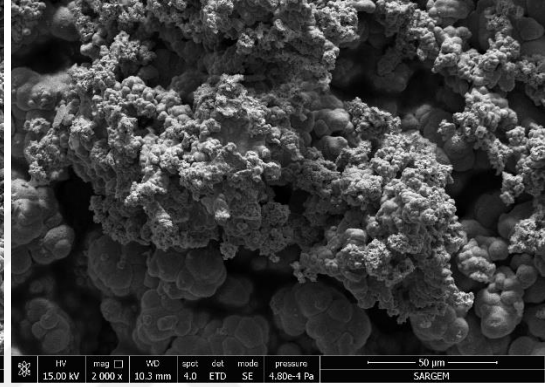
Şekil 4.1.a



Şekil 4.1.b



Şekil 4.1.c

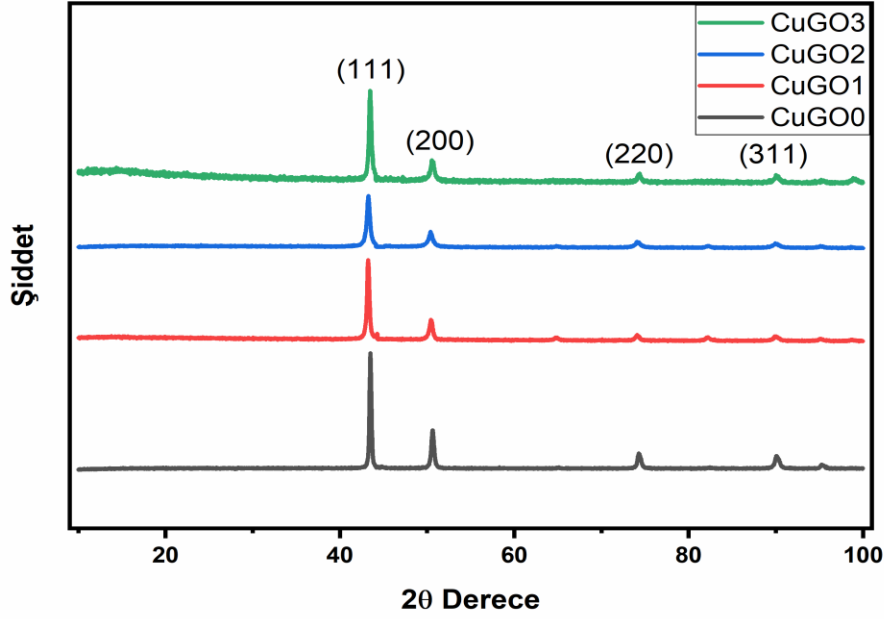


Şekil 4.1.d

Şekil 4.1. Cu-GO Kaplamaların FESEM Yüzey Morfolojileri

Şekil 4.1.'de akımlı yöntemle kaplanmış Cu-GO kaplamaların FESEM yüzey morfolojilerini göstermektedir. Şekil 4.1.a. GO ilavesiz bakır kaplamalaya aittir. Şekil 4.1.a'dan görüldüğü üzere yüzeyde diğer kaplamalara göre nispeten düz ve iri taneli bir yapı söz konusudur. Şekil 4.1.b.'de ise daha küçük (ince boyutlu) tanelerin olduğu gözlemlenmektedir. GO takviyesi ilave çekirdekleyici alanlar oluşturarak yeni tanelerin oluşumu için bölgeler oluşturmaktadır. Bu durum tane incelmelerini sağlamaktadır. Şekil 4.1.c'de ise tanelerin oldukça incelendiği görülmektedir. Bu görüntüden hareketle artan GO oranının yüzeyde oldukça fazla bir biçimde çekirdekleyici alanlar oluşturduğu ve tane incelmelerini teşvik ettiği söylenebilir [30]. Şekil 4.1.d'de ise tane boyutunda artış görülmektedir. Fazla miktarda ilave edilen GO topaklaşmaya sebep olmuş bu durumda bazı bölgelerde oldukça ince taneli morfolojiye, bazı bölgelerde ise iri taneli morfolojiye sebep olmuştur. GO'ların yığılma bölgelerinde çekirdekleyici alanların sayısı arttığı için taneler incelmıştır. Bu durum farklı bölgelerde farklı mekanik ve elektrokimyasal özellikler sergilemesine sebebiyet vermektedir.

XRD

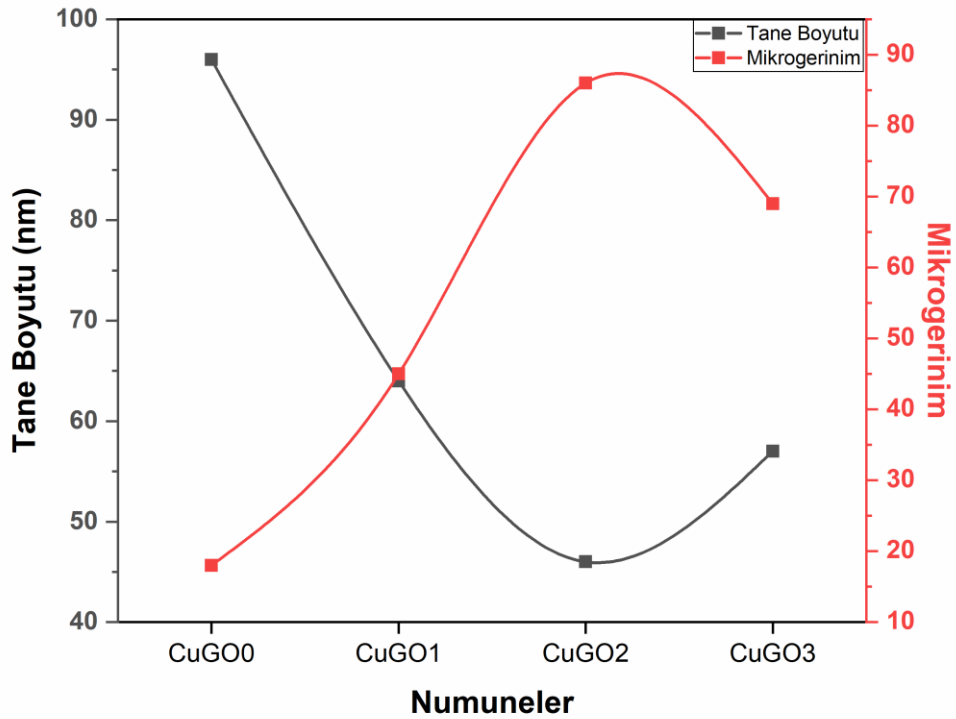


Şekil 4.2. Kaplamaların XRD Eğrileri

Şekil 4.2’de farklı akım yoğunluklarında üretilen Cu-GO kaplamalara ait X-ışınları difraktometresi (XRD) eğrilerini göstermektedir. GO oranı sabit tutulmuştur. XRD analizi 10-100°’lerde çekilmiş olup tarama hızı olarak 3 °/dk olarak belirlenmiştir. XRD eğrileri incelendiğinde artan akım yoğunluğu ile birlikte pik şiddetlerinde azalmalar meydana gelmiştir. Bu azalma 1A/dm²’lik akım yoğunluğunda en fazla seviyeye ulaşmıştır. Grafen oksit eklenmesi, kırınım tepesinin yoğunluğunda gözle görülür bir azalmaya neden olmuştur. 0.5A/dm²’lik akım yoğunluğunda, (111) tepe yoğunluğu azalırken, yarı maksimumdaki tam genişlik (FWHM) artmaktadır. Bu davranış, grafen oksit eklenmesinin kaplama içindeki tane incelmesini desteklediğini ve 0.5A/dm²’de üretilen kaplamanın daha ince taneli, daha kompakt ve homojen bir mikro yapıya yol açtığını göstermektedir [31]. Ayrıca, 0.5A/dm²’de üretilen numunedeki Cu(111) piki, diğer kaplamalara kıyasla daha geniş bir genişlik sergilemektedir ve bu da grafen oksit ortak birikimi nedeniyle kristalit boyutunda bir azalma olduğunu düşündürmektedir. Daha önce belirtildiği gibi, elektrodpozisyon işlemi sırasında elektrolit içindeki grafen oksit ve metal iyonları arasında rekabetçi bir etkileşim meydana gelir [32]. Grafen oksit, katot yüzeyine adsorbe olur ve metal birikimi için çekirdeklenme bölgeleri görevi görürken aynı zamanda aşırı kristal büyümesini engeller. Bu, daha ince kristalit boyutlarına sahip kompozit kaplamalarla

sonuçlanır. Kaplamaların kristalit boyutu Scherrer Denklemi [29] kullanılarak tahmin edilmiştir.

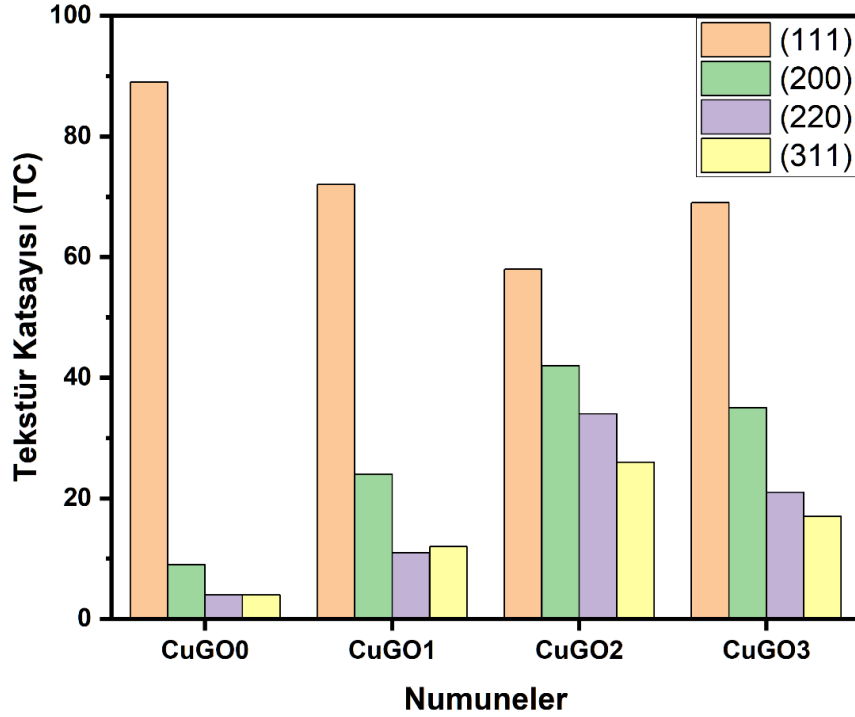
Bu denklemde, λ X-ışını dalga boyunu, θ Bragg kırınım açısını, β kırınım çizgisi genişlemesinin derecesini, K kristalitlerin şekil faktörünü (tipik olarak 0,89 olarak alınır) ve D belirli kristalografik düzlemle ilişkili ortalama kristalit boyutunu ifade eder. Numunelerin hesaplanan kristalit boyutları Şekil X'te sunulmuştur. Kompozit kaplamanın kristalit boyutunun CuGO0 kaplamasından daha küçük olduğu, CuGO2 kaplamanın yaklaşık 50 nm'lik en küçük kristalit boyutunu sergilediği açıktır. Saf Cu ve Cu-GO kaplamalar için XRD spektrumlarının karşılaştırılması, GO takviyeli Cu-GO kompozit kaplamalarında kırınım tepelerinde gözle görülür bir kayma ve genişleme olduğunu ortaya koymaktadır. Bu olgu, kompozit yapı içindeki kusurlardan kaynaklanan kafes bozulmalarına atfedilebilir [34]. Bu bulgular, grafen oksit katılımının Cu matrisinin kristalografik özelliklerini değiştirdiği, tane boyutunu iyileştirdiği ve potansiyel olarak mekanik ve elektrokimyasal özellikleri geliştirdiği hipotezini desteklemektedir.



Şekil 4.3. Numunelerin tane boyutu-mikrogerinim eğrileri

Akım yoğunluğunun mikrogerinim üzerindeki etkisi incelendiğinde, elektrodpozisyon koşullarının kaplama iç yapısını doğrudan etkilediği görülmektedir. Saf bakır kaplaması (CuGO0) ile aynı akım yoğunluğunda (0,25 A) üretilen GO takviyeli kaplama (CuGO1) karşılaştırıldığında, GO ilavesinin mikrogerinim değerini bir miktar düşürdüğü belirlenmiştir. Bu durum, GO takviyesinin kristal büyümesi sırasında tane sınırlarında engelleyici bir etki yaratarak oluşan çekirdeklenme bölgelerini stabilize etmesi ve böylece iç gerilmeleri kısmen azaltması ile ilişkilendirilebilir. Bununla birlikte, akım yoğunluğunun 0,5 A seviyesine çıkarılması ile üretilen CuGO2 kaplamasında mikrogerinim değerinin tüm numuneler arasında en düşük seviyeye indiği görülmektedir. Orta seviyedeki akım yoğunluğu, çekirdeklenme ve büyüme süreçleri arasında dengeli bir kinetik ortam sağlayarak daha homojen ve ince taneli bir mikro yapı oluşmasına yol açmıştır. Bu yapı, iç gerilmelerin etkin bir biçimde rahatlamasına olanak tanımış ve mikrogerinim değerlerini minimum seviyeye düşürmüştür.

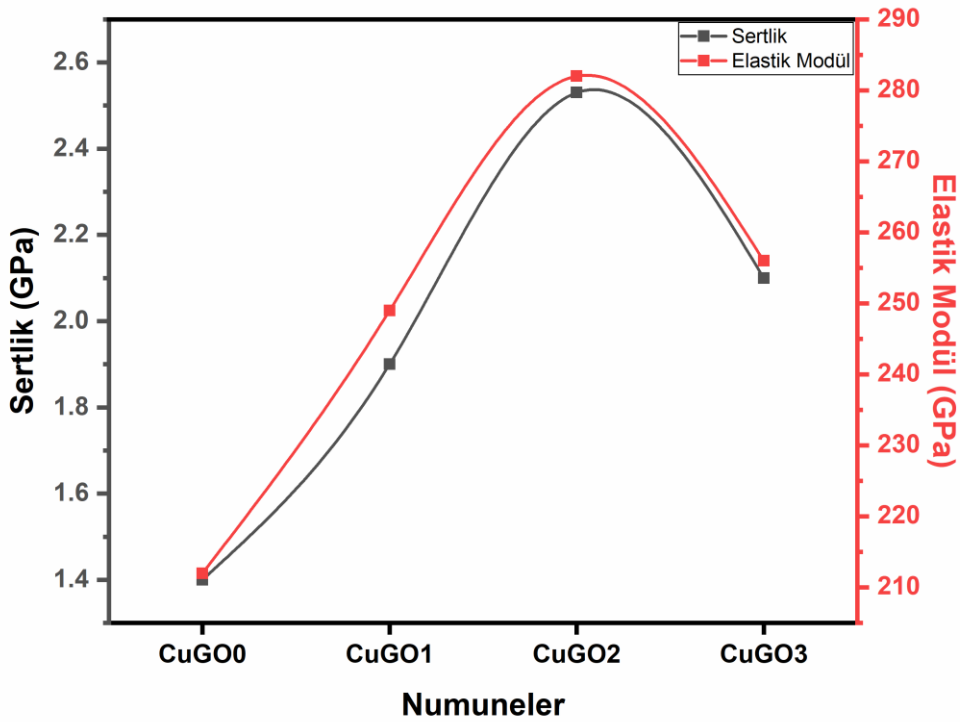
Akım yoğunluğunun 1 A seviyesine yükseltilmesi ile elde edilen CuGO3 kaplamasında ise, birikme hızının artması sonucunda kristal büyümesi esnasında yüzeyde düzensiz çekirdeklenmeler meydana gelmiş ve buna bağlı olarak mikrogerinim değeri, 0,5 A'da üretilen numuneye göre artış göstermiştir. Ancak bu artış, GO takviyesinin mikro yapısal düzenleyici etkisi sayesinde düşük akım yoğunluğunda üretilen numunelere göre daha sınırlı düzeyde kalmıştır. Sonuç olarak, elektrodpozisyon yöntemi ile üretilen bu kaplamalarda mikrogerinim değerlerinin akım yoğunluğuna bağlı olarak önce azaldığı, optimum akım yoğunluğunda (0,5 A) minimum seviyeye ulaştığı ve daha yüksek akım yoğunluklarında tekrar artış eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. GO takviyesinin ise genel olarak mikrogerinim değerlerini düşürücü yönde bir etkisi olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.4. Kaplamaların tekstür katsayıları grafiği

Elektrodepozisyon ile üretilen kaplamalarda tekstür katsayılarının akım yoğunluğuna bağlı değişimi incelendiğinde, kristalografik yönelenme davranışının akım yoğunluğu ve GO takviyesi ile önemli ölçüde değiştiği görülmektedir. Saf bakır kaplamasında (CuGO0) (111) düzlemine ait tekstür katsayısının diğer düzlemlere göre daha yüksek olduğu ve belirgin bir (111) yönelenmesinin baskın olduğu belirlenmiştir. Bu durum, düşük akım yoğunluğunda büyümenin esas olarak termodinamik olarak daha kararlı olan (111) düzlemi üzerinde gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır. Aynı akım yoğunluğunda (0,25 A) üretilen GO takviyeli kaplama (CuGO1) incelendiğinde, (111) yöneliminin hâlen baskın olduğu ancak GO parçacıklarının tane sınırlarında ve matris içerisinde heterojen çekirdeklenme bölgeleri oluşturarak diğer düzlemler (200) ve (220) yönlerinde nispeten daha yüksek büyümeye katkı sağladığı görülmüştür. Bu etki, CuGO1 numunesinde tekstür katsayılarının saf Cu'ya göre daha dengeli bir dağılım göstermesine yol açmıştır. Akım yoğunluğunun 0,5 A seviyesine yükseltilmesi ile elde edilen CuGO2 kaplamasında ise (111) yöneliminin görece azaldığı, buna karşın (311) ve (200) düzlemlerine ait tekstür katsayılarının belirgin şekilde arttığı gözlenmektedir. Bu sonuç, orta seviyede akım yoğunluğunda çekirdeklenme hızının artması ile birlikte heterojen çekirdeklenme bölgelerinin çoğalması ve bu nedenle büyümenin yalnızca

düşük yüzey enerjili (111) düzlemleriyle sınırlı kalmayıp farklı kristalografik yönlerde de gerçekleşmesi ile ilişkilendirilmektedir [33]. Bu nedenle CuGO2 numunesi, çalışmadaki en dengeli ve çok yönlü kristalografik yapıya sahip kaplama olarak öne çıkmaktadır. Akım yoğunluğunun 1 A seviyesine çıkarıldığı CuGO3 numunesinde ise yüksek birikme hızı nedeniyle yüzeyde düzensiz çekirdeklenmeler oluşmuş, bu durum (111) ve (200) yönlerinde tekrar bir kısmi yönelimin baskın hale gelmesine yol açmıştır. Ancak bu yönelme, düşük akım yoğunluklarında olduğu kadar belirgin olmayıp, GO'nun etkisiyle diğer düzlemlere göre sınırlı kalmıştır.

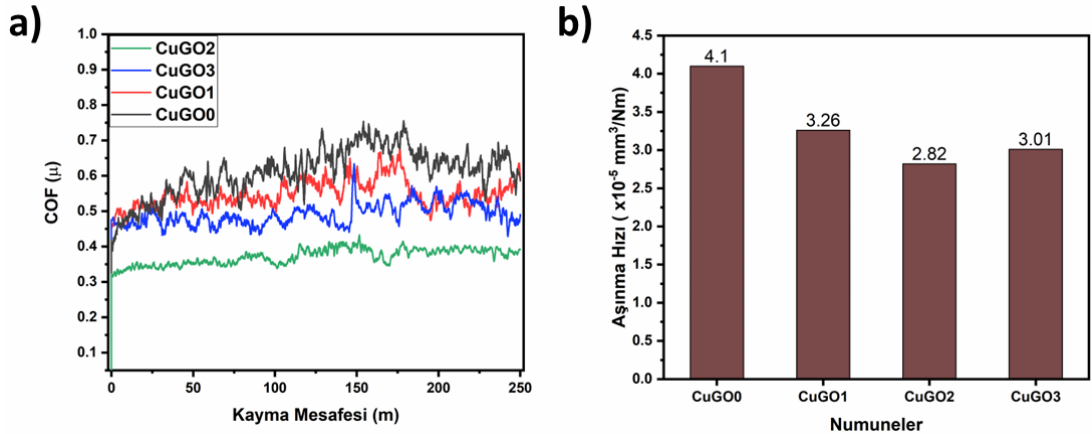


Şekil 4.5. Kaplamaların sertlik-elastic modül eğrileri

Kaplamaların mekanik özellikleri incelendiğinde, sertlik değerlerinin ve elastik modüllerin akım yoğunluğuna ve GO takviyesine bağlı olarak anlamlı bir değişim gösterdiği belirlenmiştir. Saf bakır kaplamasında (CuGO0) elde edilen sertlik (1,4 GPa) ve elastik modül (212 GPa) değerleri, diğer numunelere kıyasla en düşük seviyede olup, bu durum düşük akım yoğunluğunda oluşan daha iri taneli ve nispeten gevşek mikro yapıya bağlanabilir. Aynı akım yoğunluğunda GO takviyesi ile üretilen CuGO1 numunesinde sertlik ve elastik modül değerleri sırasıyla 1,9 GPa ve 249 GPa olarak artış göstermiştir. Bu artış, GO takviyesinin tane inceltici etkisi ve matris

içerisinde dağılan GO plakalarının yük aktarım mekanizması sayesinde matrisin güçlendirilmesi ile açıklanabilir. Akım yoğunluğunun 0,5 A seviyesine yükseltildiği CuGO2 kaplamasında sertlik 2,53 GPa ve elastik modül 282 GPa seviyesine ulaşarak tüm numuneler içinde en yüksek değerleri sergilemiştir. Bu sonuç, orta seviyede akım yoğunluğunun daha homojen ve ince taneli bir yapı oluşmasına olanak tanıdığını, aynı zamanda GO parçacıklarının bu yapı içerisinde daha etkili bir şekilde dağılmasının sinerjik bir güçlendirme sağladığını göstermektedir. Akım yoğunluğunun 1 A seviyesine çıkarıldığı CuGO3 numunesinde ise sertlik 2,1 GPa, elastik modül ise 256 GPa değerinde bulunmuştur. Yüksek akım yoğunluğu ile artan birikme hızı, mikroyapıda kusur oluşumunu ve gözenekli bölgelerin ortaya çıkmasını kolaylaştırarak mekanik özelliklerin bir miktar gerilemesine neden olmuştur. Bununla birlikte, bu değerler düşük akımda üretilen numunelere göre halen daha yüksektir ve GO takviyesinin yapısal iyileştirici etkisinin sürdüğünü göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, akım yoğunluğunun 0,5 A seviyesine kadar artırılması sertlik ve elastik modül değerlerini önemli ölçüde iyileştirmekte, bu seviyeden daha yüksek akım yoğunluklarında ise hızlı birikme nedeniyle oluşan kusurlar mekanik özelliklerde kısmi bir azalmaya yol açmaktadır. GO takviyesinin, tüm akım yoğunluklarında, bakır kaplamaların mekanik dayanımını artırıcı bir etkiye sahip olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 4.6. Kaplamaların sürtünme katsayıları ve aşınma hızları grafikleri

Kaplamaların tribolojik davranışları incelendiğinde, akım yoğunluğu ve GO takviyesinin sürtünme katsayısı ve aşınma hızı üzerinde belirgin etkiler oluşturduğu gözlenmektedir. Saf bakır kaplaması (CuGO0) 0,51 sürtünme katsayısı ve $4,1 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ aşınma hızı ile en zayıf tribolojik performansı sergilemiştir. Bu durum,

düşük akım yoğunluğunda oluşan iri taneli, görece yumuşak ve homojen olmayan mikro yapının, karşı yüzey ile temas sırasında plastik deformasyona ve malzeme transferine daha açık hale gelmesi ile açıklanabilir. Aynı akım yoğunluğunda GO takviyesi ile üretilen CuGO1 kaplamasında sürtünme katsayısının 0,37'ye, aşınma hızının ise $3,26 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ değerine düştüğü görülmektedir. GO ilavesinin sertlik ve elastik modülü artırması, ayrıca lamellar yapısı sayesinde sürtünme sırasında katı yağlayıcı bir etki göstermesi, bu iyileşmenin başlıca nedenidir.

Akım yoğunluğunun 0,5 A seviyesine çıkarıldığı CuGO2 kaplaması ise en iyi tribolojik performansı göstermiştir. Bu numunede sürtünme katsayısı 0,26'ya kadar düşmüş, aşınma hızı ise $2,82 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ olarak kaydedilmiştir. Bu davranış, orta seviyedeki akım yoğunluğunda oluşan daha homojen, ince taneli ve kompakt mikro yapının, sertlik ve elastik modül ile birlikte tribolojik özellikleri de en üst seviyeye çıkardığını göstermektedir. Akım yoğunluğunun 1 A seviyesine çıkarıldığı CuGO3 numunesinde ise sürtünme katsayısının 0,33 ve aşınma hızının $3,01 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ değerinde olduğu belirlenmiştir. Yüksek akım yoğunluğunda hızlı birikme sebebiyle oluşan mikroyapısal kusurlar ve lokal gerilmeler, tribolojik performansın CuGO2'ye kıyasla bir miktar düşmesine yol açmıştır. Bununla birlikte, elde edilen değerler düşük akım yoğunluğunda üretilen numunelerden hâlâ daha iyidir ve GO takviyesinin etkisinin sürdüğünü ortaya koymaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Çalli, Ç., Farklı seramik takviyeli bakır matrisli kompozit kaplamalar ile elektrik kontak malzemelerinin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [2] Kılıçcı, K, Grafen Esaslı Kompozit Kaplamaların Korozyon Ve Aşınma Özellikleri
- [3] Feng, S. S., Geng, H. R. Ve Guo, Z. Q. (2011). Study on Cu-based electrical contact materials by warm compaction, Journal of Functional Materials., 42, 1020-30.
- [4] Stanley, A, etc. (1997). ASM Handbook; Powder metal technologies and applications, 1020-30.
- [5] Mu, Z., Geng, H. R., Li, M. M., Nie, G. L. ve Leng, J. F. (2013). Effects of Y2O3 on the property of copper based contact materials, *Composites: Part B*.
- [6] Song, W. M., Yang, J.R., Ku, J.J., Hao, Y. ve Ma, Y. (2007). Microstructure and wear behaviour of Ni-based surface coating on copper substrate, Wear, 262, 868-75.
- [7] Melisa Köse1*, Buse Yavuz 1, Zeynep Özcan 1, Dilara Uslu 1, Görkem Bulut 1, Sezer Tan 1, Hasan Algül1, Mehmet Uysal 1, Akımlı ve Akımsız Yöntemlerle Üretilen Ni-P-CNF Kaplamaların Sertlik ve Korozyon Açısından Kıyaslanması
- [8] Serhatcan Berk AKÇAY, Bakır Esaslı Elektrik Kontak Malzemelerinin Fiziksel Ve Mekanik Özellikleri Üzerine Akımsız Kaplama Parametrelerinin Etkisi
- [9] Agarwala, R.C. ve Agarwala, V., Electroless alloy/composite coatings: A review, Sadhana-Academy Proceedings in Engineering Sciences, 28,3 (2003) 475-493.
- [10] Biswas, N., Baranwal, R.K., Majumdar, G. ve Brabazon, D., Review of duplex electroless coatings and their properties, Advances in Materials and Processing Technologies, 4,3 (2018) 448-465.
- [11] Varol, T., Akçay, S. ve GÜLer, O., Akımsız kaplama yöntemi ile Cu-Ag bimetal parçacıkların üretimi ve karakterizasyonu, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, (2021).
- [12] Mallory, G.O. ve Hajdu, J.B., Electroless plating: fundamentals and applications, William Andrew, 1990.
- [13] Ryoji T., Masashi Y., Effect of Plate Mounted Between Two Wires in Electric Arc Spraying, Journal of Computational Science 32, 56-67,2019.
- [14] Lelevic A and Walsh F C, Electrodeposition of Ni[sbnd]P alloy coatings: A review Surf. Coatings Technol. 369 198–220,2019.
- [15] J. Zhang, J. Hyun Han, Thermal Properties and Failure Mechanism of Graphene NanoplateletReinforced Copper Composites Fabricated Using Electroless Plating, Journal of Alloys and Compounds. Volume 893, 162-233, 2022.

- [16] Seong, H. , Kim, S.-C. , Choi, DJ , Lee, J.-Y. , Ko, Y.-J. , Yoon, S.-B. , Seo, M.-L. ,Kim, Y.-H., Effects of Bath Composition on the Adhesion Characteristics of Electroless Cu Layers on Epoxy-Based Polymer Substrates, Journal of The Electrochemical Society,2016.
- [17] Z. Zhang, X. Lu, J. Xu, H. Luo., Characterization and Tribological Properties of Graphene/ Copper Composites Fabricated by Electroless Plating and Powder Metallurgy. Acta Metallurgica Sinica,. 33, 903–912,2020.
- [18] Gül, H., Elektrolitik Nano Al₂O₃ Partikül Takvyeli Nikel Kompozitleirin Üretimi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2008.
- [19] Çelik, A., & Yalçın, S. (2018). Elektrolitik kaplama yöntemlerinin karşılaştırılması. Metalurji Dergisi, 57(3), 12–19.
- [20] Ghosh, R., Dutta, A., & Banerjee, S. (2019). Effect of current density on the properties of nickel coatings. Surface & Coatings Technology, 378, 124958.
- [21] Kim, H. J., Lee, S. M., & Cho, Y. J. (2020). Morphology and adhesion of copper coatings at various current densities. Materials Chemistry and Physics, 240, 122261.
- [22] Kumar, V., Singh, P., & Pandey, A. (2020). Surface modification using electrolytic nickel plating: A review. Journal of Materials Research and Technology, 9(5), 10894–10910.
- [23] Lee, J., Yoon, S., & Park, H. (2017). Effects of brighteners and suppressors in acidic copper electroplating baths. Electrochimica Acta, 256, 335–343.
- [24] Nickel Institute. (2023). Nickel Plating Handbook. <https://nickelinstitute.org>
- [25] Shu, S., Wang, J., & Zhao, M. (2024). Graphene-reinforced copper matrix composites as electrical contacts. Journal of Composite Materials, 58(2), 147–161.
- [26] Tang, L., Zhang, K., & Liu, X. (2022). Multilayer electroplated coatings for corrosion protection: A review. Corrosion Science, 197, 110081.
- [27] Yılmaz, E., & Arıkan, E. (2019). Elektrolitik kaplama yöntemleri ve uygulamaları. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 31(2), 221–230.
- [28] Zhao, X., Liu, Y., & Chen, D. (2021). Optimization of Ni-plating conditions for improved microhardness and corrosion resistance. Coatings, 11(5), 569.
- [29] Sezer Tan, Hasan Algül, Erdem Kiliçaslan, Ahmet Alp, Hatem Akbulut, Mehmet Uysal The effect of ultrasonic power on high temperature wear and corrosion resistance for Ni based alloy composite coatings.
- [30] Serhat Dilek, Hasan Algül, Abdülkadir Akyol, Ahmet Alp, Hatem Akbulut & Mehmet Uysal Pulse electro co-deposition of submicron-sized TiC reinforced Ni–W coatings: tribological and corrosion properties.
- [31] Sezer Tan, Melisa Köse, Hasan Algül, Mert Aydın, Miraç Alaf, Ahmet Alp, Hatem Akbulut, Mehmet Uysal Enhancing mechanical and corrosion properties of GO and Al₂O₃ reinforced Cu composite coatings

- [32] Melisa Köse, Sezer Tan, Mehmet Uysal Graphene oxide reinforced NiPCo composite coatings: Optimum graphene oxide content for improved anticorrosion and wear resistance.
- [33] Jinxue Song, Yi He , Hongjie Li, Yihan Zhang, Bo Liu, Ruxia Song, Zhifei Zhang, Yahui He Preparation of pulse electrodeposited Ni-B/ZrC composite coatings and investigation of their mechanical properties and corrosion resistance.
- [34] Antony Joseph, Balakrishnan Kirubasankar, Agnes Mary Mathew, Mugilan Narayanasamy, Chao Yan, Subramania Angaia, Influence of pulse reverse current parameters on electrodeposition of copper-graphene nanocomposite coating.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Gül den ATALAY

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** :2016, Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
- **Lisans** :2017, Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Endüstri Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

- 2021 yılından bu yana BMC OTOMOTİV A.Ş firmasında ALTAY Kıdemli Lider Proje Mühendisi olarak çalışmaktadır.
- 2017-2021 yılları arasında KALE HAVACILIK A.Ş firmasında Proje Kalite Mühendisi olarak görev yaptı.