

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

**GRAFEN ESASLI KOMPOZİT KAPLAMALARIN KOROZYON  
VE AŞINMA ÖZELLİKLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Kubilay KILIÇCI**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**AĞUSTOS 2023**



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

**GRAFEN ESASLI KOMPOZİT KAPLAMALARIN KOROZYON  
VE AŞINMA ÖZELLİKLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Kubilay KILIÇÇI**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet UYSAL**

**AĞUSTOS 2023**



Kubilay KILIÇCI tarafından hazırlanan ‘‘Grafen Esaslı Kompozit Kaplamaların Korozyon ve Aşınma Özellikleri’’ adlı tez çalışması 21.08.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

### **Tez Jürisi**

**Jüri Başkanı :** **Dr.Öğr.Üyesi Hasan ALGÜL** .....

Sakarya Üniversitesi

**Jüri Üyesi :** **Doç.Dr. Mehmet UYSAL (Danışman)** .....

Sakarya Üniversitesi

**Jüri Üyesi :** **Dr.Öğr.Üyesi Harun GÜL** .....

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 “GRAFEN ESASLI KOMPOZİT KAPLAMALARIN KOROZYON VE AŞINMA ÖZELLİKLERİ” 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, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

21/08/2023

Kubilay KILIÇCI





## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca desteğini benden esirgemeyen değerli büyüğüm ve danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mehmet UYSAL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmalarım boyunca her zaman yanımda olan, bana bilgi ve birikimini aktaran çok değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hasan ALGÜL'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarında her türlü yardım ve desteklerini sunan arkadaşım Sayın Büşra ÇETİNKAYA'ya, teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca benden manevi ve maddi destekleri esirgemeyen her zorlukta yanımda olan sevgili merhum babam Orhan KILIÇÇI'ya ve aileme çok teşekkür ediyorum.

Profesyonel meslek hayatımda problem çözümleri için akademik çalışmalara yönlendirmemi teşvik ederek her problemin kalıcı olarak giderilmesine, problemlerin giderilmesiyle birlikte mühendislik hayatında bir iz bırakmamıza destek, yardımcı olan yöneticim Burak CAĞIN'a bugüne kadar gösterdikleri desteklerden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Kubilay KILIÇÇI



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

<b>ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>vii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>ix</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>xi</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>xv</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>xvii</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>xix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Elektrolitik Kaplamanın Temel Amaçları .....	2
<b>2. ELEKTOLİTİK KAPLAMALAR</b> .....	<b>7</b>
<b>3. GRAFEN ESASLI KOMPOZİT MALZEMELER</b> .....	<b>13</b>
3.1. Grafen Bazlı Kompozitler için Eklemeli Üretim Yöntemleri .....	16
3.2. Grafen Esaslı Kompozit Kaplama Yöntemleri .....	20
3.3. Bakır Matrisli Grafen Kompozit .....	22
3.4. Grafen/Polipirol Kompozit .....	23
3.5. Ni-GO Kompozitler .....	25
<b>4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b> .....	<b>27</b>
4.1. Deneysel Prosedür .....	28
4.2. Karakterizasyon Çalışmaları .....	28
4.2.1. XRD ve SEM analizleri .....	28
4.3. Mikro Sertlik Çalışmaları .....	29
<b>5. DENEYSEL SONUÇLAR</b> .....	<b>31</b>
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	<b>43</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>45</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>55</b>



## **KISALTMALAR**

<b>µm</b>	: Mikrometre
<b>CEC</b>	: Kompozit elektrokimyasal kaplamalar
<b>CVD</b>	: Kimyasal buhar biriktirme
<b>DAH</b>	: Değer Akış Haritası
<b>ECRS</b>	: Eliminate – Combine – Rearrange – Simplify
<b>gr</b>	: Gram
<b>JIT</b>	: Just In Time
<b>Ni-P</b>	: Nikel-Fosfor alaşım kaplama OEE
<b>PUKÖ</b>	: Planla – Uygula – Kontrol Et – Önlem Al
<b>PVD</b>	: Fiziksel
<b>SEM</b>	: Taramalı elektron mikroskobu
<b>SMED</b>	: Single Minute Exchange of Die
<b>TPM</b>	: Total Productive Management/Maintenance
<b>XRD</b>	: X-ışını difraktometresi



## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 4.1.</b> Ni-P-GO kompozit kaplamaların üretim parametreleri. ....	28
<b>Tablo 5.1.</b> Akımlı yöntemle üretilen Ni-P-GO kompozit kaplamalara ait farklı iş çevrimlerinde üretilen kaplamaların mpy(inç/yıl) cinsinden korozyon oranları tablosu. ....	42





## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

<b>Şekil 1.1.</b> Elektrolitik kaplama işlemi [1]. .....	1
<b>Şekil 3.1.</b> Grafen bazlı kompozit malzemeler [40]. .....	19
<b>Şekil 4.1.</b> Kaplama düzeneğinin basit şematik gösterimi. ....	27
<b>Şekil 5.1.</b> Farklı iş çevrimlerinde üretilen Ni-P-Grafen oksit kompozit kaplamaların SEM görüntüleri a) %20 b) %50 c) %60 d)%80.....	32
<b>Şekil 5.2.</b> Farklı iş çevrimlerinde üretilen Ni-P-GO kompozit kaplamaların EDS analizi a) %20 b) %50 c) %60 d)%80. ....	33
<b>Şekil 5.3.</b> Farklı iş çevrimlerinde üretilen Ni-P-GO kompozit kaplamaların a) Mtris içine giren GO miktarı b) Kaplama kalınlıkları. ....	34
<b>Şekil 5.4.</b> Farklı iş çevrimlerinde üretilen Ni-P-GO kompozit kaplamaların XRD analizi. ....	35
<b>Şekil 5.5.</b> Farklı iş çevrimlerinde üretilen Ni-P-GO kompozit kaplamaların sertlik değerleri.....	35
<b>Şekil 5.6.</b> Farklı iş çevrimlerinde üretilen Ni-P-GO kompozit kaplamaların sürtünme katsayısı değerleri.....	37
<b>Şekil 5.7.</b> Farklı iş çevrimlerinde üretilen Ni-P-GO kompozit kaplamaların aşınma hızları.....	37
<b>Şekil 5.8.</b> Farklı iş çevrimlerinde üretilen Ni-P-GO kompozit kaplamaların aşınma sonrası yüzeyden alınan SEM görüntüleri a)G1, b)G2, c)G3, d)G4. ....	40
<b>Şekil 5.9.</b> Farklı iş çevrimlerinde üretilen Ni-P-GO kompozit kaplamaların aşınma sonrası yüzeyden alınan SEM görüntüleri. ....	42



## GRAFEN ESASLI KOPMPOZİT KAPLAMALARIN KOROZYON VE AŞINMA ÖZELLİKLERİ

### ÖZET

Günümüzde korozyon, aşınma ve kopma nedeniyle çok fazla malzeme kaybı yaşanmakta ve bunun sonucunda malzeme bozulması büyük ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Bu kayıpların önlenmesi günümüz mühendislerinin en büyük araştırma alanlarından biridir. Farklı disiplinler bir araya gelir ve farklı düşünceleri kararlı bir şekilde ortaya çıkarır. Yeni bir malzeme üretmeden mevcut bir malzemeye farklı özellikler eklemek çok makul bir çözüm yöntemidir. Malzemedeki korozyon ve çatlaklar yüzeyde başlar ve malzeme kaybına yol açan sonuçlar doğurabilir. Yüzey mühendisliği bu alanda oldukça farklı çalışmalar ortaya koymaktadır. Krom (Cr) kaplamalar, yüzey özelliklerini iyileştirmek için uzun süredir oldukça verimli bir şekilde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, üretim süreci çevresel faktörler ve insan sağlığı açısından oldukça tehlikelidir ve kullanımı sınırlıdır. Bu yönüde alternatif olarak güncel ve güncel olmayan kaplamalar geliştirilmiş ve geliştirmeleri araştırmacılar tarafından sürdürülmektedir. "Akımsız kaplama, metalik bir iyonun, elektrik enerjisi kullanmadan ve metali yüzeye biriktirmeden indirgeyici madde içeren sulu bir çözeltiden katalitik indirgenmesine dayanan kimyasal bir indirgeme işlemidir. " Daha düzgün bir kaplama kalınlığı elde etmek için kullanılır. Mevcut kaplama ise akımsız kaplamaya göre daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Yaklaşık 50-60 ° C gibi düşük sıcaklıklarda, düşük maliyetle ve daha kısa sürede daha kalın bir kaplama tabakası elde edilir. Diğer bir avantaj, akımın yoğunluğudur ve verilen ayrık akım ek bir parametre olarak kullanılabilir. Hem anodik hem de katodik birçok malzeme, akış kaplama ile kompozit olarak kaplanabilir. " Ana matris bir metal, alaşım, seramik veya polimerdir ve parçacıklar küresel, açısız, plaka benzeri, katmanlı veya çekirdek kabuk gibi olabilir. Ek olarak, boyutları milimetreden birkaç nm'ye kadar değişebilir. Nikel, kompozit kaplamalarda matris olarak yaygın olarak kullanılır, çünkü yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır, yüksek oksidasyon direnci gösterir ve ayrıca diğer metallerle alaşımlanma kabiliyeti yüksektir. Aynı zamanda nikel (Ni) tane büyümesini ve tanelerin elektro kristalleşmesini azaltır ve önemli yapışma sağlar. Nikel bazlı kaplamaların sergilediği nikel-fosfor (Ni-P) alaşımının karakteristik özellikleri; olgun üretim süreci ve kontrol edilebilir kaplama performansı nedeniyle kaplama endüstrisinde sıklıkla uygulanmaktadır. Ni-P alaşımlı kaplamalarda yüksek sertlik, iyi korozyon direnci ve aşınma direnci gösterir. "Uygun maliyeti, mekanik ve yağlama özellikleri nedeniyle, kalitesi alüminyumun yapışma davranışına bağlı olan hassas alüminyum alaşımları için akışlı nikel-fosfor (Ni-P) kaplamalar kullanılabilir. Alüminyumun yüzeyinin hava ile temas ettiği anda bir oksit tabakasının oluşması, kaplamaların yapışmasını önemli ölçüde azaltır. Bu nedenle, akış kaplama işleminden önce alüminyum alaşımları üzerinde uygun ön işlemler yapılır. Grafen, hegzagonal bir kafes yapısına sahiptir ve kafeste tek karbon atomu katmanları olması nedeniyle iyi bir katı yağlayıcıdır. Ortam sıcaklığındaki yüksek elektron hareketi nedeniyle çok yüksek termal ve elektriksel iletkenliğe sahiptir. Bu avantajlardan dolayı, kompozit takviye olarak kaplamalara grafen eklenir. Metal bir matriste güçlendirilmiş grafen,

mükemmel aşınma ve korozyon davranışı sergileyebilir. Bu özellikleri sergileme yeteneği, grafenin çözelti içindeki etkin homojen dağılımı ile doğru orantılıdır. Uysal ve meslektaşları, çalışmalarında Ni-W-TiO<sub>2</sub> kaplama çözeltisine GO(GO) takviye ettiler ve sürtünme katsayısında önemli bir düşüş meydana geldiğini iddia ettiler (0'dan. 6'dan 0'a. 2).

Ayrık akım (PC) kaplama teknolojilerinde çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Verilen akımın yoğunluğu düşük olduğunda daha büyük taneler gözlenir. Yüksek akımda iyon konsantrasyonunda hızlı bir düşüş pürüzlü bir yüzeyin oluşmasına neden olur. Kristalin tane boyutu çok uygundur çünkü alaşımın kimyası, dispersiyon, yüzeydeki parçacıkların kontrolü, geliştirilmiş toz morfolojisi, iyi sertlik ve iyi aşınma direnci avantajlarına sahip olan parti akımı kullanılarak kontrol edilebilir bir üretim süreci sunar

Bu çalışmada oksidasyon direnci düşük alüminyum yüzey mevcut yöntem kullanılarak Ni-P-GO ile kaplanmış ve elektrokimyasal özellikleri incelenmiştir. GO, son yıllarda en popüler katı yağlayıcılardan biridir. Bu çalışmada alaşım matrisine Ni-P eklenerek çok iyi bir korozyon hızı değeri (yaklaşık 10 mpy'ye kadar) elde edilmiştir. Farklı çalışma çevrimlerinde uygulanmış ve Ton süresinin artmasıyla tane büyüklüğü yaklaşık 28 nm'ye düşmüştür. Kaplamaların karakterizasyonu taramalı elektron mikroskobu kullanılarak gerçekleştirildi.

## **CORROSION AND WEAR PROPERTIES OF GRAPHENE BASED COMPOSITE COATINGS**

### **SUMMARY**

Nowadays, there is a lot of material loss due to corrosion, wear and rupture, and as a result of this, material deterioration causes great economic losses. Preventing these losses is one of the biggest research areas of today's engineers. Different disciplines come together and bring out different thoughts Decisively. Adding different properties to an existing material without producing a new material is a very reasonable solution method. Corrosion and cracks in the material begin on the surface and can have consequences leading to material loss. Surface engineering reveals quite different studies in this field. Chrome (Cr) coatings have been used quite efficiently for a long time in order to improve the surface properties. However, the production process is quite dangerous in terms of environmental factors and human health, and its use is restricted. As an alternative to this method, current and non-current coatings have been developed and their development is being continued by researchers. "Electroless coating is a chemical reduction process based on the catalytic reduction of a metallic ion from an aqueous solution containing a reducing agent without using electrical energy and depositing the metal on the surface. "It is used to obtain a more uniform coating thickness. Current coating, on the other hand, is more widely used than non-current coating. At temperatures as low as about 50-60°C, a thicker coating layer is obtained at a low cost and in a shorter time. Another advantage is the intensity of the current and the given discrete current can be used as an additional parameter. Many materials, both anodic and cathodic, can be coated composite with flow coating. " The main matrix is a metal, alloy, ceramic or polymer, and the particles can be spherical, angular, plate-like, layered or like a core shell. In addition, their size can vary from millimeters to several nm. Nickel is widely used as a matrix in composite coatings because it is resistant to high temperatures, exhibits high oxidation resistance, and also has a high ability to be alloyed with other metals. At the same time, nickel (Ni) reduces grain growth and electro crystallization of grains and provides significant adhesion. The characteristic properties of nickel-phosphorus (Ni-P) alloy exhibited by nickel-based coatings; it is frequently applied in the coating industry due to its mature manufacturing process and controllable coating performance. High hardness in Ni-P alloy coatings exhibits good corrosion resistance and wear resistance. "Due to its affordable cost, mechanical and lubricating properties, flow nickel-phosphorus (Ni-P) coatings can be used for sensitive aluminum alloys, the quality of which depends on the adhesion behavior of aluminum. The formation of an oxide layer at the moment when the surface of aluminum comes into contact with air significantly reduces adhesion for coatings. For this reason, appropriate pre-treatments are performed on aluminum alloys before the flow coating process. Graphene has a hegzagonal lattice structure and is a good solid lubricant due to the fact that there are layers of single carbon atoms in the lattice. Due to the high electron movement at ambient temperature, it has very high thermal and electrical conductivity. Due to these advantages, graphene is added to coatings as a composite reinforcement. Graphene reinforced in a metal

matrix can exhibit excellent wear and corrosion behavior. The ability to exhibit these properties is directly proportional to the effective homogeneous distribution of graphene in solution. Uysal and his colleagues reinforced graphene oxide(GO) into the Ni-W-TiO<sub>2</sub> coating solution in their study and claimed that a significant decrease in the friction coefficient occurred (from 0.6 to 0.2).

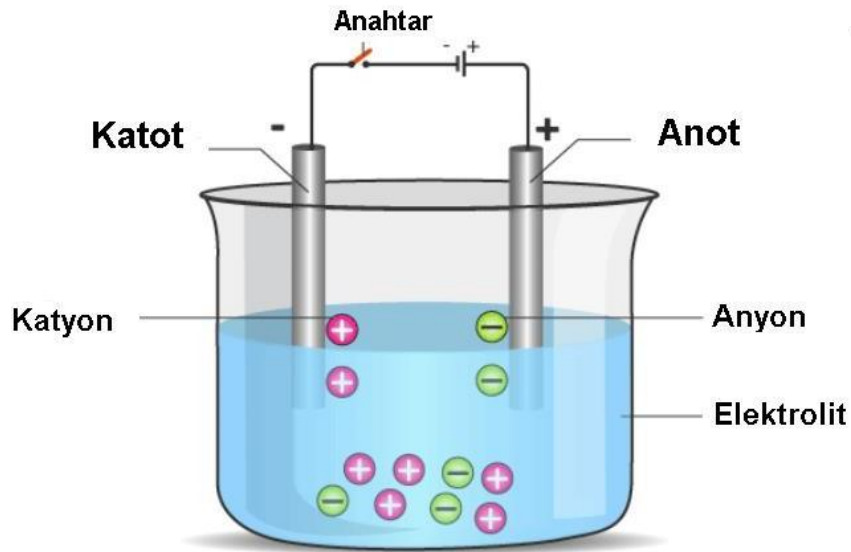
Discrete current (PC) is very widely used in coating technologies. Larger grains are observed when the intensity of the given current is low. At high current, a rapid decrease in the ion concentration causes the formation of a rough surface. The crystalline grain size is very convenient because the chemistry of the alloy offers a controllable production process, using batch current, which has the advantages of dispersion, control of particles on the surface, improved powder morphology, good hardness and good wear resistance

In this study, the aluminum surface with low oxidation resistance was coated with Ni-P-GO using the current method and the electrochemical properties were examined. GO is one of the most popular solid lubricants in recent years. In this study, a very good corrosion rate value (up to about 10 mpy) was obtained by adding Ni-P to the alloy matrix. It was applied in different work cycles and the grain size decreased to approximately 28 nm with the increase of Ton time. The characterization of the coatings was carried out using scanning electron microscopy.

## 1. GİRİŞ

Elektrolitik kaplama, bir elektrolitten metal iyonlarının elektrokimyasal indirgenmesi yoluyla bir baz malzeme üzerinde metalik bir kaplamanın birikmesiyle sonuçlanan ıslak kimyasal bir işlemdir yani kısaca Elektrolitik kaplama, çözülmüş metal katyonlarını bir elektrot üzerinde ince, tutarlı bir metal kaplama oluşturacak şekilde azaltmak için elektrik akımı kullanan bir işlemdir [1]. Elektrolitik kaplama işlemi sırasında oluşan mekanizmalar şu şekildedir Şekil 1.1.;

1. Elektrolitik kaplama, diğer elektrotta çözülmüş metal iyonlarını çoğunlukla tekdüze bir kaplama şeklinde elde etmek için elektroliz kullanılarak çözülmüş metal iyonlarını azaltmak için elektrik akımı kullanan bir işlemdir.
2. En yaygın olarak dekoratif amaçlı veya metallerin aşınmasını önlemek için bir metalin hidroliz yoluyla diğerinin üzerine kaplanması işlemidir.
3. Bakır kaplama, gümüş kaplama ve altın kaplama gibi belirli galvanik kaplama türleri de vardır. Üreticilerin ürünü ekonomik malzemelerle yapmalarına ve ardından metalleri pas geçirmezlik, görünümünü iyileştirme ve mukavemetini artırma gibi özellikler eklemek için kaplamalarına olanak tanır.



Şekil 1.1. Elektrolitik kaplama işlemi [1].

## 1.1. Elektrolitik Kaplamanın Temel Amaçları

- Metalleri korozyona karşı korumak için,
- Eşyaları parlak görünüm vererek süslemek,
- Aşınmış malzemeleri düzeltmek veya aşınma direncini yükseltmek için Elektrolitik kaplama için ilk büyük ölçekli endüstriyel tesis, dekoratif uygulamalar için altın, gümüş ve bakırın biriktirilmesi için 19. yüzyılda inşa edilmiştir [2]. O zamandan beri elektro kaplama hızla arttı ve metallerin, alaşımların ve karmaşık şekillere sahip kompozitlerin ör. Faraday'ın İkinci Elektrodepozisyon Yasasını inceleyecek olursak [3,4] aynı miktarda elektrikle biriken veya çözünen farklı metallerin ağırlıkları, eşdeğer ağırlıklar kimyasalları ile orantılıdır [5,7]. Basitçe ifade edilirse, Faraday'ın ikinci yasası, eğer akım aynı kalırsa, farklı metaller farklı derinliklerde birikir, eşdeğer ağırlıklarına veya değerliklerine bağlı olarak aynı sürededir. Bir metalin eşdeğer ağırlığı, periyodik çizelgede bulunan atom ağırlığının değerliğine bölünmesiyle elde edilir. Örneğin, nikelin atom ağırlığı 58. 70 gramdır ve normal değeri 2'dir. Bu nedenle eşdeğer ağırlığı 58. 70 grama bölünmüştür.  $272 / 5. 000 = 29. 35$  gram. Gümüşün atom ağırlığı 108. 87 gramdır ve değeri birdir, bu nedenle eşdeğer bir ağırlığa sahiptir.

108. 87 gram bölü bir veya 108. 87 gram. Faraday'ın Birinci ve İkinci Kanunlarını birleştirerek, Metal Biriktirme Formülü aşağıdaki gibidir;

$$M = (I)(t)(E)(1/F) \quad (1.1)$$

M = Biriktirilen gram cinsinden metal ağırlığı I = amper cinsinden akım t = saat olarak zaman t = saat olarak zaman E = metalin eşdeğer ağırlığı 1/F = amper-saat eşdeğeri.

Günümüze kadar gelen süreçte bu ilerleme sayesinde, günümüzde elektro kaplama, dekoratif kaplamalardan teknolojik kaplamalara kadar uzanan geniş bir yelpazede kaplama üretimi için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir uygulamalar. Yakın zamanda yapılan bir araştırmaya göre, elektro kaplama, özellikle otomotiv ve havacılık endüstrisinde koruyucu ve/veya dekoratif kaplamalar olarak nikel, çinko ve krom kaplamalardan oluşur [8] elektro kaplamasında yaklaşık %40 payla [6]. metal kaplama pazarına hakimdir [9, 10]. Ayrıca, mikroelektronik alanında uygulanan



elektrodepozisyon cihazlar, enerji dönüşümü ve biyo-elektrokimya, kapsamlı bir araştırma ve yenilik alanını temsil eder [11, 14]. Çeşitli biriktirme teknikleri ile karşılaştırıldığında, elektrodepozisyon çeşitli avantajlar sunar, örn. uygulamanın göreceli basitliği, gereken düşük sermaye maliyeti ve yüksek oranda sürecin çok yönlülüğüdür. Elektrobiriktirme işlemleri genellikle sulu bazlı elektrolitlerle, ortam basıncında ve düşük çalışma sıcaklıklarında (yani, elektrobiriktirme temellerinin daha iyi anlaşılması nedeniyle 100°C'den düşük) gerçekleştirilir, biriktirme parametrelerinin uygun şekilde kontrol edilmesiyle ince ayar yapmak mümkündür malzeme özellikleri (örneğin, bileşim ve mikro yapı) ve sonuç olarak malzeme özellikleri. Bununla birlikte, elektrodepozisyonun ana dezavantajlarından biri, elektrolit bileşimi ile ilişkili çevresel etki ve sağlık riskidir. Birçok galvanik kaplama işlemi şunları içerir: yüksek derecede aşındırıcı solüsyonların, toksik kimyasalların ve bileşiklerin kullanımı. Örneğin, sert krom kaplamaların elektrodepozisyon işlemi, oldukça kanserojen bileşiklerin (yani altı değerlikli krom) kullanımını içerir [15, 16]. Elektrodepozisyon endüstrilerinde kullanılan toksik bileşiklere (örn. Cd, Pb ve Cr6+) maruz kalmayla ilişkili sağlık riski işçilerle sınırlı değildir. Aslında, elektrodepozisyon işlemlerinde kullanılan elektrolitlerin bir kısmı atık su olarak son bulur [15]. Bu riskleri sınırlamak için, sıkı çevre düzenlemeleri uygulanmaktadır. Avrupa Birliği, örneğin altı değerlikli krom, kurşun ve kadmiyumun kullanımı 2003'ten beri kısıtlanmıştır (DIRECTIVE 2002/95/EC) [16]. Çevre ve sürdürülebilirlik endişelerinin teknolojik ilerlemeye entegrasyonu modern toplumumuz için önemli bir sorun olmaya devam etmektedir. Sürdürülebilir bir kalkınma için BM hedefi, daha iyi ve daha sürdürülebilir bir gelecek için neyin başarılması gerektiğine dair sürekli bir hatırlatmayı temsil eder yani sorumlu tüketim ve üretim ve alt hedefleriyle birlikte (ör: Doğal kaynakların yönetimi, Kimyasal atıkların yönetimi, Geri dönüşüm vb. ). Ancak daha geniş bir bakış açısıyla, sürdürülebilir üretim konusunda elde edilen başarıların diğer Birleşmiş Milletlerin hedefleri üzerinde de önemli bir rol oynayacağını hayal etmek zor değil, (örn. Temiz su ve sanitasyon) ve (örn. Endüstriler, inovasyon ve altyapı). Buradan, elektrolitik kaplama endüstrisi alanında bu sorunlarla yüzleşmek için, çevreye zararlı 2 prosesler kullanılarak üretilen kaplamalar için sürdürülebilir alternatiflere doğru ilerlemek büyük önem taşımaktadır. Hem çevreye hem de büyümesi çevresel düzenlemelerle sınırlanan elektrodepolama endüstriyel pazarına fayda sağlayacaktır [17]. Elektrolitik kaplamalarda genellikle kullanılan magnezyum alaşımlarının yüksek kimyasal reaktivitesinin bir sonucu olarak, yüzeylerinde

pasivasyon eğilimi, iyi yüksek aşınma ve korozyon direncine sahip olan alt tabaka malzemesi ile iyi bir yapışma ile oksit ve seramik kaplamaların büyümesini sağlar. PEO tekniği [18, 21] ancak PEO kaplamalar; uygulanan akım yoğunluğuna ve mikro deşarj fenomeninin varlığına bağlı olarak oldukça gözeneklidir; Erimiş oksidin kaplama yüzeyi üzerinde rastgele dağılmasından dolayı pürüzlü ve kaplama işlemi sırasında meydana gelen termal gerilimlerden dolayı mikro çatlaklara sahiptir. Üstelik, AZ91'in farklı reaktivitelerine sahip birincil  $\alpha$ , ötektik  $\alpha$  ve  $\beta$  fazları, PEO işlemlerinde uniform olmayan bir mikro yapıya neden olur [21, 26]. Oksit, oksit olmayan, seramik, organik partiküller ve katı yağlayıcıların eklenmesiyle yapılan PEO bilinmektedir [27, 32]. Wen ve ark [23]. Mg-AZ31 alaşımı üzerinde büyütülmüş PEO kaplamaya ilave edilen basınçlı oksidasyon yöntemiyle sentezlenen GO kullanılarak sol-jel tekniği ile üretilen HA/GO kompozit tozudur. Kaplamanın gözenek çapının azaldığını ve korozyon direncinin önemli ölçüde arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, GO'nun katı yağlayıcı olarak birkaç kağıdın kullanıldığı yüksek sertlik ve mukavemet değeri ile üstün aşınma direnci sağladığı kaydedilmiştir [33, 35]. GO katkı maddesi kullanılarak gerçekleştirilecek PEO arıtımında; üstün mekanik özellikleri, hidrofilik yapısı [36, 37]. ve oksijen fonksiyonel gruplarının kimyasal reaktivitesi [33, 36]. ile bu malzemenin hem kaplama oluşum sürecini verimli hale getirebileceği hem de aşınmayı iyileştirebileceği ve kaplamanın sürtünme direncini arttırmıştır. Ne yazık ki, magnezyum alaşımları için PEO kaplamalara GO katkı maddesinin etkisine ilişkin araştırmalar oldukça yetersizdir ve AZ91 alaşımı için henüz yayınlanmış bir çalışma yoktur. Kadmiyum, kobalt, krom vb. gibi toksik maddelerin korozyon önleyici malzeme olarak kullanımını son zamanlarda yasaklanmıştır. Bu, korozyon koruması için yeni malzemelerin icadına yol açmıştır [38, 40]. Malzeme bozulmasından kaynaklanan önemli kayıplar nedeniyle, yeni korozyon önleme stratejileri geliştirmek için önemli çabalar teşvik edilmiştir. Ek olarak, organik/polimer kaplamalar, korozyon inhibitörleri gibi korozyonu kontrol altına almak için birkaç hafifletme önlemi alınmıştır. Sırasıyla denizcilik, otomobil, inşaat ve boru hatları endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan anodik/katodik korumalardır. Ayrıca, uygun maliyetli yöntemleri uygulamak için çeşitli oldukça sağlam koruyucu sistemler tasarlanmıştır. Örneğin, mevcut yöntemler arasında, uygulama kolaylığı ve ölçeklenebilirliği nedeniyle, korozyon koruyucu kaplamaların en son sınıflandırmalarının devrimi popüler hale gelmeye başlamıştır. Organik polimer kaplamalar, kompozit kaplamalar, hidrofobik kaplamalar ve kendi kendini temizleyen kaplamalar uygulanarak metallere yapılan

çeşitli yapılar stabilite ve ömürleri arttırılarak korunmaktadır [41]. Şu anda, korozyon önleyici kaplama olarak grafen-polimer kompozitlerin kullanımı yükselen bir trend olmaya başlamıştır. Bu tezde, grafen bazlı polimer nanokompozitlerin gelişiminin ve ana araştırma başarılarının özetini sunar. İlk olarak, grafen bazlı polimer nanokompozit üretiminin mevcut ilerleme yöntemleri gözden geçirilmiştir. İkinci olarak, işleme ve yapı yöntemleri ile ilgili olarak, grafen bazlı polimer nanokompozitlerin bariyer özellikleri açıklanmaktadır. Son olarak, çok işlevli kaplamalar olarak potansiyelleri ele alınmıştır. Başka bir deyişle, alternatiflerden biri olarak, bu gözden geçirme yazısının sonucu, özellikle metaller olmak üzere substratların korozyon koruması için grafen ile birleştirilmiş nanokompozit kaplamaları araştırmaktır.

GO sentezi için kullanılan prosedürler, grafitin çeşitli kimyasal tekniklerle oksidasyonuna dayanmaktadır. Bugün, Hummer Metodu ve modifikasyonları en yaygın şekilde kullanılmaktadır. Yüksek performanslı kaplamalara yönelik artan endüstriyel talepler, araştırmacıları korozyon koruması ve diğer uygulamalar için geleneksel metalik kaplamaların özelliklerini geliştirmeye yöneltmiştir. Grafen esaslı metal matrisli kompozit kaplamalar, metal alt tabakaları aşındırıcı ortamdaki bozulmaya karşı koruma yeteneği nedeniyle günümüzde yaygın olarak çalışılan bir konudur. Metal matrise nano dolgu maddesi olarak grafenin eklenmesi sadece korozyon performansını iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda mekanik ve tribolojik özellikleri de geliştirir. Son mevcut incelemelerde, Farklı metal altlıklara uygulandığında farklı metal matris kaplamaların korozyon davranışına takviye olarak grafenin dahil edilmesinin etkisi araştırılmaya başlamıştır. Elektrokimyasal kodlama, bu kompozit kaplamaları metal yüzeyler üzerinde ince film olarak kaplamak için ana teknik olarak kullanılır. Grafen nano-tabakaların aglomerasyonu, grafen-matris etkileşimleri ve elektrodpozisyon proses parametrelerinin kontrolü ile ilgili gelişmeler günümüzde hala devam etmektedir [42, 43].



## 2. ELEKTOLİTİK KAPLAMALAR

Elektrodepozisyon, iyi görünüm, koruma, özel yüzey özellikleri ve mühendislik veya mekanik özellikler amacıyla metalik kaplamaların metalik veya diğer iletken yüzeylere elektrokimyasal işlemlerle uygulanmasıdır. Elektrodepozisyon multidisipliner bir tekniktir ve kimya, fizik, kimya ve elektrik mühendisliği, metalurji ve diğer bilim dallarına da dayanır. Michael Faraday (1791–1867), elektrik akımı elektrolit çözeltilerinden geçtiğinde redoks reaksiyonlarının meydana geldiğini gözlemledi. Dış kaynak elektrolitik hücreye elektrik akımı sağladığında, hücre içindeki elektron akışı dış devredekinin tersi yönde olur. Katotta dış kaynaktan elektronlar sağlanır ve bu da indirgeme reaksiyonunun oluşmasına neden olur. Benzer şekilde, elektronlar bu elektrottan dış kaynağa döndüğü için anotta oksidasyon reaksiyonu meydana gelir. Faraday yasası, bir elektrotta meydana gelen elektrokimyasal reaksiyon miktarının, hücreden geçen elektrik yükü  $Q$  ile orantılı olduğunu belirtir.

Elektrokimyasal biriktirme veya kısaca elektrodepozisyon, istenen elektrik ve korozyon direncini elde etmek için metal iyonlarının bir elektrolitten elektrokimyasal olarak indirgenmesi yoluyla meydana gelen bir baz malzeme (altlık) üzerinde metalik bir kaplamanın oluşturulmasından oluşan bir film büyütme sürecini ifade eder. Aşınma ve sürtünmeyi azaltır, ısı toleransını artırır ve dekorasyon amaçlar içinde kullanılır. Metalik kaplama üretiminin yanı sıra, metallerin cevherlerinden çıkarıldığı elektrometalurji veya malzemelerin son şekillerini oluşturacak kalıpların üretildiği elektroformasyonda da kullanılmaktadır. Çoğunlukla elde edilen metalik birikinti kristallidir. Bu nedenle bu sürece, yirminci yüzyılın başlarında Rus kimyager V. Kistiakovski tarafından ortaya atılan bir terim olan elektrokristalizasyon adı verilebilir.

Elektrolit pozitif ve negatif iyonlar içerir. Bu nedenle iyonik iletken olarak kabul edilir. Bir elektrolit hazırlamak için, farklı organik ve iyonik sıvıların yanı sıra erimiş bir tuz oluşturmak üzere sıvılaştırılan (çoğunlukla suda çözülmüş) bir kimyasal türün içerdiği istenen metal, hali hazırda belirli elektrokaplama işlemleri için kullanılmaktadır. Elektrobiriktirmeyi başlatmak için, katot (çalışma elektrodu), anotla (karşıt elektrot)

birlikte bir kapta (hücre) bulunan elektrolite daldırılır. Devrede elektrik akımının akmasını sağlamak için iki elektrot bir bataryaya veya başka bir güç kaynağına bağlanır. Katot pilin negatif terminaline bağlanırken anot pozitif terminale bağlanır, böylece metal iyonları metal atomlarına indirgenir ve bunlar sonunda yüzeyde birikinti oluşturur.

Son zamanlarda elektrodepozisyon giderek daha popüler hale geldi ve araştırmacılar tarafından farklı araştırma alanlarında yaygın olarak kullanılıyor. Bu kadar ilginin nedeni tam olarak nedir diye sorduğumuzda, prosesin kendisi büyük derecede basittir diyebiliriz. Biriktirilecek malzemenin iyonlarını içeren bir elektrolite iletken bir yüzey daldırılır ve bu katı/elektrolit arayüzüne bir voltaj uygulanır, bu da bir yük transfer reaksiyonu ve film birikmesiyle sonuçlanır. Bu sürecin itici gücü uygulanan potansiyeldir; bu miktar, mV'ye kadar ve bir nanosaniye kadar kısa zaman ölçeklerinde kolayca ve hassas bir şekilde kontrol edilebilir. Bu özellik, malzeme oluşum süreci, mikro yapısı ve özellikleri üzerinde önemli bir kontrole yol açar. Günümüzde elektrodepozisyon proseslerinin geliştirilmesindeki zorluk, önceden tanımlanmış bir malzemenin sentezi değil, bu malzemeyi üretmek için kullanılan ideal koşullar ile prosesin ticari fizibilitesi arasında bir kolerasyon sağlamaktır. Elektro çökeltmenin sıklıkla bahsedilen diğer avantajları arasında hammaddelerin yüksek kullanım oranı, düşük enerji tüketimi, düşük malzeme israfı, az sermaye yatırımı ve uygulama kolaylığı yer alır.

Mikro Elektro Mekanik Sistemler, çip üzerinde laboratuvar veya mikroakışkan cihazlarda yeni işlevler sağlamak için mikroelektronik üretime yeni malzemeler ve süreçler geliştirilmekte ve entegre edilmektedir. Polimerler ve biyomateryaller biyomedikal uygulamalar için elektro-çökeltir; metal oksitler ve bileşik yarı iletkenler, elektronik veya optoelektronik uygulamalar için elektrokimyasal olarak büyütülür. İyonik sıvılar veya süperkritik akışkanlar gibi yeni elektrolitik ortamlarda elektrodepozisyon, bir miktar başarı ile güçlü bir şekilde takip edilmektedir. Elektrodepozisyon, hem taşınabilir hem de küresel ölçekte sürdürülebilir enerji dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Ek olarak, elektrodepozisyon proseslerinin ölçeğinin büyütülmesini yöneten prensipler iyi anlaşılmuştur ve bu da büyük ölçekli üretim proseslerinin geliştirilmesini kolaylaştırmaktadır.

Elektroliz işleminin dört bölüme ayrılması şunlardır;

- a) Kaplama tankına iletilen ve bunları uygun değerlerde düzenlemek için ampermetre, voltmetre, voltaj ve akım regülatörü gibi aletlerle ilişkilendirilen, doğru akım (dc) kaynağı olarak güç kaynağı veya batarya bulunan harici devre.
- b) Çalışma elektrotları veya katotlar (kaplanacak malzeme). Katotlar, akım kaynağıyla temas kuracak şekilde kaplama çözeltisine daldırılmalıdır.
- c) Kaplama çözeltisi veya çözelti banyosu.
- d) Karşı elektrotlar veya anotlar (yalnızca devreyi tamamlamaya yarayan metal veya iletken malzemeler kaplanmıştır).

Kaplama çözeltisini veya elektroliti içeren elektro-çökeltme hücresi genellikle düz yumuşak çelikten (alkali çözeltiler için) veya astarlı çelikten (asitli çözeltiler için) yapılır. Çelik kaplama kauçuktan, plastikten, camdan ve hatta kurşundan yapılabilir.

Elektrolitler; Çözelti banyosu, biriktirilecek bir metal kaynağı olarak hizmet eder ve bu metalin iyonlarını içerir, dolayısıyla iletkenlik sağlar, örneğin hidrolize karşı çözeltiyi stabilize etmek için bir stabilizatör ve bir tampon görevi gördüğünde çözeltinin pH'ını stabilize etmek için bir stabilizatör sağlar, birikintisinin kurumsal formu ve anotların çözülmesine yardımcı olur. Son olarak, çözümü veya birikintinin özelliklerini değiştirir.

Koordinat bağıyla bazı ligandlarla veya metal atomlarıyla komplekslendiğinde çok daha kararlı hale gelen katyonu stabilize etmek için kompleks iyonlar oluşturulur. Serbest (eşit) iyonun konsantrasyonu ligandın varlığıyla azaltılır. Kaplamanın düzgünlüğünün kontrol edilmesine olanak sağlayacak şekilde eşit formu uygun şekilde düşük konsantrasyonda tutmak için karmaşık iyonlar da oluşturulur.

Elektrolitler, iyonlaşma nedeniyle sulu çözeltilerinde elektriği iletebilen asit, baz ve tuzlar gibi maddeler olarak tanımlanabilir. Elektrolitte bulunan iyonlar, akımın veya serbest elektronların tellerden geçmesine neden olan iletimden sorumludur. Hücre boyunca bir voltaj uygulandığında ve potansiyel farkının etkisi altında, negatif yüklü iyonlar anoda, pozitif yüklü iyonlar ise katoda göç eder. Bir elektrolitin sulu çözeltisindeki iyonların akışına elektroliz denir. KCl'nin sulu çözeltide elektrolizi için önce ısıtılarak ve sıcaklığı erime noktasına yükselttilerek eritilmelidir. Erimiş iyonik bileşik, elektroliz işlemiyle elementlerine ayrıştırılacaktır.

Güçlü Elektrolitler; Potasyum klorür, sodyum hidroksit ve sodyum nitrat gibi bazı elektrolitler çözelti içinde kendilerini oluşturan iyonlarda (>%99) tamamen iyonize olur. Bu elektrolitlere güçlü elektrolitler denir. Başka bir deyişle güçlü elektrolitler sulu çözeltilerinde %100 ayrışır. Genellikle sülfürik asit, nitrik asit, hidroklorik asit gibi kuvvetli asitler; Potasyum hidroksit tuzu ve diğerleri gibi güçlü bazlar güçlü elektrolitlerdir. Güçlü elektrostatik çekim kuvvetleri tarafından tutulan zıt yüklü iyonlardan oluşan tuzlar, güçlü elektrolitler olarak kabul edilir ve suda çözünürler, bu da iyonlar arasındaki çekim kuvvetlerini oldukça zayıflatır ve 80'lik yüksek dielektrik sabiti nedeniyle bunu 80 kat azaltır. Bu nedenle su ile solvasyon/hidrasyon prosesi ile stabilize edilen iyonların serbest hareketini kolaylaştırır.

Zayıf Elektrolitler; bazı elektrolitler zayıftır. Zayıf bir elektrolit, çözelti içinde kısmen ayrışan bir elektrolittir. Başka bir deyişle, elektrolitin iyonları ve molekülleri çözeltinin içinde bulunur. Orta derecede küçük bir iyon yüzdesi (<%1) çözelti içinde verilir ve bileşiğin çoğu iyonik olmayan bir formda kalır (>%99) ve bu da zayıf iletkenliğe neden olur. Asetik asit, karbonik asit, amonyak, rubidyum hidroksit, bazı organik bazlar ve diğerleri zayıf elektrolitler olarak kabul edilir.

Elektrolit olmayanlar ise çözeltilerde (su) iyonlara ayrılmayan maddelere elektrolit olmayan maddeler denir. Bu maddeler, metil alkol, etil alkol, glikoz ve diğerleri gibi çoğu karbon bileşiğini içerir.

Tane büyüklüğü 100 nm'den küçük olan malzemeler nanoyapılı malzemeler olarak sınıflandırılır. Ultra küçük yapı birimleri ve yüksek yüzey/hacim oranı nedeniyle bu malzemeler mekanik, optik, elektronik ve manyetik özellikler gibi özel özellikler sergiler. Nanoyapılı malzemelerde, boyutla ilgili tüm etkiler, kurucu bileşenlerin boyutları kontrol edilerek entegre edilebilir. Örneğin nanoyapılı metaller ve seramikler, geleneksel metaller ve seramiklerle karşılaştırıldığında gelişmiş mekanik özelliklere sahip olabilir. Ayrıca nanoyapılı malzemeler, geleneksel tozlara göre çok daha düşük sıcaklıklarda sinterlenebilme özelliğine sahip olup, bu malzemelerin nispeten daha düşük sıcaklıklarda tam yoğunlaşmasına olanak sağlamaktadır. Yarı iletken nanoyapılı malzemelerinin fotodiyotlar ve kuantum nokta yarı iletkenleri gibi optoelektronik cihazlardaki teknolojik uygulamaları, boyuta bağlı etkilere, özellikle de lokalize elektronların sınırlı tane boyutlarında uzaysal hapsedilmesinin neden olduğu kuantum boyutu etkilerine borçludur. Nanoyapılı malzemelerinin manyetik uygulamaları, manyetik kafalarla bilgisayar sabit disklerindeki verileri okumak için



büyük manyetik direnç etkilerine sahip cihazların imalatı ve sıkıştırılmış ozon-kloroflorokarbonların soğutucu olarak katı mıknatıslarla değiştirilmesiyle manyetik buzdolaplarının geliştirilmesidir. Nanoyapılı metaller yeni katalitik uygulamalara aday gibi görünmektedir.

Enerji dönüşümü ve depolanmasındaki temel ilerlemeler, küresel ısınma ve fosil yakıtların etkisi gibi bazı çevresel olayların dış yüzeylerini karşılama konusunda enerji dolu olan yeni malzemeler, özellikle de birçok uygulamada elektrotlar ve elektrolitler gibi benzersiz özellikler sunan nanomalzemeler tarafından gerçekleştirilir. Örneğin lityum piller, güneş pilleri, yakıt hücreleri ve süper kapasitörler.

Hem mikro hem de nano yapılarda metallerin ve yarı iletkenlerin ince filmlerini geliştirmek için kullanılabilecek çeşitli teknikler vardır. Bu tekniklerin bazıları şunlardır: sol-jel işlemi, kimyasal biriktirme yöntemi, hidrotermal yöntem, piroliz yöntemi, kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve elektrodepozisyon yöntemi.

Malzemeler, mikro yapıdan nano yapıya geçerken fiziksel özelliklerinde bazı değişikliklere uğrayabilir. Yüksek yüzey/hacim oranı ve parçacıkların kuantum etkilerinin baskın olduğu bir alana transferi, özelliklerin değişmesindeki iki ana faktördür. Yüzey/hacim oranındaki bir artış, yüzey atomlarının davranışının iç atomlara göre daha baskın olmasına neden olur. Bu faktör hem parçacığın özelliklerini hem de diğer malzemelerle etkileşimini etkiler. Nanopartikülün geniş yüzeyi mekanik, kimyasal ve termal özellikler gibi spesifik özelliklere yol açar.

Nanopartiküller nanoteknolojinin temel yapısal bloklarıdır. Nanoyapılı malzeme ve araçların üretiminde başlangıç noktasıdır. Nanoparçacık üretimi, nanomühendislik ve nanobilim araştırmalarının gelişmesinde önemli bir faktördür. Nanomalzemelerin üretimi ve düzenlenmesinde katı, sıvı ve gaz fazındaki öncüller kullanılarak farklı türde nanopartiküller hazırlanmaktadır. Kimyasal reaktivitelerine veya fiziksel sıkıştırmalarına bağlı olarak bu malzemeler, nanoyapıları yapısal bloklar halinde yan yana hizalar.

Nanomalzeme iki temel teknik yöntemle üretilmektedir: “aşağıdan yukarıya” ve “yukarıdan aşağıya” teknikler. Aşağıdan yukarıya tekniğinde, madde aşağıdan yukarıya doğru gelişir (atom atom, molekül molekül veya küme küme). Bu teknikte kolloid dispersiyonu üretilir. Yukarıdan aşağıya tekniği, bulk malzemeyle başlar ve onun tasarlanması veya aşındırılmasıyla ideal duruma doğru ilerler. Bu teknik,

desenlerin kullanıldığı elektron ışın litografisine benzer. Nanoteknoloji endüstrisinde aşağıdan yukarıya ve yukarıdan aşağıya teknikler önemli bir rol oynamaktadır. Her iki tekniğin de en büyük avantajı yüksek saflıkta ultra küçük yapıların oluşturulmasıdır. Bununla birlikte, aşağıdan yukarıya yönteminin kullanılması, daha az veya hatasız, homojen ve uzun ve kısa vadeli düzenler gibi gelişmiş nanoyapılar üretir; bunların tümü serbest Gibbs enerjisi düşüşleri nedeniyle termal dengeli nanomateryallere neden olur. Ancak yukarıdan aşağıya teknikte, malzeme iç gerilime maruz kaldığından çoğunlukla malzeme yüzey kusurlarında artışa maruz kalır [44-84]

### 3. GRAFEN ESASLI KOMPOZİT MALZEMELER

Geçtiğimiz birkaç on yılda grafen, benzersiz sp<sup>2</sup>hibridize yapısı ve mükemmel fizikokimyasal performansları sayesinde malzeme bilimi, elektrik ve biyoloji ile ilgili alanlarda avantajlı yeni bir malzeme olarak önemli miktarda dikkat çekmiştir [87].

Grafen tipik olarak, yüksek kırılma mukavemeti (~125 GPa), yüksek Young modülü (~1 TPa) yüksek ışık geçirgenliği (~%97.4), üstün elektron hareketliliği gibi çok çeşitli kullanışlı özellikler sergiler.  $2 \times 10^5 \text{ cm}^2$ 'yi aşan  $2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  (oda sıcaklığında ve  $2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 'den fazla elektron yoğunluğunda) [11] yüksek ampasite ( $10^{12} - 10^{13} \text{ Am}^{-2}$ ) [88] yüksek termal iletkenlik ( $5000 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 'e kadar) [89]. ve geniş özgül yüzey alanı (teorik olarak  $2630 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ) [90]. Keşfedildiğinden beri [91] grafen, tek katmanlı grafen (SLG), iki katmanlı grafen (BLG), birkaç katmanlı grafen (FLG), çok katmanlı grafen (MLG), GO dahil olmak üzere tek bir malzemeden grafen bazlı malzemeler ailesine hızla geliştirilmiştir. (GO), azaltılmış GO (rGO) ve işlevselleştirilmiş grafen (FG), grafen nanoribbonlar (GNR'ler) ve GO nanoribbonlar (GONR'ler) [92-96]. Şekil 3. 1. 'de 2011–2022 yılları arasında grafenle ilgili konularda yayınlanan dergi makalelerinin sayısının 50.000'i hızla aştığını ve bunların Web of Science veritabanındaki 'grafen' anahtar kelimesi kullanılarak alındığını gösteriyor. Buna bağlı olarak, istatistiksel verilerin dramatik bir şekilde artması, grafen ailesi üyelerinin farklı alanlarda hızlı gelişiminin önemini göstermektedir. Bugüne kadar, grafen incelemeleri, kısmi grafen sentez yöntemleri, grafen içeren polimer kompozitlerin tribolojik performansları, grafen süper kapasitörler veya kemik dokusu rejenerasyonundaki grafen üzerine odaklanmıştır [97-101].

Son yıllarda hızlı endüstriyel gelişme ile çevre kirliliği giderek daha ciddi bir sorun haline gelmiştir. Metalik kaplamalar, hafif, tok ve kimyasal dirençli yüzeyleri nedeniyle çeşitli koruyucu uygulamalarda kullanılan önemli bir malzeme olarak kabul edilmektedir. Yüksek performanslı kaplamalara yönelik artan endüstriyel talepler, araştırmacıları korozyon koruması ve diğer uygulamalar için geleneksel metalik kaplamaların özelliklerini geliştirmeye yöneltti. Grafen bazlı kompozit kaplamalar, metal alt tabakaları korozif ortamda bozulmaya karşı koruyabilme özelliğinden dolayı

günümüzde yaygın olarak çalışılan bir konudur. Metal matrise nano doldurucu olarak grafenin eklenmesi sadece korozyon performansını değil, aynı zamanda mekanik ve tribolojik özellikleri de geliştirir. Bu mevcut derlemede, Grafenin takviye olarak dahil edilmesinin, farklı metal yüzeylere uygulandığında farklı metal matris kaplamaların korozyon davranışı üzerindeki etkisi sunulmuştur. Bu kompozit kaplamaları metal yüzeyler üzerinde ince film olarak biriktirmek için ana teknik olarak elektrokimyasal birlikte kaplama kullanılır. Grafen nano-yaprak aglomerasyonu, grafen-matris etkileşimleri ve elektrodepozisyon proses parametrelerinin kontrolü ile ilgili ana konular da ayrıntılı olarak tartışılmaktadır.

Grafen, karbon atomlarından ve  $SP^2$ 'den oluşan altıgen petek kafesli iki boyutlu bir malzemedir. Hibrit yörünge  $2600 \text{ m}^2/\text{g}$ 'lik yüksek özgül yüzey alanı ve düşük taşıyıcı termal titreşim gürültüsü sayesinde, grafenin gaz algılamada benzersiz avantajları vardır. Tek bir karbon katmanının petek yapısı, tüm karbon atomlarını çevreye maruz bırakarak gaz ve grafen arasında maksimum temas alanı sağlar. Direnci, düşük bir taşıyıcı gürültüsünde taşıyıcı konsantrasyonundaki değişikliklerle büyük ölçüde değişir. Grafenin benzersiz yapısı ve mükemmel özellikleri, diğer gaz algılama malzemelerinin eksikliklerini telafi eder: bu nedenle grafen, gaz sensörleri alanında büyük bir potansiyele sahiptir. Teorik olarak, grafen sensörler ile gerçekleştirilen gaz tespiti, tek molekül seviyesine ulaşabilir.

Korozyon, günlük hayatta evrensel bir sorundur. Metallerin korozyona karşı nasıl korunacağı tüm endüstri alanlarında her zaman önemli bir konu olmuştur. Birçok korozyon önleme teknolojisi geliştirilmiş ve gemilere, uçaklara, otomobillere, endüstriyel borulara, binalara vb. uygulanmıştır. Bunların arasında, düşük maliyetli olmaları ve zorlu korozif koşullarda iyi korozyon dirençleri nedeniyle organik kaplamalar en yaygın şekilde kullanılanlardır. Ancak saf organik kaplamalar ortamdaki nemi ve diğer aşındırıcı maddeleri (klorür iyonları, oksijen, sülfürler vb. ) uzun süre engelleyemez. Bu nedenle son yıllarda birçok araştırmacı organik kaplamalara silika, nanokil, grafen vb. korozyon ajanlarının difüzyon yollarını genişletmek ve böylece korozyon direncini artırmak hedeflenmiştir [91-102].

Grafen, fiziksel bariyer etkisi için uygun olan levha benzeri geometrisi ve yüksek en boy oranı nedeniyle korozyon önleyici dolgu maddesi olarak büyük potansiyele sahip iki boyutlu bir malzemedir. Ayrıca, hidrofobikliği ve tüm gazlara ve sıvılara olağanüstü sızdırmazlığı korozyon direnci için temel unsurlardır [94-98].

Sonuç olarak, grafen bazlı antikorozyon kaplamalar son yıllarda büyük ilgi görmektedir. Örneğin, birkaç araştırma ekibi, kimyasal buhar biriktirme (CVD) ile hazırlanan grafenin bakır ve nikel-bakır alaşımlarının oksidasyonunu etkili bir şekilde engelleyebileceğini bağımsız olarak doğrulamıştır [96-103].

Bununla birlikte, bu ultra ince grafen filmlerdeki kusurlar veya çizikler, işlevlerini kolayca bozabilir. Uzun süreli koruma için, grafen dolgu maddeleri eklenmiş kalın organik kaplamalar daha pratiktir. Örneğin, Yu ve ark., kompozit bir kaplama oluşturmak için bir epoksi reçinesine titanyum dioksit/grafen ekledi [104]. Grafen pullarının, solvent buharlaşması nedeniyle epoksida oluşan mikro gözenekli korozyon kanallarını bloke ederek korozyon direncini iyileştirdiğini bildirmişlerdir. Chang ve ark., polianilin matrisine dahil edilen ağırlıkça %0,5 grafen dolgu maddesinin korozyon koruma etkinliğini önemli ölçüde artırdığını (%4,82'den %53,49'a), aynı miktarda kil dolgu maddesinin yalnızca %12,43 etkinlik sunduğunu gösterdi [105].

Kilden çok daha yüksek en boy oranına sahip tabaka benzeri dolgu maddelerinin, aşındırıcı maddeleri kaplama boyunca daha dolambaçlı bir yol izlemeye zorlayarak daha iyi fiziksel bariyer etkisi sağlayabileceğini öne sürdüler. Optimize edilmiş grafen yüklemesi, matris malzemesi seçimine, dolgu maddesinin dağılım tekdüzeliğine ve grafenin hazırlanmasına/modifikasyonuna bağlı olarak ağırlıkça ~%0,1 ila ağırlıkça ~%8 arasında değişmiştir [84-90], [103-106].

Mimari, termal koruma ve kızılötesi görünmezlik gibi bazı uygulamalarda, düşük kızılötesi (IR) emisyonlu kaplamalar talep edilmektedir (örneğin, bir askeri hedefin IR izini azaltmak ve onu IR tespitinden gizlemek için). Korozyon önleyici kaplamalara IR kamuflajı eklemek çok faydalı olacaktır. Bununla birlikte, kaplamaya grafen eklenmesi, IR emisyonunu artırma eğilimindedir çünkü grafen, IR'de geniş bir absorpsiyon bandına sahiptir. Al, Zn, Cu ve Ni gibi metal tozları, yüksek yansıtıcılıkları, dolayısıyla küçük absorpsiyonları ve düşük emisyonları nedeniyle sıklıkla düşük IR emisyonlu pigmentler olarak kullanılırlar [107-109]. Al tozları, düşük maliyetleri ve düşük yoğunlukları nedeniyle çok sık kullanılmaktadır [110-112]. Bu çalışmada, epoksi reçine kaplamalara sırasıyla korozyon önleyici ve düşük emisyonlu pigment işlevlerini yerine getirmek için grafen ve Al tozları eklenmiştir. Sonuç, aynı anda yüksek korozyon direnci ve iyi IR kamuflajıdır.

### 3.1. Grafen Bazlı Kompozitler için Eklemeli Üretim Yöntemleri

AM bazen üç boyutlu baskı (3DP), hızlı prototipleme (RP), katı serbest biçimli imalat (SFF) veya katmanlı imalat (LM) olarak da adlandırılır. AM sürecinde, bir 3B model nesnesi oluşturmak için bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımı kullanılır. Metaller, polimerler, seramikler ve hatta beton gibi çok çeşitli malzemeler AM kullanılarak başarılı bir şekilde ürünlere dönüştürülebilir [113-114].

AM'yi diğer geleneksel imalat (CM) yöntemlerinden ayıran çarpıcı özellikler vardır. Özellikle AM, herhangi bir kalıp olmadan ve birleştirme veya birleştirme gibi herhangi bir ara adım olmaksızın doğrudan 3B karmaşık nihai nesnelere üretebilir. Grafen ile 2D yapıların geliştirilmesinde önemli ilerlemeler sağlanmış olmasına rağmen, 3D çok işlevli grafen kompozit yapıların üretimi hala bir sorun olmaya devam ediyor. 2D yapıları grafen kompozitlerini başarıyla üretmek için doğrudan yazma, yumuşak litografi ve fotolitografi gibi çeşitli geleneksel yöntemler kullanılmıştır. Bununla birlikte, bu CM yöntemlerinin kaçınılmaz dezavantajları (ek aşındırma işlemleri, uygun alt tabaka seçiminde sınırlama, yüksek işletme maliyeti ve yüksek kusur yoğunluğu gibi) gelişen nesnede) grafen bazlı kompozitlerin gelişimini engeller. Açıkça, AM ve grafen bazlı kompozitlerin kombinasyonunun, enerji depolamadan algılamaya, elektromanyetik koruma veya yapısal ve fonksiyonel analitik cihazlara kadar yeni mühendislik umutları açma potansiyeli var. Kemik, ahşap veya deniz kabukları gibi doğal kompozit malzemelerle aynı düzeyde hiyerarşik yapılanmaya sahip kompozit malzemeler yaratmayı umuyorsak bu durum özellikle geçerlidir. AM yoluyla üretilen çok-yapılı grafen bazlı kompozitlerin birçok avantajı vardır. Bilgisayar destekli tasarım veya optimizasyonun yardımıyla, bileşenler veya ürünler yeniden üretilebilir ve çeşitli son kullanıcı gereksinimlerini karşılayan yüksek çözünürlükte son derece karmaşık mimarilerle hassas bir şekilde üretilebilir. Ayrıca, AM süreçleri oldukça verimlidir (spesifik basılı bileşenin boyutuna ve karmaşıklığına bağlı olarak birkaç dakikadan birkaç saate kadar değişir) ve nispeten düşük maliyetlidir. Örneğin AM, üstün mekanik özellikler ve hücre tohumlama verimliliği sağlayabilen son derece gelişmiş tasarım gözenekleri, gözenek boyutu dağılımları, gözenek şekli ve kontrol edilebilir gözenek ara bağlantısı ile doku mühendisliği için yapı iskeleleri üretebilir [115].

Chen ve ark., mükemmel biyouyumluluk, hücre tohumlama, yaşayabilirlik ve hareketlilik sergileyen bir AM yöntemi aracılığıyla 3B yapılara sahip 3B termoplastik

poliüretan (TPU)/polilaktik asit (PLA)/GO nanokompozitleri hazırladı [28]. Ağırlıkça %0,5 GO içeren TPU/PLA, TPU/PLA referansına kıyasla tüm GO yüklemeleri arasında en yüksek hücre yoğunluğunu sergiledi [116].

Grafen (GN), yüz kimyasal oksidasyonu, pul pul dökülme ve indirgeme stratejileri yoluyla doğal grafitten izole edilen  $sp^2$  hibridize karbon atomları ile yapısal olarak bal peteği ile eşanlamlı tek bir karbon tabakasıdır. Yüksek özgül yüzey alanı, üstün termal ve elektriksel iletkenlik, olağanüstü mekanik dayanım, kimyasal kararlılık ve olağanüstü yük taşıyıcı hareketliliği gibi benzersiz fizikokimyasal özelliklere sahiptir. Yukarıda belirtilen özelliklerden dolayı GN, hem akademi hem de endüstri sektörlerinde büyük ilgi görmüştür. GO (GO) ve indirgenmiş GO (rGO), GN'nin oksidatif türevleridir. GN türevlerinin çözünürlüğü ve elektriksel iletkenliği, bir biçimden başka bir duruma geçişle ayarlanabilir. GO daha az elektrik iletkenliğine ve suda yüksek çözünürlüğe sahiptir, öte yandan, rGO su veya diğer çözücüler içinde idareli bir şekilde dağılabilir ve takdire şayan bir elektrik iletkenliği sunar. Literatürde oksijen içeren grupların (hidroksil: -OH, epoksit, karboksil:CO ve karboksilik asit olduğu bildirilmektedir: -COOH GN'nin bazal düzlemi üzerinde, GO'nun sudaki mükemmel çözünürlüğünden sorumludur. Oksijen içeren grupların çoğu, GO'nun çeşitli yaklaşımlarla başarılı bir şekilde indirgenmesinden sonra ortadan kayboldu, bu nedenle, baskın  $\pi$ -konjugasyonu ile rGO üretilir. rGO'daki  $\pi$ -konjugasyonu, GN'nin yüksek iletkenliğini uyarır. Ancak GN'nin çözünürlüğü su ve diğer organik çözücülerden yoksundur. Böylece geniş ölçekli endüstriyel uygulamalarını sınırlar. GN'nin optik geçirgenliği ve direnci, istiflenmiş grafit katmanlarının sayısına bağlıdır. Bu nedenle, rGO ve GN malzemeleri elde etmek için uygun ince ayarlı sentez protokollerine ihtiyaç vardır. GN'nin daha az sayıda kusur ve fonksiyonel grupla hazırlanması, geniş uygulama yelpazesi için kritik öneme sahiptir.

Artan küresel enerji talepleri, doğal enerji kaynaklarının tükenmesini teşvik ediyor ve bu nedenle, bu önemli konuya acilen dikkat edilmesi isteniyor. Fosil yakıtların otomobillerde, havacılıkta ve endüstriyel süreçlerde kullanılması, hava kirliliğine neden olan zehirli gazlar üretiyor. Sanayi, tarım, belediye ve evsel faaliyetler sonucu oluşan organik ve inorganik kirleticiler su rezervuarlarına deşarj edilmekte ve böylece su kaynakları kirlenmektedir. Bu faaliyetler ekolojik bir dengesizlikten sorumludur. Bu bağlamda sorunlar iki şekilde aşılabılır. Enerji önce oksijen indirgeme reaksiyonu (ORR), güneş enerjisi ve su gibi sonsuz kaynaklarından dönüştürülebilir. Yakıt

hücreleri, güneş pilleri ve su ayırıcı katalizörler bu amaca ulaşmada en çok endişe duyulan konulardır. Besin zincirleri yoluyla vücutta biriken toksik ağır metal iyonları çeşitli kronik hastalıklara neden olabilir. Bu nedenle, kirlenmiş su kaynaklarından toksik ağır metal iyonlarının tespiti, tayini ve uzaklaştırılması için kolay, seçici ve uygun maliyetli yaklaşımların tasarlanması ve geliştirilmesi istenmektedir. GN tabanlı malzemelerde veya nanokompozitlerde kaydedilen ilerlemeler, enerji veya çevresel uygulamalara odaklanan çeşitli incelemelerde ele alınmıştır.

Spesifik yapısal veya fonksiyonel uygulamalar için arzu edilen bir özellik kombinasyonu elde etmek için hassas şekilde kontrol edilen işleme teknikleriyle üretilen nanokristal malzemelere yönelik artan talep, son birkaç on yıldır araştırmacıların dikkatini çekmiştir. Alaşımlara ve bileşiklere dayalı kaplamalara kıyasla aşınma ve korozyona karşı etkileyici direncin yanı sıra yüksek sertlik nedeniyle geniş mühendislik uygulamaları bulan metal matrisli nanokompozit kaplamaların geliştirilmesine ihtiyaç vardır [117-119].

Yüksek sıcaklık uygulamaları için koruyucu kaplamalarda, yüksek erime sıcaklıkları nedeniyle genellikle nikel, kobalt ve nikel- kobalt alaşım matrisleri tercih edilir. Metalik matris ve sert takviye fazının uygun bir kombinasyonu genellikle bir kompozit geliştirmek için seçilir, böylece aşınma ve korozyon direnci gibi diğer istenen özelliklerin yanı sıra daha yüksek mukavemet ve sertlik sağlayabilir. Kompozit kaplamaların elektro kaplamasının, partikül takviyeli metal matris nanokompozit kaplamaların hazırlanması için teknolojik olarak uygun ve ekonomik olarak uygulanabilir bir teknik olduğu tespit edilmiştir [120].

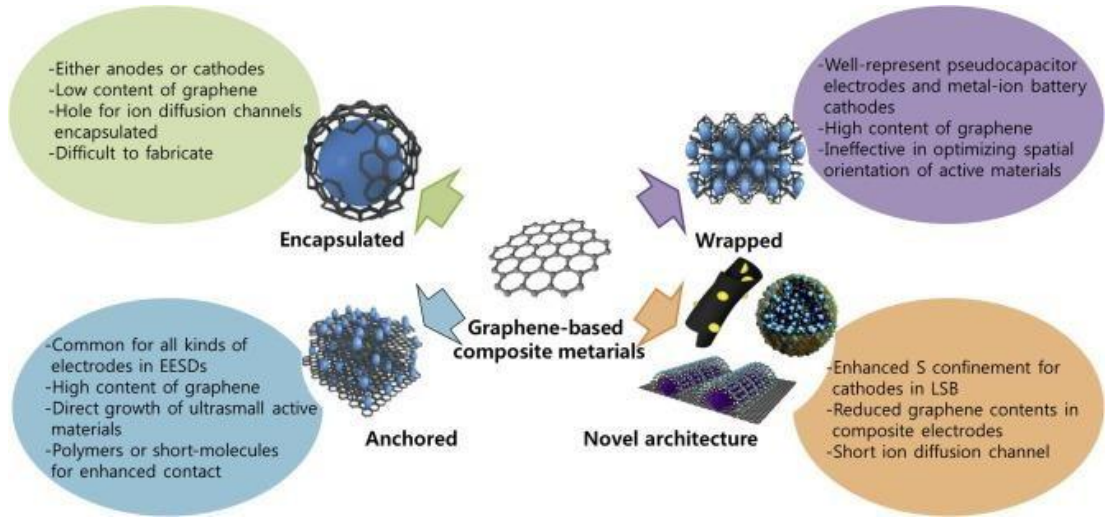
Bu teknik, nanokristal metallerin, alaşımların ve kompozitlerin kaplama şeklinde veya folyo ve tel gibi bağımsız nesnelere hazırlanması için uygun maliyetli ve daha az ekipman yoğun bir yöntem olarak tercih edilir. Elektrodpozisyon yöntemini endüstride kullanıma uygun kılan diğer önemli avantajlar, uygun parametre seçimi ile çok farklı yüzeylerde hızlı üretim imkanı, yüksek saflık, şekil sınırlamalarının üstesinden gelme potansiyeli, nanometreden değişen tane boyutlarına sahip kaplamalar üretebilme yeteneğidir. mikrometre ölçeğinde, bileşimi kontrol etme kolaylığı ve ayrıca biriktirme sonrası işlem için gerekliliğin olmaması. Spesifik olarak, elektrodpozisyon tekniği ile hazırlanan nikel matris bazlı kaplamalar, yüksek yoğunluk, minimum gözeneklilik, mükemmel korozyon direnci [121].



Son birkaç on yılda, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, CeO<sub>2</sub> ve ZrO<sub>2</sub> gibi oksitler gibi mikro ve nano boyutlu atıl parçacıkların başarılı bir şekilde birliktebirikmesi, SiC ve WC gibi karbürler TiN, BN ve Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> dahil olmak üzere nitrürler ve ayrıca galvanik kaplama tekniği aracılığıyla matris fazı Ni ile karbon nanotüpler (CNT'ler) bildirilmiştir [110], [122-125].

Şu anda, metal/alaşım matrisli grafen veya GO (GO) takviye bazlı nanokompozitler, çekici mekanik, elektriksel, korozyon önleyici ve elektrokatalitik özellikler nedeniyle dikkat çekmiştir [126-129]. Bununla birlikte, tipik hidrofobik yüzeyi nedeniyle grafenin suda veya diğer organik çözücülerde dağılılabirlik özelliği zayıftır [130].

Bu nedenle, düzgün dağılmış grafen parçacıkları ile güçlendirilmiş bir nanokompozitin sentezlenmesinin genellikle zor olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, GO partiküllerinin takviye fazı olarak dahil edilmesi, metal/alaşım matrisi ile geliştirilmiş uyumluluğu nedeniyle, elektro-birikimli nanokompozit kaplamaların tasarlanması için umut verici görünmektedir.



**Şekil 3.1.** Grafen bazlı kompozit malzemeler [40].

Bu nedenle, mevcut çalışmada, GO partiküllerinin nanokompozit kaplamalarda takviye olarak kullanılması tercih edilmiştir.

Endüstriyel bileşenlerin sürtünme ve aşınmasından kaynaklanan enerji kaybının maliyeti son yıllarda önemli hale gelmiştir [132]. Üstün malzemelerin ve yüzey kaplamalarının geliştirilmesi kayan bileşenlerin sürtünme ve aşınmasının üstesinden gelmek, araştırmacılar için büyük bir zorluk haline geldi. Mevcut senaryoda, büyük tribolojik özelliklere ve modern uygulamaya karşı en az geçirimsizliğe sahip olan

modern akıllı kompozit malzemeler uzun süredir odak noktası olmuştur. Günümüzde, yağlayıcıların katı ve sıvı rejimlerine odaklanan farklı yağlayıcı sınıfı kullanılmaktadır. Malzeme kompozitleri, kuru ve sıvı yağlama için sağlam, bakımı kolay ve güvenilir olan yağlama mühendisliğini desteklemek üzere hazırlanır [133].

Ancak basınç ve sıcaklık gibi kritik çalışma koşullarında pürüzler plastik deformasyona uğrar. ve sıvı yağlayıcıların kullanımı çoğunlukla etkisiz veya istenmeyen hale geldi, bu da temas sıcaklığında bir artışa ve toksik ve aşındırıcı olabilecek bir kimyasal film oluşumuna neden oldu.

Kompozit kaplamaların biriktirilmesinin arkasındaki amaç, tek başına saf metal ile elde edilmesi zor olan belirgin özellikleri elde etmektir. Bu nedenle, sıvı filmi kaybolduktan veya başarısız olduktan sonra yüzeyi korumak için yukarıdaki kriterleri yerine getirmek üzere kompozit kaplama malzemesi temas yüzeyine verilir. Bu kompozitler, bileşenler üretilirken bir katkı maddesi, yüzey kaplaması, saf form veya yüzeye alaşım olarak kullanılabilir. Yukarıda belirtilen özellikler nedeniyle mühendislik talepleri, sert nano parçacıkların, yumuşak nano parçacıkların ve polimerin metal matrise dahil edilmesini amaçlamaktadır. Düşük sürtünmeli nano yapı kaplamaları genellikle geçiş metali karbür veya nitrür gibi sert bir fazdan oluşur. elmas benzeri karbon (DLC), MoS<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub> ve grafitik parçacıklar gibi katı bir yağlayıcı olan yumuşak bir faz ile kombinasyon halinde [134]. Sert seramik faz, yağlayıcı parçacıklarla birlikte kaplamalar, düşük sürtünme ile yüksek sertlik gibi ikili bir rol oynar. Bu kaplamalar, çeşitli yataklarda ve kayar bileşenlerde, sıvı yağlayıcılar olmadan ve hareketli parçaların çok sık durup hareket etmesi gereken düşmanca ortamlarda uygulama bulmaktadır.

### **3.2. Grafen Esaslı Kompozit Kaplama Yöntemleri**

Geçmişte elektrokaplama, elektroliz kaplama, RF ve DC püskürtme, CVD, PVD, plazma püskürtme vb. gibi kompozit kaplamaları hazırlamak için çeşitli teknikler kullanılmıştır. yüksek görünüşlü malzemelerin verimli, çok yönlü ve güvenilir büyük ölçekli endüstriyel üretimi [135]. Yöntem genellikle tek başına veya diğer yumuşak ve sert fazlarla birleştirilerek ince metalik filmlerin elektrodepozisyonunda kullanılır. Yöntem ayrıca minimum çalışma alanı, düşük sıcaklıkta işleme, seri üretim, uygun maliyetli ve nihai ürünler için çok az veya hiç işleme gerekmemesi gibi avantajlar ekledi [136].

DC elektrodpozisyon, kaplama amacıyla yaygın olarak kullanılırken, daha yavaş DC akımı daha büyük tane boyutuna yol açarken, daha yüksek akım elektrolit açılığına neden olur ve pürüzlü yüzeylerin oluşumuna yol açar [137]. Alternatif bir yaklaşım, DC galvanik kaplamanın aksine üstün sonuç, kristal tane boyutu, alaşım kimyası ve dokusunun kolay kontrolü ve daha iyi parçacık dağılımı, iyileştirilmiş morfolojiler, sertlik ve aşınma direnci sağlayan darbeli elektroçökeltmedir (PED) [138].

Uygulanan akımın veya potansiyelin sürekli olduğu DC ile karşılaştırıldığında, darbeli elektrodpozisyonda (PED), potansiyel veya akım, temel olarak açık ve kapalı zamanı ifade eden iki farklı değer arasında hızla değiştirilir [139].

Açma süresi sırasında potansiyel veya akım uygulanır ve kapalı kalma süresi boyunca uygulanan akım sıfırdır ve her darbe bir açma süresi (*Ton*) ve kapatma süresinden (*Toff*) oluşur. Bu nedenle, elektrodpozisyon sırasında sıfır akımla ayrılan, eşit genlik, süre ve polariteye sahip darbe dizileri uygulanır. Nanomalzeme morfolojisini korumak ve kimyasal kararlılıklarını ve elektrokatalitik dayanıklılıklarını korumak için yenilikçi ancak basit bir sentetik teknik bu sınırlamaları aşabilir. Bu nedenle, bu çalışmada nanopartiküller üzerinde ultra ince ve dayanıklı kaplama katmanları oluşturmaya yönelik sağlam, düşük maliyetli ve ölçeklenebilir bir Joule ısıtma yöntemi tanıtılmıştır. Çoğunlukla implant veya iskele olarak kabul edilen biyomalzemeler, metallere, seramiklere, polimerlere veya bunların kompozitlerinden yapılır [141]. Bunlardan hidroksiapatit (HA), kalsiyum fosfat seramiklerinden biri olarak, kemik ve diş gibi insan iskelet sistemindeki apatite benzer kimyasal bileşim (Ca/P oranı 1.67) ve kristal yapı sunar [142-143]. Bu nedenle, bu seramik, iyi biyoyumluluğu, osteokondüktivitesi, yüksek korozyon direnci, sitotoksikite ve inflamatuvar olmaması sayesinde çok çeşitli ortopedik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [140], [144-145].

Bununla birlikte, HA gibi kalsiyum fosfat seramikleri, mekanik yüklere maruz kalan yerlerde klinik uygulamalarını sınırlayan içsel kırılma, düşük kırılma tokluğu ve zayıf yorulma direncinden muzdariptir [146-149]. Bu nedenle, genellikle metallerin iyi mekanik özellikleriyle birlikte bu seramiklerin biyoyumluluğunu elde etmek için metalik substratların yüzeyinde bir kaplama olarak sunulurlar [150-151]. Günümüzde 316L paslanmaz çelik, kobalt krom alaşımları gibi metalik malzemeler ve titanyum bazlı alaşımlar genellikle implantlar için yapıcı bir temel görevi görür [152-153]. Bunlar arasında, titanyum ve alaşımları, diğer metallere kıyasla daha yüksek

mukavemet-ağırlık oranı ve daha düşük elastik modül gibi uygun mekanik özellikler göstererek, onları hasarlı sert dokuları değiştirmek için daha uygun hale getirir [154-156]. İmplant mekanik gerilimlere maruz kaldığında, yüzeydeki düşük mekanik ve tribolojik özelliklerin bir sonucu olarak yoğun sürtünme ve aşınma meydana gelir [157]. Buarada, zayıf arayüz bağı nedeniyle kırılma sıklıkla kaplama veya substrat-kaplama arayüzünde meydana gelir [158].

HA bazlı kaplamanın TiO<sub>2</sub>, kalsiyum silikat, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, karbon nanotüpler (CNT'ler) ile birleştirilmesi konusunda birçok çalışma muazzam bir şekilde ilerlemiştir, grafen ve türevleri, vb. olağanüstü yüksek mekanik özellikler (çekme mukavemeti 130 GPa ve Young modülü 0, 5–1 TPa), büyük grafen ve türevlerinin özgül yüzey alanı (2600 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>), matris ile güçlü arayüzey bağı, iyi biyouyumluluk, biyo-kararlılık ve antibakteriyel etkisi, bunların biyo-kompozitler için mekanik takviye olarak değerlendirilmesine yol açmaktadır [158-168]. Ayrıca grafen, CNT'lere kıyasla düşük maliyetle nispeten saf bir ortamda basitçe üretilebilir [162-163]. Oysa bunlar, sentez yöntemleriyle ilişkili zararlı metalik katalizörlerin varlığından dolayı CNT'lerin sitotoksitesisi hakkında bazı raporlardır [163], [169].

Grafen ve GO (GO), grafen mikro tabakaları, çok katmanlı grafen (MLG) ve indirgenmiş GO (rGO) formundaki türevleri, GO-kitosan gibi grafen bazlı fonksiyonel biyomateryalleri imal etmek için ilgi konusudur. kompozit, kitosan işlevselleştirilmiş GO-HA kompoziti ve grafen-biyoaktif inorganik kompozitler [162], [164] 169-174].

Ayrıca GO, biyo-sensörler ve biyo-cihazlar oluşturmak için peptitler, proteinler, bakteriler ve hücreler gibi bazı biyomoleküllerle işlevselleştirilebilmektedir [175].

Bugüne kadar, farklı elektroforetik biyomimetik sentez, düşük akım yoğunluklarında elektrokimyasal biriktirme vakumlu soğuk püskürtme ve sıvı alev püskürtme biriktirme [163-168], [171-179].

### **3.3. Bakır Matrisli Grafen Kompozit**

Geleneksel toz metalürjisi teknolojisi, grafen/bakır matris kompozitlerin imalatı için yaygın bir tekniktir. Hwang J ve ark., saf bakırınkine (255 MPa) kıyasla kıvılcım plazma sinterleme işlemi yoluyla RGO/Cu nanokompozitlerin gerilme mukavemetinde (335 MPa) %30'luk bir artış olduğunu bildirdi [180]. Koltsova ve ark., kimyasal buhar biriktirme ve haddeme işlemleriyle hazırlanan grafen/bakır

kompozitlerinin, saf bakırdan 2.7 kat daha sert olduğunu bildirmiştir [181]. Bununla birlikte, metalürjik süreçte, grafen ve bakır matris arasındaki büyük yoğunluk farkı nedeniyle grafeni matriste düzgün bir şekilde dağıtmak zordur [182].

Elektrodepozisyon teknolojisi, basit, ekonomik, ölçeklenebilir ve grafenin dağılımını kolaylaştıran sıvı ortamı nedeniyle grafen/bakır matris kompozitlerinin imalatı için ideal bir yöntemdir. CLP Pavithra ve ark., 2.5 GPa'lık yüksek bir sertlik ve 137 GPa'lık yüksek bir elastik modül sergileyen darbeli ters elektrodepozisyon (PRED) ile Cu-Gr kompozit folyolar hazırladı [183]. Huang G ve ark., Gr-Cu kompozit filmlerin gerilme mukavemetinde (387 MPa) ultrasonik karıştırma elektrodepozisyon yöntemiyle saf bakırinkine kıyasla %21.1'lik bir artış bildirmiştir [182]. Mathew ve ark., Cu-Gr kompozit folyoları, ~800 MPa'lık kayda değer bir çekme akma mukavemeti ve ~%90-95 IACS'lik bir elektriksel iletkenlik sergileyen, katkısız bir bakır sülfat banyosundan darbeli elektrodepozisyonla imal etti [184]. Bununla birlikte, bildiğimiz kadarıyla, elektrolitlerdeki grafen konsantrasyonunun modeli ve elektrodepozisyon ile hazırlanan Gr/Cu kompozit folyoların mekanik özellikleri hakkında raporlar eksiktir.

### **3.4. Grafen/Polipirol Kompozit**

Taşınabilir ve giyilebilir elektroniğin hızlı büyümesiyle, ağırlık olarak hafif, boyut olarak kompakt, enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğu açısından yüksek olması gereken esnek enerji depolama cihazlarının geliştirilmesine büyük araştırma dikkati çekilmiştir [185-186]. Süper kapasitör, üstün yüksek güç performansı, uzun süreli çevrim kararlılığı ve yüksek güvenliği sayesinde, esnek enerji depolaması için umut vaat eden bir aday olarak kabul edilmiştir [187-188]. Lityum-iyon pil ile karşılaştırıldığında, esnek bir süper kapasitörün hücre konfigürasyonu, yanıcı ve neme duyarlı organik elektrolitler yerine su bazlı jel polimer elektrolitlerin kullanılması nedeniyle çok daha basit ve daha güvenlidir [182], [184-189]. Ayrıca, süper kapasitörlerin hızlı ve yüksek oranda tersine çevrilebilir çift katmanlı kapasitif ve/veya sözde kapasitif enerji depolama mekanizmaları, lityum-iyon pilinkine kıyasla önemli ölçüde daha iyi yüksek güç kapasitesi ( $>10 \text{ kW kg}^{-1}$ ) ve çevrim kararlılığı sağlar [189]. Bununla birlikte, süper kapasitörlerin lityum-iyon pillere kıyasla daha düşük enerji yoğunluğu, süper kapasitörlerin geniş uygulama alanını kısıtlamaktadır [190]. Elektrot malzemelerinin

yapı optimizasyonu, esnek süper kapasitörlerin elektrokimyasal performansını artırmanın umut verici yollarından biridir [191].

İki boyutlu tek bir karbon atomu tabakası olan grafen, iyi mekanik özelliklere (Young modülü 1.0 TPa), yüksek taşıyıcı hareketliliğine ( $15.000 \text{ cm}^2(\text{V}\cdot\text{s})^{-1}$ ) ve geniş teorik spesifik yüzey alanına  $2630 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$  sahiptir [116-119]. Grafenin bu olağanüstü özellikleri ve çoklu hazırlama yöntemleri, grafenin esnek süper kapasitörler için bir elektrot malzemesi olarak kullanımına büyük dikkat çekmiştir [120-124]. Bununla birlikte, grafenin yük depolama mekanizması, esas olarak, yalnızca elektrot malzemesinin yüzeyini kullanan çift katmanlı kapasitansa dayanmaktadır ve bu nedenle grafenin özgül kapasitansı nispeten küçüktür (deneysel değerler  $< 300 \text{ F g}^{-1}$ ). Genel özgül kapasitansı iyileştirmek için,  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{NiO}$ , [dahil olmak üzere sözde kapasitif malzemelerin grafen matrisine dahil edilmesi için büyük çaba harcanmıştır [125-131].  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Co}(\text{OH})_2$ , polipirol, polianilin, polidopamin vb. bu metal oksitler ve iletken polimerler arasında, polipirol üstün elektronik iletkenlik ( $\sim 10^2 \text{ S cm}^{-1}$ ), yüksek teorik özgül kapasitans ( $620 \text{ F g}^{-1}$  sergiler) yanı sıra çevre dostu [13], [112], [132- 148]. Bu nedenle, esnek grafen/polipirol kompozit filmler oluşturmak için grafen ve polipirol kombinasyonu, jel elektrolit uygulandığında esnek ve katı hal süper kapasitörlerin üretimini kolaylaştıracak yüksek performanslı esnek elektrotlar geliştirmek için umut verici bir strateji olabilir [149-150].

Grafen/polipirol kompozit filmlerin/kaplamaların doğrudan üretimi için en yaygın kullanılan yöntemler vakumlu filtrasyon ve elektro kaplamadır [31], [112], [135], [139], [151-155]. Bununla birlikte, vakumlu filtreleme zaman alıcıdır ve işlem sırasında bileşenlerin kararlı bir dağılımı (esas olarak grafen ve polipirol dağılımı) oldukça talep edilmektedir. Grafen ve polipirol kompozitlerin ortak elektrodepozisyonu için, kararlı bir öncü elektrolit çözeltisiyi dağılmış grafen ile esastır. Grafeni sulu bir öncü elektrolit çözeltisinde dağıtmak için, ya ağır oksitlenmiş GO (GO) ya da yüzey aktif maddeler kullanılır. Bununla birlikte, hafif oksitleyici özelliği olan GO, pirol monomeri ile reaksiyona girerek kararsız bir öncü elektrolite yol açar [156]. Anyonik yüzey aktif maddelerin kullanımı, öncü elektrolit çözeltisinde grafenin topaklanmasını etkili bir şekilde önleyebilir ancak büyük boyutlu yüzey aktif madde anyonları ile katkılı depolanmış polipirol, zayıf iyon hareketliliğine sahiptir ve bu da bozulmuş özgül kapasitans ve hız kabiliyetine neden olur [13], [136], [155], [157].

### 3.5. Ni-GO Kompozitler

Nikel bazlı kompozit kaplamalar, mükemmel tribolojik ve antikorozyon özelliklerinden dolayı havacılık ve uzay endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. SiC parçacıkları, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CeO<sub>2</sub>, MoO<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, B, W, TiC, TiN, katı yağlayıcılar (grafit, PTFE), karbon fiber, CNT ve GO, Ni kaplamalara ikinci faz parçacıkları olarak dahil edilmiştir [111-122].

Sertliklerini, mukavemetlerini, yüksek sıcaklık inertliklerini, korozyon ve aşınma dirençlerini artırır. Katkı maddeleri arasında SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partiküllerinin etkisi kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Takviye olarak SiC partikülleri üzerine yapılan araştırmalar, partikül boyutunun bir fonksiyonu olarak tribolojik özelliklerin araştırılmasına odaklanmıştır, kaplamalardaki SiC partiküllerinin hacim fraksiyonu, partikül aglomerasyonu ve yüzey özellikleri [111- 112], [115].

Özkan ve ark., Ni-SiC nanoparçacık kompozit kaplamalardaki SiC parçacıklarının, korozyon direnci davranışını etkileyen doku değişikliklerini desteklediğini bildirmiştir [111]. Kompozit kaplamanın korozyon direncinin SiC takviyesi yüzdesindeki artışla arttığını göstermektedir. Zarghami ve ark. darbeli elektrodepozisyon yoluyla Ni/SiC kaplamalar geliştirdi ve yüzey morfolojisinde bir değişiklik gözlemledi akım yoğunluğu değişikliklerinden dolayı [113]. Raporları ayrıca, SiC ilavesi ile kompozit kaplamanın korozyon direnci performansında bir artış olduğunu gösteriyor. PTFE gibi katı yağlayıcıların dahil edilmesi, kendi kendini yağlama özelliklerini geliştirir, ancak kaplamadaki PTFE'nin hacim yüzdesiyle kaplama sertliğinden ödün verir. Huang ve ark., SiC ve PTFE içeren Ni kompozit kaplamaları bildirmiştir [117]. Raporları, asidik ortamda kaplamaların korozyon davranışı üzerinde parçacık birleşiminin önemsiz bir etkisinin olduğunu gösterdi. Diğer popüler katkı maddeleri olan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partikülleri ayrıca Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'te partikül kompozit kaplamalar. Araştırmalar, daha yüksek Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> parçacık konsantrasyonlarında, kompozit kaplamanın aşınma direncinin arttığını ve kaplamadaki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> parçacıklarının konsantrasyonunun ve dolayısıyla aşınma özelliklerinin akım yoğunluğu ile düzenlenebileceğini göstermektedir [6-7].

Süfaktan kimyası sabit ağırlık yüzdesi Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeren Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamalarda çeşitli zaman dilimlerinde korozyon özelliklerini bildirmiştir. Araştırmaları, korozyon önleyici özelliklerin zamanla arttığını gösterdi. Dehgahi ve ark. elektro kaplamalı Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- SiC nanokompozit kaplamalar hakkında rapor verdiler [123-124]. Nanoparçacıkların konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak ağırlıkça %3,5 NaCl ve

asidik 0,5 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltilerinde kompozit kaplamaların korozyon ve pasivasyon davranışını araştırdılar. Allahyarzadeh ve ark., W ve W–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> parçacık birleşimine sahip Ni kaplamaların geliştirilmiş korozyon ve aşınma özellikleri için optimum görev döngüsünü araştırdı [113]. Li ve ark. Ni–B nanokompozit kaplamalarda Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içermesinin etkisini inceledi [114].

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partiküllerinin dahil edilmesinin doku oryantasyonunda değişikliğe, tane incelmeye ve sertlikte ve korozyon direncinde artışa neden olduğunu gösterirler. Dupleks kaplamaların geliştirilmesi ve korozyon direncini artırmak için metal matrisine SiO<sub>2</sub> eklenmesi hakkındaki araştırma raporları kapsamlı bir şekilde incelenmiştir [125- 127]. Xie ve ark., gelişmiş antikorozyon özelliklere sahip kendi kendini onaran Ni kaplamaların geliştirilmesini bildirmiştir. Sentezlenmiş SiO<sub>2</sub> nano kaplar, agresif aşındırıcı ortam altında bozulmamış yüzey morfolojisi sağlayan Ni matrisine dahil edildi [128-129].

Grafenin benzersiz termal, mekanik, elektriksel ve optik özellikler sergilemesi onu elektronik için kullanışlı kılar, elektromekanik enerji, tıbbi uygulamalar. Grafen artık hem bozulmamış formda hem de grafen içeren metal kompozit kaplamalar olarak korozyon önleyici uygulama için düşünülmektedir [130-149]. Grafenin iyonların ve moleküllerin akışına (korozyon ortam) karşı geçirimsizliği ve kimyasal inertliği, grafen ve grafen bazlı kaplamaların yüksek anti-korozyon özelliklerinden birincil olarak sorumludur [192]. Bununla birlikte, grafenin korozyon koruması için ticari kullanımı, yüksek kaliteli grafenin büyük miktarlarda hazırlanmasıyla ilgili maliyet ve enstrümantasyon nedeniyle hala pratik değildir ve sorunun üstesinden gelmek için çok az rapor ele alınmıştır [193-195]. GO (GO), grafenin yerini alacak olası alternatiflerden biri olarak duruyor. GO, grafitin kimyasal oksidasyonu ile büyük miktarlarda sentezlenebilir. Grafene benzer şekilde GO, agresif ortamlara karşı inertlik sergiler ve bu nedenle korozyona karşı koruma tabakası olarak kullanılabilir [193-194]. Hidrofobik olan grafenden farklı olarak, GO üzerinde oksijen fonksiyonel gruplarının varlığı onu hidrofilik bir yapıya sahiptir [195]. Bu, elektrodpozisyon gibi geleneksel yöntemler kullanılarak kaplamaların üretilmesi için tipik olarak kullanılan sulu elektrolitlerde GO dağılımını kolaylaştırır [196-197].

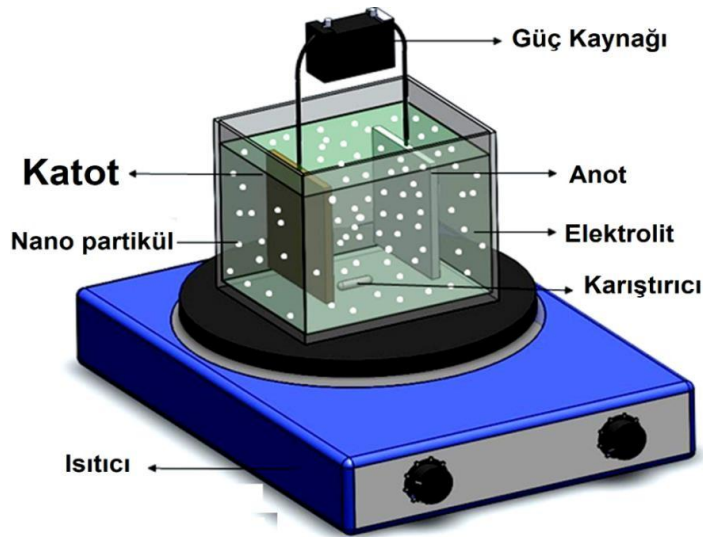


#### 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Kaplama banyolarında metalik ve ince (küçük) seramik partiküllerin elektrolitik olarak birlikte biriktirilmesi ile nanokompozit kaplamalarının üretiminin incelenmesi son yıllarda oldukça fazla çalışılmaktadır. Elektrolitik nanokompozit malzemelere olan ilgi, nanokompozit kaplamaların yüksek aşınma direnci, yüksek sıcaklıkta iyi korozyon ve oksidasyon direnci kaplanmış yüzeylerdeki kendinden yağlayıcılık gibi özelliklerinden dolayı son 20 yıl boyunca hızla artmıştır. Elektrolitik nanokompozit kaplamalar üzerine yapılan araştırmalarda; kaplamaların üretimi için banyonun kompozisyonu, partiküllerin konsantrasyonu, sıcaklık, akım yoğunluğu gibi optimum şartları belirleme yönünde çalışmalar yapılmıştır [189].

Metal matris kompozit kaplamalar elektrolitik bir banyo metal matrisi içerisinde polimerik veya seramik ince partiküllerinin biriktirilmesi yolu olan elektro-biriktirme yöntemi ile üretilebilir. Elektro biriktirme; ikinci bir işlem olmaksızın basit bir adımda nanokompozit kaplama üretmek için düşük sıcaklıkta yapılan işlemdir [190]. İşlem süresince, bu çözünmeyen partiküller bir geleneksel kaplama elektrolitinde askıda tutulur ve kaplama tabakasına biriktirilir. İkincil faz malzeme olarak partikül, fiber ya da kapsül şeklindeki partiküller kullanılabilir [190].

Aşağıda Şekil 4.1.'de basit bir kaplama düzeneğinin şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 4.1. Kaplama düzeneğinin basit şematik gösterimi.

#### 4.1. Deneysel Prosedür

Elektrolitik Ni-W matrikslikompozit kaplama çalışmalarında çelik altlıklar kullanılmıştır. 3x3,5 cm boyutlarında kesilen altlıklar, zımpara ve gerektiğinde parlatma kademelerinden geçirilerek yüzeyleri hazırlanmıştır. Kaplama öncesi altlıklar alkali ve asidik temizleme işlemlerine tabi tutulmuştur. Alkali temizleme için hacimce % 20 NaOH-% 80 H<sub>2</sub>O konsantrasyonuna sahip çözelti, asidik temizleme için ise hacimce % 40 HCl- %60 H<sub>2</sub>O konsantrasyonuna sahip çözelti kullanılmıştır. Temizleme sonrası saf su ile bolca durulanan parçalar bekletilmeden kaplama banyosuna iletilmiştir.

Kompozit kaplama çalışmaların çok sayıda banyo bileşimi hazırlanmış olup kullanılan kimyasalların saflığı yüksek kalite olarak seçilmiştir. Çözeltilerin hazırlanmasında iki kere damıtılmış saf su kullanılmıştır. Bu tür çalışmalarda banyo pH'ı çok önem arz ettiğinden, pH'ın hızla değişimini engellemek için tampon çözeltiler de kullanılmış ve kaplama esnasında sürekli sıcaklık ve pH ölçümü yapılmıştır. Çalışmada tampon olarak sülfürik asit (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) çözeltisi kullanılmıştır. Kaplama öncesi banyo çözeltisine ilave edilen seramik partiküllerinin aglomerasyonunu önleme amacıyla, çözelti manyetik olarak karıştırma ve ultrasonik homojenizatör cihazında karıştırma işlemlerine tabi tutulmuştur

**Tablo 4.1.** Ni-P-GO kompozit kaplamaların üretim parametreleri.

Numune	İş Çevrimi (Ton-Toff)
G1	20-80
G2	50-50
G3	60-40
G4	80-20

#### 4.2. Karakterizasyon Çalışmaları

##### 4.2.1. XRD ve SEM analizleri

Üretilen örneklerin yüzey morfolojisini ve kaplamaların yapısını belirlemek amacıyla XRD (X-ışınları difraktometresi) ve SEM (taramalı elektron mikroskobu) analizleri yapılmıştır. SEM analizlerinde, geri yansıyan elektronlarla yüksek çözünürlüklü mikroyapılar elde edilemediği için, ikincil elektronlarla mikroyapı görüntüleri analiz edilip fotoğraflanmıştır. XRD analizi, malzemelerin faz yapısı ve kristalografik özellikleri hakkında bilgi sağlayan bir karakterizasyon yöntemidir. Kısa dalga

boyutuna sahip X-ışınları, analiz yapılan malzemede kırılma ile bir kırınım deseni oluşturur. Bu desen, X-ışınları toz veri kataloğundaki desenlerle karşılaştırılarak analiz edilen numunenin içeriği belirlenir. Bu tez kapsamında elde edilen numunelerin faz analizleri Rigaku marka D/MAX 2000 model XRD cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elektrokimyasal özellikler, korozyon hızlarının belirlenmesi amacıyla, potansiyodinamik polarizasyon (Tafel) analizi uygulanmıştır. Potansiyodinamik polarizasyon ölçümleri, Gamry Interface 1000 Potansiyostat kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tafel korozyon deneyleri, oda sıcaklığında, ağırlıkça %3.5 NaCl çözeltisi içinde gerçekleştirilmiştir. Korozyon testleri içinde klasik üç elektrotlu hücre kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Doymuş kalomel elektrot (SCE), Pt ve çalışma alanı 1 cm<sup>2</sup> olan numuneler sırasıyla referans, karşıt ve çalışma elektrotu olarak kullanılmıştır. Tafel eğrisi, -1.0 V ila +1.0 V aralığında potansiyel tarama yoluyla elde edildi.

### 4.3. Mikro Sertlik Çalışmaları

Yapılan deneysel çalışmalar da farklı banyo bileşimlerinden elde edilen kaplamalar için mikrosertlik çalışmaları yapılmıştır. Kaplama tabakasının sertliğini ölçmek için Vickers sertlik analizi kullanılarak ölçülmüştür. Her bir numuneye en az 5 adet ölçüm yapılmıştır. Malzemenin üzerine kaplanan tabakanın sertliği, kesitin belirli bir süre yük altında kare piramit şeklindeki uçla batırılmasıyla ölçülmüştür.

$$VSD = [2P \sin(a/2)] / d^2 \quad (4.1)$$

Burada P;kgf cinsinden uygulanan yük, a;tepe açısı, d;taban köşegen uzunluğu $[(d_1+d_2)/2]$

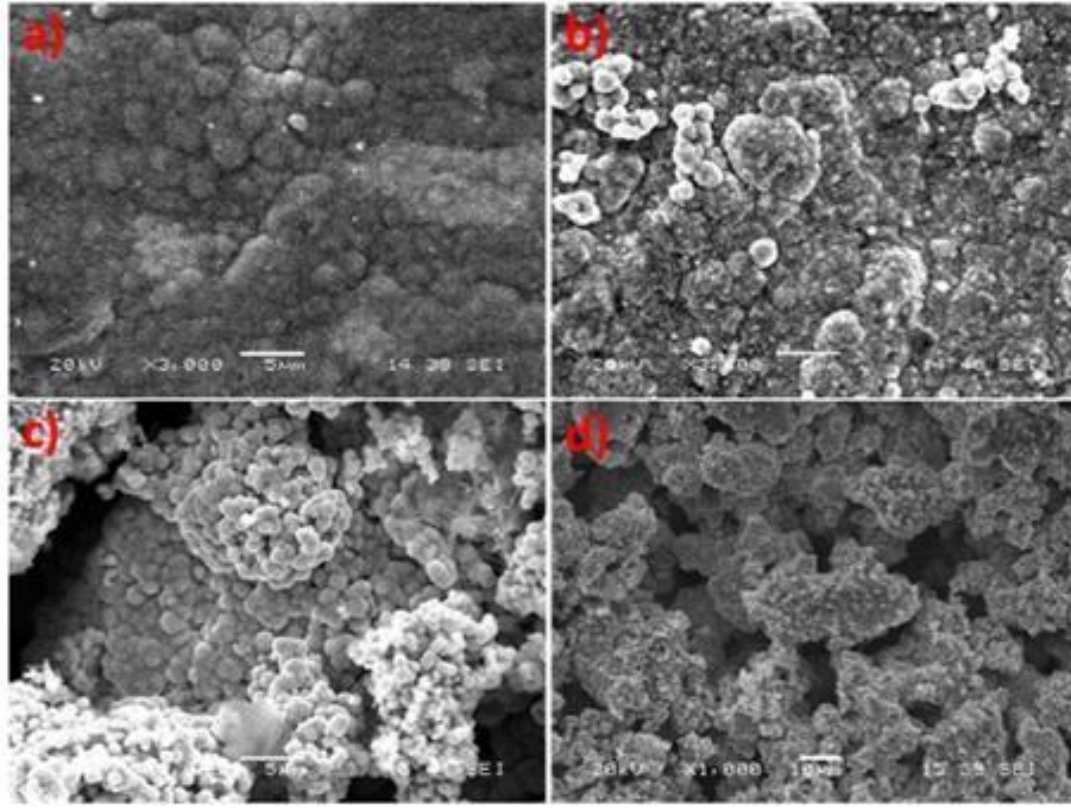
Elde edilen izin köşegen uzunlukları kullanılarak, belirtilen formül doğrultusunda sertlik değerleri hesaplanmıştır. Ölçülen sertlik değerlerinin standart sapmaları da ayrıca hesaplanmıştır.



## 5. DENEYSEL SONUÇLAR

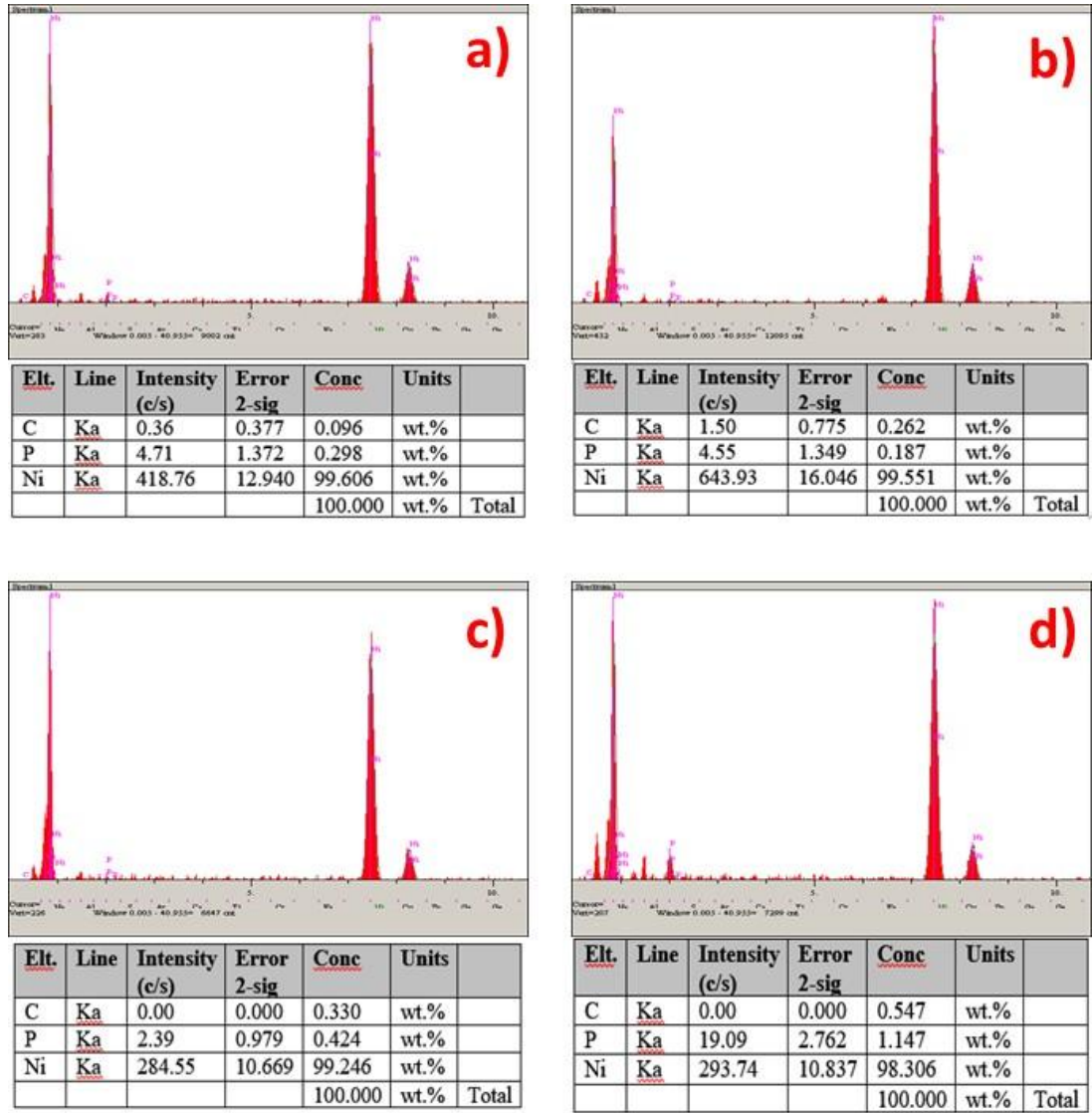
Kesikli elektrolitik kaplama yöntemi ile iş çevrimlerinde, 30 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda, 30 dakika ile Ni-P kompozit kaplamalar elde edilmiş olup, iş çevrimin kaplama morfolojisine, sertlik, sürtünme, aşınma ve korozyon özelliklerine olan etkisi incelenmiştir.

Kesikli elektrolitik kaplama yöntemi ile farklı iş çevrimlerinde Ni-P kompozit kaplamalara ait, taramalı elektron mikroskobu ile alınmış yüzey görüntüleri Şekil 5.1.'de verilmiştir. Şekil 5.1.'de görüldüğü gibi, Ni-P kompozit kaplamanın yüzeyi nodüler tipi bir morfolojiye sahiptir ve kaplama yapısındaki nodüllerin ortalama çapı 0,2 ila 1 cm arasında değişmektedir. %20 iş çevrimi ile üretilmiş Ni-P kompozit kaplamanın yüzeyi nispeten yoğun ve çatlak içermediği gözlenmiştir. Şekil xxb'de %50 iş çevrimi ile üretilen kompozit kaplamanın yüzey morfolojisinde çok fazla değişim görülmemektedir. Fakat yüzeyde oluşan nodüllerin boyutunun küçüldüğü belirlenmiştir. İş çevrimin artmasıyla kaplamanın morfolojisinde değişimler meydana geldiği görülmüştür. Şekil 5.2.'de görüldüğü gibi %60 iş çevrimi ile üretilen kompozit kaplama yapısı, %20 ve %50 iş çevrimde üretilen kaplamalara göre pürüzlü olup, yoğun ve düzgün yüzey özelliği kaybolmuştur. %80 iş çevriminde üretilen kaplama morfolojisi homojen düzensizliklerden oluştuğu gözlemlenmiştir. Farklı iş çevrimlerinde üretilen kompozit kaplamaların yüzeyine baktığımızda herhangi çatlaklı yapının oluşmadığı görülmektedir.



**Şekil 5.1.** Farklı iş çevrimlerinde üretilen Ni-P-Grafen oksit kompozit kaplamaların SEM görüntüleri a) %20 b) %50 c) %60 d)%80.

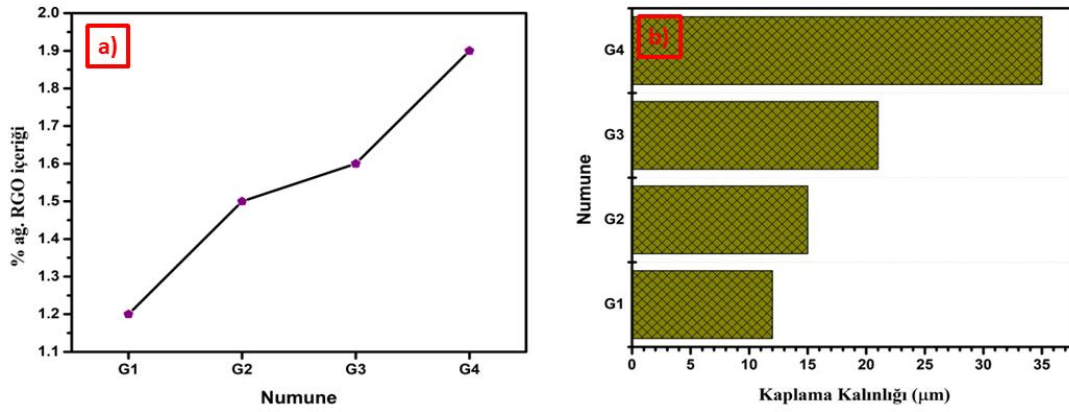
Farklı iş çevrimlerinde üretilen Ni-P-GO kompozit kaplamaların EDS analizi Şekil 5.2.'de gösterilmiştir. İş çevrimi arttıkça nikel miktarının çok fazla değişim göstermediği söylenebilir. %20 iş çevrimi ile üretilen kompozit kaplamanın nikel bileşimi %99,6 iken %80 iş çevrimi ile üretilen kompozit kaplamanın nikel bileşimi %98,3 e düştüğü görülmüştür. GO yapısının yüzey alanlarının fazla olması, nikel kristallerinin nano boyutlarda çekirdeklenmesine neden olmaktadır. Bu nedenle kristalin tane boyutunda gözlenen azalma nikel matrisine giren GO miktarının etkisi söz konusudur. İş çevrimine bağlı olarak matris içerisine giren GO miktarı arasındaki değişim Şekil 5.3.'de verilmiştir. Şekil 5.3.'e göre iş çevrimi arttıkça matris içine giren GO miktarının çok az olsa da arttığı söylenebilir. Ayrıca, bütün iş çevrimlerinde üretilen kompozit kaplamaların yüzey görüntülerine baktığımızda, topaklanmanın olmadığı ve GO ların yapı içerisine başarılı bir şekilde dağıldığı görülmektedir.



**Şekil 5.2.** Farklı iş çevrimlerinde üretilen Ni-P-GO kompozit kaplamaların EDS analizi a) %20 b) %50 c) %60 d)%80.

Şekil 5.2. akımlı yöntemle üretilen Ni-P-GO kaplamalara ait kaplama kalınlıklarını göstermektedir. Artan Ton süresi ile birlikte kaplanan tabaka kalınlığında bir artış meydana gelmiştir. Bunun sebebi Ton'un daha uzun hale gelmesi ve bunun sonucunda akım etki süresinin artmasıdır. Biriken tabaka kalınlığı uygulanan akım süresi ile artar. En yüksek Ton süresinde en kalın hale gelir. Akım yoğunluğunun daha fazla sürede verilmesi, katot yüzeyinde elektrik alan çizgilerini daha yoğun hale getirir ve nanoparçacıkların dağılılırliğini artırır. Bu sayede katot yüzeyinde nanoparçacıkların adsorbe olma kabiliyetini artırır. Nanoparçacıkların artması, çekirdeklenme noktalarını artırarak biriken tabakayı daha yoğun hale getirir ve yapışma olayı daha rahat bir biçimde gerçekleşir. İş çevriminin artmaya devam etmesi ile yüzey pürüzlülüğü şekilde görüldüğü gibi azalır. Bu kaplama esnasında meydana

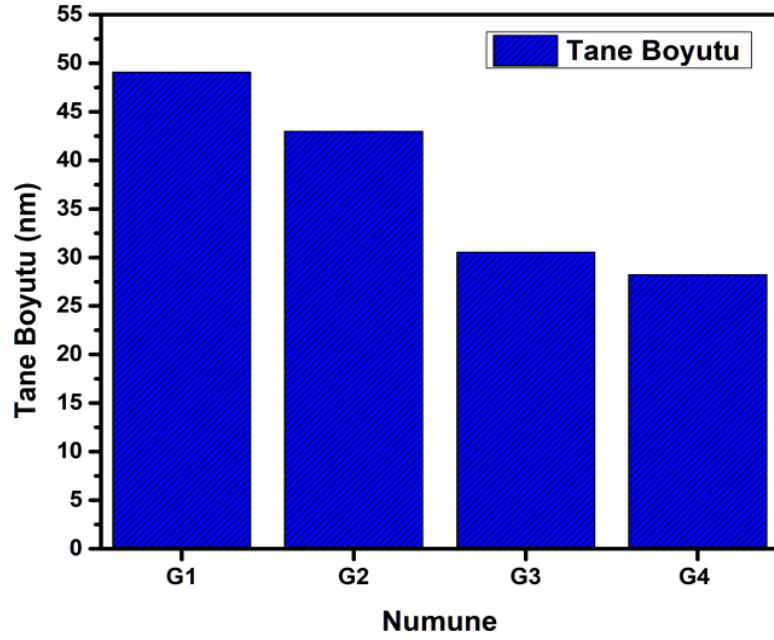
gelen hidrojen aşırı voltajı ile ilgilidir. Kaplama esnasında Ton süresinin artmaya devam etmesi Toff süresinin azalması anlamına gelmektedir.



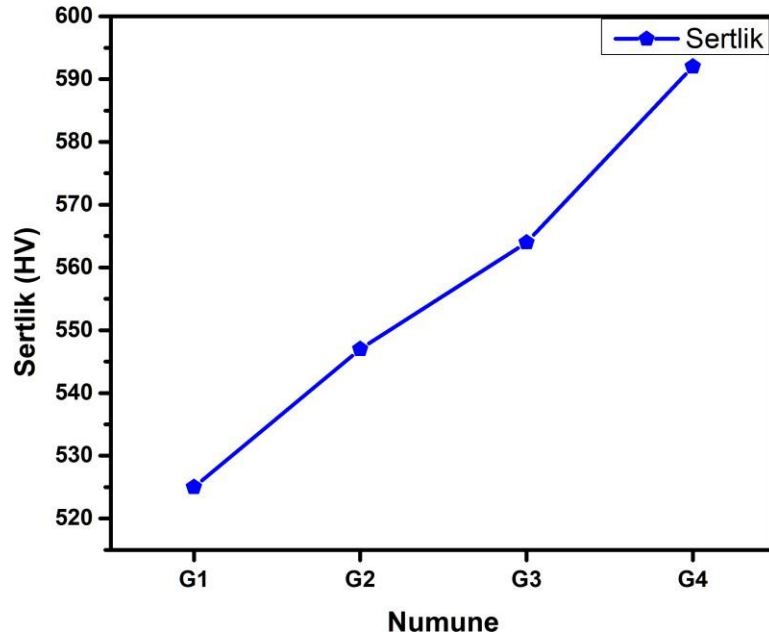
**Şekil 5.3.** Farklı iş çevrimlerinde üretilen Ni-P-GO kompozit kaplamaların a) Matris içine giren GO miktarı b) Kaplama kalınlıkları.

Genel olarak kaplamanın oluşumu iki adımdan oluşur: kristal çekirdeklerin oluşumu ve kristallerin büyümesi adımlarıdır. Kaplama yüzeyinde oluşan çıkıntılarının boyutu, çekirdeklenme hızı ve büyüme hızı ile ilgilidir. Katod polarizasyonu, kesikli akımda doğru akıma göre daha güçlüdür, bu da daha hızlı kristal çekirdeklenme hızı ve kesikli akım modunda oluşan kaplamaların daha fazla çekirdeklenme sayısına neden olur. Ayrıca, kesikli akım kaplamada ton kalma süresi kristal büyümesini engeller. Böylece, Scherrer formülasyonuna dayanarak yapılan tane boyut analizi sonucunda artan Ton süresi ile yapıda oluşan tanelerin boyutlarında küçülmeler meydana gelmiştir. Burada etkili olan mekanizma yapıya daha fazla GO parçacıklarının nüfuz etmesidir. Nüfuz eden GO oranı arttıkça nikel tanelerinin çekirdeklenmesi için gerekli olan çekirdekleyici alan sayısını arttıracaktır. Böylelikle kristal büyümesi gecikir çekirdeklenme yani yeni tane oluşum süreci hızlanır. Yang ve arkadaşları yaptıkları Ni-Co-SiC adlı çalışmada Ni-Co metal matrisine SiC seramik partiküllerini eklemişlerdir ve çıkan kaplama tabakasına nüfuz eden SiC oranının artması ile tane boyutunda küçülme meydana geldiğini görmüşlerdir. Bunun SiC partiküllerinin matris içerisinde çekirdekleyici alan sayısını arttırmasından kaynaklandığı ve tane boyutlarının incelendiğini iddia etmişlerdir.





**Şekil 5.4.** Farklı iş çevrimlerinde üretilen Ni-P-GO kompozit kaplamaların XRD analizi.



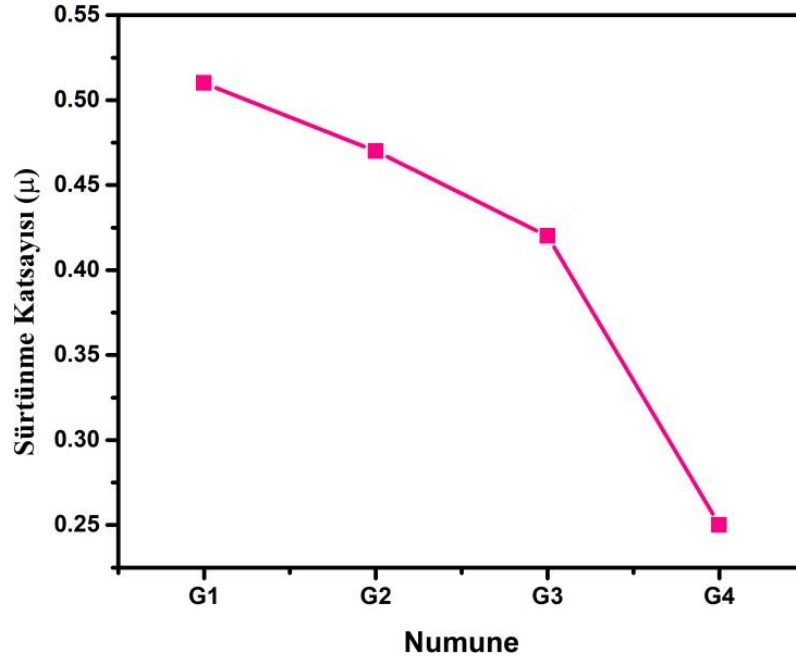
**Şekil 5.5.** Farklı iş çevrimlerinde üretilen Ni-P-GO kompozit kaplamaların sertlik değerleri.

Şekil 5.5.'de akımlı yöntemle üretilen Ni-P-GO kaplamalara ait vickers sertlik (HV) değerlerini göstermektedir. Artan Ton süresi ile birlikte sertlik değeri en yüksek Ton süresine sahip olan numune için 592HV olarak elde edilmiştir. Literatüre bakıldığı zaman bu sonuçlar geleneksel olarak üretilen akımlı Ni-P kaplamalarla uyumludur. Kaplama tabakasının sertliğinin artmasının birkaç nedeni vardır. Öncelikle artan Ton süresi ile birlikte kaplama tabakasına daha fazla GO nüfuz etmiş ve bunun bir sonucu

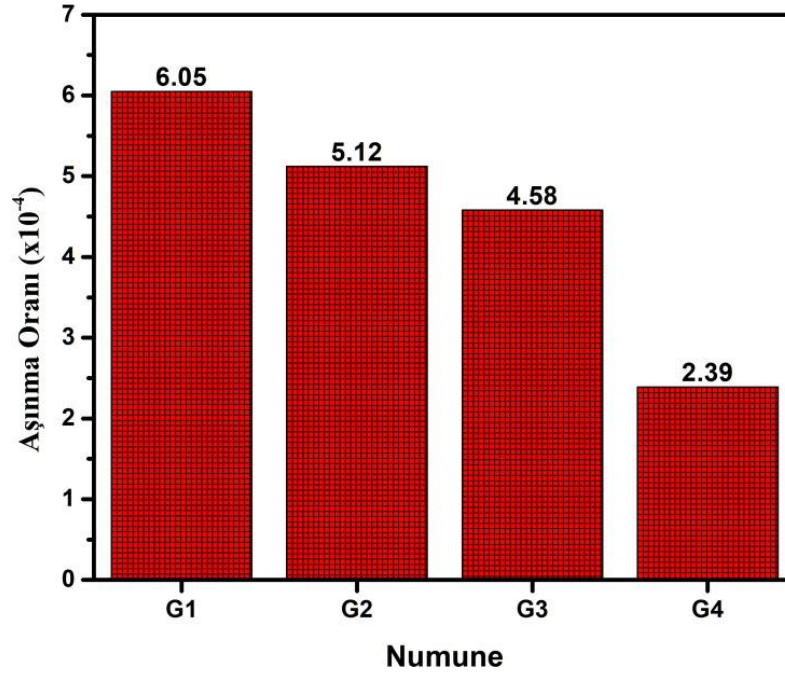
olarak tane incilmesi meydana gelmiştir. Bu sonuç Şekil 5.6'da verilen tane boyut analizini gösteren sonuçlar ile desteklenmektedir. Artan GO oranı ile daha fazla çekirdekleyici alan meydana gelmiştir. Bu alanlar tane büyümesini engellemiş ve tane oluşum hızı daha üst seviyelere çıkmıştır. Genel anlamda grafen kullanılan metal matrisli kompozitlerde (MMK) 3 temel sertlik artış mekanizması mevcuttur. Bunlar: yük transferi, tane inceltme ve termal genleşme katsayısının sebep olduğu dislokasyon güçlenmesi [182], [186]. Nanoparçacıklarla güçlendirilmiş MMK'ler için orowan sertlik artış mekanizması önemli bir rol oynar. Çünkü dislokasyonlar yoğun bir biçimde dağılmış nanopartiküller boyunca geçer ve dislokasyonlar döngülerinin arkasında kalır, böylece dislokasyon hareketi engellenebilir [188].

Şekil 5.5. ve Şekil 5.6.'da kesikli elektrolitik kaplama yöntemi ile farklı iş çevrimlerinde üretilen kompozit kaplamaların oda sıcaklığı artlarında gerçekleştirilen aşınma ve sürtünme testleri sonucu elde edilen aşınma hızının ve sürtünme katsayısının iş çevrimine bağlı olarak değişimini göstermektedir. Aşınma deneyleri 50 cm/sn'lik sabit bir hızda, 200 m mesafede ve 1 N yük şartlarında gerçekleştirilmiştir. Kesikli elektrolitik kaplama yöntemi ile farklı iş çevrimlerinde üretilen kompozit kaplamaların (%20-50-60-80) sürtünme katsayıları sırasıyla  $5,1 \times 10^{-5}$ ,  $4,5 \times 10^{-5}$ ,  $4,0 \times 10^{-5}$ ,  $3,2 \times 10^{-5}$  ve  $4,2 \times 10^{-5}$  dir. Oda sıcaklığında yapılan aşınma testleri sonucunda, en düşük sürtünme katsayısının % 80 iş çevrimi şartlarında üretilen Ni-P kompozit kaplamalara ait olduğu görülmektedir. Aşınma deneyleri sonuçlarından elde edilen veriler incelendiğinde, iş çevriminin artması ile nikel matrisin içine giren GO miktarını arttırdığından, kompozit kaplamaların sürtünme katsayısı ve aşınma hızı düşme eğilimindedir. %80 iş çevriminde elde edilen numunenin aşınma hızının azalması, iyi bağlanma, temiz ara yüzey ve GO ların matris içerisinde bulunması ile açıklanabilir. Literatürden de bilindiği gibi GO'nun matris içerisinde mükemmel aşınma ve mekanik özellik göstermesi, grafen yaprakların yapısını bozmadan matris yapısı içerisinde topaklanmadan homojen dağılmalarına bağlıdır. GO'ların sağladığı yağlayıcı özellik nedeniyle kompozit kaplamanın aşınma ve sürtünme özelliklerinin geliştirdiği gözlenmiştir. Kaplama yüzeyinin pürüzlü olmasına rağmen GO'nun homojen dağılması, GO malzemesinin hem yük taşıma hem de yağlama etkisini geliştirdiğine inanılmaktadır. Sürtünme katsayısındaki düşüşün diğer nedeni, yalnızca nikel matrisindeki ilave edilen grafen oksidin yüksek miktarı ve üniform dağılımına değil, aynı zamanda nikel kaplama ile

aşındırıcı bilye yüzey arasındaki arayüzeyde oluşan yağlayıcı film tabakasına da bağlanabilir. Kayma sırasında, kararlı ve düzgün dağılmış GO, aşınmış yüzey üzerinde sürekli ve homojen bir film tabakası oluşumuna bu da kesme kuvvetlerinin azalmasına ve böylece daha düşük bir sürtünme katsayısına neden olur.



**Şekil 5.6.** Farklı iş çevrimlerinde üretilen Ni-P-GO kompozit kaplamaların sürtünme katsayısı değerleri.



**Şekil 5.7.** Farklı iş çevrimlerinde üretilen Ni-P-GO kompozit kaplamaların aşınma hızları.

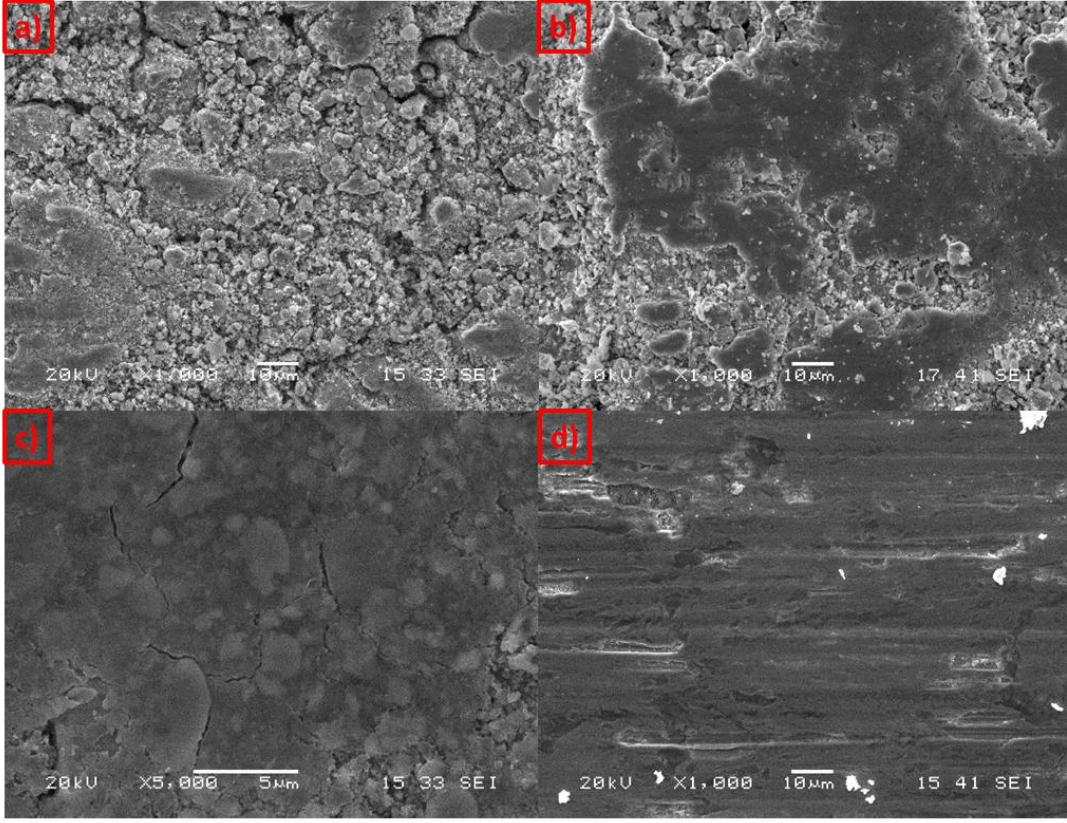
Şekil 5.7. farklı iş çevrimlerinde üretilen Ni-P-GO kompozit kaplamalara ait aşınma oranı grafiğini göstermektedir. Kesikli elektrolitik kaplama yöntemi ile farklı iş çevrimlerinde üretilen kompozit kaplamaların (%20-50-60-80) aşınma hızları sırasıyla  $5,1 \times 10^{-5}$ ,  $4,5 \times 10^{-5}$ ,  $4,0 \times 10^{-5}$ ,  $3,2 \times 10^{-5}$  ve  $4,2 \times 10^{-5}$  dır.

En iyi aşınma özelliklerine sahip kaplama, %80 iş çevrimi şartlarında üretilen numunede elde edilmiştir. Aşınma davranışının geliştirilmesinin diğer nedeni, GO'ların yüksek sertliği, kaplama tabakasında oluşturduğu dispersiyon sertleştirilmesi etkisinden dolayı kompozit kaplamaların sertliğinde artış da söylenebilir. Bilindiği gibi Grafen, 0.142 nm mesafeli C-C atomları arası mesafeye sahip olduğu hegzagonal sıkı paket yapıdaki hibrid sp<sup>2</sup> kovalent bağlarından dolayı yaklaşık 1 TPa değerinde bir elastik modüle sahiptir ve ilave olarak yüksek mukavemetinden dolayı da aşınma sırasında yüzeye paralel olarak yerleşmesi neticesinde üç temel rolü aktif hale gelmektedir. Bunlardan birincisi yüzey plastik deformasyonu engellemesi ve yüzeyde mükemmel yük taşıma bileşeni olarak davranması, ikincisi ise özellikle seramik ve sert metallerde yüksek esneye bilirlilik özelliğinden dolayı ve gevrek partiküller arasında köpürüleme yaparak, çatlak ilerlemesine engel olması, çatlak saptırması mekanizmaları ile delaminasyon aşınmasını azaltması ve üçüncüsü ise kendinden yağlayıcı (self-lubricant) olarak davranabilmesidir. Tek katmanlı grafenin aksine birkaç katmanlı grafen buruşmayı minimize etmekte ve yüzeyde hem aşınma ve hem de korozyon için pasivasyon filmi oluşturarak aşınmada adhezyonu düşürerek sürtünme kuvvetini de azaltmaktadır. Bu şekilde yüzeyde oluşan tribo film sayesinde yüzeyler arasındaki doğrudan teması keserek tribo-korozyonu azaltmaktadır. Çalışmamızda, % 80 iş çevrimi şartlarında üretilen kompozit kaplamanın yüksek aşınma direnci, esas olarak kompozit kaplamanın yüksek mekanik özelliklerine ve grafen oksidin kendi kendini yağlama özelliğine bağlanmaktadır. Ayrıca, GO, kaplama ile takviye elemanı arasında mekanik bağ oluşturmalarını sağlayan buruşuk bir yapıya sahip olması sayesinde kaplamaya gelen gerilimi kaplamadan takviyeye aktararak aşınma performansının iyileştirilmesine neden olduğu düşünülmektedir.

Şekil 5.8'de farklı iş çevrimlerinde üretilen Ni-P-GO kompozit kaplamaların oda sıcaklığında yapılan aşınma deneyi sonucu aşınma yüzeyine ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri bulunmaktadır. %20 ve %40 iş çevrimlerinde üretilen numunesinin aşınma yüzeyi incelendiğinde, aşınma yüzeyinde yoğun plastik deformasyon meydana geldiği görülebilir. Aşınma yüzeyleri incelendiğinde nikel

matris ile karşıt malzeme arasında plastik deformasyon meydana geldiği, aşınma yüzeylerinde plastik deformasyon ile ilişkili mikro çatlaklar ve bilye ile kaplama ara yüzeyinde delaminasyon tipi aşınma oluştuğu görölmektedir. Şekil 5.10.'da aşınma yüzeylerine baktığımızda aşınma yüzeylerinde çatlakların meydana geldiğini, bu çatlakların kayma doğrultusuna hem paralel hem de dik yönde oluştuğu gözlenmiştir.

Aşınma yüzeyinde meydana gelen çatlaklar genellikle tekrarlı gerilmelerde veya çekme kuvvetinin olduğu şartlarında meydana gelmektedir. Çatlak oluşumu, gerilme altında aşınma yüzeyinde meydana gelen plastik deformasyondan dolayı meydana geldiği düşünölmektedir. Metal matris içerisine giren GO miktarın az olması, aşınma sırasında kaplama yüzeyine gelen yük GO'ların etrafında gerilim konsantrasyonun artmasına neden olmaktadır. Gerilim konsantrasyonunun artması çatlak oluşumuna neden olduğu düşünölmektedir. Aşınma yüzeyinde oluşan çatlakların zamanla birleşmesi delaminasyon aşınmasını sebep olabilir. Delaminasyon aşınması, çatlak oluşumu, çatlağın ilerleyerek diğer çatlaklar ile birleşmesi ve sonuçta malzeme kaybının yaşandığı aşamalardan meydana gelir. Şekil 4.10.'da ise aşınma yüzeyinde plastik deformasyonun azalması sonucu çatlak oluşumu gözlenmemiştir. GO'nun kaplama içinde homojen dağılması ile matrise gelen yük, takviye fazı tarafından taşınarak kompozit kaplamanın aşınma hızını düşürmüştür.



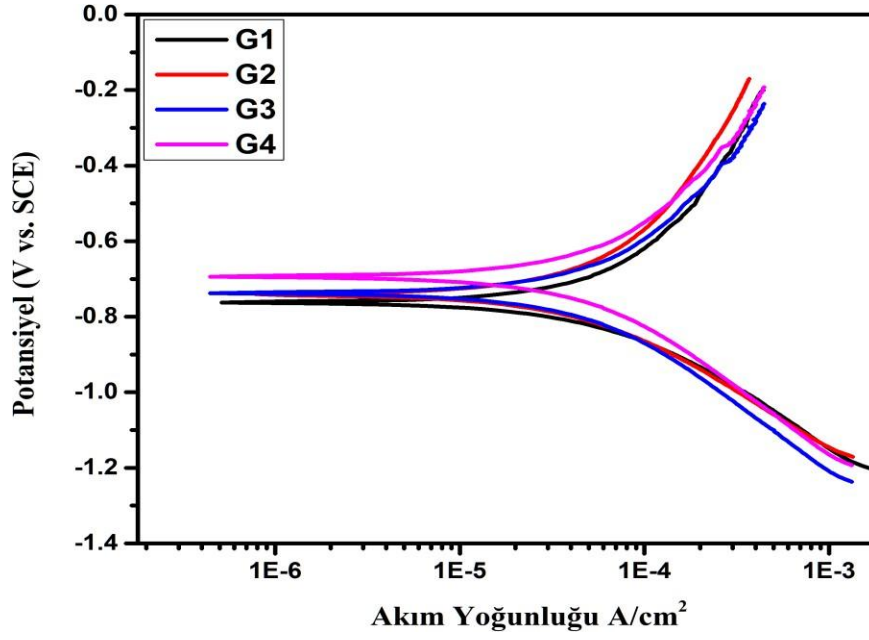
**Şekil 5.8.** Farklı iş çevrimlerinde üretilen Ni-P-GO kompozit kaplamaların aşınma sonrası yüzeyden alınan SEM görüntüleri a)G1, b)G2, c)G3, d)G4.

Farklı iş çevrimlerinde üretilen Ni-P-GO kompozit kaplamalar için, korozyon testleri, oda sıcaklığında, tipik bir üç elektrotlu hücre (çalışma elektrodu olarak kompozit kaplama, karşı elektrot olarak grafit çubuk ve referans elektrot olarak kalomel elektrodu) kullanılarak, oda sıcaklığında %3,5 NaCl çözeltisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Korozyon hızları, polarizasyon eğrilerinin katodik ve anodik dalları arasında ekstrapolasyon yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 10. 'da Farklı iş çevrimlerinde üretilen Ni-P-GO kompozit kaplamaların tafel eğrileri verilmiştir. Ni-P-GO kompozit kaplamalarına açık devre potansiyeli (OCP) 1 saat olarak ayarlanmıştır. Aşağıda belirtilen Stern – Geary denklemi kullanılarak kaplamaların polarizasyon eğrilerinden korozyon potansiyelleri ( $E_{corr}$ ) ve korozyon akım yoğunluğu ( $I_{corr}$ ) değerleri hesaplanmıştır (denklem 4.2 ve 4.3).

$$i_{corr} = [ \frac{babc}{2,303(ba+bc)} ] * [ 1/R_p ] \quad (5.1)$$

$$R_p = (\Delta E \Delta i) \Delta E \rightarrow 0 \quad (5.2)$$

Verilen eşitlikte anodik ve katodik Tafel eğrileri sırasıyla ba ve bc şeklinde verilmiştir. Buradan alınan sonuçlara göre artan Ton süresi ile kaplama tabakası içerisinde GO takviyesinin hangi oranlarda nüfuz edildiği birlikte değerlendirilmiştir. Tablo 5.1’de ise Tafel eğrisinden hesaplanan korozyon akımı ve korozyon potansiyeli değerleri görülmektedir. Farklı iş çevrimlerinde üretilen Ni-P-GO kompozit kaplamalar için belirtilen kaplamalarının SCE’ye karşılık olarak korozyon potansiyeli (değerleri) sırasıyla 19.63 mV, 16.41 mV, 15.94mV, ve 10.23 mV olarak bulunmuştur. Bu numuneler içerisinde en düşük korozyon oranına sahip numune en yüksek Ton süresinde elde edilmiştir. Korozyon oranı bu numune için düşmüştür. Bu korozyon hızındaki ki düşüş birkaç nedene atfedilebilir: Koruyucu film tabakalarının oluşması ve buna bağlı olarak yüzeyin sıvı ile temas anında koruyucu bir etki oluşturması en temel sebeptir. Bununla birlikte, bu koruyucu film aşındığında çatlayacak ve sıyrılacaktır. Daha sonra yeniden pasivasyon nedeniyle kopan kaplama tabakası sonrası ortaya çıkan metal üzerinde yeniden koruyucu film tabaka oluşmaya başlayacaktır. Polarizasyon eğrilerinden hareketle akım yoğunluğunun en düşük değerinin ile en yüksek Ton süresine sahip olan numune G4’e ait olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. GO partiküllerinin hacimce kaplama tabakasında daha fazla bulunması kaplamaya yüksek bir antikorozyon özelliği katmıştır. Bunun sebebi GO’nun bal peteği katmanlarının alt tabakaya sağlamış olduğu korumadır ve bu azalan korozyon oranının açıklanmasında atfedilebilecek bir diğer nedendir. Bu bal peteği yapısı sayesinde iyon transferi geciktirilir ve bu doğrultuda korozyon akım yoğunluğu (I<sub>corr</sub>) değerinde bir azalma, korozyon potansiyelinde ise pozitif yöne doğru bir kayma meydana gelir. GO tabakası, yüzeye iyonik bir bariyer (anodik) etkisi yapar ancak korozyon oranında meydana gelen azalmada baskın faktör metalik iyonlaşma kinetiğinde meydana gelen azalmadır. Bu sonuçlar Kirkland ve ark. araştırmasında belirtilmiş ve benzer bir eğilime rastlanmıştır [186].



**Şekil 5.9.** Farklı iş çevrimlerinde üretilen Ni-P-GO kompozit kaplamaların aşınma sonrası yüzeyden alınan SEM görüntüleri.

**Tablo 5.1.** Akımlı yöntemle üretilen Ni-P-GO kompozit kaplamalara ait farklı iş çevrimlerinde üretilen kaplamaların mpy(inç/yıl) cinsinden korozyon oranları tablosu.

Numune	Korozyon Oranı(mpy)
G1	19.63
G2	16.41
G3	15.94
G4	10.23



## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

1. Artan Ton süresi ile yapıda oluşan tanelerin boyutlarında küçülmeler meydana gelmiştir. Burada etkili olan mekanizma yapıya daha fazla GO parçacıklarının nüfuz etmesidir. Nüfuz eden GO oranı arttıkça nikel tanelerinin çekirdeklenmesi için gerekli olan çekirdekleyici alan sayısını arttıracaktır.
2. Artan Ton süresi ile birlikte sertlik değeri en yüksek Ton süresine sahip olannumune için 592HV olarak elde edilmiştir. Literatüre bakıldığı zaman bu sonuçlar geleneksel olarak üretilen akımlı Ni-P kaplamalarla uyumludur.
3. Kaplama yüzeyinin pürüzlü olmasına rağmen GOin homojen dağılması, GO malzemesinin hem yük taşıma hem de yağlama etkisini geliştirdiğine inanılmaktadır. Sürtünme katsayısındaki düşüşün diğer nedeni, yalnızca nikel matrisindeki ilave edilen grafenoksidin yüksek miktarı ve üniform dağılımına değil, aynı zamanda nikel kaplama ile aşındırıcı bilye yüzey arasındaki arayüzeyde oluşan yağlayıcı film tabakasına da bağlanabilir. Kayma sırasında, kararlı ve düzgün dağılmış GO, aşınmış yüzey üzerinde sürekli ve homojen bir film tabakası oluşumuna bu da kesme kuvvetlerinin azalmasına ve böylece daha düşük bir sürtünme katsayısına neden olur.
4. En iyi aşınma özelliklerine sahip kaplama, % 80 iş çevrimi şartlarında üretilen numunede elde edilmiştir. Aşınma davranışının geliştirilmesinin diğer nedeni, GOin yüksek sertliği, kaplama tabakasında oluşturduğu dispersiyon sertleştirme etkisinden dolayı kompozit kaplamaların sertliğinde artış da söylenebilir.
5. Aşınma yüzeyinde plastik deformasyonun azalması sonucu çatlak oluşumu gözlenmemiştir. GOin kaplama içinde homojen dağılması ile matrise gelen yük, takviye fazı tarafından taşınarak kompozit kaplamanın aşınma hızını düşürmüştür.
6. GO partiküllerinin hacimce kaplama tabakasında daha fazlabulunması kaplamaya yüksek bir antikorozyon özelliği katmıştır. Bunun sebebi GO'nun

bal peteği katmanlarının alt tabakaya sağlamış olduğu korumadır ve bu azalan korozyon oranının açıklanmasında atfedilebilecek bir diğer nedendir. Bu bal peteği yapısı sayesinde iyon transferi geciktirilir ve bu doğrultuda korozyon akım yoğunluğu (I<sub>corr</sub>) değerinde bir azalma, korozyon potansiyelinde ise pozitif yöne doğru bir kayma meydana gelir. GO tabakası, yüzeye iyonik birbariyer (anodik) etkisi yapar ancak korozyon oranında meydana gelen azalmada baskın faktör metalik iyonlaşma kinetiğinde meydana gelen azalmadır.

## KAYNAKLAR

- [1] Dini JW: *Met. Finish.*, 1963, 61, (7), 52–58.
- [2] Bakhvalov GT: ‘New technology in electrodeposition of metals – current reversal in electroplating’, 46–51; 1966, Moscow, Metallurgia Publishing House.
- [3] Lamb VA, Johnson E, Valentine DR: *J. Electrochem. Soc.*, 1970, 9, 291C–318C.
- [4] Puipe JCI, Leaman F: ‘Theory and practice of pulse plating’, 1st edn; 1986, Orlando, FL, AESF.
- [5] Kelly JJ, Braddey PE, Landolt D: *J. Electrochem.*, 2000, 147, 2975.
- [6] Farr JPG: *Trans. Inst. Met. Finish.*, 2008, 86, (2), 83–86 [Taylor & Francis Online],
- [7] Farr JPG: *Trans. Inst. Met. Finish.*, 2010, 88, (5), 262–265.
- [8] Low, C.T.J.; Wills, R.G.A.; Walsh, F.C. Electrodeposition of composite coatings containing nanoparticles in a metal deposit. *Surf. Coat. Technol.* 2006, 201, 371–383.
- [9] Walsh, F.C. A review of the electrodeposition of metal matrix composite coatings by inclusion of particles in a metal layer: An established and diversifying technology. *Trans. IMF* 2014, 92, 83–98.
- [10] Tseluikin, V.N.; Koreshkova, A.A. Deposition of zinc-carbon nanotube composite coatings in the pulse-reverse mode. *Russ. J. Appl. Chem.* 2014, 87, 1251–1253.
- [11] Tseluikin, V.N.; Solov’ova, N.D.; Gun’kin, I.F. Electrodeposition of nickel-fullerene C60 composition coatings. *Prot. Met.* 2007, 43, 388–390.
- [12] Giannopoulos, F.; Chronopoulou, N.; Bai, J.; Zhao, H.; Pantelis, D.; Pavlatou, E.A.I.; Karatonis, A. Nickel/MWCNT-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> electrochemical co-deposition: Structural properties and mechanistic aspects. *Electrochim. Acta* 2016, 207, 76–86.
- [13] Hatipoglu, G.; Kartal, M.; Uysal, M.; Cetinkaya, T.; Akbulut, H. The effect of sliding speed on the wear behaviour of pulse electro co-deposited Ni/MWCNT nanocomposite coatings. *Tribol. Int.* 2016, 98, 59–73.
- [14] Mosallanejad, M.H.; Shafyeyi, A.; Akhavan, S. Simultaneous co-deposition of SiC and CNT into the Ni coating. *Can. Metall. Q.* 2016, 55, 147–155.
- [15] Tseluikin, V.N.; Chubenko, I.S.; Gun’kin, I.F.; Pankst’yanov, A.Y. Colloidal dispersion of fullerene C60 free of organic solvents. *Russ. J. Appl. Chem.* 2006, 79, 325–326.
- [16] Tseluikin, V.N. Electrodeposition and properties of composite coatings modified by fullerene C60. *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.* 2017, 53, 433–436.

- [17] Makarova, I.; Dobryden, I.; Kharitonov, D.; Kasach, A.; Ryl, J.; Repo, E.; Vuorinen, E. Nickel-nanodiamond coatings electrodeposited from tartrate electrolyte at ambient temperature. *Surf. Coat. Technol.* 2019, 380, 125063.
- [18] Gyawali, G.; Joshi, B.; Tripathi, K.; Lee, S.W. Effect of ultrasonic nanocrystal surface modification on properties of electrodeposited Ni and Ni-SiC composite coatings. *J. Mater. Eng. Perform.* 2017, 26, 4462–4469.
- [19] Lanzutti, A.; Lekka, M.; de Leitenburg, C.; Fedrizzi, L. Effect of pulse current on wear behaviour of Ni matrix micro- and nano-SiC composite coatings at room and elevated temperature. *Tribol. Int.* 2019, 132, 50–61.
- [20] Legkaya, D.A.; Solov'eva, N.D.; Yakovlev, A.V. Physicomechanical properties of nickel coating deposited from sulfate nickel plating electrolyte using preliminary underpotential deposition. *Russ. J. Appl. Chem.* 2017, 90, 1454–1458.
- [21] Tseluikin, V.N.; Vasilenko, E.A. Electrodeposition and properties of composite coatings based on nickel. *Russ. J. Appl. Chem.* 2011, 84, 2005–2007.
- [22] Nayana, O.; Venkatesha, T.V. Effect of ethyl vanillin of ZnNi alloy electrodeposition and its properties. *Bull. Mater. Sci.* 2014, 37, 1137–1146.
- [23] Torabinejad, V.; Aliofkhaezai, M.; Assareh, S.; Allahyarzadeh, M.H.; Sabour Rouhaghdam, A. Electrodeposition of Fe-Ni alloys composites, and nano coatings: A review. *J. Alloys Compd.* 2017, 691, 841–859.
- [24] Tseluikin, V.N.; Koreshkova, A.A. Pulsed Electrodeposition of Composite Coatings Based on Zinc–Nickel Alloy. *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.* 2018, 54, 453–456.
- [25] Rahmani, H.; Aliofkhaezai, M.; Karimzadeh, A. Effect of frequency and duty cycle on corrosion and wear resistance of functionally graded Zn-Ni nanocomposite coating. *Can. Metall. Q.* 2018, 57, 99–108.
- [26] Beltowska-Lehmana, E.; Bigosa, A.; Indykab, P.; Chojnackaa, A.; Drewienkiewicz, A.; Zimowski, S.; Kotd, M.; Szczerbaa, M.J. Optimisation of the electrodeposition process of Ni-W/ZrO<sub>2</sub> nanocomposites. *J. Electroanal. Chem.* 2018, 813, 39–51.
- [27] Yakovlev, A.V.; Yakovleva, E.V.; Tseluikin, V.N.; Krasnov, V.V.; Mostovoy, A.S.; Rakhmetulina, L.A.; Frolov, I.N. Electrochemical synthesis of multilayer graphene oxide by anodic oxidation of disperse graphite. *Russ. J. Electrochem.* 2019, 55, 1196–1202.
- [28] Chang, L.M.; Chen, D.; Liu, J.H.; Zhang, R.J. Effect of different plating modes on microstructure and corrosion resistance of Zn-Ni alloy coatings. *J. Alloys Compd.* 2009, 479, 489–493.
- [29] Pinate, S.; Leisner, P.; Zanella, C. Electrocodeposition of nano-SiC particles by pulse-reverse under an adapted waveform. *J. Electrochem. Soc.* 2019, 166, D804–D809.
- [30] A.K. Geim, K.S. Novoselov The rise of graphene *Nat. Mater.*, 6 (2007), pp. 183-191 [View PDF](#)
- [31] Your institution provides access to this article. [Google Scholar](#)

- [32] K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S.V. Dubonos, I.V. Grigorieva, A.A. Firsov Electric field effect in atomically thin carbon films *Science*, 306 (2004), pp. 666-669
- [33] A.A. Balandin, S. Ghosh, W. Bao, I. Calizo, D. Teweldebrhan, F. Miao, C.N. Lau Superior thermal conductivity of single-layer graphene *Nano Lett*, 8 (2008), pp. 902-907.
- [34] X. Huang, X. Qi, F. Boey, H. Zhang Graphene-based composites *Chem. Soc. Rev.*, 41 (2012), pp. 666-686.
- [35] C. Lee, X. Wei, J.W. Kysar, J. Hone Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene *Science*, 321 (2008), pp. 385-388.
- [36] I.A. Ovid'ko Metal-graphene nanocomposites with enhanced mechanical properties: a review *Rev. Adv. Mater. Sci.*, 38 (2014), pp. 190-200.
- [37] J. Hwang, T. Yoon, S.H. Jin, J. Lee, T.S. Kim, S.H. Hong, S. Jeon Enhanced mechanical properties of graphene/copper nanocomposites using a molecular-level mixing process *Adv. Mater.*, 25 (2013), pp. 6724-6729.
- [38] T.S. Koltsova, L.I. Nasibulina, I.V. Anoshkin, V.V. Mishin, E.I. Kauppinen, O.V. Tolochko, A.G. Nasibulin New hybrid copper composite materials based on carbon nanostructures *J. Mater. Sci. Eng. B.*, 2 (2012), pp. 240-246.
- [39] G. Dai and L. Mishnaevsky, *Comput. Mater. Sci.*, 2014, 95, 684–692.
- [40] F.C. Walsh, C. Ponce De Leon A review of the electrodeposition of metal matrix composite coatings by inclusion of particles in a metal layer: an established and diversifying technology *Trans. Inst. Met. Finish.*, 92 (2014), pp. 83-98.
- [41] F.C. Walsh, S. Wang, N. Zhou The electrodeposition of composite coatings: diversity, applications and challenges *Curr. Opin. Electrochem.*, 20 (2020), pp. 8-19.
- [42] S.H.M. Anijdan, M. Sabzi, M.R. Zadeh, M. Farzam The influence of pH, rotating speed and Cu content reinforcement nano-particles on wear/corrosion response of Ni-P-Cu nano-composite coatings *Tribol. Int.*, 127 (2018), pp. 108-121.
- [43] M. Sabzi, S.H.M. Anijdan, M. Roghani Zadeh, M. Farzam The effect of heat treatment on corrosion behaviour of Ni-P-3 gr/lit Cu nano-composite coating *Can. Metall. Q.*, 57 (2018), pp. 350-357.
- [44] J. Reid Copper electrodeposition: principles and recent progress *Jpn. J. Appl. Phys.*, 40 (2001), pp. 2650-2657.
- [45] S. Shanmugasamy, K. Balakrishnan, A. Subasri, S. Ramalingam, A. Subramania Development of CeO<sub>2</sub> nanorods reinforced electrodeposited nickel nanocomposite coating and its tribological and corrosion resistance properties *J. Rare Earths.*, 36 (2018), pp. 1319-1325.
- [46] Joseph, M. Narayanasamy, B. Kirubasankar, S. Angaiah Development of MoS<sub>2</sub> nanosheets embedded nickel composite coating and its mechanical properties *ES Mater. Manuf.*, 2 (2018), pp. 2-8.

- [47] C. Subramaniam, T. Yamada, K. Kobashi, A. Sekiguchi, D.N. Futaba, M. Yumura, K. Hata One hundred fold increase in current carrying capacity in a carbon nanotube–copper composite *Nat. Commun.*, 4 (2202) (2013), pp. 1-7.
- [48] K. Jagannadham Thermal conductivity of copper-graphene composite films synthesized by electrochemical deposition with exfoliated graphene platelets *Metall. Mater. Trans. B.*, 43B (2012), pp. 316-324.
- [49] G. Song, Z. Wang, Y. Gong, Y. Yang, Q. Fu, C. Pan Direct determination of graphene amount in electrochemical deposited Cu-based composite foil and its enhanced mechanical property *Adv*, 7 (2016), pp. 1735-1742.
- [50] G. Song, Y. Yang, Q. Fu, C. Pan Preparation of Cu-graphene composite thin foils via DC electrodeposition and its optimal conditions for highest properties *J. Electrochem. Soc.*, 164 (2017), pp. D652-D659.
- [51] T. Wang, R. Zhao, K. Zhan, L. Bao, Y. Zhang, Z. Yang, Y. Yan, B. Zhao, J. Yang Preparation of electro-reduced graphene oxide/copper composite foils with simultaneously enhanced thermal and mechanical properties by DC electro-deposition method *Mater. Sci. Eng. A.*, 805 (2021), Article 140574.
- [52] Torrents, H. Yang and F. A. Mohamed, *Metall. Mater. Trans. A*, 2010, 41, 621–630.
- [53] H. W. Höppel and M. Göken, *Nanostructured Metals and Alloys*, 2011 Search.
- [54] S. Suresh, A. Mortensen and A. Needleman, *Fundamentals of metal-matrix composites*, 1993 Search.
- [55] J. Reid, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001, 40, 2650–2657.
- [56] C. Lupi and D. Pilone, *Miner. Eng.*, 2001, 14, 1403–1410.
- [57] S. Rashmi, L. Elias and A. Chitharanjan Hegde, *Eng. Sci. Technol. Int. J.*, 2017, 20, 1227–1232 Search.
- [58] M. R. H. de Almeida, E. P. Barbano, M. F. de Carvalho, P. C. Tulio and I. A. Carlos, *Appl. Surf. Sci.*, 2015, 333, 13–22.
- [59] J. Musil, *Surf. Coat. Technol.*, 2000, 125, 322–330.
- [60] P. Holubar, M. Jilek and M. Sima, *Surf. Coat. Technol.*, 2000, 133–134, 145–151.
- [61] R. Andrievski, *Mater. Trans.*, 2001, 42, 1471–1473.
- [62] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, M. I. Katsnelson, I. V. Grigorieva, S. V. Dubonos and A. A. Firsov, *Nature*, 2005, 438, 197–200.
- [63] C. Lee, X. Wei, J. W. Kysar and J. Hone, *Science*, 2008, 321, 385–388.
- [64] D. G. Papageorgiou, I. A. Kinloch and R. J. Young, *Prog. Mater. Sci.*, 2017, 90, 75–127.
- [65] J. F. Dai, G. J. Wang, L. Ma and C. K. Wu, *Rev. Adv. Mater. Sci.*, 2015, 40, 60–71.
- [66] P. Govindaraj, B. Fox, P. Aitchison and N. Hameed, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2019, 58, 17106–17129.

- [62] H. Porwal, S. Grasso and M. J. Reece, *Adv. Appl. Ceram.*, 2013, 112, 443–454.
- [63] Z. Hu, G. Tong, D. Lin, C. Chen, H. Guo, J. Xu and L. Zhou, *Mater. Sci. Technol.*, 2016, 32, 930–953.
- [64] J. R. Potts, D. R. Dreyer, C. W. Bielawski and R. S. Ruoff, *Polymer*, 2011, 52, 5–25.
- [65] H. Chang and H. Wu, *Energy Environ. Sci.*, 2013, 6, 3483–3507.
- [66] G. Yasin, M. Arif, T. Mehtab, M. Shakeel, M. A. Mushtaq, A. Kumar, T. A. Nguyen, Y. Slimani, M. T. Nazir and H. Song, *Inorg. Chem. Front.*, 2020, 7, 402–410.
- [67] S. Ullah, G. Yasin, A. Ahmad, L. Qin, Q. Yuan, A. U. Khan, U. A. Khan, A. U. Rahman and Y. Slimani, *Inorg. Chem. Front.*, 2020, 7, 1750–1761.
- [68] H. G. P. Kumar and M. A. Xavior, *Procedia Eng.*, 2014, 97, 1033–1040.
- [69] C. M. P. Kumar, T. V Venkatesha and R. Shabadi, *Mater. Res. Bull.*, 2013, 48, 1477–1483.
- [70] H. Algul, M. Tokur, S. Ozcan, M. Uysal, T. Cetinkaya, H. Akbulut and A. Alp, *Appl. Surf. Sci.*, 2015, 359, 340–348.
- [71] N. Khobragade, K. Sikdar, B. Kumar, S. Bera, D. Roy Mechanical and electrical properties of copper-graphene nanocomposite fabricated by high pressure torsion *J. Alloys Compd.*, 776 (2019), pp. 123-132.
- [72] Y. Liu, Y. Liu, Q. Zhang, C. Zhang, J. Wang, Y. Wu, P. Han, Z. Gao, L. Wang and X. Wu, *Mater. Sci. Eng. A*, 2018, 727, 133–139.
- [73] Z. Ren, N. Meng, K. Shehzad, Y. Xu, S. Qu, B. Yu and J. K. Luo, *Nanotechnology*, 2015, 26, 065706.
- [74] D. Kuang, L. Xu, L. Liu, W. Hu and Y. Wu, *Appl. Surf. Sci.*, 2013, 273, 484–490.
- [75] F. Wang, L. T. Drzal, Y. Qin and Z. Huang, *J. Mater. Sci.*, 2015, 50, 1082–1093.
- [76] S. Singh, S. Samanta, A. K. Das and R. R. Sahoo, *Surfaces and Interfaces*, 2018, 12, 61–70.
- [77] Y. Liu, Y. Liu, Q. Zhang, C. Zhang, J. Wang, Y. Wu, P. Han, Z. Gao, L. Wang and X. Wu, *Mater. Sci. Eng. A*, 2018, 727, 133–139.
- [78] G. Yasin, M. Arif, M. N. Nizam, M. Shakeel, M. A. Khan, W. Q. Khan, T. M. Hassan, Z. Abbas, I. Farahbakhsh and Y. Zuo, *Adv.*, 2018, 8, 20039–20047.
- [79] G. Yasin, M. Arif, M. Shakeel, Y. Dun, Y. Zuo, W. Q. Khan, Y. Tang, A. Khan and M. Nadeem, *Adv. Eng. Mater.*, 2018, 20, 1701166.
- [80] G. Yasin, M. A. Khan, M. Arif, M. Shakeel, T. M. Hassan, W. Q. Khan, R. M. Korai, Z. Abbas and Y. Zuo, *J. Alloys Compd.*, 2018, 755, 79–88.
- [81] G. Yasin, M. J. Anjum, M. U. Malik, M. A. Khan, W. Q. Khan, M. Arif, T. Mehtab, T. A. Nguyen, Y. Slimani, M. Tabish, D. Ali and Y. Zuo, *Diam. Relat. Mater.*, 2020, 104, 107763.

- [82] B. Szeptycka, A. Gajewska-midzialek and T. Babul, *J. Mater. Eng. Perform.*, 2016, 25, 3134–3138.
- [83] G. Yasin, M. Arif, M. N. Nizam, M. Shakeel, M. A. Khan, W. Q. Khan, T. M. Hassan, Z. Abbas, I. Farahbakhsh and Y. Zuo, *Adv.*, 2018, 8, 20039–20047.
- [84] G. Yasin, M. Arif, M. Shakeel, Y. Dun, Y. Zuo, W. Q. Khan, Y. Tang, A. Khan and M. Nadeem, *Adv. Eng. Mater.*, 2018, 20, 1701166.
- [85] G. Yasin, M. A. Khan, M. Arif, M. Shakeel, T. M. Hassan, W. Q. Khan, R. M. Korai, Z. Abbas and Y. Zuo, *J. Alloys Compd.*, 2018, 755, 79–88.
- [86] G. Yasin, M. J. Anjum, M. U. Malik, M. A. Khan, W. Q. Khan, M. Arif, T. Mehtab, T. A. Nguyen, Y. Slimani, M. Tabish, D. Ali and Y. Zuo, *Diam. Relat. Mater.*, 2020, 104, 107763.
- [87] G. Dai and L. Mishnaevsky, *Comput. Mater. Sci.*, 2014, 95, 684–692.
- [88] F. Wang, L. T. Drzal, Y. Qin and Z. Huang, *J. Mater. Sci.*, 2015, 50, 1082–1093.
- [89] H. M. Chong, S. J. Hinder and A. C. Taylor, *J. Mater. Sci.*, 2016, 51, 8764–8790
- [90] C. Wang, X. Bai, Z. Guo, C. Dong, C. Yuan A strategy that combines a hydrogel and graphene oxide to improve the water-lubricated performance of ultrahigh molecular weight polyethylene Compos A Appl Sci Manuf, 141 (2021), Article 106207.
- [91] Z. Zhou, X. Ji, S. Pourhashem, J. Duan, B. Hou Investigating the effects of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Graphene oxide nanohybrids on corrosion resistance of waterborne epoxy coatings Compos A Appl Sci Manuf, 149 (2021), Article 106568.
- [92] K. Yang, H. Ma, S. Cao, X. Li, A. Li, Z. Cao Analysis of friction interfaces with sinusoidal microchannels and the hybrid lubrication mechanisms of a tribo-film Appl Surf Sci, 525 (2020), Article 146502
- [93] K. Yang, F. Zhang, Y. Chen, H. Zhang, B. Xiong, H. Chen Recent progress on carbon-based composites in multidimensional applications Compos A Appl Sci Manuf, 157 (2022), Article 106906
- [94] K. S. Novoselov, V. I. Fal'ko, L. Colombo, P. R. Gellert, M. G. Schwab, K. Kim A roadmap for graphene Nature, 490 (7419) (2012), pp. 192-200
- [95] V. Jain, A. Bisht, S. Jaiswal, K. Dasgupta, D. Lahiri Assessment of Interfacial Interaction in Graphene Nanoplatelets and Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Matrix Multiscale Composites and Its Effect on Mechanical Behavior J Mater Eng Perform, 30 (12) (2021), pp. 8913-8925
- [96] P. Wang, M. Jian, M. Wu, C. Zhang, C. Zhou, X. Ling, et al. Highly sandwich-structured silver nanowire hybrid transparent conductive films for flexible transparent heater applications Compos A Appl Sci Manuf, 159 (2022), Article 106998
- [97] P. Shende, N. Pathan Potential of carbohydrate-conjugated graphene assemblies in biomedical applications Carbohydr Polym, 255 (2021), Article 117385



- [98] C. Lee, X. Wei, J. W. Kysar, J. Hone Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene *Science*, 321 (5887) (2008), p. 385
- [99] S. Bae, H. Kim, Y. Lee, X. Xu, J. S. Park, Y. Zheng, et al. Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes *Nat Nanotechnol*, 5 (8) (2010), pp. 574-578
- [100] K. I. Bolotin, K. J. Sikes, Z. Jiang, M. Klima, G. Fudenberg, J. Hone, et al. Ultrahigh electron mobility in suspended graphene *Solid State Commun*, 146 (9) (2008), pp. 351-355
- [101] M. Yang, Y. Liu, T. Fan, D. Zhang Metal-graphene interfaces in epitaxial and bulk systems: A review *Prog Mater Sci*, 110 (2020), Article 100652
- [102] A. A. Balandin, S. Ghosh, W. Bao, I. Calizo, D. Teweldebrhan, F. Miao, et al. Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene *Nano Lett*, 8 (3) (2008), pp. 902-907
- [103] M. D. Stoller, S. Park, Y. Zhu, J. An, R. S. Ruoff Graphene-Based Ultracapacitors *Nano Lett*, 8 (10) (2008), pp. 3498-3502
- [104] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, et al. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films *Science*, 306 (5696) (2004), p. 666
- [105] Y. Liu, X. Ge, J. Li Graphene lubrication. *Applied Mater Today*, 20 (2020), Article 100662
- [106] C. Nie, L. Ma, S. Li, X. Fan, Y. Yang, C. Cheng, et al. Recent progresses in graphene based bio-functional nanostructures for advanced biological and cellular interfaces *Nano Today*, 26 (2019), pp. 57-97
- [107] C. -F. Cao, W. -J. Liu, H. Xu, K. -X. Yu, L. -X. Gong, B. -F. Guo, et al. Temperature-induced resistance transition behaviors of melamine sponge composites wrapped with different graphene oxide derivatives *J Mater Sci Technol*, 85 (2021), pp. 194-204
- [108] L. Jiao, X. Wang, G. Diankov, H. Wang, H. Dai Facile synthesis of high-quality graphene nanoribbons *Nat Nanotechnol*, 5 (5) (2010), pp. 321-325
- [109] L. Jiao, L. Zhang, X. Wang, G. Diankov, H. Dai Narrow graphene nanoribbons from carbon nanotubes *Nature*, 458 (7240) (2009), pp. 877-880
- [110] Y. Zhao, H. Hao, T. Song, X. Wang, C. Li, W. Li MnO<sub>2</sub>-graphene based composites for supercapacitors: Synthesis, performance and prospects *J Alloy Compd*, 914 (2022), Article 165343
- [111] Y. Li, Q. Wang, S. Wang A review on enhancement of mechanical and tribological properties of polymer composites reinforced by carbon nanotubes and graphene sheet: Molecular dynamics simulations *Compos B Eng*, 160 (2019), pp. 348-361
- [112] R. Kumar, S. Sahoo, E. Joanni, R. K. Singh, K. Maegawa, W. K. Tan, et al. Heteroatom doped graphene engineering for energy storage and conversion *Mater Today*, 39 (2020), pp. 47-65

- [113] M. E. Berrio, A. Oñate, A. Salas, K. Fernández, M. F. Meléndrez Synthesis and applications of graphene oxide aerogels in bone tissue regeneration: a review *Mater Today Chem*, 20 (2021), Article 100422
- [114] Malik, R. Tauler Exploring the interaction between O<sub>3</sub> and NO<sub>x</sub> pollution patterns in the atmosphere of Barcelona, Spain using the MCR-ALS methods *Sci. Total Environ.*, 517 (2015), p. 151
- [115] R. Atkinson Atmospheric chemistry of VOCs and NO<sub>x</sub> *Atmos. Environ.*, 34 (2000), pp. 2063-2101
- [116] S. W. Lee, W. Lee, Y. Hong, G. Lee, D. S. Yoon Recent advances in carbon material-based NO<sub>2</sub> gas sensors *Sens. Actuators, B*, 255 (2018), pp. 1788-1804
- [117] J. Z. Ou, W. Ge, B. Carey, T. Daeneke, A. Rotbart, W. Shan, Y. Wang, Z. Fu, A. F. Chrimes, W. Wiodarski, S. P. Russo, Y. X. Li, K. Kalantar-zadeh Physisorption based charge transfer in two-dimensional SnS<sub>2</sub> for selective and reversible NO<sub>2</sub> gas sensing *ACS Nano*, 9 (2015), pp. 10313-10323
- [118] J. A. Bernstein, N. Alexis, C. Barnes, I. L. Bernstein, A. Nel, D. Peden, et al. Health effects of air pollution *J. Allergy Clin. Immunol.*, 114 (2004), pp. 1116-1123
- [119] M. Kaur, N. Jain, K. Sharma, S. Bhattacharya, M. Roy, A. K. Tyagi, S. K. Gupta, J. V. Yakhmi Room-temperature H<sub>2</sub>S gas sensing at ppb level by single crystal In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> whiskers *Sens. Actuators, B*, 133 (2008), pp. 456-461
- [120] S. G. Chatterjee, S. Chatterjee, A. K. Ray, A. K. Chakraborty Graphene–metal oxide nanohybrids for toxic gas sensor: a review *Sens. Actuators, B*, 221 (2015), pp. 1170-1181
- [121] J. E. Colman Lerner, E. Y. Sanchez, J. E. Sambeth, A. A. Porta Characterization and health risk assessment of VOCs in occupational environments in Buenos Aires, Argentina *Atmos. Environ.*, 55 (2012), pp. 440- 447
- [122] G. Li, Z. Zhang, H. Sun, J. Chen, T. An, B. Li Pollution profiles, health risk of VOCs and biohazards emitted from municipal solid waste transfer station and elimination by an integrated biological-photocatalytic flow system: a pilot-scale investigation *J. Hazard Mater.*, 250–251 (2013), pp. 147-154
- [123] H. Guo, S. C. Lee, L. Y. Chan, W. M. Li Risk assessment of exposure to volatile organic compounds in different indoor environments *Environ. Res.*, 94 (2004), pp. 57-66
- [124] D. Juang, C. Lee, W. Chen, C. Yuan Do the VOCs that evaporate from a heavily polluted river threaten the health of riparian residents? *Sci. Total Environ.*, 408 (2010), pp. 4524-4531
- [125] X. Liu, S. Chang, H. Liu, S. Hu, D. Zhang, H. Ning A survey on gas sensing technology *Sensors*, 12 (2012), pp. 9635-9665
- [126] J. H. Kim, A. Mirzaei, H. W. Kim, S. S. Kim Low power-consumption CO gas sensors based on Au-functionalized SnO<sub>2</sub>-ZnO core-shell nanowires *Sens. Actuators, B*, 267 (2018), pp. 597-607

- [127] R. López, E. Viguera-Santiago, A. R. Vilchis-Nestor, V. H. Castrejón-Sánchez, M. A. Camacho-López, N. Torres-Gómez Ether gas-sensor based on Au nanoparticles-decorated ZnO microstructures *Results Phys*, 7 (2017), pp. 1818-1823
- [128] S. M. Shang, L. Li, X. M. Yang, Y. Y. Wei Polymethylmethacrylate-carbon nanotubes composites prepared by microemulsion polymerization for gas sensor *Compos. Sci. Technol.*, 69 (2009), pp. 1156-1159
- [129] V. S. Bhati, M. Hojamberdiev, M. Kumar Enhanced sensing performance of ZnO nanostructures-based gas sensors: a review *Energy Rep.*, 6 (2020), pp. 46-62
- [130] F. Chao, Y. H. Chen, S. M. Xing, D. L. Zhang, W. L. Shen Facile fabrication of ZnO/C nanoporous fibers and ZnO hollow spheres for high performance gas sensor *Sens. Actuators, B*, 298 (2019), p. 126927
- [131] Q. Zhou, W. Zeng, W. G. Chen, L. N. Xu, R. Kumar, A. Umar High sensitive and low-concentration sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>) gas sensor application of heterostructure NiO-ZnO nanodisks *Sens. Actuators, B*, 298 (2019), p. 126870
- [132] Chang, C. H. ; Huang, T. C. ; Peng, C. W. ; Yeh, T. C. ; Lu, H. I. ; Hung, W. I.; Weng, C. J.; Yang, T. I. ; Yeh, J. M. Novel anticorrosion coatings prepared from polyaniline/graphene composites. *Carbon* 2012, 50, 5044–5051.
- [133] Li, J. ; Cui, J. ; Yang, J. ; Ma, Y. ; Qiu, H. ; Yang, J. Silanized graphene oxide reinforced organofunctional silane composite coatings for corrosion protection. *Prog. Org. Coat.* 2016, 99, 443–451.
- [134] Yu, Y. H. ; Lin, Y. Y. ; Lin, C. H. ; Chana, C. C. ; Huang, Y. C. High-performance polystyrene/graphene-based nanocomposites with excellent anti-corrosion properties. *Polym. Chem.* 2014, 5, 535–550.
- [135] Chang, K. C. ; Ji, W. F. ; Lai, M. C. ; Hsiao, Y. R. ; Hsu, C. H. ; Chuang, T. L.; Wei, H. ; Yeh, J. M. ; Liu, W. R. Synergistic effects of hydrophobicity and gas barrier properties on the anticorrosion property of PMMA nanocomposite coatings embedded with graphene nanosheets. *Polym. Chem.* 2014, 5, 1049–1056.
- [136] Jiang, F. ; Zhao, W. ; Wu, Y. ; Dong, J. ; Zhou, K. ; Lu, G. ; Pu, J. Anti-corrosion behaviors of epoxy composite coatings enhanced via graphene oxide with different aspect ratios. *Prog. Org. Coat.* 2019, 127, 70–79.
- [137] Liu, S. ; Gu, L. ; Zhao, H. ; Chen, J. ; Yu, H. Corrosion resistance of graphene-reinforced waterborne epoxy coatings. *J. Mater. Sci. Technol.* 2016, 32, 425–431.
- [138] Tsai, P. Y. ; Chen, T. E. ; Lee, Y. L. Development and characterization of anticorrosion and antifriction properties for high performance polyurethane/graphene composite coatings. *Coatings* 2018, 8, 250.
- [139] Bunch, J. S. ; Verbridge, S. S. ; Alden, J. S. ; van der Zande, A. M. ; Parpia, J. M. ; Craighead, H. G. ; McEuen, P. L. Impermeable atomic membranes from graphene sheets. *Nano Lett.* 2008, 8, 2458–2462.
- [140] Berry, V. Impermeability of graphene and its applications. *Carbon* 2013, 62, 1–10.

- [141] Miao, M. ; Nardelli, M. B. ; Wang, Q. ; Liu, Y. First principles study of the permeability of graphene to hydrogen atoms. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2013, 15, 16132–16137.
- [142] Sun, P. Z. ; Yang, Q. ; Kuang, W. J. ; Stebunov, Y. V. ; Xiong, W. Q. ; Yu, J. ; Nair, R. R. ; Katsnelson, M. I. ; Yuan, S. J. ; Grigorieva, I. V. ; et al. Limits on gas impermeability of graphene. *Nature* 2020, 579, 229–232.
- [143] Cho, J. ; Gao, L. ; Tian, J. ; Cao, H. ; Wu, W. ; Yu, Q. Atomic-scale investigation of graphene grown on Cu foil and the effects of thermal annealing. *ACS Nano* 2011, 5, 3607–3613.
- [144] Chen, S. ; Brown, L. ; Levendorf, M. ; Cai, W. ; Ju, S. Y. ; Edgeworth, J. Oxidation resistance of graphene-coated Cu and Cu/Ni alloy. *ACS Nano* 2011, 5, 1321–1327.
- [145] Prasai, D. ; Tuberquia, J. C. ; Harl, R. R. ; Jennings, G. K. Graphene: Corrosion-inhibiting coating. *ACS Nano* 2012, 6, 1102–1108.

## ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Kubilay KILIÇCI

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2018, Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2023, Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2019-2020 yılları arasında Çelmer Çelik Endüstri A.Ş.'de üretim mühendisi olarak çalıştı.
- 2020 yılında girmiş olduğu Telmetal Soğuk Haddecilik A.Ş.'de İşletme Müdürü olarak halen görev almaktadır.

### TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Cihangir G., Kılıçcı K., Tan S., Algül H., Uysal M., Alp A. (2022 45,135-139 Aralık). Farklı İş Çevrimlerinde Akımlı Yöntemle Üretilen Ni-P-GO Kaplamaların Özelliklerinin İncelenmesi- DergiPark

### DiĞER ESERLER: