



BİLECİK ŞEYH EDEBALI
ÜNİVERSİTESİ

**BİLECİK
ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine ve İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**DÜŞÜK KARBONLU ÇELİĞİN YÜZEY
ÖZELLİKLERİNİN GRAFEN İÇERİKLİ KOMPOZİT
KAPLAMA İLE İYİLEŞTİRİLMESİ**

**Kemal AYDIN
Yüksek Lisans**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Harun MİNDİVAN**

**BİLECİK, 2019
Ref. No: 10267525**



BİLECİK ŞEYH EDEBALI
ÜNİVERSİTESİ

**BİLECİK
ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine ve İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**DÜŞÜK KARBONLU ÇELİĞİN YÜZEY
ÖZELLİKLERİNİN GRAFEN İÇERİKLİ KOMPOZİT
KAPLAMA İLE İYİLEŞTİRİLMESİ**

**Kemal AYDIN
Yüksek Lisans**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Harun MİNDİVAN**

BİLECİK, 2019



BİLECİK ŞEYH EDEBALI
ÜNİVERSİTESİ

**BİLECİK
SEYH EDEBALI UNIVERSITY**

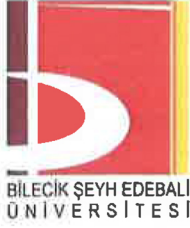
**Institute of Science
Department of Mechanical and Manufacturing Engineering**

**IMPROVEMENT OF SURFACE PROPERTIES OF LOW
CARBON STEEL WITH GRAFEN CONTENT
COMPOSITE COATING**

**Kemal AYDIN
Master's Thesis**

**Thesis Advisor
Prof. Dr. Harun MİNDİVAN**

BİLECİK, 2019



BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS
JÜRİ ONAY FORMU

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun 12/06/2019 tarih ve 30/08 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 27/06/2019 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Kemal AYDIN'ın "Düşük Karbonlu Çeliğin Yüzey Özelliklerinin Grafen İçerikli Kompozit Kaplama ile İyileştirilmesi" başlıklı tez çalışması Makine ve İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak oy birliği/ oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE : Prof. Dr. Harun MİNDİVAN (TEZ DANIŞMANI)

ÜYE: Prof. Dr. Murat BAYDOĞAN (JÜRİ BAŞKANI)

ÜYE: Prof. Dr. Şennur CANDAN

ONAY

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun 12/07/2019 tarih ve ...37...../06..... sayılı kararı.

İMZA/ MÜHÜR



TEŞEKKÜR

Tez hazırlanırken bilgisi, deneyimi, yorumları ile ışık tutan, laboratuvar imkânları ve deneylerin uygulanması konusunda bize çok yardımcı olan, tez danışmanım sayın hocam Prof. Dr. Harun MİNDİVAN' a teşekkür ederim.

Bilecik Şeyh Edebalı Üniversitesi'nde yapılan analizler esnasında katkılarından dolayı Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ferda MİNDİVAN'a teşekkürü borç bilirim.

Bu çalışma Bilecik Şeyh Edebalı Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) birimi tarafından desteklenmiştir (Proje No: 2018-01.BŐEÜ.03-03). Desteklerinden dolayı Bilecik Şeyh Edebalı Üniversitesi BAP birimine teşekkürlerimi sunarım.

Beni yetiştiren ve hayatım boyunca bana destek olan kıymetli annem ve değerli babama Őükranlarımı sunarım.

Ayrıca hayatımın her alanında gösterdiği destek, sabır ve anlayışlarıyla her zaman yanımda hissettiğim değerli eşim Bahar AYDIN'a teşekkür ederim

BEYANNAME

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzu'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada, tez içindeki tüm verileri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun olarak sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmada kullanılmadığını beyan ederim.

...../...../ 2019

Kemal AYDIN

(DÜŞÜK KARBONLU ÇELİĞİN YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN GRAFEN İÇERİKLİ KOMPOZİT KAPLAMA İLE İYİLEŞTİRİLMESİ)

ÖZET

Kompozit kaplamalar üstün özelliklerinden dolayı endüstriyel ve teknolojik alanlarda geniş uygulama alanlarına sahiptir. Mekanik, otomotiv, kâğıt mili, gıda ve imalat endüstrisinde kullanılan ve kullanım alanına göre kalınlığı nm seviyesinden başlayan ve mm seviyesine kadar kalınlığa ulaşan kaplama tabakalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bahsi geçen uygulamalar için üretilecek kaplamalardan üstün mekanik özellikler, yüksek aşınma direnci, yüksek termal kararlılık gibi özellikler istenmektedir. Kompozit kaplamalar bu tür uygulamalar için iyi bir adaydır.

Bu çalışmada St37 çelik altlık üzerine Nikel ve Nikel/Grafen kompozit kaplama tabakaları Doğru Akım (DC), Pulse Akım (PC) ve Pulse Reverse Akım (PRC) olmak üzere üç farklı akım türünde ve farklı grafen miktarlarına bağlı olarak Watt tipi banyo kullanılarak üretilmiştir. Akım yoğunluğunun farklı akım türlerinde üretilen kaplamaların özelliklerine etkileri incelenmiştir. Üretilen kaplamalar taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışınları difraksiyonu (XRD) metodu kullanılarak karakterize edilmiştir. Akım türünün sertlik ve aşınma davranışına etkileri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Nikel; Grafen; Kaplama; Kompozit; Elektrolitik kaplama;

**(IMPROVEMENT OF SURFACE PROPERTIES OF LOW CARBON STEEL
WITH GRAFEN CONTENT COMPOSITE COATING)**

ABSTRACT

Composite coatings have a wide range of applications in industrial and technological fields due to their superior properties. There is a need for coating layers whose use in mechanical, automative, paper shaft, food and manufacturing industry, and thickness starts at nm and reaches up to mm depending on the area of use. Features such as superior mechanical properties, high wear resistance, high thermal stability are required from the coatings to be produced for said applications. Composite coatings are a good candidate for such applications.

In this study, Nickel and Nickel / Graphene composite coating layers on St37 steel substrate were produced by using Watt type bath in three different types of current such as Direct Current (DC), Pulse Current (PC) and Pulse Reverse Current (PRC) depending on different amounts of graphene. The effects of current density on the properties of coatings produced in different current types were investigated. Produced coatings were characterized by scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD) method. The effects of current type on hardness and wear behaviour were investigated.

Key Words: Nickel; Graphene; Coating; Composite; Electrodeposition;

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
TEŞEKKÜR	
BEYANNAME	
ÖZET	I
ABSTRACT	II
İÇİNDEKİLER	III
ÇİZELGELER DİZİNİ	V
ŞEKİLLER DİZİNİ	VI
SİMGELER ve KISALTMALAR	IX
1. GİRİŞ	1
1.1 Elektrokimyasal Kaplama	2
1.1.1 Akımsız kaplama	3
1.1.2 Akımlı kaplama	7
2. ELEKTROLİTİK YÖNTEMLE ÜRETİLEN KOMPOZİT MALZEMELER 11	
2.1. Elektrolitik Kaplama Yöntemi ile Üretilen Ni Alaşımları	11
2.2. Elektrolitik Kaplama Yöntemi ile Üretilen Ni Kompozit Kaplamalar.....	14
2.3. Elektrolitik Kaplama Yöntemi Kullanılarak Üretilmiş Ni-Gr Kompozit Kaplama Özellikleri.....	16
3. MATERYAL ve YÖNTEM	24
3.1. Deney Düzenegi ve Altlıkların Hazırlanması	24
3.2. Ni Elektrolitik Kaplamalar	26
3.3. Ni/Gr Elektrolitik Kompozit Kaplamalar.....	26
3.4. Kaplama Tabakasının Karakterizasyonu.....	27
3.4.1. Optik ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) çalışmaları.....	27
3.4.2. X-ışınları difraktometresi (XRD) çalışmaları.....	27
3.4.3. Mikrosertlik ölçümleri	28
3.4.4. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri	28
3.5. Aşınma Deneyleri.....	28
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	29
4.1. Yapısal Karakterizasyon Sonuçları	29
4.2. Sertlik ve Aşınma Deney Sonuçları	297

5. SONUÇLAR	46
KAYNAKÇA	47
ÖZ GEÇMİŞ.....	

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 1.1. Akımlı ve akımsız nikel kaplamaların karşılaştırılması	5
Çizelge 3.1. Elektrolitik kaplama banyo çalışma koşulları.....	26
Çizelge 3.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan banyo parametreleri	27
Çizelge 3.3. Aşınma deney sistemine ait parametreler	28

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	Akımsız kaplamanın şematik gösterimi.....	4
Şekil 1.2.	Otomotiv sektöründe kullanılan akımsız nikelle kaplanmış bir parça.....	4
Şekil 1.3.	Akımsız nikel kaplanmış bir parça ile, geleneksel yöntemle akımlı nikel kaplanmış parça arasındaki fark	6
Şekil 1.4.	Akımlı kaplamanın şematik gösterimi	7
Şekil 1.5.	Elektrolitik kaplama yöntemi kullanılarak a) DC, b) PC ve c) PRC akım türünde üretilmiş Ni kaplama tabakasının yüzey topografik görüntüsü	9
Şekil 2.1.	Yaygın olarak kullanılan karbon malzemeler	16
Şekil 2.2.	Grafen filmin korozyon ortamındaki bariyer etkisi	17
Şekil 2.3.	Metallerin korozyonuna neden olan grafen film kusurları.....	18
Şekil 2.4.	(a) Saf Ni ve (b) grafen içeren kompozit kaplamanın şematik görüntüsü	22
Şekil 3.1.	Gr'lerin SEM görüntüsü.....	25
Şekil 3.2.	Kaplama deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	25
Şekil 3.3.	Kullanılan akım türleri	26
Şekil 4.1.	DC akım altında üretilmiş saf Ni ve kompozit kaplamaların yüzeyine ait OM ve SEM görüntüleri.....	30
Şekil 4.2.	DC akım altında 50 °C de 30 dk süre ile 5 A/dm ² akım yoğunluğunda üretilmiş 0,1 g/l Gr içeren Ni matrisli kompozit kaplamadaki elementel haritalama görüntüleri..	30
Şekil 4.3.	DC akım altında 50 °C de 30 dk süre ile 5 A/dm ² akım yoğunluğunda üretilmiş 0,3 g/l Gr içeren Ni matrisli kompozit kaplamadaki elementel haritalama görüntüleri..	31
Şekil 4.4.	Pulse periyodu 10 msn. (T _{on} 10 msn ve T _{off} 10 msn) olan PC akım altında 50°C de 60 dk süre ile Tort 5 A/dm ² , akım yoğunluğunda üretilmiş saf Ni ve kompozit kaplamaların yüzeyine ait OM ve SEM görüntüleri.	32
Şekil 4.5.	PC akım altında 50 °C de 60 dk süre ile 5 A/dm ² akım yoğunluğunda üretilmiş 0,1 g/l Gr içeren Ni matrisli kompozit kaplamadaki elementel haritalama görüntüleri.....	33

- Şekil 4.6.** PC akım altında 50 °C de 60 dk süre ile 5 A/dm² akım yoğunluğunda üretilmiş 0,3 g/l Gr içeren Ni matrisli kompozit kaplamadaki elementel haritalama görüntüleri..... 33
- Şekil 4.7.** Pulse periyodu 10 msn. (T_{on} 10 msn ve T_{off} 10 msn) ve -Ton akımı 1 A/dm² ve 10 msn olan PRC akım altında 50 °C de 60 dk süre ile T_{ort} 5 A/dm² akım yoğunluğunda üretilmiş saf Ni ve kompozit kaplamaların yüzeyine ait OM ve SEM görüntüleri..... 34
- Şekil 4.8.** Pulse periyodu 10 msn. (T_{on} 10 msn ve T_{off} 10 msn) ve -T_{on} akımı 1 A/dm² ve 10 msn olan PRC akım altında 50 °C de 60 dk süre ile T_{ort} 5 A/dm² akım yoğunluğunda üretilmiş 0,1 g/l Gr içeren Ni matrisli kompozit kaplamadaki elementel haritalama görüntüleri..... 35
- Şekil 4.9.** Pulse periyodu 10 msn. (T_{on} 10 msn ve T_{off} 10 msn) ve -T_{on} akımı 1 A/dm² ve 10 msn olan PRC akım altında 50 °C de 60 dk süre ile T_{ort} 5 A/dm² akım yoğunluğunda üretilmiş 0,3 g/l Gr içeren Ni matrisli kompozit kaplamadaki elementel haritalama görüntüleri..... 35
- Şekil 4.10.** a) DC, b) PC ve c) PRC akım türünde üretilmiş saf Ni ve kompozit kaplamaların XRD grafikleri. 36
- Şekil 4.11.** DC, PC ve PRC akım türünde üretilmiş saf Ni ve kompozit kaplamaların yüzey pürüzlülük ölçümleri..... 37
- Şekil 4.12.** DC, PC ve PRC akım türünde üretilmiş saf Ni ve kompozit kaplamaların sertliklerinin Gr içeriği ile ilişkisi 38
- Şekil 4.13.** St 37 çelik altlık, DC, PC ve PRC akım türünde üretilmiş saf Ni ve kompozit kaplamaların aşınma hızının Gr içeriği ile ilişkisi 39
- Şekil 4.14.** St 37 çelik altlık ve DC akım altında üretilmiş saf Ni ve kompozit kaplamaların ve karşı malzeme olarak kullanılan Al₂O₃ bilyelerin aşınma yüzey görüntüleri, aşınma hızı ve sürtünme katsayısı grafikleri. 40
- Şekil 4.15.** DC akım altında üretilmiş saf Ni ve kompozit kaplamaların detaylı SEM görüntüleri 41
- Şekil 4.16.** St 37 çelik altlık ve PC akım altında üretilmiş saf Ni ve kompozit kaplamaların ve karşı malzeme olarak kullanılan Al₂O₃ bilyelerin aşınma yüzey görüntüleri, aşınma hızı ve sürtünme katsayısı grafikleri..... 42

- Şekil 4.17.** PC akım altında üretilmiş saf Ni ve kompozit kaplamaların detaylı SEM görüntüleri 43
- Şekil 4.18.** St 37 çelik altlık ve PRC akım altında üretilmiş saf Ni ve kompozit kaplamaların ve karşı malzeme olarak kullanılan Al_2O_3 bilyelerin aşınma yüzey görüntüleri, aşınma hızı ve sürtünme katsayısı grafikleri..... 44
- Şekil 4.19.** PRC akım altında üretilmiş saf Ni ve kompozit kaplamaların detaylı SEM görüntüleri 45

SİMGELER ve KISALTMALAR**Simgeler**

A	: Amper
°	: Derece
K	: Kelvin
Pa	: Pascal
N	: Newton
HV	: Vickers Sertlik Birimi
µm	: Mikrometre
nm	: Nanometre
mm	: Milimetre
mg	: Miligram
λ	: Dalga Boyu
Å	: Dalga Boyu Mesafesi Birimi
Ω	: Ohm
W	: Watt
g	: Gram
L	: Litre
dm ²	: Desimetre Kare

Kısaltmalar

MEMS	: Mikro Elektro Mekanik Sistemler
CVD	: Kimyasal Buhar Kaplama
DC	: Doğru Akım
PC	: Pulse Akım
PRC	: Pulse Reverse Akım
T _{on}	: Akım Uygulama Zamanı
T _{off}	: Akımın Kesildiği Zaman
T _{ort}	: Ortalama Akım Süresi
HV	: Vickers Sertlik Değeri
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik Kafes Sistemi

XRD	: X-Işınları Difraksiyonu
EDS	: Enerji Dağılımlı X-Işınları Spektrometre
CNT	: Karbon Nanotüp
MWCNT	: Çok Duvarlı Karbon Nanotüp
SDS	: Sodyum Dodesil Sülfat
Gr	: Grafen
GO	: Grafen Oksit
RGO	: İndirgenmiş Grafen Oksit
GNPs	: Grafen Nano Plakalar

1. GİRİŞ

Kompozit kaplamalar, üstün mekanik özellikleri, yüksek ısı kararlılıkları, yüksek aşınma ve korozyon dirençleri gibi özellikler dolayısıyla son yıllarda oldukça ilgi görmektedir. Bu üstün özellikleri sayesinde mekanik, otomotiv, gıda ve imalat gibi pek çok endüstride kullanılan ve ilgi gören bir ürün olarak ortaya çıkmıştır. Bu kaplamaları, ısı püskürtme, elektrolitik kaplama, fiziksel ve kimyasal buhar biriktirme yöntemleriyle oluşturmak mümkündür. Daha basit ve düşük maliyetli olması elektrokimyasal işlemleri tercih edilir kılmaktadır (Rezaeiolum vd., 2017). Nikel ve kobalt esaslı kompozit kaplamalar elektrolitik kaplama yöntemi sayesinde son birkaç yıldır dikkat çekmektedir (Jiang vd., 2017). Elektrolitik kaplama işlemleri sonrası elde edilen kompozit kaplamalar yüksek sertlik, üstün korozyon ve aşınma direnci sergilemektedir (Aruna vd., 2015).

Grafen, tek sıra bir karbon tabakasından oluşan, 2-boyutlu olarak tanımlayabileceğimiz ve hem temel özellikleri, hem de uygulama alanları dolayısıyla oldukça ilgi çeken bir maddedir. Grafenin dikkat çekici kimyasal ve fiziksel özellikleri onun güneş enerjisi uygulamaları, süper kapasitörler, transistörler, lityum bataryaları ve yakıt hücreleri gibi çeşitli alanlarda potansiyel uygulamalar haline gelmesine neden olmaktadır (Kuang vd., 2013). Grafenin olağanüstü mekanik, elektrik ve termal özellikleri, 2004'te keşfedilmesinden bu yana, onu nano-elektroniklerden sensörlere kadar çeşitli uygulama alanlarında karbon nanotüplerin bir alternatifi olarak görmemizi sağlamıştır (Jiang vd., 2014). Metallerde korozyon önleyici kaplama olarak kullanılacak takviye malzemesinin hafif, atomik boyutta ince, sızdırmaz, inert, aşınmaya karşı dirençli ve mekanik olarak dayanıklı olması gerekir. Bir bal peteği örgüsünde düzenlenmiş ince bir karbon atomu tabakasından oluşan grafen bu talepleri karşılamaktadır (Kyhl vd., 2015).

Nikel esaslı kompozit kaplamalar sertlik, yüksek mukavemet ve korozyon direncinden dolayı otomotiv ve havacılık endüstrisinde tercih edilmektedir. Nikel matrisine ilave edilen grafenin yüksek sertlik ve mukavemet sağlayacağı beklenmektedir. Ancak grafen/metal kompozitlerin sentezi ile ilgili çok az sayıda çalışma mevcuttur (Kuang vd., 2013). Bu sebeple, hazırladığımız bu çalışmada, düşük karbonlu çelik üzerine nikel ve nikel/grafen kompozit kaplama tabakaları, deney ve bulgular kısımlarında daha detaylı bir şekilde anlatılacak olan Doğru Akım (DC), Pulse Akım (PC) ve Pulse Reverse Akım (PRC) olmak üzere üç farklı akım türünde Watts tipi banyo kullanılarak üretilecektir.

Akım türünün ve grafen miktarının, üretilen kaplamaların sertlik ve aşınma davranışı üzerinde bir etkisi olup olmadığı incelenecektir. Hazırladığımız bu çalışmanın diğer çalışmalardan ayıran en önemli özellik, akım türünün ve grafen miktarının iki ayrı parametre olarak incelenecek olmasıdır. Üretilen kaplamalar taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışınları difraksiyonu (XRD) metodu kullanılarak karakterize edilecektir.

1.1. Elektrokimyasal Kaplama

Elektrik enerjisi ve bununla birlikte yürüyen kimyasal olayları inceleyen elektrokimya bilimi, elektrolitik kaplamanın yapı taşlarını oluşturmaktadır. Elektrokimyasal tepkime, elektrik akımı ile maddenin etkileşmesi sonucu yeni bir maddenin oluştuğu bir tepkime türüdür. Reaksiyon olarak yükseltgenme ve indirgenme tepkimelerini içeren bu durum bir kap içerisinde gerçekleşmektedir. Bu kabın içerisinde, elektrolit (elektriksel iletkenlik gösteren çözelti), elektrotlar ve bu elektrotları birbirine bağlayan dış bir devre bulunur. Yükseltgenme tepkimesinin olduğu elektrota anot, indirgenme tepkimesinin meydana geldiği elektrota ise katot adı verilir. Elektrokimyasal olarak adlandırılan bu kaplar galvanik (akımsız) ve elektrolitik (akımlı) olarak ikiye ayrılır. Elektrolitik hücrelerde tepkimenin gerçekleşebilmesi için bir enerji kaynağı gerekirken, galvanik tepkimelerin gerçekleşmesi için herhangi bir enerji kaynağına ihtiyaç duyulmaz. Kimyasal reaksiyonlar dolayısıyla galvanik hücrelerde tepkimeler kendiliğinden meydana gelip, bunun sonucunda bir elektrik akımı üretilir. Elektrolitik kaplama olayı, en temel anlatımıyla, çözelti içindeki metal iyonlarının elektron alarak metale indirgenmesinin bir sonucudur (Saidin vd., 2011; Şahin, 2014).

Elektrolitik kaplama işlemi, elektrik akımı ve kimyasal yardımıyla ilgili yüzey üzerinde bir kaplama film tabakası oluşturma işlemidir. Bu işlem sayesinde nm boyutunda bir kaplama oluşturulabileceği gibi, mm boyutlarda da kaplama tabakaları tasarlanabilmektedir. Elektrolitik kaplama yöntemi, nanopartikül takviyeli veya nanokristal yapıları metal matrisli kompozit yapıları malzemeler elde etmek için kullanılan günümüzün popüler yöntemlerinden biridir (Erb, 1995). Anodik elektrolitik kaplama işlemi daha eski bir yöntemdir. Yaklaşık olarak 1960'lı yıllarda bu yöntem kullanılmaya başlanmıştır. Yüksek oranda kullanım alanı olan otomotiv endüstrisinde tek kat ve son kat kaplama olarak tercih edilmişlerdir. Ancak buna yakın zamanda takip eden dönemlerde (1975'den bu yana) katodik elektrolitik kaplamaya yönelik methodlar

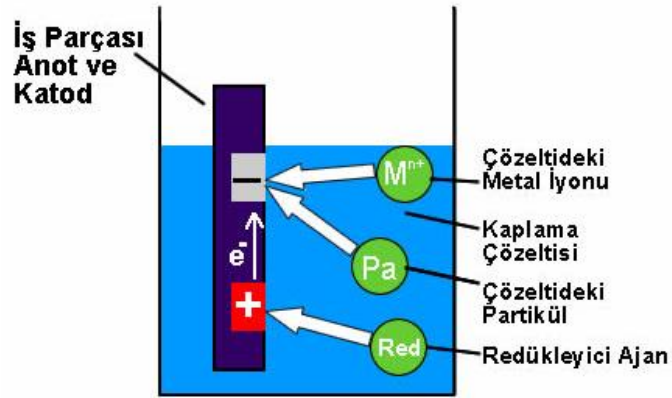
geliştirilmiştir. Bunu takip eden sonuçlar neticesinde, üstün korozyon direnci, üniform kalınlıkta bir kaplama, boşluklara daha iyi dolan bir kaplama hali, daha iyi köşe kaplamalar elde edilmiştir. Katodik elektrolitik kaplamasında iş parçası buna uygun olarak katot yapılır. İş parçaları genellikle demir fosfatlama olarak da bilinen (genel olarak anodik elektrolitik kaplama durumunda) alkalin fosfatlama veya çinko fosfatlama (genellikle katodik elektrolitik kaplama durumunda yüksek performans) ile ön işleme tabi tutulur (Brock, 2015).

Elektrolitik kaplama işlemi esnasında pH, sıcaklık, banyonun bileşimi ve akım yoğunluğu gibi parametreler ile tane boyutunu değiştirmek mümkündür (Goddard, 2003). Tasarımcılar ve bu konuda araştırma yapan bilim insanları, elektrolitik kaplama yöntemini kullanarak malzemelerin yüzey özelliklerini kolayca değiştirebildiğinden bu teknoloji geniş bir kullanım alanına hitap etmektedir. Düzensiz yapıdaki yüzey geometrilerinin ekonomik ve hatasız bir şekilde düzgün bir hale getirilmesi yine bu yöntem sayesinde sağlanmaktadır. Ancak bu malzemeleri ekonomik ve kusursuz olarak üretmek her zaman mümkün olmayabilir. Elektrolitik kaplama işlemi bunun ekonomik bir şekilde karşılanmasını sağlayabilir, fakat bunun yanında temel proses parametrelerinin dikkatli bir şekilde seçilmesi gereklidir. Katı hal fiziği, malzeme bilimi, elektroteknik, elektrokimya, yüzey bilimi gibi çoğu disiplin grubu elektrolitik kaplama ile ilgilenir. Elektrolitik kaplanmış malzemelerde fiziki ve mekanik özelliklerin her ikisini de içeren verilere ihtiyaç duyulur. Bunlar; elektrik ve termal iletkenlik, termoelektrik etkiler, maddenin yoğunluğu, ergime noktası ve manyetik davranış gibi fiziki özellikler, ve elastisite modülü, sertlik, süneklik ve mukavemet gibi mekanik özelliklerdir (Goddard, 2003).

1.1.1. Akımsız kaplama

Kaplama teknolojileri son yıllardır büyük bir gelişme kaydetmiştir. Bunun nedeni ise, kaplama sonrasında mekanik özelliklerin iyileşmesidir. Buna örnek olarak akımsız nikel kaplamaları birçok endüstriyel alanda kullanılmaktadır. Metal kullanımının dünyadaki artışıyla birlikte, metallerin zarar görme potansiyeli de artmaktadır. Modern yüzey teknolojisinin asıl hedefi endüstriyel, taşıma ve servis araç gereçlerinin ömrünü arttırmak ve bunlara uygun dekoratif ve fonksiyonel kaplamalar sunmaktır. Bu amaçla, nikel pratiklik ve uygulanabilirlik olarak büyük kullanım alanına hitap etmektedir. Nikel

bu sebeple endüstrinin çok değişik sektörlerinde uygulanmaktadır. (Çam, 2009; Muraliraja, 2019). Akımsız kaplamanın şematik gösterimi Şekil 1.1 'de verilmiştir.



Şekil 1.1. Akımsız kaplamanın şematik gösterimi.

Günümüzde nikel kaplama uygulamaları modern yüzey teknolojisinde en çok kullanılan bir uygulama haline gelmiştir. Akımsız kaplamalarda nikel saf olarak kullanılmayıp, nikel-fosfor veya nikel-bor alaşımları daha yaygın olarak kullanılmaktadır (Krishnan vd., 2006). Şekil 1.2'de otomotiv sektöründe kullanılan akımsız nikkelle kaplanmış bir parça örneği görülmektedir.



Şekil 1.2. Otomotiv sektöründe kullanılan akımsız nikkelle kaplanmış bir parça (Web, Star Metal, 2019).

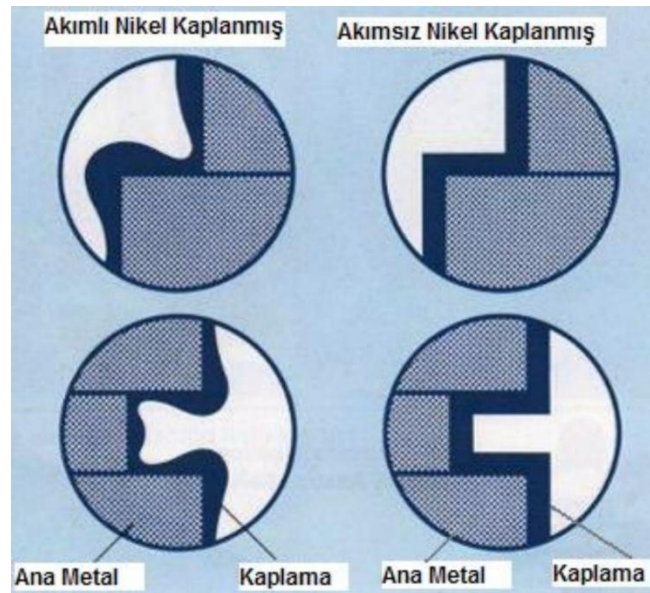
- Akımsız kaplamaların başlıca üstünlükleri sırasıyla;
- İstenilen kalınlıkta kaplanabilmesi,
 - Metal/metal olmayan tüm yüzeylere, belirli işlem basamaklarından sonra kaplama yapılabilmesi,
 - Kaplama kalınlığının malzemenin her tarafında aynı olması,
 - Yüksek kaplama sertliği,
 - Tribolojik özelliklerinin ve yağlayıcılığın yüksek olması,
 - Lehimlenebilme özelliği,
 - Temas edebildiği tüm düzgün/düzensiz olmayan yüzeylerde kusursuz kaplama özelliği,
 - Herhangi bir akım kaynağına ihtiyaç duymaması ve bu sayede tasarruf sağlanabilmesi,
 - Aşınmaya ve korozyona karşı dirençli olması ve birçok mekanik ve fiziksel üstünlük sağlamasıdır (Çam, 2009 ; Eraslan, 2010).

Çizelge 1.1. 'de akımlı ve akımsız kaplamaların karşılaştırılması yapılmıştır. Akımlı kaplamanın ergime noktası, ısıl iletkenlik ve % uzama gibi özellikleri akımsız kaplamaya göre iyi bir performans sergilediği görülmektedir.

Çizelge 1.1. Akımlı ve akımsız nikel kaplamaların karşılaştırılması (Eraslan, 2010).

Özellikler	Akımlı Kaplama (Elektrolitik)	Akımsız Kaplama (Ni-P Alaşımı)
Bileşimi	%99 + Ni	Ort. % 2-15 P, % 98-85 Ni
Görünüşü	Mattan parlağa	Yarı parlak
Yapısı	Kristalin	Amorf
Yoğunluk	8,9 gr/cm ³	Ortalama 7,9 gr/cm ³
Kalınlık Dağılımı	Değişken	± %10
Ergime Noktası	1455 °C	890 °C (yaklaşık)
Sertlik	40 - 150 HV	500-600 HV
Isıl İşlem Sonrası	Etkisiz	1000 HV
Aşınma Direnci	Orta	Yüksek
Korozyon Direnci	İyi (gözenekli)	Çok İyi (bir kaç gözenek)
Relatif Manyetik Duyarlılık	% 36	% 4
Elektrik Direnç	7 mikrohm/cm	60-100 mikrohm/cm
Isıl İletkenlik	0,16kal/cm.s °C	0,01 - 0,02 kal/cm.s °C
% Uzama	% 6 - 30	% 2
Çeliğe Göre Sürtünme Katsayısı		
Yağlanmış	Yapışma	0,38
Yağlanmamış	0,2	0,2

Akımsız kaplamanın ise akımlı kaplamaya göre kalınlık dağılımının daha düzgün, sertlik değerlerinin çok daha yüksek ve elektrik direncinin oldukça fazla olduğu görülmektedir. Şekil 1.3. 'de görüldüğü üzere, akımsız kaplamalarda yüzey kalınlığı dağılımı, akımlı kaplamalara göre daha kararlı haldedir.



Şekil 1.3. Akımsız nikel kaplanmış bir parça ile, geleneksel yöntemle akımlı nikel kaplanmış parça arasındaki fark (Eraslan, 2010).

Akımsız kaplamalar içerisinde nikel kaplamalar en önemli yeri tutmaktadırlar. Nikel kaplamaların her geçen gün artmasının en önemli nedeni, malzemelerin dış görünüşünü değiştirmesinin yanı sıra malzemeye sağladığı fonksiyonel özelliklerdir. (Riedel, 1991). Özellikle korozyon direnci, aşınma direnci, sertlik ve süneklik açısından çok değişik uygulama alanları bulmaktadır. Akımsız nikel kaplamalar takım çelikleri ve paslanmaz çeliklerin kaplanmasından ziyade hafif çelikler, alaşımlı çelikler ve dökme demirlerin kaplanmasında yoğun olarak tercih edilmektedir (Eraslan, 2010).

Akımsız nikel kaplamaları şu şekilde sınıflandırabiliriz:

i) Banyodaki redükleyici türüne göre;

- Hipofosfitli,
- Borhidrüllü,
- Aminoborlu,
- Hidrazinli banyolar,

ii) Çözeltinin pH'ına göre;

- Alkali banyolar (hipofosfitli, borhidrüllü)

- Asidik banyolar (hipofosfitli, aminoborlu)

iii) Çalışma sıcaklığına göre;

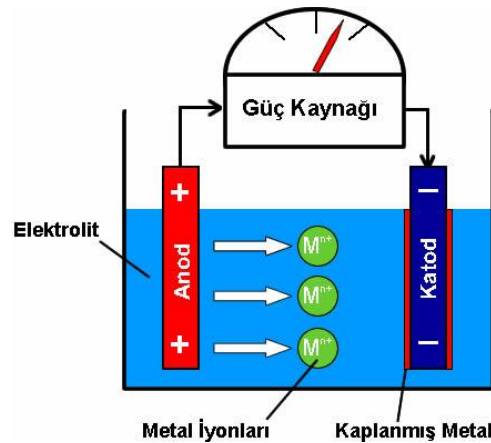
- Alkali veya asitli hipofosfitli banyolar (uygulamadaki banyoların % 90'ı),

- Alkali borhidrüllü banyolar,

- Asitli aminoborlu banyolar

1.1.2. Akımlı kaplama

Akımlı kaplamanın temeli, metal iyonlarının katodik olarak serbest bırakılması olayına dayanmaktadır. Çözeltinin elektrolizi süresince, katotda altlık olarak kullanılan malzemeye iyonlar indirgenir. Katot elektron kaynağı, anotta elektron alıcı olarak görev almaktadır. Akımlı kaplama gereği, gerekli olan elektronlar dış bir akım kaynağından tedarik edilir. Sulu çözülden katodik metal kaplama esnasında, metal genellikle sulu bir eriyik durumunda (hidrat) bulunmaz, bunun yerine anyonik kompleks olmayı tercih eder. Hidrat durumdaki metal nötr olmak için birçok adımı takip etmesi gerekir. Metal iyonu difüzyon tabakasına geçişi esnasında, metal iyonunu çevreleyen su molekülleri yönlenir. Metal iyonları Helmholtz adı verilen tabakanın içine geçtiğinde, metal iyonundan su moleküllerini ayırmak yüksek enerji gerekmektedir. Bunun için katodun yüzeyinde asıl nötrleşme işlemi olduğunda, bu yüzeyde sadece basit halde suyu alınmış bir iyon bulunur. Öncelikle metal iyonu katot yüzeyine absorbe edilir. Ardından yüzey boyunca metal kafesinin içerisine doğru hareket eder ve buraya katılır (Karşlıoğlu, 2014). Şekil 1.4'te akımlı kaplama şematik olarak görülmektedir.



Şekil 1.4. Akımlı kaplamanın şematik gösterimi

Elektrolitik kaplama işlemi, kristalin yapıda metalik yapılar elde edebilmek açısından oldukça ekonomik ve basit bir yöntemdir. Akımlı kaplama da elektrolitik kaplama yöntemi olarak metalik kaplama üretiminde, Doğru Akım (DC), Pulse Akım (PC) ve Pulse Reverse Akım (PRC) yöntemleri kullanılmaktadır. Ghazanlou vd., (2016), DC ve PC akım altında yaptıkları Ni–Co/SiO₂ nanokompozit kaplamalar ve Ni–Co alaşım kaplamalarda PC akımla üretilen nanokompozit kaplamaların mikrosertliğinin, DC akımla elde edilenden daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

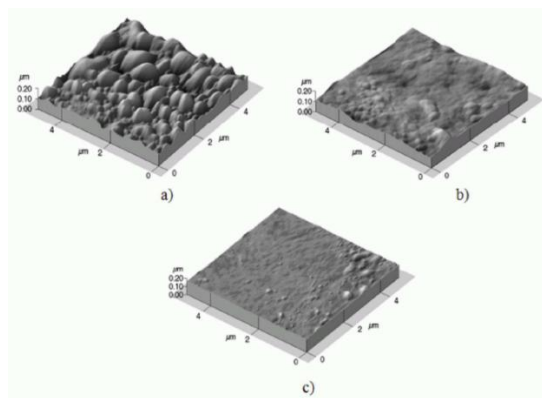
Gül vd., (2014), elektrolitik kaplama yönteminin Ni-Al₂O₃ nanokompozit kaplamaların mikroyapı ve tribolojik davranışlarını önemli ölçüde etkileyebileceğini göstermiştir. Bu çalışmada aynı akım yoğunluğu için PC akımla üretilen kaplamada partikül içeriği yüksek, daha homojen partikül dağılımı, yüksek kayma mesafesinde daha yüksek aşınma direnci ve iyileştirilmiş sürtünme katsayılarına sahip kaplamalar elde edilmiştir. PC akımla üretilen kaplamalardaki Al₂O₃ nano partiküllerin üstün dağılımının yük taşıma kapasitesinin artmasına katkıda bulunduğu tespit edilmiştir. Karşlıoğlu ve Akbulut (2015), bakır altlıklar üzerine Ni-Co alaşım ve Ni-Co/MWCNT kompozit kaplama tabakaları DC, PC ve PRC olmak üzere Watt tipi banyo kullanılarak üretmiştir ve bu çalışmada PC ve PRC ile üretilen nanokompozit kaplamalar, Ni-Co kaplamalarda CNT'lerin eşsiz özellikleri sayesinde mikrosertlikte ve aşınma direncinde önemli bir gelişme sergilemiştir. Ayrıca aşınma testleri sonucunda CNT ilavesinin sürtünme yüzeyleri arasında etkin yük taşıma yeteneği ve kendinden yağlama sağladığı belirlenmiştir. Ancak DC, PC ve PRC akımla üretilen tüm nanokompozitler için sürtünme katsayısının arttığı tespit edilmiştir.

DC akım yönteminde bazı parametrelerin kullanımı daha sınırlıydı. PC akım sayesinde, DC akıma göre, elektrolitik kaplama tekniği daha esnek hale gelmiştir. Pulse akım açık (on-time, akım verilen zaman, T_{on}) ve kapalı (off-time, akımın kesildiği zaman, T_{off}) zamanın eşsiz kombinasyonu ile kaplama tabakasının mikroyapısı ve bileşenlerinin kontrol edilmesi bu sayede çok daha etkilidir. Son zamanlarda yapılan bazı çalışmalarda DC ve PC akımın artık yeterli olmadığı görülmüştür ve PC akıma ters bir akım ilave edilerek artık PRC türü üzerine çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Chang vd., (2006), PRC tekniği ile ince taneli, pürüzsüz yüzey ve kompakt kompozit kaplamalar elde edilebileceğini göstermiştir. Sonuçlar, pulse akım süresi boyunca, katodun artan elektrokimyasal polarizasyonuna atfedilebilir. Bu durum elektrot yüzeyi üzerindeki metal

birikiminin çekirdekleşme enerjisini azaltmakta ve çekirdeklenme oranını arttırmaktadır. Yüksek çekirdeklenmenin bir sonucu olarak çekirdeklenme merkez sayısının artmasına neden olmaktadır. Ayrıca PRC işleminde pozitif akım ve ters akımın alternatif uygulanması, adsorpsiyon olayları, yüzey difüzyon tabaka yapısı ve elektriksel çift katman yapısı vb. gibi yüzeyde elektrot değişimine neden olabilir ve bu durum metal yüzeyin temizlenmesi, aktive edilmesi ve kompozit kaplamaların saflığının artırılması için fırsat sunmaktadır.

Bu akım yöntemini kullanarak kompozit kaplama üreten bilim insanları, PRC işleminde ters akım uygulandığı zaman, transformasyon (akımın ters yönüne doğru taşınım) gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu ters taşınım olayının sonucunda, katodun elektrokimyasal polarizasyonunun artması dolayısıyla, elektrotun yüzeyindeki tanelerin çekirdekleşme enerjilerinin düştüğü ve bunun sonucunda çekirdeklenme oranının artmasından dolayı daha düzgün bir yüzey ve daha sıkı bir yapı elde edildiği görülmüştür (Karşlıoğlu, 2014).

Bu çalışmayı destekleyen nitelikte bir çalışma da Chaparro vd., (2007) tarafından yapılmıştır. Bakır altlık kullanılarak farklı akım türlerinde nikel kaplama tabakaları oluşturulmuştur. Yapılan bu çalışma sonucunda, PRC akım kullanılarak ürettikleri kaplama tabakasının daha sıkı, ince taneli ve homojen halde olduğu görülmüştür. Şekil 1.5'de nikel kaplama tabakasının yüzey topografik görüntüsü, akım türünün değişmesi ile yüzey kalitesinin nasıl değiştiği gösterilmektedir (Chaparro vd., 2007).



Şekil 1.5. Elektrolitik kaplama yöntemi kullanılarak a) DC, b) PC ve c) PRC akım türünde üretilmiş nikel kaplama tabakasının yüzey topografik görüntüsü (Chaparro vd., 2007).

Akımlı olarak metal bir malzemenin kaplanması şu amaçla yapılmaktadır;

- Dekoratif olarak daha iyi bir görünüm elde etmek,
- Aşınmaya karşı dayanıklılığın artırılması,
- Kalıpların ve piston yataklarının darbelere karşı mekanik özelliklerinin ve dayanımının artırılması,
- Korozyona karşı koruma direncinin artırılması bunlar arasında sayılabilir (Shakoor vd., 2014).

2. ELEKTROLİTİK YÖNTEMLE ÜRETİLEN KOMPOZİT MALZEMELER

2.1. Elektrolitik Kaplama Yöntemi ile Üretilen Ni Alaşımları

Ni ve alaşımları iyi korozyon ve aşınma direnci gibi çeşitli özelliklere sahip olduklarından, kaplama uygulamalarında büyük dikkat çekmektedir. Dünyadaki Ni tüketiminin neredeyse % 12'si Ni kaplamanın elektrolitik yöntemiyle yapılmaktadır. Dekoratif amaçlı Ni kaplama kullanımı, elektrolitik Ni kaplamanın ana uygulamasıdır. Ni kaplamaları, sanayide aşınma ve korozyon direncini arttırmak, erozyona uğramış metalleri onarmak, küçük boyutlu parçaların boyutlarını değiştirmek, manyetik özellikleri geliştirmek, altlık yüzeyi lehimleme veya organik kaplama üretmek için hazırlamak ve diğer amaçlar için kullanılmaktadır. Saf Ni kaplamaya ilave olarak, bir elektrolitik kaplama işlemi ile Ni esaslı bir alaşım kaplama üretmek mümkündür (Torabinejad vd., 2017). Ni alaşımlarına örnek olarak Ni-Co, Ni-Fe, Ni-Zr, Ni-P, Ni-B, Ni-Al, Ni-Ti, Ni-Mo ve Ni-W verebiliriz.

Ni-Co kaplamalar üstün mekanik özellikleri (yüksek çekme dayanımı ve yüksek sertlik), iyi tribolojik özellikleri, uygun ısı direnci ve korozyon önleyici özellikleri nedeniyle öne çıkan mühendislik malzemeleri ve kaplamaları haline gelmiştir. Bu özellikler, bu kaplamaların, aşınma ve korozyon önleyici kaplamalar olarak gelişmesini sağlamıştır. Ni-Co alaşımlarının önemli özelliklerinden biri de sıra dışı manyetik özellikleridir. Diskler, hafıza kartları ve mikro elektromekanik sistemler (MEMS) dahil, elektronik ve bilgisayar endüstrisindeki potansiyel uygulamaları için bu alaşımların manyetik özellikleri dikkat çekmektedir. Ni-Co alaşımları koruyucu ve dekoratif özelliklerinden dolayı büyük pratik öneme sahiptir. Ni-Co kaplamaların üretim metotları arasında kimyasal buhar biriktirme (CVD), püskürtme ve alev püskürtme gibi diğer üretim işlemleriyle karşılaştırıldığında elektrolitik kaplama, ortalama maliyetleri, esnekliği (tek katmanlı veya çok katmanlı biriktirme), yüksek sıcaklıklara ve yüksek basınçlara çok az ihtiyaç duyulan basit üretim prosedürü nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir (Yang vd., 2014; Karimzadeh vd., 2019).

Ni-Fe alaşımları, üretim maliyetlerini azaltmak ve aynı zamanda yumuşak manyetik özellikleri, iyi elektrik iletkenlik, korozyon direnci ve özel optik özellikler sağlamak için kullanılmaktadır. Bu kaplama türü elektronik ürünler, sensörler, iletişim ve optik endüstrilerinde yaygın olarak yer almaktadır. Ni-Fe kaplama üretmek için

püskürtme, moleküler ışın epitaksi, buharlaşma ve elektrolitik kaplama gibi yöntemler tercih edilmektedir. Elektrolitik kaplama dışındaki diğer kaplama yöntemlerinin dezavantajları sırasıyla özel sıcaklık ve basınç koşulları, ultra yüksek vakum ve buna bağlı olarak prosesin pahalı olmasıdır. Ayrıca, elektrolitik kaplama işlemi ile üretilen kaplama daha homojendir ve diğer kaplama işlemleriyle üretilenlere kıyasla daha düşük kusurlara sahiptir (Torabinejad vd., 2017).

İkili Ni-Zr alaşımlı ince filmlerin üstün katalitik uygulamaları, spesifik hidrojen emilim özellikleri ve gelişmiş korozyon direnci gibi özellikleri ilgi çekmektedir. Bu malzeme ayrıca yakıt hücrelerinde, biyomedikal endüstrisinde, gerilmeli atomik kuvvet mikroskop propları ve nükleer reaktörde soğutucu akış döngülerinde uygulama alanlarına sahiptir (Sahu vd., 2018).

Ni-P kaplamalar, korozyon ve aşınmaya karşı koruma sağlayan mekanik ve tribolojik özellikleri nedeniyle mühendislikte yoğun olarak kullanılmaktadır. Klasik olarak, bu tür kaplamalar <500 µm kalınlığa sahip olabilir, ancak daha hızlı biriktirme ve daha düşük maliyet elde etmek için kaplama kalınlığını inceltme eğilimi vardır. Bileşimlerine ve yapılarına bağlı olarak, ilk elde edilen kaplamalar iyi mekanik, tribolojik ve elektrokimyasal özellikler, katalitik aktivite ve aynı zamanda faydalı manyetik özellikler göstermektedir. Elektrolitik kaplama sırasında fosfor birleşmesinin temel özelliği, kristal yapının amorflaşmasıdır ve bu özellik hidrojen/oksijen reaksiyonları için korozyon önleyici veya elektrokatalizör gibi birçok yolla elektrokimyaya uygulanabilir. Korozyonu engellemek için Ni-P'un otomobil endüstrisindeki yanmalı motor parçaları, konteynerler vb. gibi birçok uygulaması vardır. Isıl işlem uygulandıktan sonra, Ni-P metal kaplamaların sertliği sert Cr kaplamalarinkine yaklaşabilir ya da aşabilir (Soares vd., 2018; Lelevic ve Walsh, 2019).

Mükemmel özellikleri nedeniyle öne çıkan Ni-B alaşımlı kaplamalar, yüksek sertliğe, yüksek aşınma direncine (sert krom kaplamalardan daha iyi) ve iyi korozyon önleyici özelliklere sahiptir. Ni-B kaplamalar ayrıca yağlayıcılık, mükemmel lehimlenebilirliği, iyi elektriksel özellikleri, antibakteriyel özellikleri, olağanüstü elektromanyetik özellikleri ve düşük gözenekliliği ile bilinmektedir. Bununla birlikte, ısı işlem uygulandığında Ni-B kaplamaların, Ni-P kaplamalardan korozyona daha fazla dirençli olduğu ve ticari sert krom kaplamalardan daha sert olduğu bilinmektedir. Ni-B kaplamalar, yüksek erime noktalarına (1350-1360 °C) bağlı olarak yüksek termal

kararlılığa sahiptir. Ayrıca, Ni-B kaplamalar düşük elektrik direncine ($89 \times 10^{-6} \Omega \text{ cm}$) sahiptir ve bu nedenle elektronik endüstrisi için uygundur. Ni-B kaplamaları otomotiv, uzay, nükleer, petrokimya, bilgisayar, elektronik, plastik, optik, tekstil, kağıt, gıda ve baskı endüstrisinde kullanılmaktadır (Cengiz vd., 2019).

Elektrolitik kaplama yöntemi ile geliştirilen Ni-Al kaplamaları, üstün korozyon direnci ve yüksek sıcaklıkta oksidasyon direnci nedeniyle çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Korozyona karşı direnci arttırmanın umut verici bir yoluda kaplamanın düzgün ve daha yüksek miktarda Al içermesiyle mümkündür (Maharana vd., 2019).

Ni-Ti kaplamalar, optimize edilmiş mikroyapıları ve özellikleri nedeniyle agresif bir ortamda koruma kapağı olarak kullanılmaktadır. Her ne kadar elektrolitik kaplama yöntemi ile Ni-Ti kaplamaların hazırlanması geniş çapta çalışılsa da, Ni-Ti kaplamaların kaplama prosesi, mikroyapı, korozyon önleyici davranış ve mekanik özellikleri, özellikle nano boyutlu Ti partikülleri mikron boyutunda olanların yerini aldığı daha fazla araştırma yapılması ihtiyacı doğmuştur (Zhao vd., 2015).

Ni-Mo alaşım kaplamaların yüksek sertlik, aşınma ve korozyon direnci, iyi katalitik özellikler gibi üstün özellikleri dolayısıyla bu kaplamalar araştırmacıların oldukça ilgisini çekmektedir. Bu özellikleri sayesinde çeşitli uygulama alanlarında sert kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır (Laszczyńska vd., 2018). Ni-Mo alaşımları, hidrojen üretiminde katalizör, süper iletken kaplamalar için altlık materyali ve soğuk haddeleme ve tavlama ile üretilen süper iletken kaplamalarda takviye malzemesi olarak uygulamalara sahiptir (Kapoor vd., 2017; Kapoor vd., 2019).

Krom esaslı kaplamalar, mükemmel korozyon direnci ve aşınma direnci özelliği nedeniyle geniş mühendislik uygulamalarına sahiptir. Ancak krom esaslı kaplamaların hazırlanmasında kullanılan elektrolit, toksik krom iyonları içermektedir. Ayrıca, sert krom kaplamalar kalıntı çekme gerilmesi ve çatlak içermesinden dolayı servis sırasında kolay bir şekilde hasara uğrayabilir. Tungsten ve molibden ile alaşımlandırılmış nikel esaslı kaplamalar üstün mekanik özellikleri, korozyona ve aşınmaya karşı direncinden dolayı sert krom kaplamalara alternatif olarak yerini alabilir. Esasen Ni-W alaşımı, saf nikel ($1445 \text{ }^\circ\text{C}$) ve tungstenin ($3410 \text{ }^\circ\text{C}$) ergime noktalarındaki büyük fark nedeniyle geleneksel alaşımlama işlemleriyle üretilemezler. Ancak elektrolitik kaplama tekniği ile Ni-W kaplama hazırlamak mümkündür. Elektrolitik kaplama ile oluşturulmuş Ni-W

alaşımları yüksek sertlik, mükemmel aşınma direnci ve üstün korozyon direnci sergilemektedir (Jinlong vd., 2018).

2.2. Elektrolitik Kaplama Yöntemi ile Üretilen Ni Kompozit Kaplamalar

Elektrolitik kaplama, optimize edilmiş koşullarda metalik ve metalik olmayan bileşenlerin veya polimerlerin kaplama tabakasında biriktirilmesiyle kompozit oluşturulmasına imkân veren en önemli tekniklerden biridir. Partikül ilave edilmiş kompozitlerin üretiminde pek çok yöntem kullanılabilir. Ancak, elektrolitik kaplama yöntemini burada üstün kılan durum, yüksek sıcaklık ve basınca gerek duyulmaksızın partiküllerin dağılımı ve konsantrasyonun kolayca kontrol edilebilmesidir. Bu sebeple nano-kompozit üretiminde elektrolitik kaplama yönteminin kullanılması en uygun tercih olacaktır (Wu vd., 2004; Karşlıoğlu, 2014; Kartal vd., 2017).

Nikel korozyona karşı dirençli bir metaldir. Nikel kompozit kaplamalara baktığımız zaman, Al_2O_3 (Saha ve Khan, 2010; Alizadeh ve Cheshmpish., 2019), SiC (Vaezi vd., 2008; Salari Mehr vd., 2019; Lanzutti vd., 2019), ZrO_2 (Benea, 2009; Bostani vd., 2018), TiO_2 (Bagheri vd., 2010; Yılmaz, 2013), WC (Surender vd., 2004; Elkshokhany vd., 2017) ve CNT (An vd., 2008; Dong vd., 2019) ile yapılan kompozit bileşenleri ön plana çıkmaktadır. Bu partiküllerin ilave edilmesi durumunda, saf olan yapı ile kıyaslandığında yüksek korozyon ve aşınma direnci gibi fiziksel ve mekanik özelliklerin iyileştiği görülmektedir. Ancak partiküller metal matriks içerisine homojen olarak dağılması durumunda bu mümkündür.

Matris olarak korozyona dirençli nikel içerisinde bulunan sert alümina nano-partiküller (2000-2300 HV) sayesinde Ni- Al_2O_3 kompozit kaplamalar önemli ölçüde sertlik, korozyon ve aşınma direnci sergilemektedir. Optimum akım yoğunluğu ve metal matriks yapısı içerisinde partiküllerin düzgün dağılımı tribolojik özellikleri ve kompozit kaplamaların oksidasyon direncini de iyileştirmiştir (Wu vd., 2004; Saha ve Khan, 2010; Alizadeh ve Cheshmpish., 2019).

Ni-SiC kompozit kaplamalar sürtünen parçaların, döküm kalıpları ve yanmalı motorların korunmasında ticari anlamda büyük öneme sahiptir. Nano boyutlu partiküllerin mevcudiyeti ve akım türünün kaplamaya kazandırmış olduğu olumlu özellikler nikel esaslı nano SiC kompozit kaplamaların üretimine olan ilgiyi arttırmıştır. Ni-SiC kompozit kaplamalar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Diğer takviye

partiküllerine göre SiC partikülünün düşük maliyeti ve yüksek aşınma direnci SiC'ü cazip kılmaktadır (Vaezi vd., 2008; Salari Mehr vd., 2019; Lanzutti vd., 2019).

Ni-ZrO₂ kompozit kaplamaların yüksek sertlik ve üstün tribokorozyon direnci sergilemesi Ni matrikste dislokasyon hareketini engelleyen inert ZrO₂'ün dispersiyon mukavemet artırma etkisinden kaynaklanmaktadır (Benea, 2009; Bostani vd., 2018).

Kimyasal olarak kararlı, toksik olmayan, yüksek sertlik ve yüksek sıcaklıkta aşınma direnci gösteren Ni-TiO₂ kompozit kaplamalarda artan TiO₂ içeriğine bağlı olarak yük taşıma kabiliyeti ve aşınma direnci artmaktadır. Ni-TiO₂ kompozit kaplamalar, otomobil parçaları, elektrik bağlantı parçaları, motor silindir parçaları, müzik aletleri, tıbbi cihaz parçaları ve yakıt hücresi uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Baghery vd., 2010; Algul vd. 2015 a).

WC veya WC-Co teknolojik olarak önemli bir malzeme olup, kesici aletler, kaya deliciler, zimbalar ve aşınmaya dayanıklı kaplama malzemeleri olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Hem tokluk hem de mukavemetin birlikte bulunduğu WC-Co kaplamalar sert krom kaplamalara alternatif olarak düşünülmüştür. Hazırlanan Ni-WC kompozit kaplamalarda, WC oranı arttıkça sürtünme katsayısının azaldığı gözlenmiştir (Surender vd., 2004; Elkhoshkhany vd., 2017).

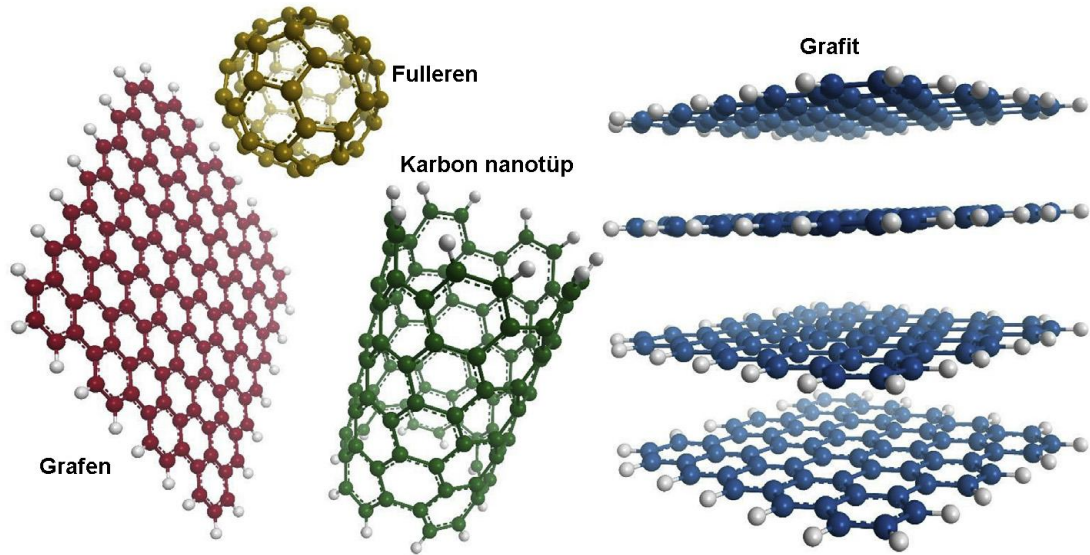
Bir boyutlu nanomalzeme olan CNT'ler hafif, geniş en boy oranlarına sahip boru şeklinde hegzagonal yapılıdır. CNT'lerin yüksek elektrik iletkenliği, üstün mekanik özellikler ve ışık geçirgenliği nedeniyle elektrolitik kaplama yöntemi ile CNT içeren kompozit kaplamalar daha iyi aşınma direnci, korozyon direnci ve kendiliğinden yağlama özellikleri için önerilmiştir (An vd., 2008; Dong vd., 2019). CNT'ün kendiliğinden yağlayıcılık özelliğinden dolayı hazırlanan Ni-CNT kompozit kaplamalarda sürtünme katsayısının belirgin bir şekilde azaldığı gözlenmiştir. Ni-CNT kompozit filmler, havacılık, otomobil ve diğer endüstrilere sürtünme bileşeni olarak uygulama alanı bulabilir (Arai vd., 2008).

Grafen, güçlü kovalent bağların oluşturulduğu 1580 cm⁻¹ ve 2700 cm⁻¹'de Raman pikleri ile karakterize edilen sp² karbon altıgen ağlarından oluşmaktadır. Grafen, eşsiz iki boyutlu yapısı, olağanüstü fiziksel ve mekanik özelliklerinden dolayı uzay, kimya ve otomotiv endüstrileri, enerji üretimi, nükleer uygulamalar için gerekli tüm özellikleri sergilemektedir. Ayrıca, grafen levhalarının kompozit kaplamalarda yüzey pürüzlülüğünü ve sertliği arttırdığı, tane boyutunu incelttiği ve kompozit kaplamaların

korozyon direncini arttırdığı rapor edilmiştir (Jabbar vd., 2017). Yüksek performanslı Ni-Gr kompozitler geliştirmede karşılaşılan en önemli sorun, Ni matriks içine grafenin üniform bir şekilde dağıtılmasıdır.

2.3. Elektrolitik Kaplama Yöntemi Kullanılarak Üretilmiş Ni-Gr Kompozit Kaplamaların Özellikleri

Grafen günümüzde en ince iki boyutlu karbon malzeme ve tüm grafit formlarının yapıtaşı olarak bilinmektedir. Tek bir karbon atomu tabakasına sahip olan grafen ilk olarak grafitten elde edilmiştir. Grafenin keşfi, karbon malzemelerin araştırılmasında yeni uygulama alanları oluşturmuştur. Şekil 2.1’de karbon’a ait grafen, fulleren, karbon nanotüp ve grafit formları verilmektedir (Ding vd., 2018).

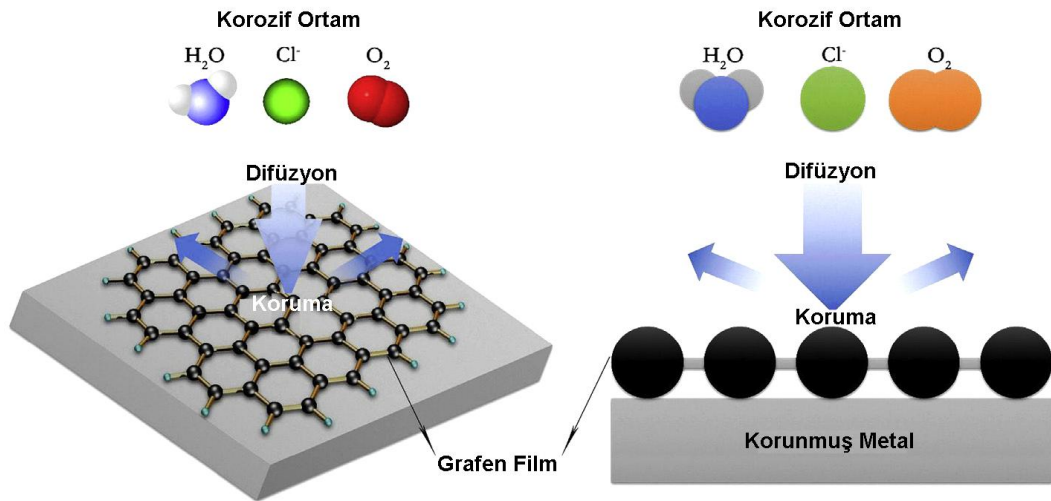


Şekil 2.1. Yaygın olarak kullanılan karbon malzemeler (Ding vd., 2018).

Son yıllarda, araştırmacılar metal grafen kompozitleri döküm, toz metalurji ve elektrolitik kaplama gibi birçok farklı yöntemle hazırlamışlardır. Döküm ile üretilen grafen-metal kompozitlerde grafen ve metal arasındaki yoğunluk farkından dolayı grafen metalin üstünde toplanacaktır. Ayrıca metallerin yüksek ergime sıcaklığı grafen ile metal matris arasında ciddi bir arayüz reaksiyon oluşumunu tetikleyecektir. Toz metalurjisi, metal kompozit hazırlamak için nispeten uygun bir işlem olup karmaşık geometriye sahip nihai ürün elde edilmesine imkân verir. Ancak, grafen kompozitlerin toz metalurjisi ile hazırlanması aşamalarından biri olan yüksek enerjili bilyalı öğütme prosesi sırasında

grafen zarar görebilir veya sinterleme aşamasında kusurlar oluşabilir. Diğer taraftan elektrolitik kaplama ile oda sıcaklığında ve atmosferik basınçta kompozit kaplama oluşturmak mümkündür. Elektrolitik yöntemle hazırlanan malzemelerin tane büyüklüğü, toz metalürjisi ile üretilenden daha ince olup tane boyutunu küçültme mukavemet artırma mekanizmasından dolayı ileri mekanik ve kimyasal özellikler elde edilir. Ancak geleneksel elektrolitik kaplama teknolojisi zayıf biriktirme verimliliğine sahiptir ve bu nedenle endüstriyel üretim için uygun değildir (Jiang vd., 2018; Ji vd., 2018).

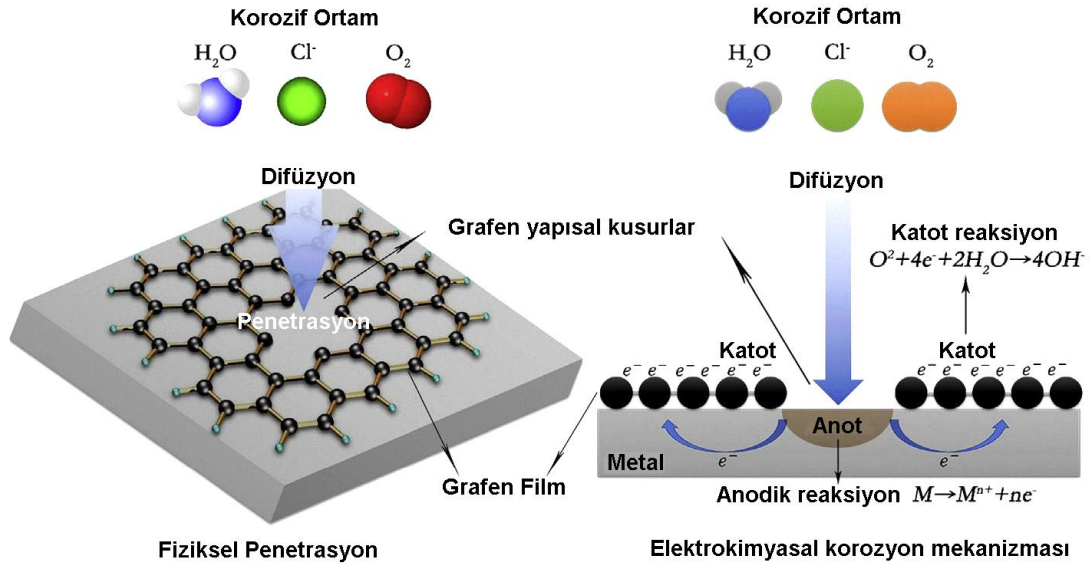
Son on yılda grafen en çok çalışılan bilimsel çalışmalar arasında yer almaktadır. Grafenin en popüler nanomalzeme haline gelmesinde elektronik, enerji ve biyolojide uygulamaları etkili olmuştur. Grafenin kimyasal kararlılığı, termal kararlılığı ve mükemmel bariyer özellikleri sayesinde metalleri korozyona karşı korumak mümkündür (Ding vd., 2018). Grafen filmin su, hava vb. korozif ortamlarda metallerin korozyon hızını önemli ölçüde azaltıcı etkisi Şekil 2.2’de görülmektedir. Grafen filmler en ince koruyucu kaplama olarak isimlendirebiliriz.



Şekil 2.2. Grafen filmin korozif ortamdaki bariyer etkisi (Ding vd., 2018).

Grafen film korozif çözeltilisinin metale nüfus etmesine izin vermeyerek hasara uğramasını engellese de, grafen filmdeki çatlak ve kusurlardan dolayı altlık olarak kullanılan metal önemli ölçüde korozyona uğrayabilir. Grafen filmdeki çatlak ve kusurlar korozyona karşı koruma kabiliyetini önemli ölçüde azaltmaktadır. Metal yüzeyindeki grafen filmde bulunan bu kusurlar korozyona karşı kısa süreli üstün koruma performansı sağlasa dahi uzun süreli koruma performansında istenilen talebi karşılamayabilir. Bu

nedenle, atomik tabakası biriktirme teknolojisi ile kusurları tamir ederek grafen filmin koruyucu yeteneğini geliştirmek mümkündür. Grafen filmin koruyucu etkisi hakkında birçok farklı görüş bulunmaktadır. İnce filmlerin hazırlanmasında kusurları önlemek neredeyse imkânsız olduğu için uzun vadeli bir korozyon önleyici teknoloji olarak grafen film uygulamasının pratik olmadığı düşünülmektedir. Ayrıca bu kusurlar, grafen filmin uzun süreli koruma performansının zayıf kalmasının ana nedenidir. Bazı araştırmacılar, grafen filmlerin metal yüzeyin korozyon koruma performansına katkı sağlamadığını düşünmektedir ve grafenin mükemmel iletkenliği metallerin elektrokimyasal korozyona uğramasını teşvik ettiği Şekil 2.3’de görülmektedir.



Şekil 2.3. Metallerin korozyonuna neden olan grafen film kusurları (Ding vd., 2018).

Chronopoulou vd., (2018), yüzey aktif madde Sodyum Dodesil Sülfat (SDS) ilave ederek veya etmeyerek hem DC hem de PC akımla saf nikel ve grafen plaka (GNPs) içeren kompozit kaplamalar hazırlamıştır. DC akım koşulları altında üretilen kaplamadan farklı olarak, yapı yüksek frekanslarda uygulanan PC akım durumunda daha homojen ve pürüzsüz hale gelmektedir. Elektrolitik banyoda düşük frekanslı PC akım ($\nu = 1$ Hz) uygulanmasıyla birlikte yüzey aktif madde SDS ilave edilmesi durumunda yüzeyin pürüzlülüğü daha da azalmıştır. Bununla birlikte, yüksek frekanslı PC akımla beraber yüzey aktif madde SDS ilave edildiğinde düşük frekans altında PC akımla üretilen kaplamalara kıyasla Ni matrisinde daha yüksek karbon içeriğine sahip daha düzgün ve pürüzsüz bir yüzey ile elde edilmiştir. Hem DC hem de PC akımla üretilen kompozit

kaplamaların XRD sonuçlarına göre Ni matrise grafen (Gr) ilavesinin Ni kristalinin tekstür yapısını önemli ölçüde etkilemediğini, (111) düzlemi boyunca yönelmenin geliştiği ortaya çıkmıştır. Saf Ni kaplamalara kıyasla PC akımla üretilen tüm kompozit kaplamaların sertliği yüksektir. Ancak, DC akım uygulanması durumunda kaplamaların yüzeyinde partiküllerin topaklaşmasından dolayı Ni matriste üniform olmayan grafen dağılımı kompozit kaplamaların sertliğinin saf Ni'den daha düşük olmasına yol açmıştır. Yüzey aktif madde içeren kompozit kaplamalar daha yüksek bir aşınma direnci sergilemiştir. Kompozit kaplamaların aşınma mekanizması, bölgesel oksidasyon olayları ile birlikte adhesif ve abrasif aşınmasının beraber gerçekleşmesidir.

Kumar vd., (2013), elektrolitik kaplama yöntemi ile çelik üzerine saf Ni ve Ni-Gr kaplama hazırlamıştır. Ni matrise Gr ilavesi ile tercihli yönelme gerçekleşmektedir. Saf Ni ve Ni-Gr kompozit kaplamaların yüzey morfoloji sonuçlarına göre saf Ni kaplamanın tüm yüzeyinde iri taneli homojen kaplama elde edilirken, Ni-Gr kompozit kaplama yüzeyinde ise daha az tepeciklerin olduğu üniform, parlak ve ince taneli yapı gözlenmiştir. Elektrolitik kaplama sırasında kaplama yüzeyine adsorbe edilen Gr'in kristal büyümesini engellediği ve Ni iyonlarının indirgenmesi için çekirdekleşme bölgelerini arttırdığı, bu da kompozit kaplamada tane inceltiliği ileri sürülmüştür. Ni-Gr kompozit kaplama, saf Ni'den daha yüksek sertlik sergilemiştir. Kompozit kaplamanın daha yüksek sertlik göstermesi Ni matriste yüksek mukavemete sahip Gr partiküllerinden kaynaklanmaktadır. İnce taneli metal matriste bulunan Gr dislokasyon hareketine engelleyerek sertlikte artış sağlamıştır. Çok sayıda çatlak ve boşlukların oluştuğu saf Ni kaplamaya nazaran kompozit kaplamada banyo çözeltisindeki Gr kusurlara karışır ve kompozit kaplamanın korozyona karşı direncini artırmıştır.

Kuang vd., (2013), süspansiyon halinde grafen oksit (GO) tabakaları olan bir nikel sülfamat çözeltisi içinde elektrolitik kaplama ile Gr/Ni kompozitler hazırladı. Kompozitlerde yüksek şiddette (1 1 1) keskin difraksiyon piki Ni'in (2 0 0) düzlemi yerine (1 1 1) düzlemi boyunca büyüme eğiliminde olduğunu göstermektedir. Elektrolitik kaplama işlemi sırasında indirgendikten sonra Ni'in Gr tabakaları üzerinde büyüebileceği iddia edilmektedir. Saf Ni ile karşılaştırıldığında kompozit kaplama daha yüksek pürüzlülük sergilemiştir. İndirgenmiş grafen oksit (RGO) tabakalarının birbiriyle etkileşmesi elektrolit iyonlarının Gr yüzeylerin içine girmesi ve çıkması için kolay bir yol sağlayan açık bir gözenek yapısı oluşturmasından kaynaklanmaktadır. Kompozitlerin

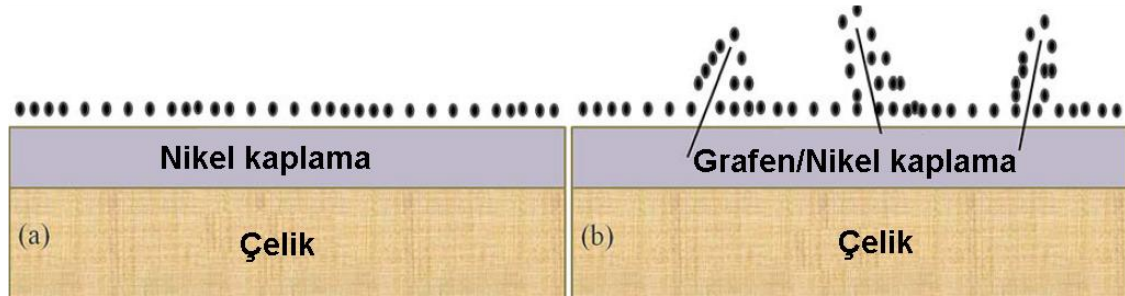
yüzeyi incelendiğinde elektrolitik kaplanmış bazı buruşuk tabakaların bulunması Ni matrisinde indirgenmiş Gr tabakalarının homojen dağılımını göstermektedir. EDS analiz sonucu da kompozitlerde grafenin varlığını doğrulamaktadır. EDS analiz sonuçlarına göre Ni'in mevcudiyeti, iletken Gr yüzeylerinde Ni²⁺ iyonlarının indirgenebileceğini işaret etmektedir. Elektrolitik kaplanmış Ni kaplama ile Gr/Ni kompozitlerin 20°C ila 200°C arasında sıcaklığa bağlı olarak ısıl iletkenlikleri incelendiğinde sıcaklık artışıyla ısıl iletkenliğin azaldığı ve kompozitlerin daha yüksek ısıl iletkenliğe sahip olduğu gözlenmiştir. Örneğin kompozitin 200°C'de (70.4 W / mK) ısıl iletkenliği, 20°C'de (68.4 W / mK) elektrolitik kaplanmış Ni'den bile daha yüksek olup genel olarak tüm sıcaklık aralığında kompozitlerin ısıl iletkenliği saf Ni'den yaklaşık % 15 daha fazla gelişme göstermiştir. Kompozit kaplamalarda ağırlıkça % 0,12 Gr ilavesinin bir takviye etkisi olduğu tespit edilmiştir. Gr / Ni kompozit ve saf Ni elektrolitik kaplamaların nanosertlik test sonuçlarına göre Gr / Ni kompozit nanomekanik özelliklerinde mükemmel bir gelişme sergilemiştir. Kompozit kaplama 6,85 GPa'lık bir sertliğe ve 252,76 GPa'lık bir elastisite modülüne sahiptir. Saf Ni ise 1,81 GPa'lık bir sertlik ve 166,70 GPa'lık elastite modülle karşılaştırıldığında, kompozit kaplamanın sertliğindeki artış neredeyse 4 kat olmaktadır. Ni içine daha iyi tutunan Gr tabakaları sayesinde Gr tabakaları ve Ni arasındaki ara yüz bağlanmadan dolayı kompozit yüzeyi daha kompakttır. Kompozit kaplamadaki sertlik artışı ilave edilen Gr tabakalarının sığ yüzeyde homojen bir şekilde dağılması ve Ni içinde bir ağ gibi hareket etmesi ile ilgilidir. Batıcı uç kompozit kaplamaya girdiğinde Gr tabakaları yükü taşır ve dislokasyon hareketini engeller. Saf Ni kaplamada ise batıcı uç daha büyük bir derinliğe kolayca nüfuz edebilir.

Algul vd., (2015 b) yaptığı çalışmada bir Watt tipi elektrolitten PC akımla Ni-Gr metal matris kompozit kaplamalar hazırladı ve yapısal ve tribolojik özelliklerini inceledi. XRD çalışmalarında (1 1 1), (2 0 0) ve (2 2 0) kristalografik düzlemlerine karşılık gelen Ni'e ait tipik pikler elde edilmiştir. Saf Ni için, (2 0 0) düzleminin relatif şiddeti, (1 1 1) ve (2 2 0) gibi diğer düzlemlerden çok daha yüksektir. Kompozit kaplamada Gr ilavesi ile Ni (2 0 0) yerine (1 1 1) düzlemi boyunca büyüme eğiliminde olduğundan (1 1 1) relatif şiddetinde hafif bir artışa ve (2 0 0) düzleminde ise relatif şiddetin azalmasına neden olmaktadır. Borik asit (H₃BO₃) ve yüzey aktif madde (SDS) gibi Ni matrisin pH ve tane büyüklüğünü kontrol etmek için kullanılan bazı katkı maddeleri olduğundan, bu katkı maddelerinin kirlilik oluşturduğuna inanılmaktadır. Gr

ilavesi ile SDS ve Bor'un, Gr tabakalarındaki kusurlu bölgelere absorbe olmasına neden olabilir. Bu davranış, (1 1 1) düzlem boyunca Ni'in büyümesini sağlayan Gr'in özel morfolojik yapısıyla ilgilidir. Gr ilavesi ile Ni'in (1 1 1) difraksiyon pikinin şiddetinde azalma ve pikin genişlemesi kompozit kaplamada Ni'in tane büyüklüğündeki azalmayı göstermektedir. Elektrolitik kaplamada büyüme çekirdeklenme ve kristal büyümesi arasındaki bir rekabetten oluşmaktadır. Gr ilavesi ile Ni'in çekirdeklenme bölgeleri artarak ve kristal büyümesi gecikerek ve böylece kompozit kaplamada daha ince taneli Ni matrisi elde edilir. Gr ilavesi ile sertliğin artması tane incelmeye ve grafenin Ni matriste dislokasyon hareketini engellemesine atfedilmektedir. Ni'in (1 1 1) düzleminde şiddetin azalması ince taneli Gr takviyeli Ni matrisli kaplamaları çok kristalli yapmaktadır ve Ni kristalinde tane sınırları dislokasyon hareketini engelleyerek Ni matrisin sertliğini artırmaktadır. Elektrolitte daha az Gr içeren kompozit kaplamanın aşınmış yüzeyinde plastik deformasyon gözlenirken yüksek Gr içeren kompozit kaplamanın yüzeyinde ise plastik deformasyon ve aşınma iz genişliğinin azalması artan kompozit kaplama sertliği ve ayrıca Gr'in kaplamada yük taşıyıcı ve katı yağlayıcı görev üstlenmesinden kaynaklanmaktadır. Gr'in katı yağlayıcı etkisi nedeniyle, Gr nano tabakaları katı bir yağlayıcı olarak davranır ve aşınan yüzeyde kayarak plastik deformasyonu azaltmaktadır.

Jiang vd., (2014) hazırladığı çalışmada, korozyon direnci uygulamaları için 0,1 ve 0,2 g/l grafen içeren nikel kompozitler üretmişlerdir. Yüzey morfoloji incelendiğinde kompozit kaplamaların yüzeylerinde dağılmış kabarıklar bulunurken saf Ni kaplama düzgün bir yüzey ve homojen bir yapı sergilemiştir. Ayrıca daha yüksek Gr içeren banyodan hazırlanan kompozit kaplamanın yüzeyinde daha fazla ve daha büyük kabarıklar gözlenmiştir. Saf Ni kaplamaya kıyasla kompozit kaplamaların yüzeyinde kabarıkların oluşmasından dolayı daha pürüzlü yüzeyler elde edilmiştir. Saf Ni ile kompozit kaplamaların yüzey morfolojisi arasındaki fark Gr'in elektrik özelliği ile ilgili olabilir. Gr'in çok iletken olması nedeniyle, katot yüzeyleri kaçınılmaz olarak Ni matrisine Gr'in ilave edilmesine artacaktır. Kaplama sırasında, elektronlar Gr yüzeylerinden Ni matrisine transfer olabilir ve sonuç olarak Ni iyonları ya katot yüzeyinde veya Gr yüzeyinde azalır. Ayrıca Gr, Ni matrisinden daha iyi bir iletkenliğe sahip olduğundan Gr yüzeylerindeki Ni iyonlarının redüksiyon hızı Ni matrisinin yüzeylerindeki oranlardan daha yüksek olacaktır. Bu nedenle, Ni iyonları tercihen Gr

üzerinde birikecektir ve kaplamanın yüzeylerinde bazı kabarmaların oluşumuna yol açacaktır. Gr'in Ni matrisine yapıştığı veya Ni'e ilave edildiği mekanizma Şekil 2.4'de desteklenmektedir.



Şekil 2.4. (a) Saf Ni ve (b) Gr içeren kompozit kaplamanın şematik görüntüsü (Jiang vd., 2014).

Saf Ni ve Gr içeren kompozit kaplamalar altlık malzeme olarak kullanılan çelikten daha yüksek korozyon potansiyeli ve daha düşük korozyon akım yoğunluğu sergilemektedir. Gr içeren kompozit kaplamalarda artan Gr içeriğine bağlı olarak korozyona karşı direnç artmaktadır. Gr içeren kompozit kaplamaların korozyona karşı direnç göstermesi çeşitli faktörler sorumlu olabilir: (i) Gr'in Ni matriste düzgün bir şekilde dağılması ve inert bir fiziksel bariyer görev üstlenmesi sonucu lokal korozyonun başlamasına ve kompozit kaplama yüzeyinde homojen korozyon oluşmasına neden olması, (ii) Gr'in Ni matriste aralık, boşluk ve mikro ölçekte delikleri doldurması ile korozyonun başlaması ve gelişmesi önleyebilmesi (iii) Gr ilavesi ile Ni matrisin tane boyutunun önemli ölçüde azalması ve NiO ve Ni(OH)₂ gibi sürekli ve koruyucu pasif film oluşumuna ve daha iyi korozyon direncine neden olan tane sınırı yoğunluğunun artmasıdır. Gr içeren kompozit kaplamaların daha iyi korozyon direnci göstermesi Gr'in Ni matriste dağılımına büyük ölçüde bağlı olduğuna inanılmaktadır. Kaplama işlemi sırasında homojen bir Gr dağılımı kesinlikle iyi korozyon direncine katkıda bulunacaktır (Jiang vd., 2014).

Chen vd., (2016) yaptığı çalışmada, Ni-Gr kompozit kaplamanın kuru kayma koşulları altında karşı malzeme olarak Si₃N₄ seramik bilye kullanarak sürtünme ve aşınma deneylerini inceledi ve saf Ni kaplama ile karşılaştırdı. Kompozit kaplamada Gr içeriğinin 0,3 g/l'den 0,4 g/l'ye yükselmesi ile kaplamanın kompakt yapısı ve yüksek

kaplama sertliğinden dolayı aşınma hızının düşmeye başladığı, yük taşıma kapasitesi ve aşınma direncinin arttığı ifade edilmiştir.

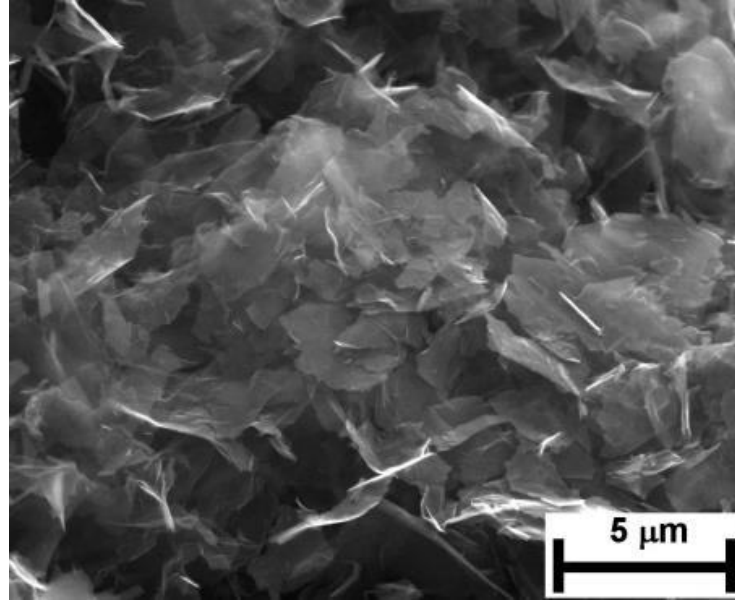
Singh vd., (2018), PC akımla üretilen Ni-grafen oksit (GO) kompozit kaplamanın tribolojik davranışını incelemiştir. Ni-GO kaplamaların sertliğindeki artış, GO partikülleri tarafından sağlanan plastik deformasyonun yanı sıra GO nanopartikülün yüksek sertliği nedeniyle olabilir. Bu nedenle, Ni-GO kaplamaların üstün aşınma direnci sergilemesi GO'nin sertliği nedeniyledir.

Xiang vd., (2019), tabaka tabaka ayırma ve kaplama yöntemini beraber uygulayarak grafit elektrottan tabaka tabaka ayrılmış Gr içeren mükemmel tribolojik özelliklere sahip tek aşamalı elektrolitik Ni-Gr kompozit kaplama hazırlamıştır. Ni-Gr kompozit kaplamanın sertliğindeki artış, Ni'e ilave edilen Gr'in dispersiyon ve Hall-Petch etkisi ile ilişkilidir. Sürtünme katsayısı ve aşınma hızındaki azalmasının nedenleri ise sırasıyla: (i) Gr'in kendinden yağlayıcılık özelliği ve Ni-Gr kompozit kaplamada Gr tabakalarının üniform dağılımı, (ii) geleneksel Archard ilkesine göre, malzemenin sertliği aşınma hızı ile ters orantılıdır. Yukarıda tarif edildiği gibi, Gr'in ilavesi ile Ni-Gr kompozit kaplamanın sertliği ve aşınma direnci artmaktadır.

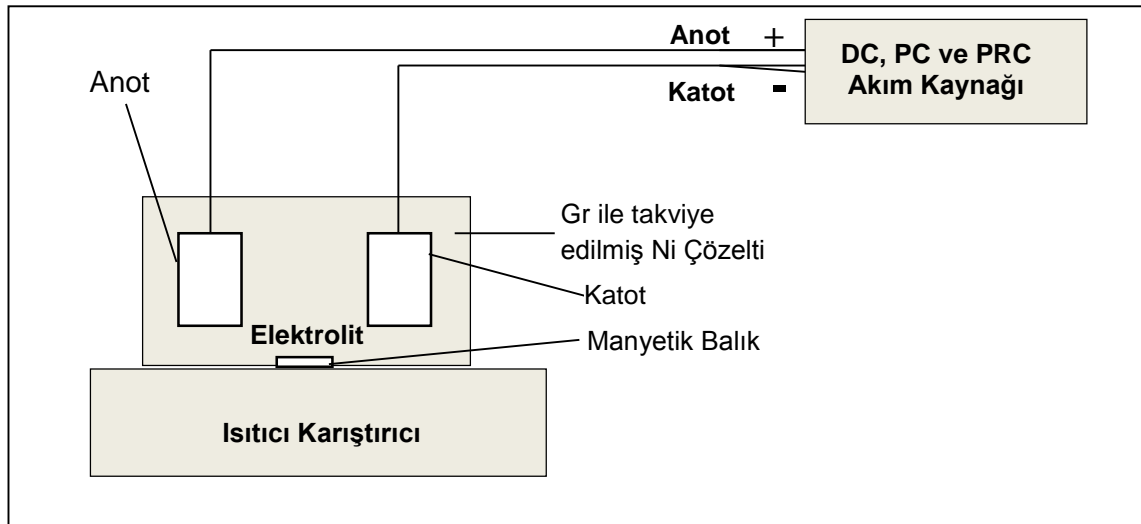
3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Deney Düzenegi ve Altlıkların Hazırlanması

Deneysel çalışmalarda Ni ve Gr takviyeli Ni esaslı kaplamaların üretiminde Watts tipi kaplama banyosu kullanılmıştır. Makine Mühendisliği laboratuvarında doğru akım (DC), pulse akım (PC) ve pulse reverse akım (PRC) uygulayabilen ve akım parametrelerinin kontrolünün kolayca sağlayabildiği güç kaynağı kullanılmıştır. Kaplamalar 100 ml lik cam beher içerisine ısı ve hız kontrollü manyetik karıştırıcı üzerine kurulmuş düzenek içerisinde yapılmıştır. Deney düzenegi çevre ve ortam sağlığı için çeker ocak içerisine kurulmuştur. Çalışmalarımızda katot malzemesi olarak 10 x 30 x 3 mm ebatlarında St 37 çelik levhalar, anot malzemesi olarak 30 x 50 x 2 mm ebatlarında Ni levhalar kullanılmıştır. Kaplama banyosu olarak yüksek saflıkta nikel sülfat ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), nikel klorür ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), borik asit (H_3BO_3) ve saf su kullanılmıştır. Kompozit kaplamalar için yanal boyutu ~5 nm ve kalınlığı ~5-8 nm boyutlarında olan Gr tabaka yığınlarından oluşmaktadır. Gr'ne ait SEM görüntüleri Gr tabakalarının üst üste geldiğini ve buruşuk veya buruşuk ince kağıt gibi olduğunu göstermektedir (Şekil 3.1). Gr'ler ultrasonik prob yardımı ile kaplama banyolarına ilave edilmiştir. Gr ile takviye edilmiş tabakalar üretilirken Gr'lerin topaklaşmasını (aglomerasyonunu) engellemek için kaplama esnasında manyetik karıştırmanın yanında kaplama öncesi ultrasonik prob çalıştırılmıştır. Kaplama düzenegi Şekil 3.2'de verilmiştir. Bu çalışma esnasında banyo bileşimi, akım türünün (DC, PC ve PRC) Gr takviyeli Ni esaslı kaplamaların mikroyapı, sertlik, aşınma direnci gibi fiziksel parametreler üzerindeki etkisi incelenmiştir.



Şekil 3.1. Gr'lerin SEM görüntüsü.



Şekil 3.2. Kaplama deney düzeneğinin şematik gösterimi.

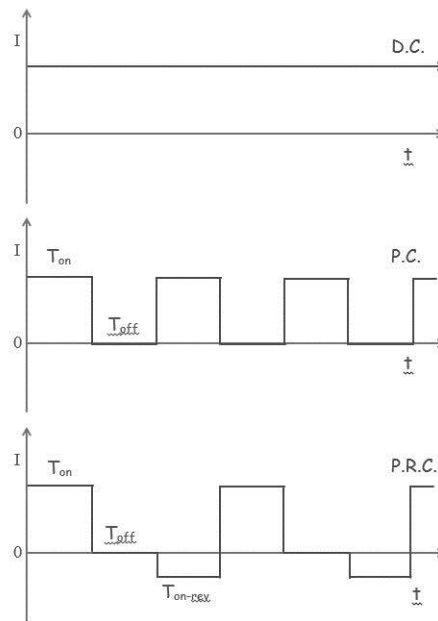
Kaplama tabakasının altlıkla iyi bir birleşme sağlayabilmesi, düzgün ve homojen bir kaplama tabakası elde edebilmek için altlıkların yüzeyi düzgün ve temiz olması gereklidir. İstenilen ebatlarda çelik levhalardan elde edilen katot malzemeleri, zımpara yardımı ile yüzeyleri düzgün ve temiz hale getirilmiştir. Çelik katot yüzeyleri 400, 600, 800 numaralı Silisyum Karbür (SiC) zımparalar kullanılarak yüzeyi ıslak zımparalanmış ve alkolle temizlendikten sonra kurutulup deneye hazır hale getirilmiştir. Kaplama öncesi çelik levhalar hacimce % 10 H₂SO₄ çözeltisine daldırılmış 50 sn bekletilmiş sonrasında saf su ile yıkanarak kaplama sistemine yerleştirilmiştir.

3.2. Ni Elektrolitik Kaplamalar

Kaplama çalışmalarında 5 A/dm^2 akım yoğunluğu altında DC, PC ve PRC akım türünde olmak üzere kaplama gerçekleştirilmiştir (Çizelge 3.1). Kullanılan akım türleri Şekil 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Elektrolitik kaplama banyoları çalışma koşulları.

Banyo Bileşimi	
NiSO ₄ .6H ₂ O	300 g/l
NiCl ₂ .6H ₂ O	50 g/l
H ₃ BO ₃	40 g/l
SDS (Sodium dodecyl sulfate)	0.1 g/l
Kaplama Parametreleri	
Sıcaklık	$50 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$
pH	4 ± 2
Akım Yoğunluğu	5 A/dm^2
Akım Türü	DC, PC ve PRC
Manyetik Karıştırma	30 dak.
Ultrasonik Karıştırma	30 dak.
Anot	Ni
Katot	St 37 çelik



Şekil 3.3. Kullanılan akım türleri.

3.3. Ni/Gr Elektrolitik Kompozit Kaplamalar

Bir önceki bölümde belirtilen Ni kaplama banyosunun içerisine 0,1 ve 0.3 gr/l Gr ilave edilerek aynı şartlarda Ni/Gr kompozit kaplamalar üretilmiştir. Gr takviyeli Ni esaslı

kompozit kaplamalar takviyesiz Ni esaslı olduğu gibi akım türünün etkisi incelenmiştir. Ayrıca ilave edilen Gr miktarının etkisini incelemek için farklı oranlarda ilave edilmiştir. Kaplama öncesi banyo çözeltisine ilave edilen Gr'lerin aglomerasyonunu önlemek amacıyla, çözelti manyetik olarak karıştırma ve ultrasonik homojenizatör cihazında karıştırma işlemlerine tabi tutulmuştur. Gr takviyeli kompozit kaplama ve takviyesiz Ni esaslı kaplama çalışmalarında kullanılan banyo türleri, bileşimleri ve işlem parametreleri Çizelge 3.2'de verilmiştir

Çizelge 3.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan banyo parametreleri.

Numune Kodu	Akım (T_{on})	Gr	$T_{on}/T_{off}/-T_{on}$ (ms)
1	DC-5 A/dm ²	-	$\infty/0/0$
2	PC-5 A/dm ²	-	10/10/0
3	RPC-5 A/dm ²	-	10/10/10
4	DC-5 A/dm ²	0,1 g/l	$\infty/0/0$
5	DC-5 A/dm ²	0,3 g/l	$\infty/0/0$
6	PC-5 A/dm ²	0,1 g/l	10/10/0
7	PC-5 A/dm ²	0,3 g/l	10/10/0
8	RPC-5 A/dm ²	0,1 g/l	10/10/10
9	RPC-5 A/dm ²	0,3 g/l	10/10/10

3.4. Kaplama Tabakasının Karakterizasyonu

3.4.1. Optik ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) çalışmaları

Kaplamaların yapısı ve aşınma deneyleri sonrası yüzey görünüşleri enerji dağılımlı x-ışınları spektrometre (EDS) donanımlı Zeiss Supra taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Nikon marka Eclipse LV150 model optik metal mikroskobu (OM) kullanılarak incelenmiştir.

3.4.2. X-ışınları difraktometresi (XRD) çalışmaları

Kaplamaların faz analizleri Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı bünyesinde bulunan Panalitcal X-ışını kırınım ölçer (XRD) kullanılarak

gerçekleştirilmiştir. XRD ölçümlerinde $\lambda = 1,54059 \text{ \AA}$ dalga boyuna sahip CuK_α ışınımı kullanılmıştır.

3.4.3. Mikrosertlik ölçümleri

Mikrosertlik ölçümleri Shimadzu HVM mikro sertlik cihazında Vickers batıcı uç kullanılarak 50 gram yük altında yapılmıştır. Her bir numune için en az 5 ölçüm alınarak ortalama sertlik değeri hesaplanmıştır.

3.4.4. Yüzey pürüzlüğü ölçümleri

Yüzey pürüzlülüğü Mitutoyo Surtest SJ-400 marka profilometrede numune yüzeyinde 1000 μm mesafede tarama yapılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir numune için üç farklı ölçüm alınmıştır. Cihazda alınan yüzey pürüzlüğü sonuçlarının ortalaması alınmıştır.

3.5. Aşınma Deneyleri

St 37 çelik ve kaplanmış numunelerin aşınma deneyleri 5 N'luk normal yük altında oda şartlarında doğrusal zıt yönlü düzlem-bilye aşınma (reciprocating ball-on-flat) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Karşı malzeme olarak 10 mm çaplı alümina (Al_2O_3) bilye kullanılmıştır. Sürtünme kuvveti bilgisayar tarafından aşınma cihazındaki yük hücresi (loadcell) ile sürekli olarak kaydedilmiştir. Aşınma deneylerine ait diğer şartlar Çizelge 3.3'de verilmiştir. Aşınma testleri sonrasında aşınma izlerinin profili Mitutoyo Surtest SJ-400 profilometre cihazı ile ölçülmüştür. Her bir numune için 5 adet aşınma izi topografik profilleri çıkarılmıştır.

Çizelge 3.3. Aşınma deney sistemine ait parametreler.

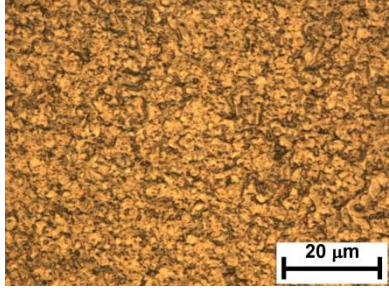
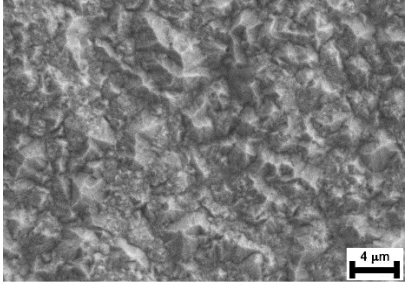
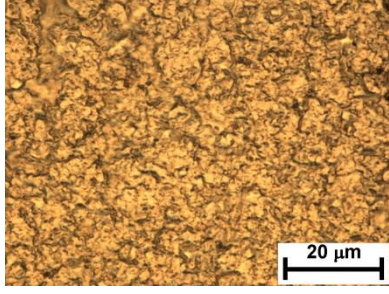

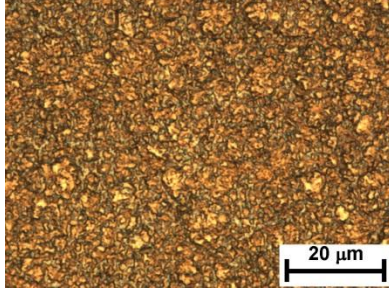
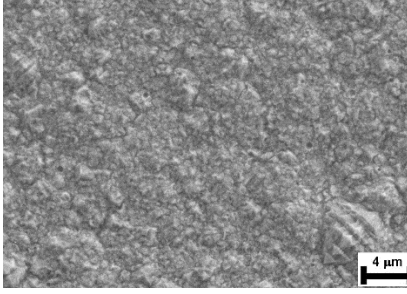
Deney Yüğü (N)	5
Aşınma izi uzunluğu (mm)	10
Kayma hızı (cm s^{-1})	1,7
Aşındırma süresi (s)	2880
Aşındırma mesafesi (m)	50
Nem (%)	35 ± 5
Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	20 ± 5

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

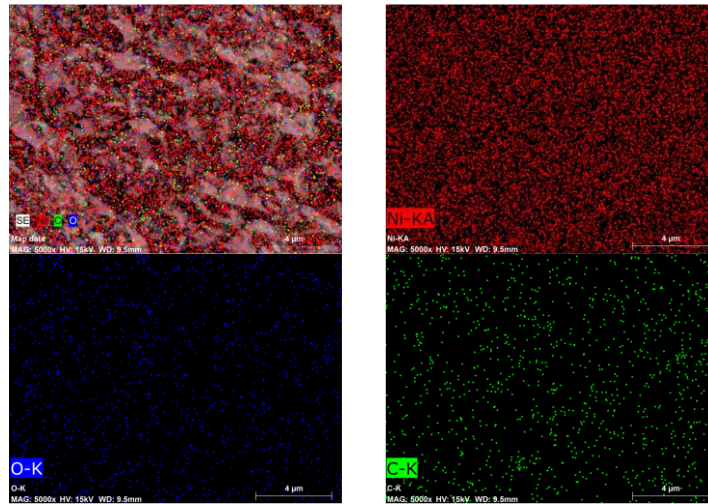
4.1. Yapısal Karakterizasyon Sonuçları

Ni kaplama ve Ni/Gr kompozit kaplamaların yapısal ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi hedeflendiğinden katot malzemesi olarak St 37 çelik altlık malzeme olarak seçilmiştir. Kaplama esnasında anot malzemesi olarak yüksek saflıkta Ni kullanılmıştır. Literatürde Gr'in üstün mekanik, korozyon, tribolojik vb. özelliklerinden sıkça bahsedilmektedir (Singh vd., (2018) ve aynı zamanda yapılan ön çalışmalar ve literatür taraması yapı içerisindeki Gr miktarının artması ile tribolojik özelliklerin olumlu yönde geliştiği belirlenmiştir. Bu mükemmel özelliklerin etkilerini görebilmek için Gr takviyeli Ni matrisli kompozit kaplamalar üretilmiş ve sonuçlar kıyaslanmıştır. Gr takviyeli Ni matrisli kompozit kaplamaların üretiminde yine saf Ni kaplama oluşturulurken kullanılan kaplama banyosu ve kaplama şartları kullanılmıştır. Bu çalışmalarda banyo elektrolitine 300 g/l NiSO₄.6H₂O, 50 g/l NiCl₂.6H₂O, 40 g/l H₃BO₃, 0,1 g/l SDS (Sodium dodecyl sulfate) ve saf suyun yanında 0,1 g/l ve 0,3 g/l Gr ilave edilmiştir. Literatür çalışmaları dikkate alındığında genellikle 5 A/dm² akım yoğunluğu, pH 4 ve banyo elektrolit sıcaklığı 50 °C olarak sabitlenmiştir. Akım türünün Gr takviyeli Ni matrisli kompozit kaplama üzerine etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda sabit bileşim, 5 A/dm² akım yoğunluğunda ve üç farklı (DC, PC ve PRC) akım türünde kaplamalar üretilmiştir.

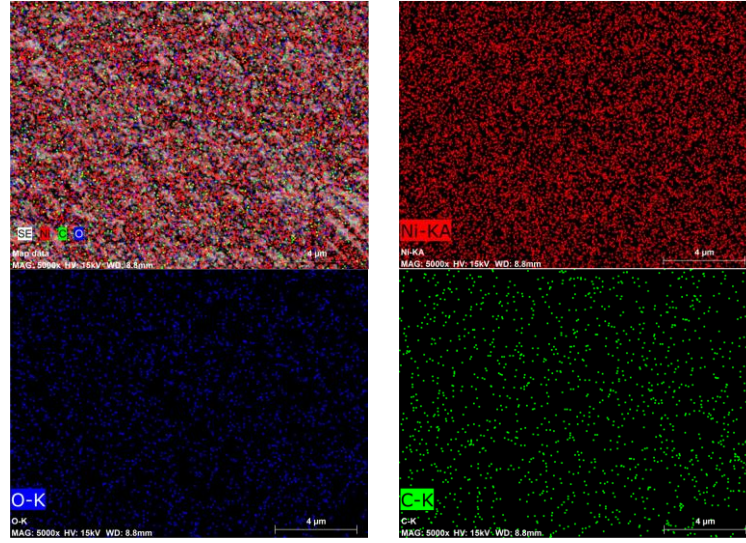
Şekil 4.1'de DC akım altında 50 °C de 30 dk süre ile 5 A/dm² akım uygulanarak çelik altlıklar üzerine biriktirilen saf Ni ve kompozit kaplamaların yüksek çözünürlüklü yüzey morfolojileri görülmektedir. DC akım altında üretilen saf Ni kaplamada tanelerin polihedron şeklinde olduğu görülmektedir. Kompozit kaplamaların yüzey SEM görüntüleri incelendiğinde Gr içeriğinin artması ile polihedron tane şeklinin kaybolduğu ve ince taneli yapıya dönüştüğü tespit edilmiştir (Şekil 4.1). Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'de sırasıyla 0,1 g/l ve 0,3 g/l Gr içeren Ni matrisli kompozit kaplamalardaki elementel haritalama sonuçları verilmiştir. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 incelendiğinde yapıdaki Gr içeriğinin artması ile Gr'in yapı içerisinde homojen olarak dağıldığı görülmüştür.

Gr İçeriği (g/l)	OM Görüntüsü	SEM Görüntüsü
0		
0,1		
0,3		

Şekil 4.1. DC akım altında üretilmiş saf Ni ve kompozit kaplamaların yüzeyine ait OM ve SEM görüntüleri.

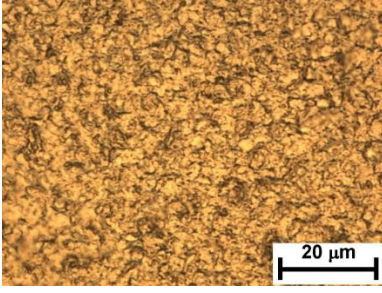
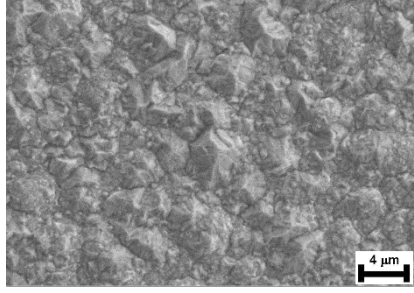
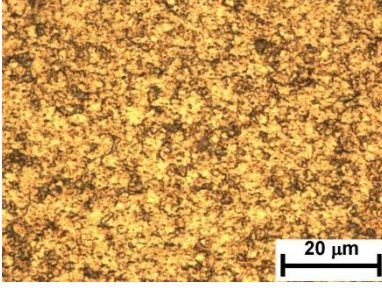
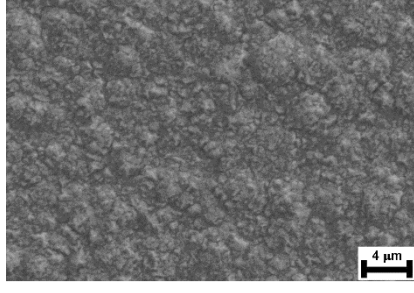
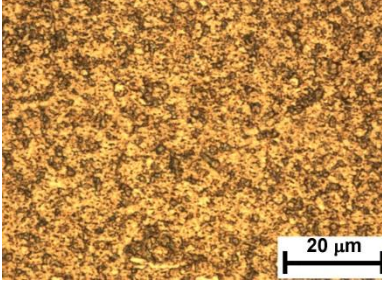
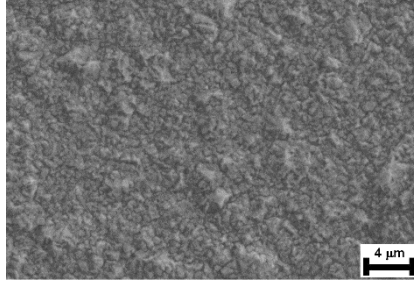


Şekil 4.2. DC akım altında 50 °C de 30 dk süre ile 5 A/dm² akım yoğunluğunda üretilmiş 0,1 g/l Gr içeren Ni matrisli kompozit kaplamadaki elementel haritalama görüntüleri.

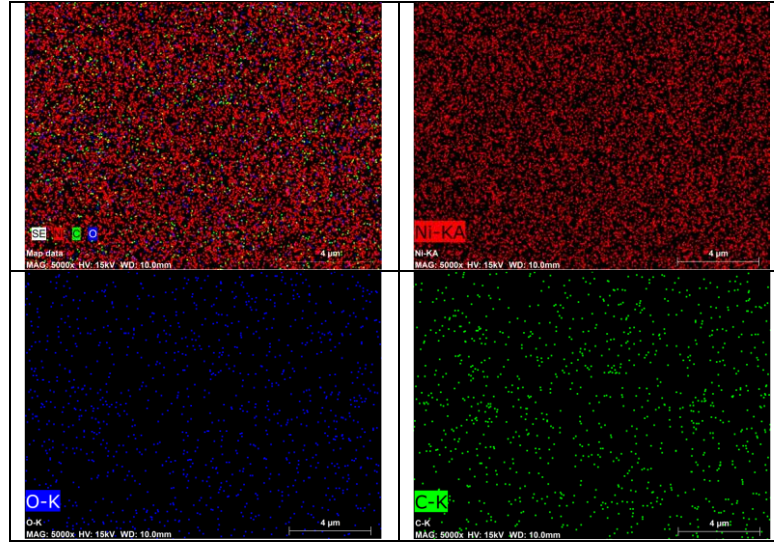


Şekil 4.3. DC akım altında 50 °C de 30 dk süre ile 5 A/dm² akım yoğunluğunda üretilmiş 0,3 g/l Gr içeren Ni matrisli kompozit kaplamadaki elementel haritalama görüntüleri.

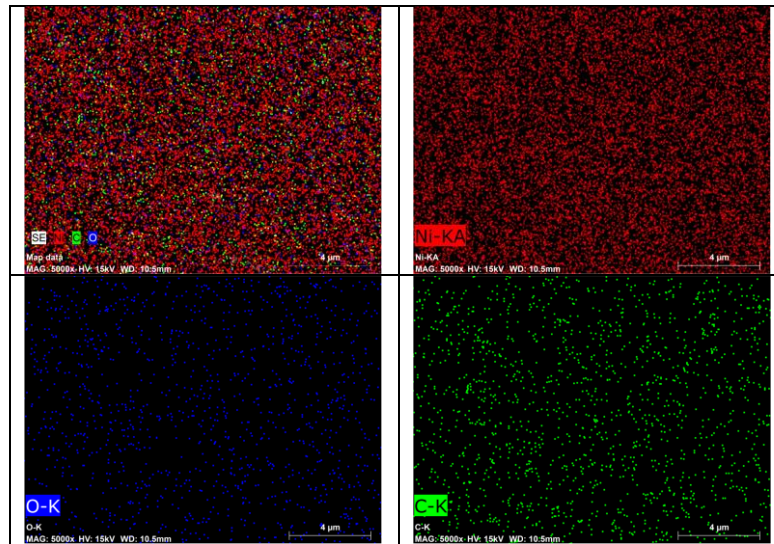
Pulse periyodu 10 msn. (T_{on} 10 msn ve T_{off} 10 msn) olan PC akım altında 50 °C de 60 dk süre ile ortalama (T_{ort}) 5 A/dm² akım uygulanarak saf Ni ve kompozit kaplamalar üretilmiştir. PC akım altında üretilen kaplamaların yüksek büyütme OM ve SEM görüntüleri Şekil 4.4’de verilmiştir. Şekil 4.4 incelendiğinde saf Ni kaplamada polihedron şeklinde tanelerin olduğu görülmektedir. PC akımla yapılan çalışmalarda artan Gr içeriği ile tane şeklinin küçüldüğü SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır. Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da sırasıyla 0,1 g/l ve 0,3 g/l Gr içeren Ni matrisli kompozit kaplamadaki elementel haritalama sonuçları verilmiştir. Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 incelendiğinde yapıdaki Gr içeriğinin arttığı ve yapı içerisinde Gr’in homojen olarak dağıldığı görülmüştür.

Gr İeriği (g/l)	OM Görüntüsü	SEM Görüntüsü
0		
0,1		
0,3		

Şekil 4.4. Pulse periyodu 10 msn. (T_{on} 10 msn ve T_{off} 10 msn) olan PC akım altında $50^{\circ}C$ de 60 dk süre ile T_{ort} 5 A/dm², akım yoğunluğunda üretilmiş saf Ni ve kompozit kaplamaların yüzeyine ait OM ve SEM görüntüleri.



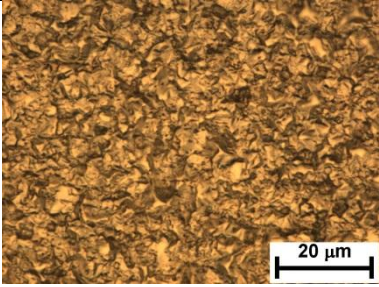
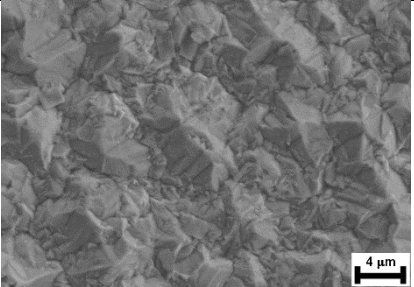
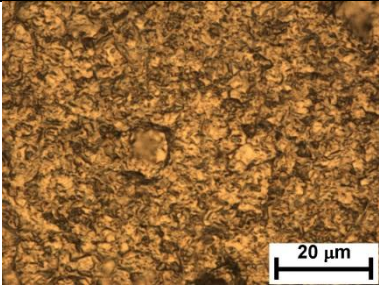
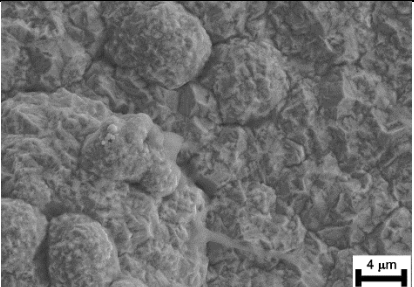
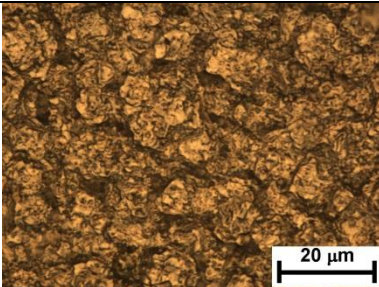
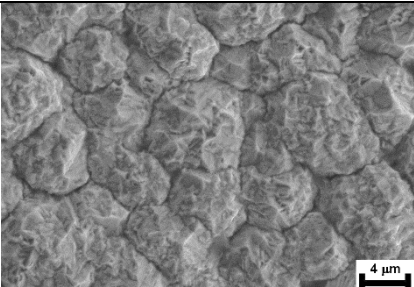
Şekil 4.5. PC akım altında 50 °C de 60 dk süre ile 5 A/dm² akım yoğunluğunda üretilmiş 0,1 g/l Gr içeren Ni matrisli kompozit kaplamadaki elementel haritalama görüntüleri.



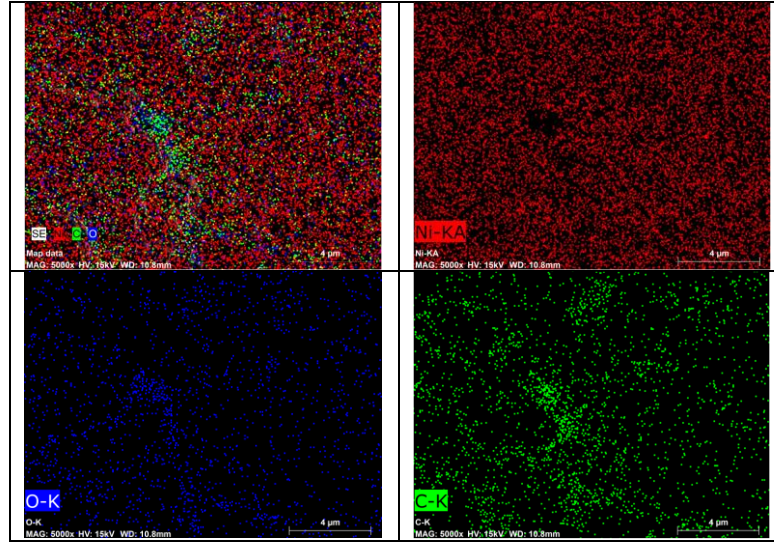
Şekil 4.6. PC akım altında 50 °C de 60 dk süre ile 5 A/dm² akım yoğunluğunda üretilmiş 0,3 g/l Gr içeren Ni matrisli kompozit kaplamadaki elementel haritalama görüntüleri.

PC akımda olduğu gibi pulse periyodu 10 msn. (T_{on} 10 msn ve T_{off} 10 msn) ve reverse (ters) akım ($-T_{on}$) ise 1 A/dm² ve 10 msn periyodlarda, 50 °C sıcaklıkta 60 dakika süre ile ortalama (T_{ort}) 5 A/dm² akım yoğunluğunda üretilmiş saf Ni ve kompozit kaplamaların yüzey OM ve SEM görüntüleri Şekil 4.7’de verilmiştir. Şekil 4.7’de yüzey görüntüleri incelendiğinde ortalama akım yoğunluğu 5 A/dm² ile üretilen saf Ni kaplamada tanelerin polihedron forma yakın olduğu ve iri taneli olduğu gözükmemektedir. Kompozit kaplamalarda ise tanelerin küresel forma yakın olduğu ve artan Gr içeriği ile

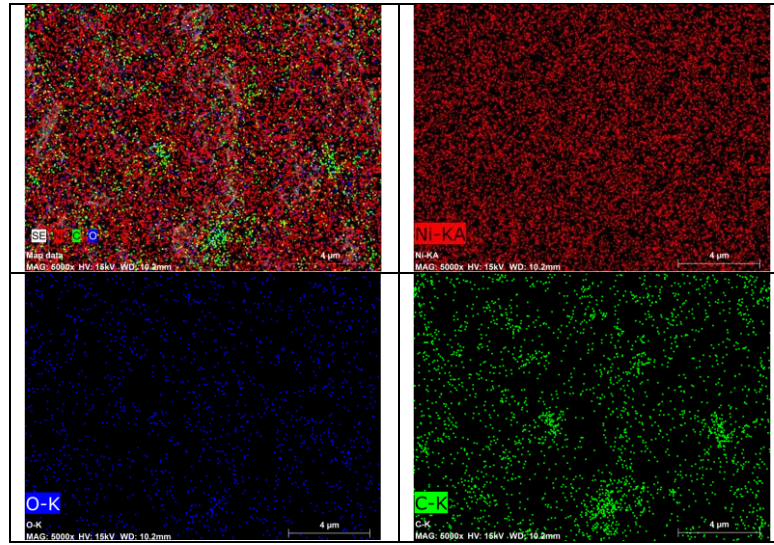
tanelerin irileştiği anlaşılmaktadır. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da sırasıyla 0,1 g/l ve 0,3 g/l Gr katkılı Ni matrisli kompozit kaplamalardaki elementel haritalama görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 ayrıntılı incelendiğinde Gr’in yapıda üniform dağılmadığı ve Gr’lerin topaklanma (aglomerasyon) eğiliminde olduğu açıkça görünmektedir.

Gr İçeriği (g/l)	OM Görüntüsü	SEM Görüntüsü
0		
0,1		
0,3		

Şekil 4.7. Pulse periyodu 10 msn. (T_{on} 10 msn ve T_{off} 10 msn) ve $-T_{on}$ akımı 1 A/dm² ve 10 msn olan PRC akım altında 50 °C de 60 dk süre ile T_{ort} 5 A/dm² akım yoğunluğunda üretilmiş saf Ni ve kompozit kaplamaların yüzeyine ait OM ve SEM görüntüleri.



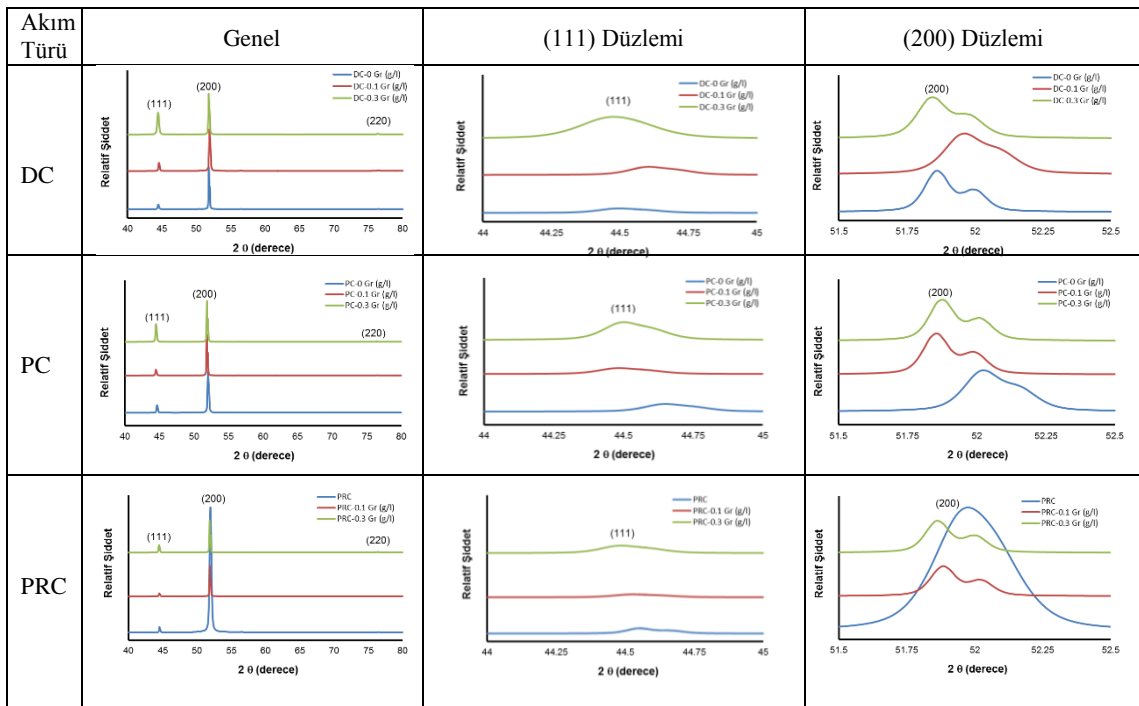
Şekil 4.8. Pulse periyodu 10 msn. (T_{on} 10 msn ve T_{off} 10 msn) ve $-T_{on}$ akımı 1 A/dm^2 ve 10 msn olan PRC akım altında $50 \text{ }^\circ\text{C}$ de 60 dk süre ile T_{ort} 5 A/dm^2 akım yoğunluğunda üretilmiş 0,1 g/l Gr içeren Ni matrisli kompozit kaplamadaki elementel haritalama görüntüleri.



Şekil 4.9. Pulse periyodu 10 msn. (T_{on} 10 msn ve T_{off} 10 msn) ve $-T_{on}$ akımı 1 A/dm^2 ve 10 msn olan PRC akım altında $50 \text{ }^\circ\text{C}$ de 60 dk süre ile T_{ort} 5 A/dm^2 akım yoğunluğunda üretilmiş 0,3 g/l Gr içeren Ni matrisli kompozit kaplamadaki elementel haritalama görüntüleri.

Şekil 4.10 saf nikel ve Ni-Gr kompozit kaplamaların XRD analiz sonuçları verilmektedir. XRD sonuçlarına göre DC, PC ve PRC akım şartlarında sırası ile 2θ $44,4^\circ$ ve $51,8^\circ$ de iki adet keskin pik ortaya çıkmakta ve (200) pikinin baskın olduğu açıkça görülmektedir. DC ve PC akım türünde üretilen saf Ni ve kompozitlerin XRD grafikleri

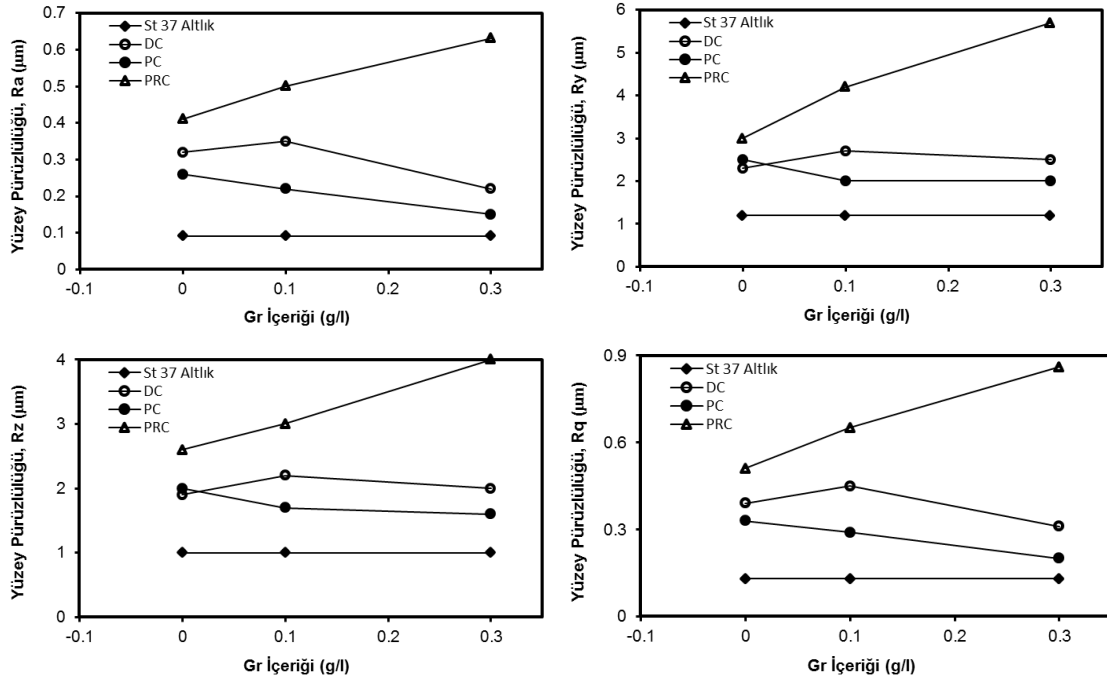
ayrıntılı olarak incelendiğinde, kompozit kaplamalarda (200) Ni pik şiddeti azalmakta ve pik genişliği artmaktadır. Bu durum Gr partiküllerinin kaplama banyosu içerisine ilave edilmesiyle Ni-Gr kompozit kaplamaların tane boyutunun düşmesine bağlanabilir. Gr partikülleri daha fazla çekirdeklenme bölgesi sağlar ve böylece kristal büyümesini geciktirerek kompozit kaplamanın Ni matriksi daha ince tane boyutuna sahip olur (Algul vd., 2015 b). Ni-Gr kompozit kaplamalarda (200) yönünün azalmasıyla (111) piklerinde artış gözlemlenmiştir. PRC akım türünde ise ağırlıklı büyüme (200) yönünde olduğu görülmektedir. PRC akım türünde elektrolitik kaplama prosesi sırasında meydana gelen kristal büyümesi ve yeni tane çekirdeklenmesi rekabetinde kristal büyümesi daha baskın olup tane boyutunda irileşme gerçekleşmektedir. SEM ve XRD sonuçlarında bu durumu desteklemektedir.



Şekil 4.10. a) DC, b) PC ve c) PRC akım türünde üretilmiş saf Ni ve kompozit kaplamaların XRD grafikleri.

Kaplama işlemi öncesi St 37 çelik altlık zımparalama ve Al_2O_3 pasta ile yardımıyla parlatılmıştır. Bu aşamada çelik yüzeyin yaklaşık $R_a=0,09 \mu m$, $R_y=1,2 \mu m$, $R_z=1 \mu m$ ve $R_q=0,13 \mu m$ yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu görülmüştür. Kaplama sonrası yüzey pürüzlülüğü sonuçları Şekil 4.11'de verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü grafiği incelendiğinde DC ve PC kaplamaların tümünde genellikle Gr içeriği arttıkça yüzey

pürüzlülüğünde düşüş görülmüştür. PRC akım türünde üretilen kaplamalarda artan Gr içeriği ile yüzey pürüzlülüğünde ciddi bir artış meydana gelmiştir. Bunun nedeni PRC akımla üretilen kompozit kaplamalarda daha iyi iletkenliğe sahip olan Gr üzerinde Ni'in büyümesi sonucu kaplama tabakasının yüzey pürüzlülüğünü artırmıştır. DC, PC ve PRC akım türlerinde üretilen kaplamaların yüzey pürüzlükleri kıyaslandığında; en yüksek yüzey pürüzlüğü PRC de, en düşük ise PC de olduğu görülmektedir. Bu durumun nedeni daha öncede belirttiğimiz gibi PC akım türünde oluşan kaplamalar daha küçük tane boyutuna bundan dolayı daha düzgün istif yoğunluğuna ve daha kompakt bir yapıya sahip olmasıdır.

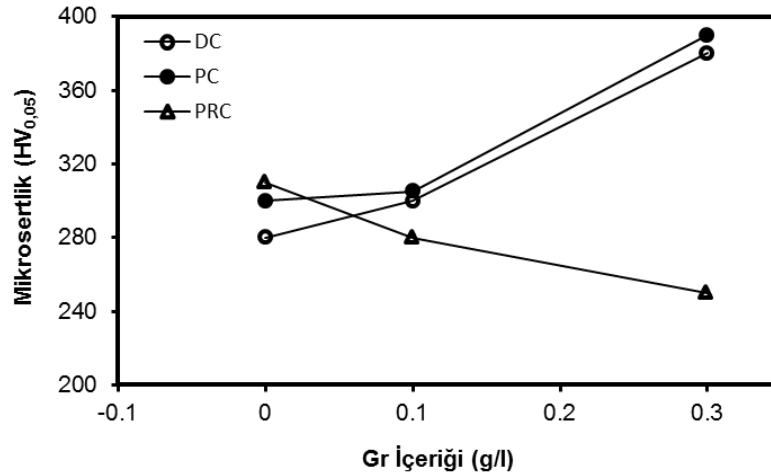


Şekil 4.11. DC, PC ve PRC akım türünde üretilmiş saf Ni ve kompozit kaplamaların yüzey pürüzlülük ölçümleri.

4.2. Sertlik ve Aşınma Deney Sonuçları

Saf Ni ve kompozit kaplamaların sertlik değerlerinin Gr içeriği ile değişimi Şekil 4.12'de verilmiştir. DC, PC ve PRC akım türlerinde üretilmiş kompozit kaplamaların sertlikleri kıyaslandığında en düşük sertlik değeri PRC, en yüksek ise PC akım ile üretilen kompozit kaplamalarda elde edilmiştir. DC ve PC akım şartlarında banyo içerisine Gr ilavesinin kaplama tabakasının sertliğini arttırdığı tespit edilmiştir. Kumar vd., (2013) ve Algul vd., (2015 b) yapı içerisine giren Gr'in sertliği arttırdığını raporlamışlardır. Sertlik

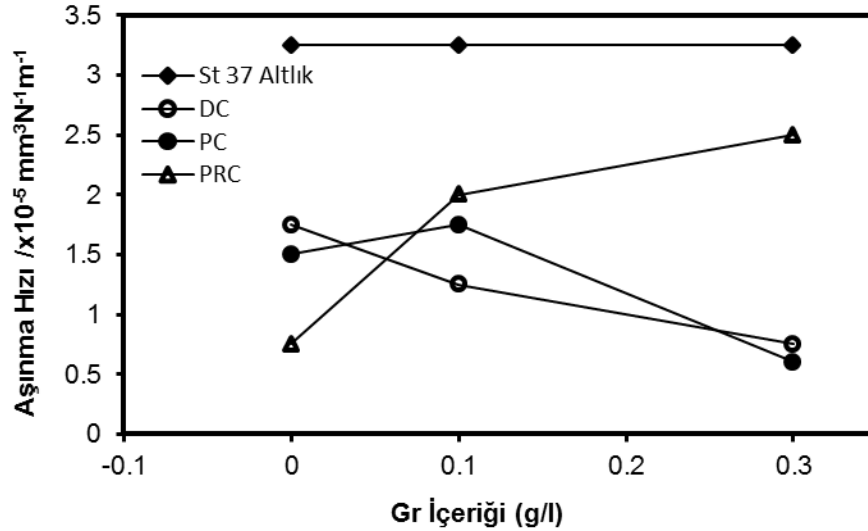
sonuçları SEM (Şekil 4.1, Şekil 4.4), elementel haritalama görüntüleri (Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.5, Şekil 4.6) ve XRD (Şekil 4.10) sonuçları ile birlikte değerlendirildiğinde yüzey merkezi kübik (YMK) yapıdaki Ni kafesine Gr'in girmesi ile sertliği arttırdığı sonucuna ulaşılmaktadır. PRC akımla üretilen saf Ni ve kompozit kaplamalarda artan Gr içeriği ile sertlik değerlerinde kayda değer miktarda düşüş Şekil 4.12'de açıkça görülmektedir. Bu sertlik düşüşü, PRC ile üretilen kompozit kaplamaların SEM ve elementel haritalama görüntüleri (Şekil 4.7 - Şekil 4.9) sonuçlarıyla uyumlu olarak artan Gr içeriği ile tane irileşmesi ve Gr partiküllerinin yapıdaki dağılımının yeterince homojen olmaması ile açıklanabilir.



Şekil 4.12. DC, PC ve PRC akım türünde üretilmiş saf Ni ve kompozit kaplamaların sertliklerinin Gr içeriği ile ilişkisi.

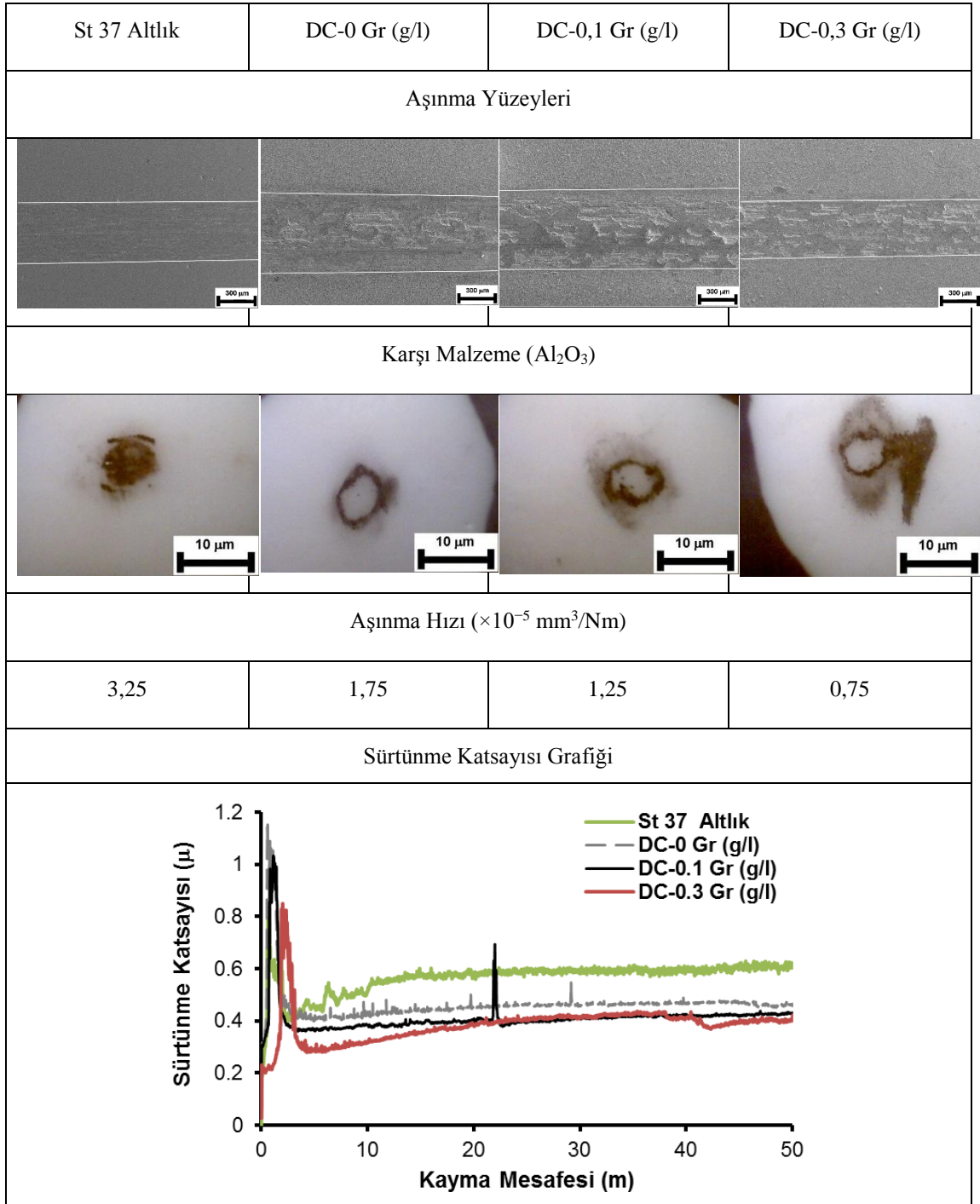
Şekil 4.13'de Gr içeriğinin artışına bağlı olarak aşınma hızındaki değişim görülmektedir. DC, PC ve PRC akım türlerinde üretilmiş kompozit kaplamaların aşınma hızları karşılaştırıldığında en düşük aşınma hızı değerleri Archard'ın kanununa (Xiang vd., 2019) uygun şekilde DC ve PC, en yüksek ise PRC akım ile üretilen kompozit kaplamalarda elde edilmiştir (Şekil 4.12 ve 4.13'ü karşılaştırınız). Kompozit kaplamaların mikrosertliği artan Gr içeriği ile artmaktadır. DC ve PC akımla üretilen Ni-Gr kompozit kaplamalar saf Ni ile karşılaştırıldığında mikrosertliğinin artması ve aşınma hızının düşmesi net bir biçimde anlaşılabilir. Burada Ni matris içerisinde giren Gr nanopartiküller tane inceltme ve dispersiyon sertleşmesi etkileri yoluyla Ni tanelerinin büyümesini ve yük altında matrisin plastik deformasyona uğramasını engeller. Tane inceltmesi ve dispersiyon sertleşmesi etkileri artan Gr içeriği ile artmaktadır, böylece Ni-

Gr kompozit kaplamaların mikrosertliği ve aşınma direnci artan Gr içeriği ile artmaktadır (Xiang vd., 2019).



Şekil 4.13. St 37 çelik altlık, DC, PC ve PRC akım türünde üretilmiş saf Ni ve kompozit kaplamaların aşınma hızının Gr içeriği ile ilişkisi.

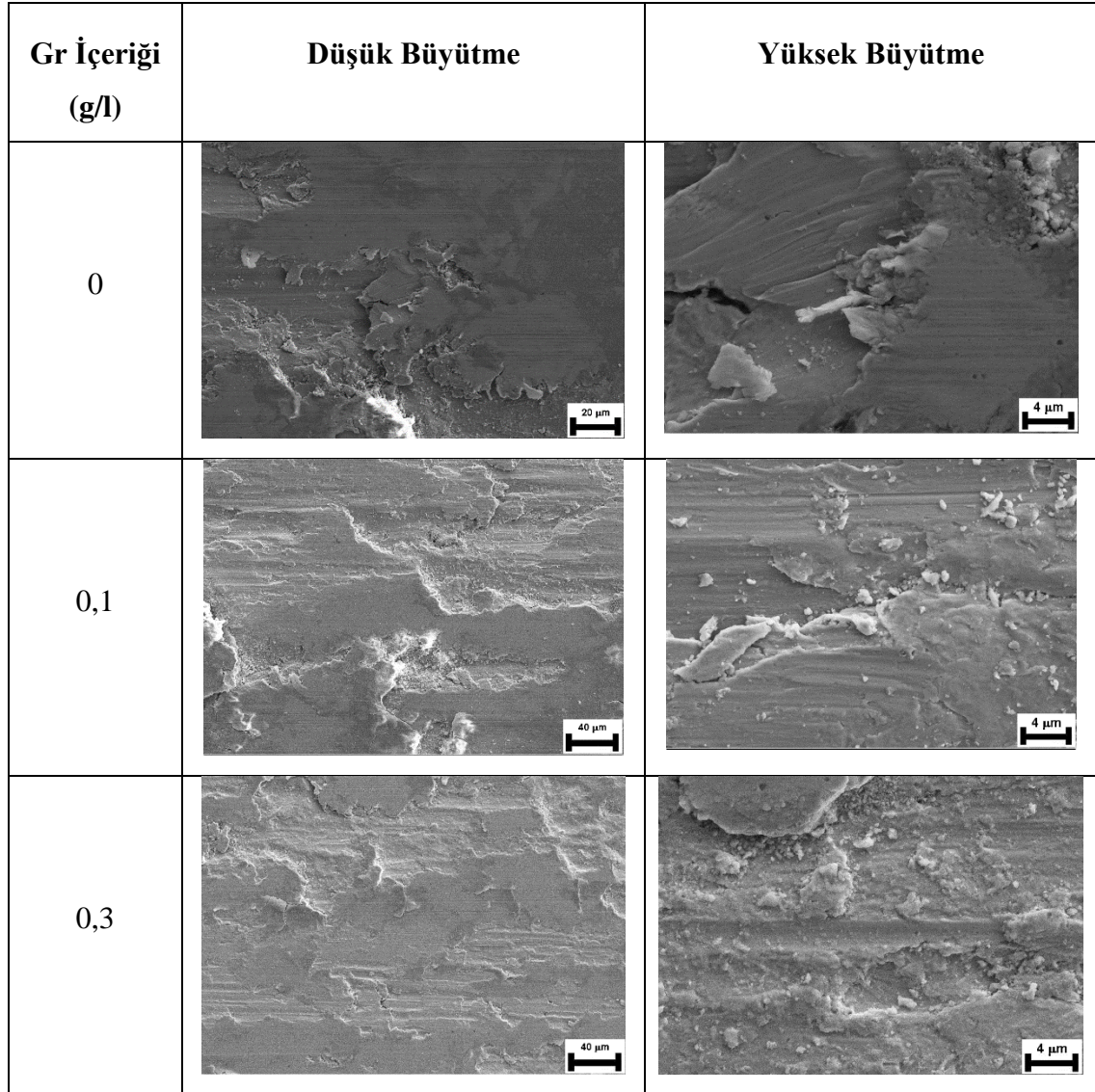
Şekil 4.14 kuru ortam aşınma deneylerinde DC akım altında üretilen saf Ni ve kompozit kaplamaların ve karşı malzeme olarak kullanılan Al_2O_3 bilyelerin aşınma yüzey görüntüleri, aşınma hızı ve sürtünme katsayısı grafikleri karşılaştırmalı olarak verildiğinde, Al_2O_3 bilye ile oluşturulan aşınma iz derinliği ve geniş yüzey hasarından dolayı saf Ni kaplama daha yüksek aşınma hızı ($1,75 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$) sergilemektedir. Gr içeriğinin artması ile kompozit kaplamaların aşınma iz genişliği ile karşı malzeme olarak kullanılan Al_2O_3 bilyelerin aşınma iz büyüklüğünün azaldığı görülmektedir. Sürtünme katsayısı grafikleri incelendiğinde Gr içeriğinin artması ile ortalama sürtünme katsayısı da azalmaktadır. Sürtünme katsayısında önemli parametrelerden olan yüzey pürüzlülüğü (Şekil 4.11) ve mikrosertlik (Şekil 4.12) grafikleri beraber incelendiğinde en düşük yüzey pürüzlülüğü ve en yüksek sertlik değerlerinin DC ve PC akım altında üretilen Ni-Gr kompozit kaplamaların verdiği görülmüştür. Sertliğin yüksek ve yüzey pürüzlülüğünün düşük olması sürtünme katsayısını düşürmektedir.



Şekil 4.14. St 37 çelik altlık ve DC akım altında üretilmiş saf Ni ve kompozit kaplamaların ve karşı malzeme olarak kullanılan Al₂O₃ bilyelerin aşınma yüzey görüntüleri, aşınma hızı ve sürtünme katsayısı grafikleri.

Şekil 4.15 DC akım altında üretilen saf Ni ve kompozit kaplamalarda Gr'in aşınmaya olan etkisini görmek için aşınma yüzeylerine ait detaylı SEM görüntüleri verilmektedir. Aşınma yüzey görüntülerinden, aşınma yönünde aşınma mekanizması

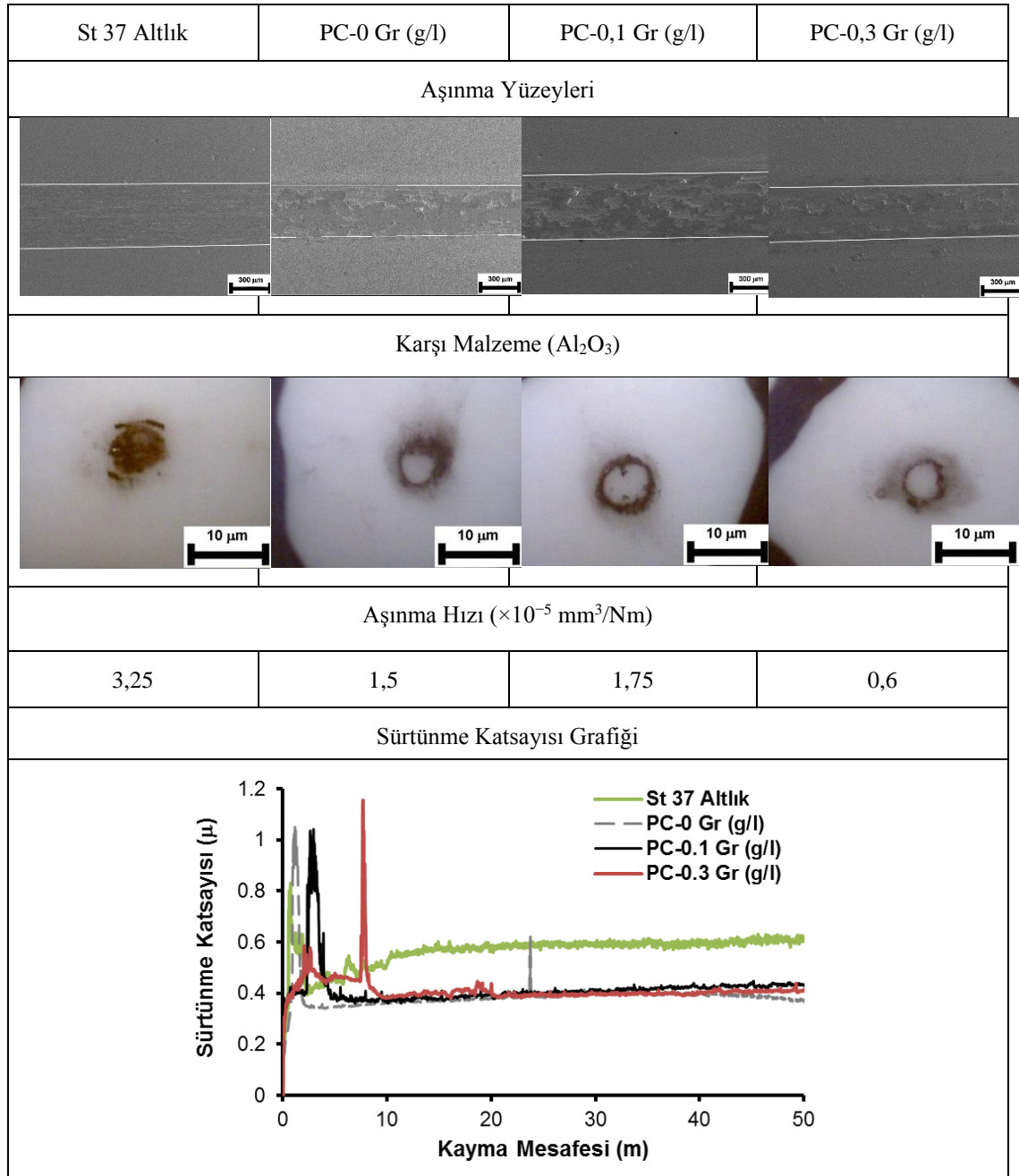
olarak adhezif aşınmanın gerçekleştiği ve Gr içeriğinin artması ile adhezif aşınma şiddetinin azaldığı söylenebilir.



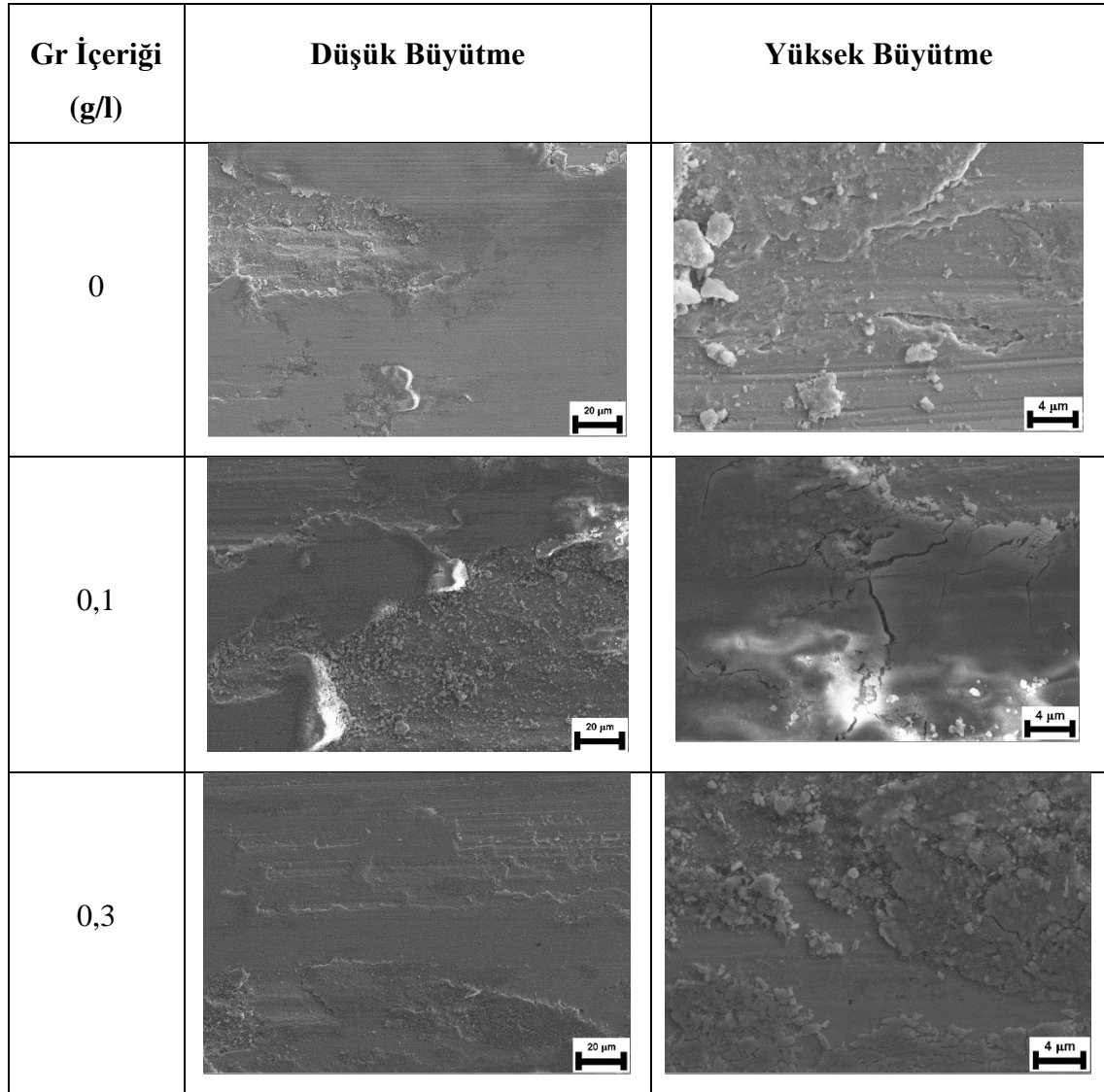
Şekil 4.15. DC akım altında üretilmiş saf Ni ve kompozit kaplamaların detaylı SEM görüntüleri.

Şekil 4.16 kuru ortam aşınma deneylerinde PC akım altında üretilen saf Ni ve kompozit kaplamaların ve karşı malzeme olarak kullanılan Al_2O_3 bilyelerin aşınma yüzey görüntüleri, aşınma hızı ve sürtünme katsayısı grafikleri karşılaştırmalı olarak verildiğinde, Al_2O_3 bilye ile oluşturulan aşınma iz derinliği ve geniş yüzey hasarından dolayı 0,1 gr/l Gr içeren kompozit kaplama daha yüksek aşınma hızı ($1,75 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$) sergilemektedir. Şekil 4.17’de PC akım altında üretilen 0,1 gr/l Gr içeren

kompozit kaplamanın aşınma yüzeyine ait detaylı SEM görüntülerinde mikro çatlakların varlığıyla anlaşılan deformasyon sertleşmesi görülmektedir. 0,3 gr/l Gr içeren kompozit kaplamanın aşınma yüzeyinde hem deformasyon sertleşmesi hem de adhezif aşınma şiddetinin azalmasıyla karşı malzeme olarak kullanılan Al_2O_3 bilyenin aşınma iz büyüklüğü de azalmaktadır.



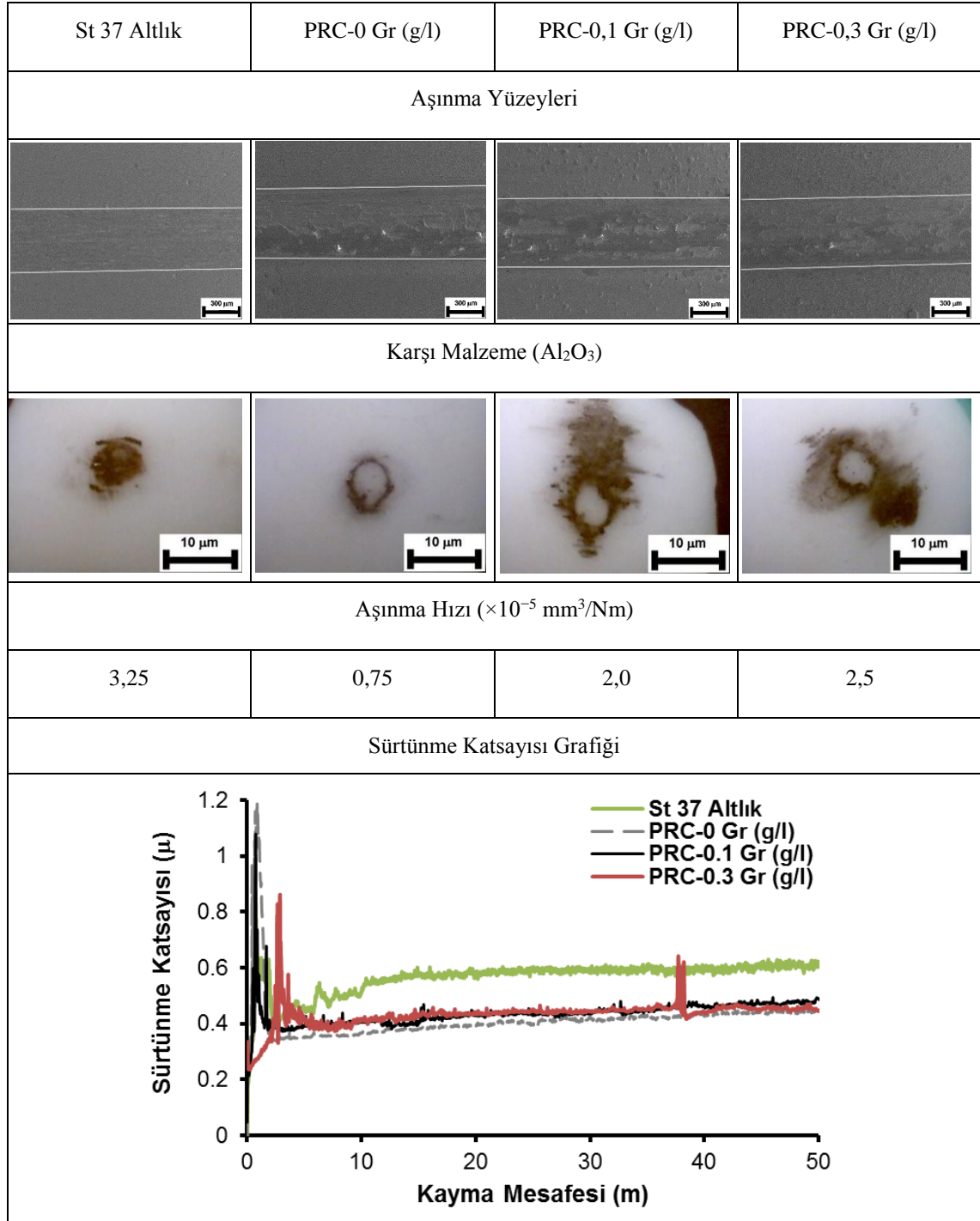
Şekil 4.16. St 37 çelik altlık ve PC akım altında üretilmiş saf Ni ve kompozit kaplamaların ve karşı malzeme olarak kullanılan Al_2O_3 bilyelerin aşınma yüzey görüntüleri, aşınma hızı ve sürtünme katsayısı grafikleri.



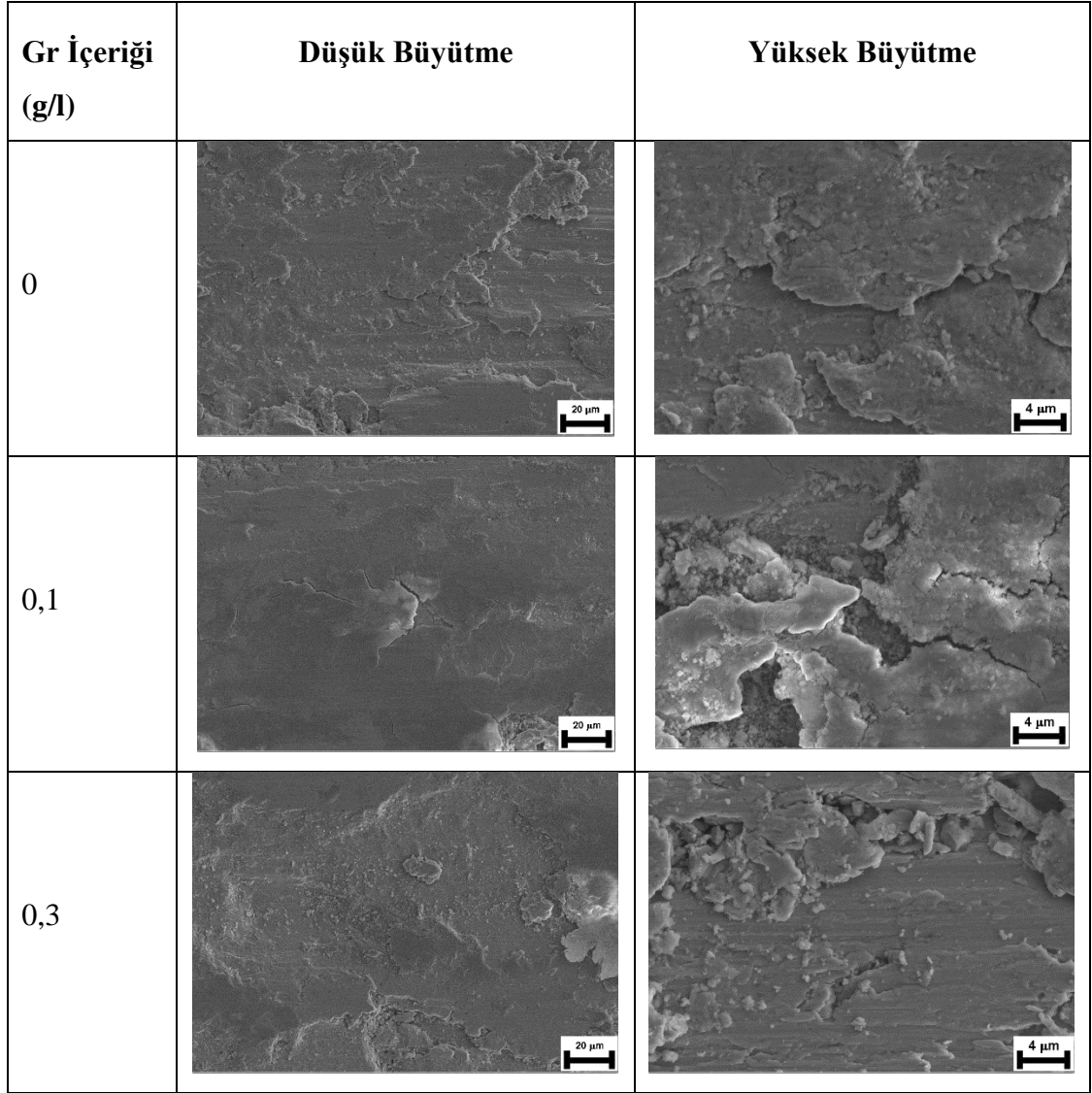
Şekil 4.17. PC akım altında üretilmiş saf Ni ve kompozit kaplamaların detaylı SEM görüntüleri.

Şekil 4.18’de PRC akım altında üretilmiş saf Ni ve kompozit kaplamaların ve karşı malzeme olarak kullanılan Al_2O_3 bilyelerin aşınma yüzey görüntüleri, aşınma hızı ve sürtünme katsayısı grafikleri beraber incelendiğinde Al_2O_3 bilye ile oluşturulan aşınma iz derinliği ve geniş yüzey hasarından dolayı 0,3 gr/l Gr içeren kompozit kaplama daha yüksek aşınma hızı ($2,5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$) sergilemektedir. 0,3 gr/l Gr içeren kompozit kaplamanın sürtünme katsayısı değerlerinin yüksek oluşu kaplama yapısındaki Gr partikül dağılımının homojen olmayışına (Şekil 4.9) ilişkilendirilebilir. Şekil 4.19’da PRC akım altında üretilen kompozit kaplamaların aşınma yüzeylerine ait detaylı SEM

görüntülerinde adhezif aşınma şiddetinin artmasıyla karşı malzeme olarak kullanılan Al_2O_3 bilyenin temas alanı da genişlemektedir.



Şekil 4.18. St 37 çelik altlık ve PRC akım altında üretilmiş saf Ni ve kompozit kaplamaların ve karşı malzeme olarak kullanılan Al_2O_3 bilyelerin aşınma yüzey görüntüleri, aşınma hızı ve sürtünme katsayısı grafikleri.



Şekil 4.19. PRC akım altında üretilmiş saf Ni ve kompozit kaplamaların detaylı SEM görüntüleri.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada elektrokimyasal kaplama yöntemi kullanılarak St 37 çelik altlıklar üzerine saf Ni ve Gr katkılı Ni kompozit kaplamalar başarılı bir şekilde üretilmiştir. DC, PC ve PRC olmak üzere üç farklı akım türünün saf Ni ve Ni-Gr kompozit kaplama tabakalarına etkileri incelenmiştir. Üretilen kaplamalar enerji dağılımlı x-ışınları spektrometre (EDS) donanımlı taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışınları difraktometresi (XRD), yüzey profilometresi, mikrosertlik ve aşınma deneyleri kullanılarak analiz edilmiştir.

1.Akım türünün saf Ni ve Ni-Gr kompozit kaplama tabakasının tane morfolojisini değiştirdiği görülmüştür. DC ve PC akım türlerinde üretilen kompozit kaplamalarda Gr ilavesinin matrisin (Ni) tane yapısını incelediği, PRC akım türünde üretilen kompozit kaplamalarda ise artan Gr içeriği ile tane yapısının irileştiği görülmüştür.

2.DC ve PC akım türlerinde üretilen kompozit kaplamalarda Gr ilavesi, XRD pik şiddetlerini düşürmüş ve pikleri sağa doğru ötelemiştir.

3.EDS analizi sonucunda DC ve PC akım türlerinde üretilen kompozit kaplamalarda Gr'nin yapı içerisine homojen dağıldığı görülmüştür. PRC akım türünde üretilen kompozit kaplamalarda ise Gr içeriğinin artması ile birlikte yapı içerisindeki Gr dağılımının homojen olmadığı tespit edilmiştir.

4.En düşük yüzey pürüzlüğü DC ve PC akım türünde elde edilmiştir ve Gr katkısı yüzey pürüzlülüğünü azaltmıştır.

5.DC, PC, PRC akım türlerinde üretilen kompozit kaplamaların aşınma ve sertlik sonuçları birlikte incelendiğinde en yüksek aşınma hızı ve en düşük sertlik PRC akım türünde üretilen kompozit kaplamalarda, en düşük aşınma hızı ve en yüksek sertlik ise DC ve PC akım türlerinde üretilen kompozit kaplamalarda elde edildiği görülmektedir. Bu durumun nedeni yapısal incelemeler sonucu DC ve PC akım türlerinde üretilen kompozit kaplamaların PRC akım türüne göre daha kompakt bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir.

KAYNAKLAR

- Algul, H., Gul, H., Uysal, M., Alp, A., & Akbulut, H. (2015 a). Tribological Properties of TiO₂ Reinforced Nickel Based MMCs Produced by Pulse Electrodeposition Technique. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 68 (1), 79-87.
- Algul, H., Tokur, M., Ozcan, S., Uysal, M., Cetinkaya, T., Akbulut, H., & Alp, A. (2015 b). The effect of graphene content and sliding speed on the wear mechanism of nickel-graphene nanocomposites. *Applied Surface Science*, 359, 340-348.
- Alizadeh, M., & Cheshmpish, A. (2019). Electrodeposition of Ni-Mo/Al₂O₃ nanocomposite coatings at various deposition current densities. *Applied Surface Science*, 466, 433-440.
- An, B.-G., Li, L.-X., & Li, H.-X. (2008). Electrodeposition in the Ni-plating bath containing multi-walled carbon nanotubes. *Materials Chemistry and Physics*, 110 (2-3), 481-485.
- Arai, S., Fujimori, A., Murai, M., & Endo, M. (2008). Excellent solid lubrication of electrodeposited nickel-multiwalled carbon nanotube composite films. *Materials Letters*, 62 (20), 3545-3548.
- Aruna, S. T., & Srinivas, G. (2015). Wear and corrosion resistant properties of electrodeposited Ni composite coating containing Al₂O₃-TiO₂ composite powder. *Surface Engineering*, 31 (9), 708-713.
- Baghery, P., Farzam, M., Mousavi, A. B., & Hosseini, M. (2010). Ni-TiO₂ nanocomposite coating with high resistance to corrosion and wear. *Surface and Coatings Technology*, 204 (23), 3804-3810.
- Benea, L. (2009). Electrodeposition and tribocorrosion behaviour of ZrO₂-Ni composite coatings. *Journal of Applied Electrochemistry*, 39 (10), 1671-1681.
- Bostani, B., Parvini Ahmadi, N., Yazdani, S., & Arghavanian, R. (2018). Co-electrodeposition and properties evaluation of functionally gradient nickel coated ZrO₂ composite coating. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 28 (1), 66-76.
- Brock, T., (2015). Electrodeposition Coatings - the perfect symbiosis of water / electro / paint chemistry. *Chemik*, 69 386-388.
- Cengiz, E., Köksal, O. K., Apaydın, G., Karahan, İ. H., & Ünal, E. (2019). Determination of valence electronic structure of Ni in Ni-B alloy coatings using K_β-to-K_α X-ray intensity ratios. *Applied Radiation and Isotopes*, 144, 24-28.
- Chang, L. M., An, M. Z., & Shi, S. Y. (2005). Corrosion behavior of electrodeposited Ni-Co alloy coatings under the presence of NaCl deposit at 800 °C. *Materials Chemistry and Physics*, 94, 125-130.
- Chaparro, A., Arnulfo, W., & Vera, E. (2007). Electrodeposition of nickel plates on copper substrates using PC y PRC. *Revista Matéria*, 12 (4), 583-588.

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Chen, J., Li, J., Xiong, D., He, Y., Ji, Y., & Qin, Y. (2016). Preparation and tribological behavior of Ni-graphene composite coating under room temperature. *Applied Surface Science*, 361, 49–56.
- Chen, L., Wang, L., Zeng, Z., & Zhang, J. (2006). Effect of surfactant on the electrodeposition and wear resistance of Ni–Al₂O₃ composite coatings. *Materials Science and Engineering A*, 434, 319-325.
- Chen, S., Brown, L., Levendorf, M., Cai, W., Ju, S.-Y., Edgeworth, J., & Ruoff, R. S. (2011). Oxidation resistance of graphene-coated Cu and Cu/Ni alloy. *ACS Nano*, 5 (2), 1321–1327.
- Chronopoulou, N., Vozios, D., Schinas, P., & Pavlatou, E. A. (2018). Electrodeposition and characterization of electroplated Ni/Graphene composite coatings. *Materials Today*, 5 (2018), 27653–27661.
- Çam, E., (2009). *Akımsız nikel kaplama banyolarının karakteristiklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ding, R., Li, W., Wang, X., Gui, T., Li, B., Han, P., Tian, H., Liu, A., Wang, X., Liu, X., Gao, X., Wang, W., & Song, L. (2018). A brief review of corrosion protective films and coatings based on graphene and graphene oxide. *Journal of Alloys and Compounds*, 764, 1039-1055.
- Dong, Y., Sun, W., Liu, X., Jia, Z., Guo, F., Ma, M., & Ruan, Y. (2019). Effect of CNTs concentration on the microstructure and friction behavior of Ni-GO-CNTs composite coatings. *Surface & Coatings Technology*. 359, 141-149.
- Elkhoshkhany, N., Hafnway, A., & Khaled, A. (2017). Electrodeposition and corrosion behavior of nano-structured Ni-WC and Ni-Co-WC composite coating. *Journal of Alloys and Compounds*, 695, 1505-1514.
- Eraslan, S., (2010). *Akımsız Ni-B kaplama sistemlerine W ilavesinin kaplama özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Erb, U. (1995). Electrodeposited nanocrystals: Synthesis, properties and industrial applications. *Nanostructured Materials*, 6 (5-8), 533-538.
- Goddard, W. A., (2003). *Handbook of nanoscience, engineering, and technology*. 2th ed. CRC Press, New York, 772.
- Gül, H., Uysal, M., Akbulut, H., & Alp, A. (2014). Effect of PC electrodeposition on the structure and tribological behavior of Ni–Al₂O₃ nanocomposite coatings. *Surface & Coatings Technology*, 258, 1202-1211.

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Jabbar, A., Yasin, G., Khan, W., Q., Anwar, M., Y., Korai, R., M., Nizam, M., N., & Muhyodin, G., (2017). Electrochemical deposition of nickel graphene composite coatings: Effect of deposition temperature on its surface morphology and corrosion resistance. *RSC Advances*, 31100-31109.
- Ji, L., Chen, F., Huang, H., Sun, X., Yan, Y., & Tang, X. (2018). Preparation of nickel-graphene composites by jet electrodeposition and the influence of graphene oxide concentration on the morphologies and properties. *Surface and Coatings Technology*, 351, 212-219.
- Jiang, J., He, X., Du, J., Pang, X., Yang, H., & Wei, Z. (2018). In-situ fabrication of graphene-nickel matrix composites. *Materials Letters*, 220, 178-181.
- Jiang, K., Li, J., & Liu, J. (2014). Electrochemical codeposition of graphene platelets and nickel for improved corrosion resistant properties. *RSC Advances*, 4, 36245-36252.
- Jiang Y., Xu Y., Wang M., et al. (2017). Effects of pulse plating parameters on the microstructure and properties of high frequency pulse electrodeposited Ni-Co/ZrO₂ nanocomposite coatings. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 28 (1), 610-616.
- Jinlong, L., Zhuqing, W., Tongxiang, L., Suzuki, K., & Hideo, M. (2018). Effect of tungsten on microstructures of annealed electrodeposited Ni-W alloy and its corrosion resistance. *Surface and Coatings Technology*, 337, 516-524.
- Kapoor, G., Huang, Y., Sarma, V. S., Langdon, T. G., & Gubicza, J. (2017). Influence of Mo alloying on the thermal stability and hardness of ultrafine-grained Ni processed by high-pressure torsion. *Journal of Materials Research and Technology*, 6 (4), 361-368.
- Kapoor, G., Péter, L., Fekete, É., Lábár, J. L., & Gubicza, J. (2019). Stored energy in nanocrystalline Ni-Mo films processed by electrodeposition. *Journal of Alloys and Compounds*, 796, 307-313.
- Karimzadeh, A., Aliofkhaezai, M., & Walsh, F. C. (2019). A review of electrodeposited Ni-Co alloy and composite coatings: Microstructure, properties and applications. *Surface and Coatings Technology*, 372, 463-498.
- Karşlıoğlu, R., (2014). *Karbon nanotüp takviyeli nikel-kobalt kaplamaların geliştirilmesi*. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü.
- Kartal, M., Buyukbayram, I., Alp, A., Akbulut, H., (2017). Production of pulse electrodeposited Ni-TiC nanocomposite coatings. *Materials Today: Proceedings*, 4, 6982-6989.
- Krishnan, K. H., John, S., Srinivasan, K.N., Praveen, J., Ganesan, M. & Kavimani, P.M., (2006). An overall aspect of electroless Ni-P depositions-A review article, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 37, 1917-1926.

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Kuang, D., Xu, L., Liu, L., Hu, W., & Wu, Y. (2013). Graphene–nickel composites. *Applied Surface Science*, 273, 484-490.
- Kumar, C. M. P., Venkatesha, T. V., & Shabadi, R. (2013). Preparation and corrosion behavior of Ni and Ni–graphene composite coatings. *Materials Research Bulletin*, 48(4), 1477-1483.
- Kyhl, L., Nielsen, S. F., Čabo, A. G., Cassidy, A., Miwa, J. A., & Hornekær, L. (2015). Graphene as an anti-corrosion coating layer. *Faraday Discussions*, 180, 495-509.
- Lanzutti, A., Lekka, M., de Leitenburg, C., & Fedrizzi, L. (2019). Effect of pulse current on wear behavior of Ni matrix micro-and nano-SiC composite coatings at room and elevated temperature. *Tribology International*, 132, 50-61.
- Laszczyńska, A., Tylus, W., Szczygieł, B., & Szczygieł, I. (2018). Influence of post–deposition heat treatment on the properties of electrodeposited Ni–Mo alloy coatings. *Applied Surface Science*, 462, 432-443.
- Lelevic, A., & Walsh, F. C. (2019). Electrodeposition of Ni- P alloy coatings: A review. *Surface and Coatings Technology*, 369, 198-220.
- Maharana, H. S., Bishoyi, B., & Basu, A. (2019). Current density dependent microstructure and texture evolution and related effects on properties of electrodeposited Ni-Al coating. *Journal of Alloys and Compounds*, 787, 483-494.
- Muraliraja, R., Sudagar, J., Elansezhian, R., Raviprakash, A. V., Dhinakaran, R., Shaisundaram, V. S., & Chandrasekaran, M. (2019). Estimation of zwitterionic surfactant response in electroless composite coating and properties of Ni–P–CuO (nano) coating. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 44 (2), 821-828.
- Rezaeiolum, A., Aliofkhazraei, M., Karimzadeh, A., Rouhaghdam, A. S., & Miresmaeili, R. (2017). Electrodeposition of Ni-Mo and Ni-Mo-(nano Al₂O₃) multilayer coatings. *Surface Engineering*, 34 (6), 423-432.
- Riedel, W., (1991). *Electroless Nickel Plating*. ASM International, Metals Park Ohio, USA/Finishing Publications Ltd., Stevenage, Hertfordshire, England, 320.
- Saha, R. K., & Khan, T. I., (2010). Effect of applied current on the electrodeposited Ni-Al₂O₃ composite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 205 (3), 890-895.
- Sahu, B. P., Sarangi, C. K., & Mitra, R. (2018). Effect of Zr content on structure property relations of Ni-Zr alloy thin films with mixed nanocrystalline and amorphous structure. *Thin Solid Films*, 660, 31-45.
- Saidin, N.U., Ying, K.K., Khuan, N.I, (2011). Electrodeposition: Principles, applications and methods. *Industrial Technology Division*, Malaysian Nuclear Agency, Bangi, 43000 Kajang, Selangor.
- Salari Mehr, M., Akbari, A., & Damerchi, E. (2019). Electrodeposited Ni-B/SiC micro-and nano-composite coatings: A comparative study. *Journal of Alloys and Compounds*, 782, 477-487.

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Shakoor, R. A., Kahraman, R., Waware, U. S., Wang, Y., & Gao, W. (2014). Synthesis and properties of electrodeposited Ni-B-CeO₂ composite coatings. *Materials & Design*, 59, 421-429.
- Singh, S., Samanta, S., Das, A. K., & Sahoo, R. R. (2018). Tribological investigation of Ni-graphene oxide composite coating produced by pulsed electrodeposition. *Surfaces and Interfaces*, 12, 61-70.
- Soares, H. J. M., Campos, O. S., Dias, D. F., Casciano, P. N. S., de Lima-Neto, P., & Correia, A. N. (2018). Chemical, morphological and corrosion characterisations of electrodeposited Ni-Fe-P coatings. *Electrochimica Acta*, 284, 18-23.
- Surender, M., Basu, B., & Balasubramaniam, R. (2004). Wear characterization of electrodeposited Ni-WC composite coatings. *Tribology International*, 37 (9), 743-749.
- Şahin, T., (2014). *Elektrodepozisyon ile üretilen CoFeCu/Cu çok katmanlı filmlerin elektrokimyasal, yapısal, manyetik ve manyetodirenç özellikleri üzerine L(+)* askorbik asit ve sodyum hidrosit'in etkisinin incelenmesi. Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Torabinejad, V., Aliofkhazraei, M., Assareh, S., Allahyarzadeh, M. H., & Rouhaghdam, A. S. (2017). Electrodeposition of Ni-Fe alloys, composites, and nano coatings—A review. *Journal of Alloys and Compounds*, 691, 841-859.
- Vaezi, M. R., Sadrnezhaad, S. K., & Nikzad, L. (2008). Electrodeposition of Ni-SiC nano-composite coatings and evaluation of wear and corrosion resistance and electroplating characteristics. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 315 (1-3), 176-182.
- Web: http://www.starmetal-tr.com/akimsiz_nikel.html, (12.03.2019).
- Wu, G., Li, N., Zhou, D., & Mitsuo, K. (2004). Electrodeposited Co-Ni-Al₂O₃ composite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 176 (2), 157-164.
- Xiang, L., Shen, Q., Zhang, Y., Bai, W., & Nie, C. (2019). One-step electrodeposited Ni-graphene composite coating with excellent tribological properties. *Surface & Coatings Technology*, 373, 38-46.
- Yang, Y., Wen, Z., Li, Q. (2014). Electrodeposition of Ni-Co alloy films onto titanium substrate. *Rare Metals*, 33 (4), 442-447.
- Yılmaz, G., (2013). *Elektrokimyasal yöntemle Ni-TiO₂ kompozit kaplamaların üretimi ve karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Zhao, Y., Jiang, C., Xu, Z., Cai, F., Zhang, Z., & Fu, P. (2015). Microstructure and corrosion behavior of Ti nanoparticles reinforced Ni-Ti composite coatings by electrodeposition. *Materials & Design*, 85, 39-46.

ÖZ GEÇMİŞ



Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Kemal AYDIN
Doğum Yeri ve Tarihi : Eskişehir - 28/05/1993

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Makine Mühendisliği
Bildiği Yabancı Diller : İngilizce
Bilimsel Faaliyetleri :

İş Deneyimi

Stajlar : TEI (TUSAŞ MOTOR SANAYİ) - ETİ - VİTRA AR-GE
Projeler : Bir Vitrifiye Ürününün Damar Oluşumu Probleminin Çözümü
Ve Ansys Ortamında Yapılan Dolum Analizinin İncelenmesi
Çalıştığı Kurumlar : Koreli Müh. Ltd. Şti

İletişim

Adres : Batıkent Mah. Aksu Sk. No:9/5 Eskişehir
E-Posta Adresi : 26kemalaydin@gmail.com

Akademik Çalışmaları

- Mindivan, F., **Aydın, K.**, Mindivan, H. (2019). Production and Characterization of Electrodeposited Nickel/Graphene Composite Coatings, *The Internatinonal Conference on Materials Science, Mechanical and Automotive Engineerings and Technology in Cappadocia/TURKEY (IMSMATEC'19)*, June 21-23 2019.

Tarih: 27/06/2019