



İSKENDERUN TEKNİK

ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK
LİSANS
TEZİ**

**AKIMSIZ KAPLAMA METODUYLA
Ni-P-W/h-BN KOMPOZİT
KAPLAMALARIN MEKANİK
VE KOROZYON DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

Hüseyin KURUMLİ

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

OCAK 2024





**AKIMSIZ KAPLAMA METODUYLA Ni-P-W/h-BN KOMPOZİT
KAPLAMALARIN MEKANİK VE KOROZYON DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

HÜSEYİN KURUMLİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2024

AKIMSIZ KAPLAMA METODUYLA Ni-P-W/h-BN KOMPOZİT KAPLAMALARIN MEKANİK VE KOROZYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

HÜSEYİN KURUMLİ

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Ocak 2024

ÖZET

Bu tez, 2024-T3 alüminyum alaşımının yüzey özelliklerini iyileştirmek için akımsız kaplama yöntemiyle Ni-P-W/h-BN kompozit kaplamaların üretimini ve karakterizasyonunu anlatmaktadır. Akımsız kaplama, elektrik akımı gerektirmeden metal yüzeyler üzerinde ince film oluşturmak için kimyasal bir reaksiyon kullanılan bir kaplama yöntemidir. Ni-P-W/h-BN kompozit kaplamalar, nikel, fosfor, tungsten ve hekzagonal bor nitrit (h-BN) partiküllerinden oluşan çok bileşenli kaplamalardır. Bu kaplamalar, yüksek sertlik, aşınma direnci, korozyon direnci ve sürtünme katsayısı gibi üstün mekanik ve korozyon özellikleri sunmaktadır.

Tezde, akımsız kaplama yöntemiyle 2024-T3 alüminyum alaşımı yüzeyine farklı h-BN konsantrasyonlarıyla Ni-P-W/h-BN kompozit kaplamaların üretimi detaylı bir şekilde açıklanmaktadır. Kaplamaların morfolojisi, mikroyapısı, faz yapısı, sertliği, aşınma davranışı, korozyon davranışı ve sürtünme katsayısı gibi özellikleri çeşitli analiz ve test yöntemleriyle incelenmiştir.

Bu bağlamda, kaplama parametreleri, kaplama banyosunun pH, sıcaklık, süre, h-BN katkı oranı ve karıştırma hızı olarak seçilmiştir. Kaplama kalınlığı, kaplama sertliği, kaplama yapısı, kaplama bileşimi ve kaplama morfolojisi, sırasıyla, mikrometre, mikro sertlik test cihazı, X-ışını kırınımı (XRD), enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile ölçülmüştür. Kaplama korozyon direnci, potansiyodinamik polarizasyon testi ile, kaplama aşınma direnci ise kuru sürtünme testi ile değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak, akımsız kaplama metodunun, Ni-P-W/h-BN kompozit kaplamaların mekanik ve korozyon davranışlarını belirgin şekilde geliştirdiği ve h-BN katkı oranının artmasıyla kaplama performansının daha da yükseldiği ortaya çıkmıştır. Kaplama kalınlığı, kaplama sertliği, korozyon direnci ve aşınma direnci, kaplama banyosunun pH, sıcaklık, süre, h-BN katkı oranı ve karıştırma hızı gibi parametrelerle bağlantılı bulunmuştur. Kaplama yapısı, kaplama bileşimi ve kaplama morfolojisi, h-BN katkı oranının artmasıyla değişmiştir. h-BN katkı oranı arttıkça, kaplamada daha çok h-BN partikülü görülmüş, kaplama kristallliği düşmüş, kaplama yüzeyi daha düzgün hale gelmiş ve kaplama sürtünme katsayısı azalmıştır. Bu çalışma, akımsız kaplama metodunun, Ni-P-W/h-BN kompozit kaplamaların üretiminde etkin bir yöntem olduğunu ve bu kaplamaların endüstriyel uygulamalarda kullanılabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler : Akımsız Kaplama, Ni-P, Ni-P-W/h-BN, Kompozit
Sayfa Adedi : 85
Danışman : Doç. Dr. Erdoğan KANCA
İkinci Danışman : Prof. Dr. İsmail Hakkı KARAHAN

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL AND CORROSION BEHAVIOR OF Ni-P-W/h-BN COMPOSITE COATINGS USING THE ELECTRIC FREE COATING METHOD

(Master's Thesis)

HÜSEYİN KURUMLİ

İSKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY

GRADUATE EDUCATION INSTITUTE

January 2024

ABSTRACT

This thesis describes the production and characterization of Ni-P-W/h-BN composite coatings by electroless coating method to improve the surface properties of 2024-T3 aluminum alloy. Electroless plating is a plating method that uses a chemical reaction to form thin films on metal surfaces without requiring electrical current. Ni-P-W/h-BN composite coatings are multi-component coatings consisting of nickel, phosphorus, tungsten and hexagonal boron nitride (h-BN) particles. These coatings offer superior mechanical and corrosion properties such as high hardness, wear resistance, corrosion resistance and coefficient of friction.

In the thesis, the production of Ni-P-W/h-BN composite coatings with different h-BN concentrations on the surface of 2024-T3 aluminum alloy by electroless coating method is explained in detail. Properties of coatings such as morphology, microstructure, phase structure, hardness, wear behavior, corrosion behavior and friction coefficient have been examined by various analysis and test methods.

In this context, coating parameters were chosen as pH, temperature, time, h-BN contribution rate and mixing speed of the plating bath. Coating thickness, coating hardness, coating structure, coating composition, and coating morphology were measured by micrometer, microhardness tester, X-ray diffraction (XRD), energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX), and scanning electron microscopy (SEM), respectively. Coating corrosion resistance

was evaluated by potentiodynamic polarization test, and coating wear resistance was evaluated by dry friction test.

As a result, it has been revealed that the electroless coating method significantly improves the mechanical and corrosion behaviors of Ni-P-W/h-BN composite coatings, and the coating performance increases further with the increase in the h-BN additive ratio. Coating thickness, coating hardness, corrosion resistance and wear resistance were found to be related to parameters such as pH, temperature, time, h-BN contribution rate and mixing speed of the plating bath. The coating structure, coating composition and coating morphology changed with the increase of h-BN additive ratio. As the h-BN contribution rate increased, more h-BN particles were seen in the coating, coating crystallinity decreased, the coating surface became smoother and the coating friction coefficient decreased. This study has shown that the electroless coating method is an effective method in the production of Ni-P-W/h-BN composite coatings and that these coatings can be used in industrial applications.

Key Words : Electroless Plating, Ni-P, Ni-P-W/h-BN, Composite
Page Number : 85
Supervisor : Doç. Dr. Erdoğan KANCA
2nd Supervisor : Prof. Dr. İsmail Hakkı KARAHAN

TEŞEKKÜRLER

Çalışma boyunca tez danışmanlığımı üstlenerek çalışmamın yürütülmesinde ve sonuçlandırılmasında bana yol gösteren ve desteğini benden eksik etmeyen çok değerli danışman hocam Doç. Dr. Erdoğan KANCA'ya, çalışmam süresince yaptığım deneylerde bana destek olan ve her türlü imkanı sağlayan ikinci danışmanım Prof. Dr. İsmail Hakkı KARAHAN'a, aşınma deneylerinin yapılmasında ve yorumlanmasında desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Yusuf KANCA'ya ve hayatım boyunca maddi ve manevi desteğini bana her zaman gösteren, beni hiç yalnız bırakmayan, bugünlere gelmemde en büyük katkıyı sağlayan ve her zaman arkamda duran aileme ve en çokta babam Şükrü ve annem Belgüzar KURUMLİ' ye teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	III
ABSTRACT.....	V
1. GİRİŞ.....	1
2. AKIMSIZ KAPLAMALAR	6
3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	11
3.1. Akımsız Kaplama Metoduyla Üretilen Ni-P ve Ni-P-W Ana Yapılı ve Kompozit Takviyeli Kaplamalar.....	11
3.1.1. Banyo Bileşenleri.....	11
3.1.2. Kaplamaların İçerik Analizleri	17
3.1.3. Kaplamaların Banyo Parametreleri.....	20
3.1.4. Kaplamaların Üretiminde Kullanılan Altlıklar	24
3.1.5. Temizlik ve Katalitik Aktivasyon Oluşturma Aşaması	25
3.2. Ni-P ve Ni-P-W Alaşım ve Ni-P/X ve Ni-P-W/X Kompozit Kaplamaların Özellikleri	27
3.2.1. Kristal Yapı, Yüzey ve Kesit Morfolojisi	27
3.2.2. Sertlik Davranışları	29
3.2.3. Korozyon Davranışları.....	30
3.2.4. Aşınma Davranışları	31
3.3. Takviye Fazı Olarak h-BN Parçacık Kullanılan Akımsız Kaplanmış Kompozit Kaplamalar.....	33
4. MATERYAL VE METOT	34
4.1. Materyal	34
4.1.1. Nikel.....	34

4.1.2. Fosfat.....	34
4.1.3. Tungsten.....	35
4.1.4. h-BN Kompozit Takviye Parçacıkları	35
4.1.5. Alüminyum (Al 2024-T3) Altlık	35
4.2. Yöntem.....	36
4.2.1. Akımsız Kaplama.....	36
4.2.2 Alüminyum Altlık Hazırlama Aşaması	38
4.2.3. Alüminyum (Al 2024-T3) Altlığın Otokatalitik (Akımsız Kaplama) Yöntemi.	39
4.2.3.1. Altlığın Ni-P Akımsız Kaplama Banyosunda Kaplanması.....	39
4.2.3.2. Altlığın Ni-P-W Akımsız Kaplama Banyosunda Kaplanması.....	41
4.2.3.3. Altlığın Ni-P-W/h-BN Akımsız Kaplama Banyosunda Kaplanması.....	42
4.2.4. Korozyon Analiz Yöntemleri.....	44
4.2.4.1. Açık Devre Potansiyeli	44
4.2.4.2. Tafel Ekstrapolasyon (Potansiyodinamik Kutuplaşma) Yöntemi	45
4.2.4.3. Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EES)	46
4.2.5. Mikrosertlik.....	47
4.2.6. Aşınma Deneyleri ve Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri	48
4.2.7. X Işını Kırınımı (XRD) Analizi	50
4.2.8. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Ve Enerji Dağılımı X-Işını Spektroskopisi (EDS) Analizleri.....	51
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	53
5.1. Ni-P, Ni-P-W ve Ni-P-W/h(BN) Akımsız Kaplamaların Mikrosertlik Analizi	53
5.2. Akımsız Kaplamaların Korozyon Analizleri	53
5.2.1. Ni-P ve Ni-P-W Akımsız Kaplamaların; Açık Devre Potansiyeli, Tafel Ekstrapolasyon (Potansiyodinamik Kutuplaşma) Yöntemi ve Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EDS) ile Korozyon Analizleri	53

5.2.3. Ni-P-W/h(BN) Alaşımlı Kompozit Kaplamaların; Açık Devre Potansiyeli, Tafel Ekstrapolasyon (Potansiyodinamik Kutuplaşma) Yöntemi ve Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EDS) İle Korozyon Analizleri.....	56
5.3. Akımsız Kaplamaların XRD Analizleri.....	63
5.3.1. Ni-P ve Ni-P/W Alaşımlı Akımsız Kaplamaların XRD Analizleri	63
5.3.2. Ni-P-W/h-BN Akımsız Kompozit Kaplamada XRD Analizleri.....	64
5.4. Akımsız Kaplamaların Morfoloji ve İçerik (SEM ve EDS) Analizleri	66
5.4.1. Ni-P ve Ni-P-W Alaşımlı Akımsız Kaplamaların Morfoloji ve İçerik (SEM ve EDS) Analizi	67
5.4.2. Ni-P-W/h(BN) Akımsız Kompozit Kaplamada Takviye Parçacık h(BN) Tozlarının Morfoloji ve İçerik (SEM ve EDS) Analizi	69
5.5. Ni-P, Ni-P-W ve Ni-P-W/h(BH) Akımsız Kompozit Kaplamaların Aşınma Analizleri.....	73
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	79
KAYNAKLAR	81

ÇİZİLGELERİN LİSTESİ

Çizelge 3.1 Ni-P akımsız kaplama banyo bileşenleri	11
Çizelge 3.2 Ni-P/X akımsız kompozit kaplamaların banyo bileşenleri	13
Çizelge 3.3 Ni-P-W akımsız kaplamaların banyo bileşenleri	14
Çizelge 3.4 Ni-P/W/X akımsız kompozit kaplamaların banyo bileşenleri	16
Çizelge 3.5 Ni-P akımsız kaplamanın içerik analizi	17
Çizelge 3.6 Ni-P/X akımsız kompozit kaplamanın içerik analizi	18
Çizelge 3.7 Ni-P-W akımsız kaplamanın içerik analizi	19
Çizelge 3.8 Ni-P-W/X akımsız kompozit kaplamanın içerik analizi	20
Çizelge 3.9 Ni-P Akımsız kaplamaların banyo parametreleri	21
Çizelge 3.10 Ni-P/X kompozit kaplama banyo parametreler	21
Çizelge 3.11 Ni-P-W kaplama banyo parametreler	23
Çizelge 3.12 Ni-P-W/X akımsız kompozit kaplamaların banyo parametreleri	24
Çizelge 4.1 AA2024 alaşımının kimyasal bileşimi	36
Çizelge 4.2 AA2024 serisi alüminyum alaşımının mekanik özellikleri	36
Çizelge 4.3 Akımsız Ni-P kaplama üretim değişkenleri	40
Çizelge 4.4 Akımsız Ni-P-W kaplama üretim değişkenleri	42
Çizelge 4.5 Akımsız Ni-P-W/h-BN kompozit kaplama üretim değişkenleri	43
Çizelge 5.1 Üretilen kaplamaların vickers sertlik değerleri	53
Çizelge 5.2 Ni-P ve Ni-P-W akımsız kaplamaların korozyon potansiyeli (E_{kor}), korozyon akımı (I_{kor}) ve korozyon hızı verileri	55
Çizelge 5.3 Ni-P-W/h-BN akımsız kompozit kaplamaların korozyon potansiyeli (E_{kor}), korozyon akımı (I_{kor}) ve korozyon hızı verileri	59
Çizelge 5.4 Ni-P ve Ni-P-W akımsız kaplamaların ve Ni-P-W/h-BN akımsız kompozit kaplamaların korozyon potansiyeli (E_{kor}), korozyon akımı (I_{kor}) ve korozyon hızı verileri	60
Çizelge 5.5 Ni-P ve Ni-P-W akımsız kaplamaların ve Ni-P-W/h-BN akımsız kompozit kaplamaların aşınma izi genişlikleri optik mikroskop görüntüleri değerleri	73
Çizelge 5.6 Akımsız kaplamaların ve akımsız kompozit kaplamaların aşınma deneyi sonrasında elde edilen aşınma izi genişliği, aşınma hacmi değerleri	77

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil 4.1 Alüminyum altlık hazırlama aşaması	39
Şekil 4.2 Ni-P akımsız kaplama prosesi	40
Şekil 4.3 Ni-P-W akımsız kaplama prosesi	41
Şekil 4.4 (a) Ni-P-W/h-BN çözeltisinin ultrasonik karıştırma prosesi, (b) Ni-P-W/h-BN akımsız kompozit kaplama prosesi	43
Şekil 4.5 Tafel Ekstrapolasyon doğruları yöntemiyle korozyon akımı (I_{kor}) ve korozyon potansiyelinin (E_{kor}) bulunuşu (Gerengi, 2008)	46
Şekil 4.6 Aşındırıcı topun aşınmadığı, sadece karşıt plakanın aşındığı aşınma durumu (a) aşınma öncesi, (b) aşınma sonrası: (c) A ve B bölgelerinden oluşan aşınma izi yüzey görünümü şematikleri (Sharma vd., 2013)	50
Şekil 5.1 Ni-P ve Ni-P-W arasındaki OCP analizi	54
Şekil 5.2 Ni-P ve Ni-P-W akımsız kaplamaların Tafel eğrileri	55
Şekil 5.3 Ni-P ve Ni-P-W arasındaki Empedans analizi eğrileri	56
Şekil 5.4 Farklı oranlardaki Ni-P-W/h-BN akımsız kompozit kaplamaların OCP analiz eğrileri	57
Şekil 5.5 Ni-P, Ni-P-W ve farklı oranlardaki Ni-P-W/h-BN akımsız kaplamaların OCP analizi eğrileri	58
Şekil 5.6 Farklı oranlardaki Ni-P-W/h-BN akımsız kompozit kaplamaların Tafel analizi eğrileri	59
Şekil 5.7 Ni-P, Ni-P-W ve farklı oranlardaki Ni-P-W/h-BN akımsız kaplamaların Tafel analizi eğrileri	60
Şekil 5.8 Farklı oranlardaki Ni-P-W/h-BN akımsız kompozit kaplamaların Empedans analizi eğrileri	62
Şekil 5.9 Ni-P, Ni-P-W ve farklı oranlardaki Ni-P-W/h-BN akımsız kaplamaların empedans analizi eğrileri	63
Şekil 5.10 Ni-P ve Ni-P-W alaşımlı akımsız kaplamaların XRD analiz eğrileri	64
Şekil 5.11 Ni-P/W/h-BN akımsız kompozit kaplamada takviye parçacık h-BN parçacıklarının XRD analiz eğrileri	65
Şekil 5.12 Ni-P ve Ni-P-W akımsız kaplamalar ve Ni-P/W/h-BN akımsız kompozit kaplamada takviye parçacık h-BN parçacıklarının XRD analiz eğrileri	65

Şekil 5.13 Alüminyum altlık SEM/EDS görüntüleri	66
Şekil 5.14 Ni-P akımsız kaplama SEM/EDS analizi	67
Şekil 5.15 Ni-P-W akımsız kaplama SEM/EDS analizi	68
Şekil 5.16 Ni-P-W/h-BN(2g/L) akımsız kaplama SEM/EDS analizi	69
Şekil 5.17 Ni-P-W/h-BN(4g/L) akımsız kaplama SEM/EDS analizi	70
Şekil 5.18 Ni-P-W/h-BN(6g/L) akımsız kaplama SEM/EDS analizi	71
Şekil 5.19 Ni-P-W/h-BN(8g/L) akımsız kaplama SEM/EDS analizi	72
Şekil 5.20 Al 2024 T3 taban ve taban üzerine üretilen Ni-P ve Ni-P-W kaplamalara 2 ve 4 N yük altında yapılan aşınma deneyi sonrasında meydana gelen yüzeylerin optik görünüşleri	75
Şekil 5.21 Al 2024 T3 taban üzerine farklı yoğunluklarda hBN kullanılarak büyütülen Ni-P-W-hBN kaplamalara 2 ve 4 N yük altında yapılan aşınma deneyi sonrasında meydana gelen yüzeylerin optik görünüşleri	76

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim 2.1 Elektro depolama işleminin şematik gösterimi ve mekanizma ayrıntıları (a) ve akımsız kaplama biriktirme (b).....	7
Resim 2.2 Havşa başlı vidanın elektro kaplama ve akımsız kaplama, kaplama homojenliğinin karşılaştırılması	7
Resim 2.3 Akımsız Ni-P bazlı kompozit kaplamaların fiziksel ve mekanik özellikleri.....	9
Resim 2.4 Akımsız Ni-P bazlı kaplamaların çeşitli endüstrilerdeki uygulamaları	10
Resim 4.1 CH Instruments elektrokimyasal analiz cihazı	44
Resim 4.2 Mikro sertlik test cihazı	47
Resim 4.3 Aşınma test cihaz görünümü	48
Resim 4.4 Nikon Eclipse MA 100 marka aşınma görüntüleme cihazı	49
Resim 4.5 RIGAKU Smart LabTM marka XRD cihazı	51
Resim 4.6 Jeol marka JSM7001F model SEM ve EDS.....	52

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile aşağıda sunulmuştur

Simgeler	Açıklamalar
Al	Alüminyum
Al 2024-T3	Alüminyum 2024-T3
Al5052	Alüminyum 5052 Alaşımı
Al₂O₃	Alüminyum Oksit
AZ31	Magnezyum Alaşımları
AZ31B	Magnezyum Alaşımları
AZ91D	Magnezyum Alaşımları
AQ	Havada Soğutma
B	Bor
B4C	Bor Karbür Nano Tozu
CH₃COONa	Sodyum Asetat
CH₃COOH	Asetik Asit
C₃H₆O₃	Gliserik Aldehit
C₅H₈NNaO₄	Monosodyum Glutamat
CH₄N₂S	Tiyoüre
CH₃COON	Asetik asit
C₆H₈O₇	Sitrik asit
C₄H₆O₄	Süksinik Asit
CH₃COONH₄	Amonyum Asetat
C₆H₁₁NO₇	Amonyum Sitrat
C₂H₃NaO₂	Sodyum Asetat Trihidrat
C₁₂H₂₅O₄S.Na	Sodyum Dodesil Sülfat
C₇H₆O₆S.2H₂O	Sülfosalisilik Asit Dihidrat
CNT	Karbon Nanotüp Dizisi
CNFs	Nanofibril Selüloz
C₃N₄	Grafit Karbon Nitrür
Cr	Krom

Simgeler**CrCl₃·6H₂O****CTAB****Cu****CuSO₄****CuSO₄·5H₂O****GPa****h-BN****HCl****HF****HNO₃****H₂SO₄****K₂C₂O₄·H₂O****Mg****Mn****Mo****N****NaCl****NaCit/Lac****Na₃C₆H₅O₇·2H₂O****NaF****Na₂H₂PO₂****Na₂MO₄·2H₂O****NaSO₄C₁₂H₂₅****Na₂WO₄****Nb₂O₅****NdFeB****NH₄Cl****NH₄HF₂****NH₄ReO₄****(NH₄)₂SO₄****Açıklamalar (Devamı)**

Krom(III) Klorür Hekzahidrat

Setrimonyum Bromür

Bakır

Bakır (II) Sülfat

Bakır(II) Sülfat Pentahidrat

Basınç Birimi

Hegzagonal Bor Nitrür

Hidroklorik Asit

Hidroflorik Asit

Nitrik Asit

Sülfürik Asit

Di-Amonyum Oksalat Monohidrat

Magnezyum

Manganez

Molibden

Azot

Sodyum Klorür

Sodyum Klorür ve Laktik Asit Karışımı

Sodyum Sitrat

Sodyum Florür

Sodyum Hipofosfit

Sodyum Molibdat Dihidrat

Sodyum Dodesil Sülfat

Sodyum Tungstat

Niyobyum(V) Oksit

Neodyum Mıknatıs

Amonyum Klorür

Amonyum Biflorür

Amonyum Perhenat

Amonyum Sülfat

Simgeler	Açıklamalar (Devamı)
NH₃·H₂O	Amonyum Hidroksit
Ni	Nikel
NiCl₂·6H₂O	Nikel(II) Klorür Heksahidrat
NiSO₄	Nikel(II) Sülfat
NiSO₄·6H₂O	Nikel(II) Sülfat Heksahidrat
O	Oksijen
P	Fosfat
Pd	Paladyum
pH	Potansiyel Hidrojen
PTFE	Politetrafloroetilen
P-Tipi Si (100)	P- Tipi Silisyum Yarıiletkeni
RCA	Sitrat Antikoagülasyonu
Re(CeO₂)	Seryum dioksit
Si	Silisyum
SiC	Silisyum Karbür
SiO₂	Silisyum Dioksit
St 37	37 kg/mm ² Çekme Dayanımına Sahip Olan Çelik
TaC	Tantal Karbür
Ti	Titanyum
TiC	Titanyum Karbür
TiN	Titanyum Nitrür
TiO₂	Titanyum Dioksit
TL084	Bakır Alaşım
TU	Tiyoüre
ZK61M	Magnezyum Metal Alaşımı
ZnO	Çinko Oksit
ZrO₂	Zirkonyum Dioksit
Zn	Çinko
W	Tungsten
WS₂	Tungsten Disülfür

Kısaltmalar**ADP****AFM****Alüminyum 7075-T6****AM60B****API X100****ASTM G133****CH Instrument****CuNi 90/10****EDS****EDX****EES****Ekor****Fe-600****FESEM****L80****HV****İkor****L245****MOF****OCP****OHM****SEM****V****X****XRD****WQ****Açıklamalar**

Açık Devre Potansiyeli

Atomik Kuvvet Mikroskobu

Alüminyum 7073 Alaşımı -T6

Magnezyum Alaşımı

Amerikan Petrol Enstitüsü Çeliği

Linear Aşınma Test Cihazı

Korozyon Test Cihazı adı

Bakır Nikel Alaşımı 90/10

Enerji Dağılımı Spektrometresi

X-ışınını Kırınımı

Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi

Korozyon Potansiyeli

Yüksek Krom Alaşımlı Kaynak Metal

Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu

Alüminyum Alaşımı

Vickers Sertlik Ölçü Birimi

Korozyon Akımı

Karbon Çelik

Metal-Organik Çerçeveler

Açık Devre Potansiyeli

Direnç Birimi

Taramalı Elektron Mikroskobu

Elektik Potansiyeli

Herhangi Bir Seramik Parçacık

X Işını Kırınımı

Suda Soğutma

1. GİRİŞ

Alüminyum alaşımı 2024-T3, yüksek mukavemeti ve yaşlandırma ile sertleşme özellikleri nedeniyle havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [(Ralston vd., 2009); (Rodríguez-Martínez vd., 2011)]. Bu alaşım, yüksek akma gerilimi ve gerinim sertleşmesi sergileyerek sağlam malzemeler gerektiren uygulamalar için uygun hale gelir (Rodríguez-Martínez vd., 2011).

Fakat, bu alaşımın endüstride kullanımı genellikle aşınma ve korozyon sorunları nedeniyle zordadır. Alaşımdaki korozyona bağlı problemler çukurlaşma ile başlar ve taneler arası korozyona dönüşerek malzemenin pul pul dökülmesine yol açabilir (Kamoutsi vd., 2006).

Bu korozyon zorluklarının üstesinden gelmek için çeşitli çalışmalar, yerel korozyonu azaltmak ve alüminyum alaşımının korozyona karşı korumasını arttırmak için vanadyum türleri, nadir toprak iyonları ve benzotriazol gibi inhibitörlerin kullanımını araştırmıştır [(Ralston vd., 2008); (Qafsaoui vd., 2015); (Jadhav vd., 2015)].

Ayrıca, alüminyum alaşımı, endüstriyel uygulamalarda aşınmayla ilgili zorluklarla karşı karşıyadır. Alaşım, işleme süreçleri sırasında hızlı takım aşınmasına ve pürüzlü yüzey kalitesine karşı hassastır ve bu durum bitmiş ürünlerin kalitesini etkiler (Khodir & Shibayanagi, 2007).

Bu zorlukların üstesinden gelmek, endüstriyel uygulamalarda alaşımın aşınma direncini ve korozyona karşı korumasını iyileştirmek için etkili korozyon önleyicilerin, yüzey işlemlerinin ve kaplamaların geliştirilmesini gerektirir [(Jadhav vd., 2015); (Cai vd., 2017)]

Endüstriyel tesislerde kullanılan parçaların korozyon ve aşınma nedeniyle bozulması, önemli operasyonel ve ekonomik kayıplara yol açabilmektedir. Bu sorunu çözmek için malzemelerin yüzey özelliklerini geliştirmek amacıyla termal püskürtme, nitrürleme ve nano yapılandırma gibi çeşitli kaplama yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler, malzemelerin yüzey özelliklerini değiştirerek mekanik kuvvetlere ve korozyon ve aşınma dahil çevresel faktörlere karşı dirençlerini arttırmayı amaçlamaktadır. Aşınma ve korozyonun sinerjik etkileri, özellikle madencilik, kimyasal imalat, kâğıt üretimi ve enerji üretimi gibi

endüstrilerde malzeme bozulmasını önemli ölçüde hızlandırabilir [(Hardwicke & Lau, 2013); (Gant vd., 2004)].

Metal kaplama yöntemlerinden biri de akımsız kaplama yöntemidir. Akımsız kaplama, metal kaplamaların çeşitli yüzeyler üzerine biriktirilmesi için köklü ve çok yönlü bir yöntemdir ve uygulamasında basitlik ve olgunluk sunar (Al-Maqdasi vd., 2019). Bu işlem, harici bir elektrik güç kaynağına ihtiyaç duymadan metallerin veya alaşımların altlıklar üzerine kimyasal olarak biriktirilmesini içerir ve bu da onu baskılı elektronikler, yarı iletken mikro sistemler ve kompozit malzemeler dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamalar için uygun hale getirir (Shacham-Diamand vd., 2015). Akımsız kaplama, metallerin ve alaşımlarının ince filmlerinin hazırlanması için özellikle değerlidir ve çeşitli endüstrilerde yaygın kullanımına katkıda bulunur (Shacham-Diamand vd., 2015). Ayrıca, metal kaplamaların gözenekli malzemeler üzerine biriktirilmesi için akımsız kaplama kullanılmış olup, bu da gelişmiş mekanik özelliklere ve termal iletkenliğe katkıda bulunur (Kim vd., 2016). Yöntem aynı zamanda işlevsel olarak derecelendirilmiş kompozit kaplamaların sentezinde ve karakterizasyonunda da çok önemli olup, kaplama ile alt tabaka arasındaki mekanik uyumsuzluk açısından avantajlar sunmaktadır (Bostani vd., 2018). Genel olarak, elektriksiz kaplama, çeşitli endüstrilerde geniş kapsamlı uygulamaları olan çok yönlü ve vazgeçilmez bir tekniktir ve bu da onu önemli bir araştırma ve geliştirme alanı haline getirmektedir.

Kompozit malzemeler tipik olarak bileşenlerden ayrı ayrı elde edilemeyen özellikleri sağlamak üzere birleştirilen iki veya daha fazla fazdan oluşan çok fazlı malzemelerdir. Bu teknoloji, daha pahalı malzemelerin kullanımından kaçınarak ürün performansını iyileştirmenin ekonomik bir yolunu temsil eder. Kompozit malzemeler, mikron veya mikron altı ölçekte asılı parçacıklar, genellikle karbürler, nitrürler ve oksit parçacıkları gibi organik parçacıklar içeren, banyo yoluyla bir film olarak elde edilebilir.

Kompozit kaplama üretiminde elektriksiz kaplama yöntemi diğer yöntemlere göre katalitik olarak aktif yüzeyler üzerine seçici olarak kaplama yapabilme, ideal kalınlıkta kaplama oluşturabilme, karmaşık parçaları aynı anda kaplayabilme, yüzey üzerine biriktirme imkânı, iletken olmayan ve yarı iletken malzemeler ve metalik olmayan malzemelerin eklenmesi yoluyla özelliklerin geliştirilmesi gibi birçok avantaj sunmaktadır. (Nemane & Chatterjee, 2021).

Akımsız kaplama yöntemiyle kompozit kaplama, belirli özellikleri geliştirmek için katı parçacıkların metal kaplamalarla birlikte biriktirilmesini içerir (Allahkaram & Rabizadeh, 2012). Bu yöntem, sertlik, aşınma direnci ve korozyon direnci gibi arzu edilen nitelikleri geliştirmek için yaygın olarak kullanılır ve bu da onu hidrolik, hassas parçalar ve malzeme mühendisliği gibi endüstrilerdeki çeşitli uygulamalar için uygun hale getirir [(R. Hu vd., 2018); (Balaraju vd., 2001); (Safonov vd., 2019)]. Akımsız kompozit kaplamalar, özelliklerde önemli iyileştirmeler sağlama yetenekleri nedeniyle popülerlik kazanmış, bu da onları gelişmiş mekanik davranış ve arayüz iyileştirmesi gerektiren uygulamalar için uygun hale getirmiştir [(Mahtab vd., 2018); (Gao vd., 2007)]. Ek olarak, takviye parçacıkları üzerindeki akımsız kaplama, metal-seramik arayüzündeki gözenekliliği ortadan kaldırarak mekanik özelliklerin ve performansın iyileştirilmesine katkıda bulunur (Mahtab vd., 2018). Ayrıca, kompozit kaplamaların akımsız kaplama yöntemiyle imalatı, takviye parçacıklarının morfolojisini ve şeklini değiştirmek, matris ve takviye malzemeleri arasındaki ıslanabilirliği arttırmak için araştırılmıştır (X. Wang vd., 2017). Genel olarak, akımsız kaplama yöntemiyle kompozit kaplama, çok çeşitli endüstriyel ve bilimsel uygulamalar için malzemelerin özelliklerini geliştirmek için çok yönlü ve etkili bir yaklaşım sunar.

Akımsız nikel (Ni) kaplama, Ni elementlerinin tekdüze birikmesi, kaplama banyosunun stabilitesi ve elektriksel iletkenlik ve korozyon direnci gibi işlevleri sağlama yeteneği dahil olmak üzere çeşitli avantajlar sunar [(Sudagar vd., 2013a); (Q. Chen & Lua, 2021); (Zou vd., 2015); (S. Q. Jiang vd., 2008)]. Aynı zamanda korozyon direnci, aşınma direnci, yağlayıcılığı, yüksek sertliği ve kabul edilebilir sünekliği ile de bilinir ve bu da onu çeşitli uygulamalar için uygun kılar [(Krishnan vd., 2006); (Guo vd., 2008)].

Akımsız Ni-P kaplama, Ni kaplamaya göre gelişmiş korozyon direnci, aşınma direnci, yağlayıcılık ve yüksek sertlik dahil olmak üzere çeşitli avantajlar sunar (Zou vd., 2015). Ek olarak Ni-P kaplama, özel alt tabaka gereklilikleri olmadan daha iyi bağ mukavemeti ve tekdüze kaplamalar sağlar [(Gu vd., 2005); (Bae vd., 2019)]. Genel olarak, akımsız Ni-P kaplama, geleneksel Ni kaplama yöntemlerine kıyasla üstün özellikler ve yetenekler sunar.

Akımsız kaplama yöntemiyle Ni-W-P kaplama, Ni-P kaplamaya göre çeşitli avantajlar sunar. Tungsten, mikro sertliğini ve yüksek sıcaklıklara karşı direncini artırarak kaplamanın genel dayanıklılığını artırır (Stankiewicz vd., 2013). Ayrıca, akımsız Ni-W-P kaplama

sistemi, depolama kaplarını biyodizelin aşındırıcı saldırısından korumak için potansiyel bir malzeme olarak tanımlanmıştır ve bu da üstün korozyon direncine işaret etmektedir (Sudagar vd., 2013b). Bu avantajlar, Ni-W-P kaplamaları, Ni-P kaplamalara kıyasla daha iyi aşınma direnci, daha az sürtünme ve daha iyi korozyon koruması gerektiren uygulamalar için umut verici bir seçenek olarak konumlandırıyor.

Akımsız kaplama yöntemiyle uygulanan h-BN kompozit kaplama birçok avantaj sunmaktadır. Hidrofobik, inert ve dielektrik yapısı nedeniyle etkili korozyon koruması sergileyerek düşük korozyon hızı ve akım yoğunluğu sağlar [(Liu vd., 2016); (Husain vd., 2013)]. Ek olarak, h-BN kaplamalar mükemmel termal iletkenlik, mekanik mukavemet, kimyasal stabilite ve elektriksel iletkenlik sergileyerek onları çeşitli uygulamalar için uygun hale getirir [(Jo vd., 2013); (Pakdel vd., 2011)]. Bu avantajlar, h-BN kaplamalarını korozyon koruması, termal yönetim, alev geciktiricilik açısından umut verici malzemeler olarak konumlandırıyor.

Ni-P-Al₂O₃ ve Ni-P/nano-SiO₂ gibi akımsız kompozit kaplamalar, Ni-P kaplamalara kıyasla üstün korozyon önleme özellikleri ve mikro sertlik gösterir. Ni-P-Al₂O₃ kompozit kaplamalar, daha uygun kristal düzlem aralığı ve tane boyutu nedeniyle daha iyi performans sergilerken, Ni-P/nano-SiO₂ kompozit kaplamalar daha iyi korozyon koruması sağlar. Bu avantajlar, akımsız kompozit kaplamaları, Ni-P kaplamalara kıyasla gelişmiş özelliklere sahip, gelecek vaat eden alternatifler olarak konumlandırıyor.

Bu tez çalışmasının amacı, akımsız kaplama metoduyla Ni-P-W/h-BN kompozit kaplamaların mekanik ve korozyon davranışlarını incelemektir. Bu amaçla, akımsız kaplama metodunun parametreleri, kaplama kalınlığı, kaplama sertliği, kaplama yapısı, kaplama bileşimi, kaplama morfolojisi, kaplama korozyon direnci ve kaplama aşınma direnci üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ayrıca, h-BN katkı oranının kaplama özellikleri üzerindeki etkisi de incelenmiştir.

Bu çalışmada Al 2024-T3 altlık metali üzerine akımsız Ni-P, Ni-P-W ve farklı oranlarda h-BN katılarak Ni-P-W/h-BN kaplamaları üretilmiş ve W ve h-BN katkı maddelerinin kaplama özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır. Üretilen kaplamaların korozyon direnci, sertlik değerleri, morfolojik yapısı, aşınma hızı incelenmiştir.

Deney tasarımımda Ni-P alaşımlı çözelti, Ni-P alaşımına ek olarak W katkı maddesi eklenerek hazırlanan çözeltiye ek olarak farklı oranlarda Ni-P-W akımsız kaplama çözeltisine eklen h-BN (2g/l, 4g/l, 6g/l, 8g/l) çözeltileri hazırlanarak akımsız kaplamalar üretilmiştir. Deney setleri 75 °C sıcaklıkta 200g/l çözelti içinde 90 dk sürede ve 200-300 dev/dk'da akımsız kaplamaların üretimi gerçekleştirilmiştir.

Üretilen akımsız kaplamaların özelliklerinin incelenmesi için, akımsız kaplamalar işleme yüzeyine dik gelecek şekilde kesilmiştir. Hem kaplama yüzeyinden hem kaplama yüzeyi kesitinden parçaların elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri alınmış ve enerji dağılım spektrometresi (EDS) analizi yapılmıştır. Böylece akımsız kaplamaların hem kesiti hem de kaplama yüzeyi incelenmiştir.

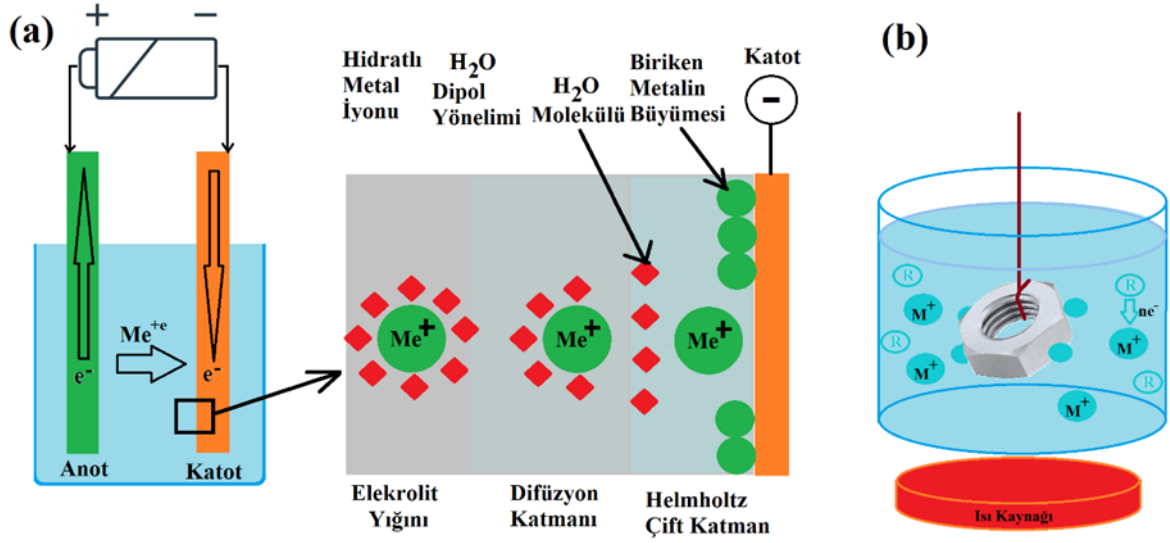
Üretilen Ni-P, Ni-P-W ve farklı oranlar çözeltiye katılan h-BN seramik parçacıkların Ni-P-W/h-BN akımsız kompozit kaplamaların vickers sertlik değeri yöntemi kullanılarak kaplamaların sertlik değerleri incelenmiştir. Her numune için 5 farklı bölgeden vickers sertlik ölçümleri yapılmış olup ortalama sertlik (HV) değerleri belirlenmiştir. Numunelerin yüzeyinde X-ışını kırınımı (XRD) kullanılarak kaplama içreği ile ilgili grafikler oluşturulmuştur. Akımsız kaplamaların ve akımsız kompozit kaplamaların karşılaştırmalı olarak korozyon performansları incelenmiş ve kaplamaların yüzey performanslarını irdelemek için aşınma analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışması, beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, giriş kısmı verilmiştir. İkinci bölümde, akımsız kaplamalar hakkında kısaca bilgilendirme yapılmıştır. Üçüncü bölümde, literatür taraması kapsamlı bir şekilde yapılmıştır. Dördüncü bölümde, deneysel çalışmanın malzeme ve yöntemleri anlatılmıştır. Beşinci bölümde, deneysel çalışmanın bulguları yorumlanmış ve tartışması sunulmuştur. Altıncı bölümde ise, sonuç ve öneriler verilmiştir.

2. AKIMSIZ KAPLAMALAR

Makine elemanlarını aşınmadan, hasardan ve korozyondan korumak için yüzey işlemleri uygulanmaktadır. Bileşenleri bu hasarlardan korumak için kaplanması yüzeyin kimyası ve metalurjisi değiştirilmektedir. Kaplamalar üç başlığa ayrılmaktadır: inorganik, organik ve seramik kaplamalar olarak sınıflandırılmaktadır. İnorganik kaplamalar, korunması amaçlanan alt tabakalara uygulanan boyalar veya metaller alt tabakayı korozyon ve aşınmaya karşı korurken, değer bir kaplama çeşidi olan organik kaplamalar ise plastik ve kauçuk malzemelerden elde edilmektedir. Her iki kaplama çeşidi de iyi korozyon direnci ve mekanik özellikler sağlamaktadır (Nazari vd., 2023).

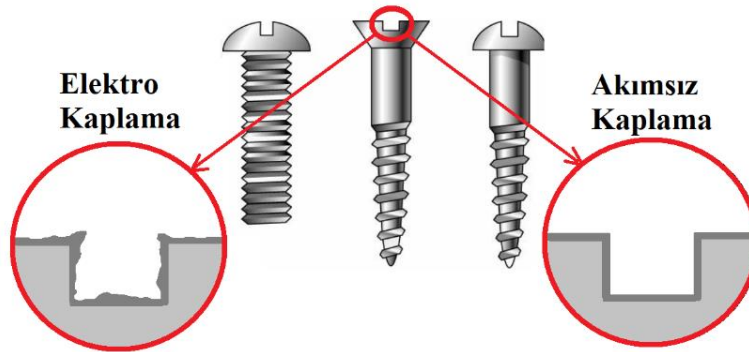
Seramik kaplamalar ise metal üzerine uygulanan kaplamaların çeşitli işlemleri mevcuttur, elektro kaplama, elektriksiz kaplama, fiziksel ve kimyasal buhar biriktirme ve benzeri kaplamalar kendilerine özgü sınırlamaları avantaj ve dezavantajları vardır. Elektro kaplama, Resim 2.1a'da gösterildiği gibi, elektroliz sırasında elektrolitten bir elektrik akımı geçirilerek bir metalin bir altlık üzerine birikmesi olarak tanımlanmaktadır (Nazari vd., 2023). Diğer bir kaplama türü olan akımsız kaplamada ise metal üzerine elektrik akımı kullanılmadan yapılan kaplamadır. Kaplamanın oluşabilmesi için metal tuzları içeren sulu çözelti, indirgeyici bir ajan, pH'ı kontrol eden diğer kimyasallar ve reaksiyon oranları belirleyici rol almaktadırlar. İndirgeyici ajan, metal iyonları varlığında katalizör görevi görmektedir. Bu kaplama yöntemine bazen otokatalitik veya kimyasal kaplama denir (Resim 2.1b) (Guglielmi, 1972)



Resim 2.1 Elektrodépolarizasyon işleminin şematik gösterimi ve mekanizma ayrıntıları (a) ve akımsız kaplama biriktirme (b).

Akımsız kaplama, elektrokaplama göre kaplamanın kalitesi, mükemmel tribolojik özellikler ve tekdüzellik gibi avantajların yanısıra altlık malzemeye ya da çözeltiye herhangi bir dış akım olmadığı için karmaşık şekillere sahip altlık malzemeler ve iletken ve iletken olmayan altlık malzemeler üzerine akımsız kaplamalar uygulanabilmektedir (Nazari vd., 2023).

Resim 2.2’de gösterildiği gibi havşa başlı vidaya elektro kaplama ve akımsız kaplama prosesleri gerçekleştirilmiştir. Havşa başlı vidanın elektro kaplamasında köpek kemiği etkisi gözlenirken, akımsız kaplamada ise düz ve pürüzsüz bir yüzey olduğu gözlenmektedir, bu durum ise kaplama proseslerinin kalınlık ve homojenliğindeki farkı göstermektedir.



Resim 2.2 Havşa başlı vidanın elektro kaplama ve akımsız kaplama, kaplama homojenliğinin karşılaştırılması

Gümüş (Chang vd., 1993; Ling vd., 2004), altın (Ishikawa vd., 2007), nikel (Hoon Park & Nyung Lee, 1988), bakır (Sard, 1970) ve diğer bazı metaller için akımsız kaplama çözeltileri geliştirilmiştir. Akımsız nikel kaplamalar şu dört gruba ayrılır: saf nikel/siyah nikel akımsız kaplamalar, alaşım/polialaşım akımsız kaplamalar, akımsız kompozit kaplamalar ve nano akımsız kaplamalar olarak gruplandırılır (Sudagar vd., 2013b).

Korozyon ve aşınma tahribatları için en etkili ve önemli kaplamalar nikel-fosfor (Ni-P) ve nikel-bor (Ni-B) kaplamalardır. Ni-B akımsız kaplamalar aşınmaya ve korozyona karşı iyi bir dirence sahiptir, ama tamamen amorf bir yapıya sahip olmadıkları için aşındırıcı ortamlara karşı dirençleri düşük olmakla beraber maliyetli oldukları görülmektedir. Ni-P akımsız kaplamalar ise sert, kaygan, korozyona oldukça dirençli, kolay lehimlenebilir ve sert krom malzemesine alternatif olduğu görülmüştür (Barati & Hadavi, 2020; Baskaran vd., 2006; Shozib vd., 2022; Tomlinson & Wilson, 1986).

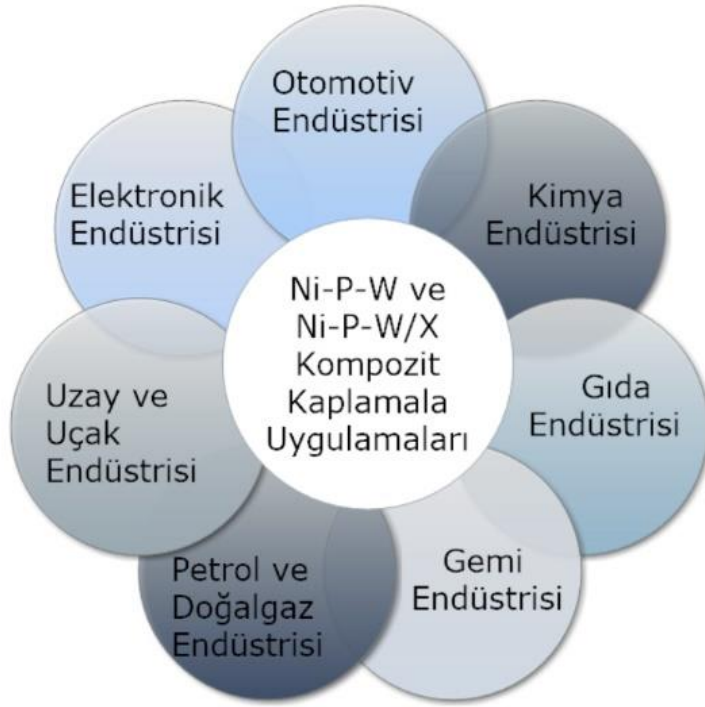
Akımsız Ni-P kaplamaların önemli avantajlarına rağmen bazı dezavantajları olduğu tespit edilmiştir. Akımsız kaplama gerçekleşirken oluşan hidrojen kabarcıkları akımsız Ni-P kaplama yapısında kaplamanın koruyuculuğunun performansını kötü etkileyecek derecede küçük delikler oluşturacaktır. Bu dezavantaj durumunun giderilmesi ve performansını arttırmak için birbiri üstünde birbirini tamamlayan iki farklı kaplama sisteminin birleşimi olan dubleks kaplama ve kompozit kaplama gibi farklı teknikler kullanılarak kaplamanın performansı geliştirilmektedir. Akımsız Ni-P bazlı kompozit kaplamaların Ni-P akımsız kaplamalara göre daha iyi bir aşınma direncine sahip olduğu bilinmektedir. Akımsız Ni-P bazlı kompozit kaplamaların aşınma direnci, birçok parçacık katkılı kompozit kaplama ile karşılaştırılmış ve sert kroma eşdeğer bir aşınma performansı gösterdiği tespit edilmiştir. Akımsız Ni-P bazlı kompozit kaplamaların iç yapısı araştırıldığında, genellikle tane sınırı, ikizlik, dislokasyon, yığılma hatası veya diğer yapısal yığılma hataları olmayan amorf bir yapıya sahip olduğu gözlemlenmiş bu yapısal performansından dolayı kompozit kaplamalar mükemmel korozyon direncine sahip olduğu görülmüştür (Nazari vd., 2023). Akımsız Ni-P bazlı kompozit kaplamaların bu üstün özelliklerinden dolayı Ni-P akımsız kaplamalardan daha iyi bir korozyon direnci gösterir (Du vd., 2018).

Akımsız Ni-P bazlı kompozit kaplamalar uygun yağlama, lehimlenebilirlik ve plastisite özellikleri, iyi elektro katalitik aktivite ve düşük direnç vb. gibi farklı özelliklerde gösterir. Resim 2.3'te akımsız Ni-P bazlı kompozit kaplamaların fiziksel özellikleri gösterilmektedir.



Resim 2.3 Akımsız Ni-P bazlı kompozit kaplamaların fiziksel ve mekanik özellikleri.

Akımsız Ni-P bazlı kompozit kaplamaların mükemmel özelliklerinden dolayı bu akımsız kompozit kaplamalar petrol, gaz, kimya, elektronik, otomotiv vb. birçok endüstrilerde özel uygulamalarda kullanılabilirler. Resim 2.4'te akımsız kompozit kaplamaların çeşitli endüstrilerdeki uygulamaları gösterilmektedir.



Resim 2.4 Akımsız Ni-P bazlı kaplamaların çeşitli endüstrilerdeki uygulamaları

Yapılan inceleme, akımsız Ni-P kaplamaların gelişiminin, Ni-P akımsız kaplamaların çözelti bileşimine katılan sert ve yumuşak nanopartiküllerin kaplamanın performansındaki iyileşmenin sebebi olduğu vurgulamaktadır.

Nano boyutlu parçacıkları içeren Ni-P akımsız kaplamalara Ni-P nanokompozit kaplamalar adı verilir. Genel olarak Ni-P nanokompozit kaplamalar, kaplamaya katılan parçacıkların özelliklerine bağlı olarak iki çeşide ayrılabilir. Biri TiO_2 (Pandian vd., 2023), Al_2O_3 (Daniel vd., 2023; Gul & Usta, 2023), SiC (Uppada vd., 2023), TiC (Farhan vd., 2023), ZnO (Kumar vd., 2023) elmas vb. gibi sert nanoparçacıkların ilave edilmesi, Ni-P kaplamanın aşınma ve korozyon direncini artırabilir (Nazari vd., 2023). Diğeri ise akımsız Ni-P nanokompozit kaplamaların sürtünme katsayısını azaltabilen politetrafloroetilen (PTFE) (Mei vd., 2023), CNT (Gul vd., 2023), hBN (Khaira et al., 2023), grafit (Czapczyk et al., 2023)] vb. tozlarını içerir.

3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

3.1. Akımsız Kaplama Metoduyla Üretilen Ni-P ve Ni-P-W Ana Yapılı ve Kompozit Takviyeli Kaplamalar

3.1.1. Banyo Bileşenleri

Ni-P akımsız kaplamaların üretimi ve özelliklerinin incelenmesi ile ilgili birçok çalışma yapıldığı Çizelge 3.1'deki literatür taramasında görülmüştür. Ni-P akımsız kaplamalar temel olarak nikel sulu çözelti olarak kullanılmaktadır. Akımsız kaplamalarda kullanılan nikel kaynağı olarak nikel sülfat (NiSO_4) kullanılmıştır. Altlık üzerine ince film tabakanın oluşabilmesi için fosfit kaynağı olarak sodyum hipofosfit ($\text{Na}_2\text{H}_2\text{PO}_2$) kullanılmıştır.

Çizelge 3.1 Ni-P akımsız kaplama banyo bileşenleri

Kompozit Kaplamalar	Nikel Kaynağı ve miktarı	Fosfit Kaynağı ve miktarı	Parçacık Tipi ve miktarı	Katkı Maddeleri	Referans
Ni-P	$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -35 g/L	$\text{Na}_2\text{H}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ -10 g/L	-----	$\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ CH_3COONa	(Venkatesha & Ranganatha, 2012)
Ni-P	$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -16 g/L	$\text{Na}_2\text{H}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ -20 g/L	-----	$\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, CH_3COOH	(Arulvel vd., 2021)
Ni-P	$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -30 g/L $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -30 g/L	$\text{Na}_2\text{H}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ -10 g/L	-----	$\text{C}_4\text{H}_4\text{Na}_2\text{O}_4$	(Kundu vd., 2018)
Ni-P	$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -20 g/L	$\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ -22 g/L	-----	$\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ NH_4HF_2 , $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$ Surfactant	(Qin vd., 2011)
Ni-P	$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -35 g/L	$\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{XH}_2\text{O}$ -10 g/L	-----	$\text{C}_6\text{H}_5\text{N}_8\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ NH_4Cl	(Matik & Citak, 2011)
Ni-P	$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -30 g/L	$\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ -25 g/L	-----	CH_3COONa $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$	(B. Jiang vd., 2014)
Ni-P	$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -15 g/L	$\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ -14 g/L	-----	CH_3COONa NH_4HF_2 , $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$ HF , $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	(Rajabalizadeh vd., 2018)
Ni-P	$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -33 g/L	$\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ -20 g/L	-----	$\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ CH_3COONa $\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_2$, $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	(Sundararajan vd., 2021)
Ni-P	$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -30 g/L $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -30 g/L	$\text{Na}_2\text{H}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ -10 g/L	-----	$\text{C}_4\text{H}_4\text{Na}_2\text{O}_4$	(Kundu vd., 2016)
Ni-P	$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -40 g/L	$\text{Na}_2\text{H}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ -30 g/L	-----	$\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ NH_4Cl	(Karthikeyan & Vijayaraghavan, 2016)

Akımsız kaplamanın hızlı, dengeli ve çözeltinin bozunmayacak şekilde oluşması için farklı ve birçok katkı maddesi kullanıldığı Çizelge 3.1’de liste halinde sıralanmıştır. Katkı maddeleri olmadan akımsız kaplamanın altlık üzerinde ince film şeklinde oluşmadığı görülmüştür. Katkı maddelerinin özellikleri; komplekstirici ajan oluşumu, stabilizatör, banyo pH’nın tamponu, yüzey aktif madde olarak literatürde görülmüştür. Ni-P akımsız kaplamalarda farklı oranlarda nikel sülfat ve sodyum hipofosfit kullanılmıştır. Bazı akımsız kaplamalarda nikel kaynağı olarak nikel klorit kullanıldığı görülmüştür (Karthikeyan & Vijayaraghavan, 2016; Kundu vd., 2018; Matik & Citak, 2011; Venkatesha & Ranganatha, 2012). Literatürde yapılan farklı banyon bileşenlerinde (Venkatesha & Ranganatha, 2012) yaptığı çalışmada nikel sülfat ile nikel klorit farklı banyo bileşenlerini kullanarak kaplama üzerindeki özelliklerini karşılaştırmalı olarak inceledikleri görülmüştür.

Kaplamacılık sektöründe en çok kullanılan nikel kaynağı nikel sülfattır, nikel klorür nadir uygulamalarda kullanılmaktadır. Akımsız nikel kaplamalarda ise nikel sülfat ve nikel klorür en sık kullanılan nikel kaynaklarıdır. Nikel kaynağı olarak; nikel klorür (NiCl_2)’ de %24,7 nikel miktarı, nikel asetat (NiSO_4)’ ta %23,6 nikel miktarı ve nikel sülfat (NiSO_4)’ta ise %23 den bir miktar fazla nikel miktarı bulunmaktadır. Nikel klorür (NiCl_2), demir alaşımları üzerine korozyon uygulamaları için kullanıldığında ve alüminyum kaplaması için akımsız nikel kaplama banyosu için kullanıldığında istenilen performansı sağlayamaz (Mallory et al.1990). Fosfit kaynağı olarak incelenen çalışmalarda sodyum hipofosfit kullanılmıştır. Elektriksiz kaplamalarda sodyum hipofosfitin kullanılma amacı daha iyi kaplanabilirlik, daha kararlı banyolar oluşturmaları ve banyo parametrelerinin daha kolay kontrol edilebilmesine müsaade etmesidir. Sodyum hipofosfit 15 - 30 g/L arasında çözelti içeriğine katılır. Katılan bu oran çözelti içeriğini alkali ya da asidik karakterli olmasını sağlamaktadır.

Aynı zamanda, akımsız kaplamalar için çözeltiye katkı maddeleri eklenir. Bu katkı maddelerinden $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ çözeltinin kaplama süresince bozulmaması için Stabilizör/İnhibitör olarak kullanılmıştır [(Venkatesha & Ranganatha, 2012), (Qin vd., 2011), (Sundararajan vd., 2021), (Karthikeyan & Vijayaraghavan, 2016)]. Altlık üzerine Ni ve P’in tutunmasını sağlamak için kompleks yapıcı ajan olarak NH_4HF_2 , Surfactant, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_2$, $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$ tercih edilmiştir [(Qin vd., 2011), (Rajabalizadeh vd., 2018), (Sundararajan vd., 2021), (B. Jiang vd., 2014)]. Reaksiyon

hızlandırıcı ve pH dengeleyici olarak sırasıyla CH_3COONa , NH_4Cl ve $\text{C}_4\text{H}_4\text{Na}_2\text{O}_4$, HF 'lar akımsız kaplama çözeltisine katılmaktadır [(Venkatesha & Ranganatha, 2012), (Karthikeyan & Vijayaraghavan, 2016), (Kundu vd., 2018), (Rajabalizadeh vd., 2018)].

Ni-P/X akımsız kaplamaların üretimi ve özelliklerinin incelenmesi ile ilgili Ni-P akımsız kaplamaya göre daha az çalışma yapıldığı literatür taramasında görülmüştür. Ni-P/X akımsız kompozit kaplamaları başarılı bir şekilde üretildiği Çizelge 3.2'de literatürde görülmüştür. Ni-P akımsız kaplamalardan farklı olarak akımsız kaplama çözeltisine mikron veya nano boyutta kompozit parçacıkların ilave edildiği görülmüştür. Kompozit parçacıkların ilave edilmesi ile Ni-P akımsız kaplama ile bir karşılaştırma yapılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda; Ni-P ve Ni-P/X birbirlerinden farklı sonuçlar verdiği görülmüştür. (Faraji vd., 2011) yatıkları çalışmada Ni-P kaplamadan farklı olarak Cu-P ve Cu-P/X kaplamalarını üretmişlerdir. Banyo içeriğine bakıldığı zaman nikel sülfatın olduğu görülmektedir lakin araştırmanın temel amacı ise bakır ve kompozit parçacıklarının nikel ile kaplanmasını üretmek olduğu araştırmalardan tespit edilmiştir. Yapılan bir başka çalışmada (Liu vd., 2016) araştırmacıları dubleks kaplama gerçekleştirmişlerdir. Yapılan kaplama metodunda ilk önce Ni-P akımsız kaplaması belli bir süre kaplandıktan sonra Ni-Mo-P akımsız kompozit kaplaması Ni-P kaplamasının üzerine üretildiği yaptıkları çalışmada ispat edilmiştir.

Çizelge 3.2 Ni-P/X akımsız kompozit kaplamaların banyo bileşenleri

Kompozit Kaplamalar	Nikel Kaynağı ve miktarı	Fosfit Kaynağı ve miktarı	Parçacık Tipi ve miktarı	Katkı Maddeleri	Referans
Ni-P-nanoZrO ₂	NiSO ₄ .6H ₂ O -12 g/L	NaH ₂ PO ₂ . H ₂ O- 70 g/L	nanoZrO ₂ - 13.5 g/L	C ₂ H ₃ NaO ₂ , C ₆ H ₈ O ₇ Thio-organic compound	(Pedrizzetti vd., 2023)
Ni-P-TiN	NiSO ₄ .6H ₂ O -20 g/L	NaH ₂ PO ₂ . H ₂ O- 20 g/L	TiN 0 and 8 g/L	Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ .2H ₂ O CH ₃ COOH, C ₃ H ₆ O ₃ C ₅ H ₈ NNaO ₄ , NH ₄ ReO ₄	(B. Chen vd., 2021)
Ni-P-Al ₂ O ₃	NiSO ₄ .6H ₂ O - 0,1 mol	Na ₂ H ₂ PO ₂ . H ₂ O- 0,35 mol	Al ₂ O ₃ 4, 6, 8 g/L	CuSO ₄ C ₃ H ₆ O ₃ - C ₂ H ₅ NO ₂ - C ₃ H ₆ O ₂ - Pb(CH ₃ CO ₂) ₂ · 3H ₂ O - C ₁₉ H ₄₂ BrN	(Chai & Anasyida, 2018)
Ni-P-SiC	NiSO ₄ .6H ₂ O -20 g/L	NaH ₂ PO ₂ . H ₂ O- 22 g/L	Nano-SiC 0.5, 1, 2, 4 g/L	Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ .2H ₂ O NH ₄ HF ₂ CH ₄ N ₂ S -Surfactant	(Ghavidel vd., 2020)
Ni-P-MOF	NiSO ₄ .6H ₂ O -15 g/L	NaH ₂ PO ₂ . H ₂ O- 14 g/L	MOF-0,3 g/L	CuSO ₄ .5H ₂ O CH ₄ N ₂ S CH ₃ COONa HF	(Rajabalizadeh vd., 2022)
Ni-P-SiO ₂	NiSO ₄ .6H ₂ O -24 g/L	Na ₂ H ₂ PO ₂ . H ₂ O- 27 g/L	Nano SiO ₂ 5–15 g/	C ₃ H ₆ O ₃ CH ₄ N ₂ S CH ₃ COONa	(Sadreddini & Afshar, 2014)

Ni-Mo-P	NiSO ₄ .6H ₂ O -20 g/L	Na ₂ H ₂ PO ₂ . H ₂ O- 20 g/L	Na ₂ MO ₄ .2 H ₂ O 5 g/l	Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ .2H ₂ O C ₆ H ₈ O ₇ NH ₄ Cl NaF NaSO ₄ C ₁₂ H ₂₅	(Liu vd., 2016)
Ni-P-C ₃ N ₄	NiSO ₄ .6H ₂ O -15 g/L	NaH ₂ PO ₂ - 30 g/L	C ₃ N ₄ 0.5 g/l	CH ₃ COONa NH ₄ Cl	(Fayyad vd., 2019)
Ni-P- BN(h)	NiSO ₄ .6H ₂ O -30 g/L	NaH ₂ PO ₂ -30 g/L	BN(h) particles 4 g/L	Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ .2H ₂ O - C ₃ H ₆ O ₃ - Sulphocarbamide CH ₃ COONa	(S. Li vd., 2020)

Ni-P-W akımsız kaplamaların üretimi ve özelliklerinin incelenmesi ile ilgili sınırlı sayıda çalışma yapıldığı literatür taramasında görülmüştür. Ni-P-W akımsız kaplamaların başarılı bir şekilde üretildiği Çizelge 3.3'te ki yapılan çalışmalardan görülmüştür. Ni-P akımsız kaplamalardan farklı olarak akımsız kaplama çözeltisine tungsten kaynağı olarak farklı oranlarda sodyum tungstat ilave edilmiştir.

Çizelge 3.3 Ni-P-W akımsız kaplamaların banyo bileşenleri

Kompozit Kaplamalar	Nikel Kaynağı ve miktarı	Fosfit Kaynağı ve miktarı	Tungsten kaynağı ve miktarı	Katkı Maddeleri	Referans
Ni-W-P	NiCO ₃ -10 g/L	Na ₂ H ₂ PO ₂ . H ₂ O- 20 g/L	Na ₂ WO ₄ - 12 g/L	NH ₃ ·H ₂ O HF C ₆ H ₈ O ₇	(Selvi vd., 2014)
Ni-W-P	NiSO ₄ .H ₂ O-15 g/L	Na ₂ H ₂ PO ₂ . H ₂ O- 15 g/L	Na ₂ WO ₄ 15-20 g/L	Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ .2H ₂ O C ₄ H ₆ O ₄ CH ₄ N ₂ S	(Luo vd., 2018)
Ni-W-P	NiSO ₄ .6H ₂ O - 20 g/L	Na ₂ H ₂ PO ₂ .H ₂ O- 30 g/L	Na ₂ WO ₄ - 10 g/L	Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ . 2H ₂ O C ₆ H ₈ O ₇ NH ₄ Cl (NH ₄) ₂ SO ₄	(Liu vd., 2012)
Ni-W-P	NiSO ₄ .6H ₂ O - 10-50 g/L	Na ₂ H ₂ PO ₂ .H ₂ O- 30 g/L	Na ₂ WO ₄ - 50 g/L	NH ₄ Cl NaCit/Lac	(J. Li vd., 2015)
Ni-W-P	NiSO ₄ .6H ₂ O - 20-30 g/L	Na ₂ H ₂ PO ₂ .H ₂ O- 14-20 g/L	Na ₂ WO ₄ - 15-25 g/L	Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ . 2H ₂ O C ₃ H ₆ O ₃ (NH ₄) ₂ SO ₄	(Mukhopadhyay & Sahoo, 2021)
Ni-W-P	NiSO ₄ .6H ₂ O - 20-30 g/L	Na ₂ H ₂ PO ₂ .H ₂ O- 14-20 g/L	Na ₂ WO ₄ - 50 g/L	Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ . 2H ₂ O C ₃ H ₆ O ₃ (NH ₄) ₂ SO ₄	(Roy & Sahoo, 2012)
Ni-W-P	NiSO ₄ .6H ₂ O - 15 g/L	Na ₂ H ₂ PO ₂ .H ₂ O- 20 g/L	Na ₂ WO ₄ - 10 g/L	Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ . 2H ₂ O CH ₄ N ₂ S	(X. M. Chen vd., 2008)
Ni-W-P	NiSO ₄ .6H ₂ O - 40 g/L	Na ₂ H ₂ PO ₂ .H ₂ O- 30 g/L	Na ₂ WO ₄ - 15 g/L	HF CH ₄ N ₂ S RE (CeO ₂)	(Sun vd., 2017)
Ni-W-P	NiSO ₄ .6H ₂ O - 18 g/L	Na ₂ H ₂ PO ₂ .H ₂ O- 20 g/L	Na ₂ WO ₄ - 5-50 g/L	Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ . 2H ₂ O C ₃ H ₆ O ₃ CH ₃ COONH ₄	(Cheng vd., 2016)
Ni-W-P	NiSO ₄ .6H ₂ O - 27,85 g/L	Na ₂ H ₂ PO ₂ .H ₂ O- 30 g/L	Na ₂ WO ₄ - 15 g/L	C ₆ H ₁₁ NO ₇	(Tao vd., 2013)

Aynı zamanda, akımsız kaplamalar için çözeltiye katkı maddeleri eklenir. Bu katkı maddelerinden Na₃C₆H₅O₇.2H₂O çözeltinin kaplama süresince bozulmaması için

Stabilizör/İnhibitör olarak kullanılmıştır [(Liu vd., 2016), (B. Chen vd., 2021), (Ghavidel vd., 2020), (S. Li vd., 2020)]. Altlık üzerine Ni ve P'nin tutunmasını sağlamak için kompleks yapıcı ajan olarak NH_4HF_2 , Surfactant, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$, $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$, CH_3COOH , $\text{C}_4\text{H}_4\text{Na}_2\text{O}_4$, NaF ve $\text{NaSO}_4\text{C}_{12}\text{H}_{25}$, $\text{C}_5\text{H}_8\text{NNaO}_4$ tercih edilmiştir [(Ghavidel vd., 2020), (B. Chen vd., 2021), (Chai & Anasyida, 2018), (Rajabalizadeh vd., 2022), (Liu vd., 2016), (S. Li vd., 2020)] Reaksiyon hızlandırıcı ve pH dengeleyici olarak sırasıyla CH_3COONa , NH_4Cl , $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$, $\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_2$ ve HF 'lar akımsız kaplama çözeltisine katılmaktadır [(S. Li vd., 2020), (Fayyad vd., 2019), (Pedrizzetti vd., 2023), (Rajabalizadeh vd., 2022)]. Çözeltiye katılan seramik parçacıkların kaplama süresince çözeltide askıda kalması için; nanoZrO_2 , TiN, SiC, MOF, SiO_2 , Mo, C_3N , BN(h) parçacıkları için $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Ghavidel vd., 2020), Al_2O_3 için $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ - $\text{C}_{19}\text{H}_{42}\text{BrN}$ (Chai & Anasyida, 2018) ve TiN için NH_4ReO_4 katkı maddeleri kullanılmıştır (B. Chen vd., 2021).

Ni-P alaşımlarına üçüncü element olarak Tungsten katılmak istendiğinde, Tungsten kaynağı olarak sodyum tungstat (Na_2WO_4) kullanılmıştır (Çizelge 3.3). Tungstenin sert karakterli olmasından dolayı yapılan kaplamaların korozyon, aşınma ve sertliğinde üstün performans sergilediği gözlenmiştir. Aynı zamanda, akımsız kaplamalar için çözeltiye katkı maddeleri eklenir. Bu katkı maddelerinden Amonyak ($\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), Amonyum sülfat $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, Sodyum sitrat $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ çözeltinin kaplama süresince bozulmaması için Stabilizör/İnhibitör olarak kullanılırken sitrik asit kompleks yapıcı katkı olarak kullanılmıştır [(Selvi vd., 2014), (Liu vd., 2012), (Cheng vd., 2016)]. Altlık üzerine Ni ve P'nin tutunmasını sağlamak için kompleks yapıcı ajan olarak $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$, $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$, $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$ tercih edilmiştir [(Liu vd., 2012), (X. M. Chen vd., 2008), (Cheng vd., 2016)]. Reaksiyon hızlandırıcı ve pH dengeleyici olarak sırasıyla $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_4$, NH_4Cl ve HF, H_3COONH_4 , $\text{C}_6\text{H}_{11}\text{NO}_7$ 'lar akımsız kaplama çözeltisine katılmaktadır [(Luo vd., 2018), (J. Li vd., 2015), (Sun vd., 2017), (Cheng vd., 2016), (Tao vd., 2013)].

Ni-P-W/X akımsız kaplamaların üretimi ve özelliklerinin incelenmesi ile ilgili çok az sayıda çalışma yapıldığı literatür taramasında görülmüştür. Ni-P-W/X akımsız kompozit kaplamaların başarılı bir şekilde üretildiği yapılan Çizelge 3.4'te ki çalışmalardan görülmüştür. Bu akımsız kompozit kaplamalar Ni-P-W akımsız kaplamalardan farklı bir içeriğe sahip olduğu görülmüştür. Akımsız Ni-P-W kaplama çözeltisine farklı oranlarda

mikron veya nano boyutlarda kompozit parçacıklar ilave edildiği tabloda gösterilmiştir. Üretilen bu kompozit akımsız kaplamaların Ni-P, Ni-P/X ve Ni-P-W ile karşılaştırılarak sonuçlar üzerinde değerlendirmelerde bulunulduğu görülmüştür.

Aynı zamanda, akımsız kompozit kaplamalar için çözeltiye katkı maddeleri eklenir. Bu katkı maddelerinden $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, çözeltinin kaplama süresince bozulmaması için Stabilizör/İnhibitör olarak kullanılmıştır [(Aslan & Duru, 2021), (Zhang vd., 2008), (Ranganatha vd., 2012)]. Adından anlaşılabilir gibi stabilizatörler elektrolitin stabil kalmasına yardımcı olurlar. Stabilizörlerin kullanılan miktarları çok önemlidir, genellikle çok az miktarda kullanılırlar ve çok miktarda kullanımları filmin oluşumunu gereğinden fazla yavaşlatabileceği gibi oluşmaması ile de sonuçlanabilir. Bununla beraber, altlık üzerine Ni ve P tın tutunmasını sağlamak için kompleks yapıcı ajan olarak $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$, $\text{C}_2\text{H}_3\text{NaO}_2$, $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$, NH_4HF_2 , $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$ tercih edilmiştir [(Akyol vd., 2018), (Araghi & Paydar, 2013), (H. Chen vd., 2011), (Ranganatha & Venkatesha, 2012), (Araghi & Paydar, 2013)].

Çizelge 3.4 Ni-P/W/X akımsız kompozit kaplamaların banyo bileşenleri

Kompozit Kaplamalar	Nikel Kaynağı ve miktarı	Fosfit Kaynağı ve miktarı	Tungsten kaynağı ve miktarı	Parçacık Tipi ve miktarı	Katkı Maddeleri	Referans
Ni-P-W-CNF _s	$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ - 200 g/L	$\text{Na}_2\text{H}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ -12 g/L	Na_2WO_4 - 60-100 g/L	CNFs- 50 and 100 mg/L	$\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ NH_4Cl $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$	(Akyol vd., 2018)
Ni-P-W-PTFE	$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ - 200 g/L	$\text{Na}_2\text{H}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ -4.4 g/L	Na_2WO_4 - 60 g/L	PTFE 5, 10, 20 g/L	$\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ NH_4Cl $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$	(Aslan & Duru, 2021)
Ni-W-Cr-P	$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ - 30-40 g/L	$\text{Na}_2\text{H}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ - 10-20 g/L	Na_2WO_4 - 25-30 g/L	$\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 10-15 g/L	$\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ NH_4Cl $\text{C}_2\text{H}_3\text{NaO}_2$ $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ Stability	(Zhang vd., 2008)
Ni-W-P-B ₄ C	$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ - 15 g/L	$\text{Na}_2\text{H}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ - 14 g/L	Na_2WO_4 - 10 g/L	B ₄ C 4 g/L	$\text{C}_2\text{H}_3\text{NaO}_2$ $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$ NH_4HF_2 HF	(Araghi & Paydar, 2013)
Ni-W-P-WS ₂	$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ - 0,076 mol	$\text{Na}_2\text{H}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ - 0,14 mol	Na_2WO_4 - 0.01–0.08 mol	WS ₂ 1 g/L	$\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	(Ranganatha vd., 2012)
Ni-PW/Nb ₂ O ₅	$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ - 35 g/L	$\text{Na}_2\text{H}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ - 30 g/L	Na_2WO_4 - 35 g/L	Nb ₂ O ₅ 5;10;15;20 g/L	$\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{O}_4\text{S} \cdot \text{Na}$ $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	(H. Chen vd., 2015)
Ni-W-P-MoS ₂	$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ - 20,5 g/L	$\text{Na}_2\text{H}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ - 14,84 g/L	Na_2WO_4 - 0,01-0,05 mol	MoS ₂ 1 g/L	$\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	(Ranganatha & a

						Venkatesha, 2012)
Ni-P-W-Al ₂ O ₃	NiSO ₄ .6H ₂ O-20 g/L	Na ₂ H ₂ PO ₂ .H ₂ O-20 g/L	Na ₂ WO ₄ -20 g/L	nano-Al ₂ O ₃ 0,5,10,15, 20,25 g/L	Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ . 2H ₂ O C ₁₂ H ₂₅ O ₄ S.Na CH ₄ N ₂ S (NH ₄) ₂ SO ₄	(H. Chen vd., 2011)
Ni-W-P-nSiO ₂	NiSO ₄ .6H ₂ O-30-35 g/L	Na ₂ H ₂ PO ₂ .H ₂ O-18-20 g/L	Na ₂ WO ₄ -40-50 g/L	nSiO ₂ 10 g/L	Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ . 2H ₂ O C ₁₂ H ₂₅ O ₄ S.Na CH ₄ N ₂ S C ₃ H ₆ O ₃ (NH ₄) ₂ SO ₄	(J. Hu vd., 2018)

Kompleks yapıcılar, kendiliğinden işleyen elektriksiz kaplamada indirgenmeyi ve birikimi kontrol altına almamıza yarayan maddelerdir. Metali çözünemeyen bir komplekse çevirerek çökmesini engellemeye yarar. Reaksiyon hızlandırıcı ve pH dengeleyici olarak sırasıyla NH₄Cl, NH₃.H₂O, ve HF'lar akımsız kaplama çözeltisine katılmaktadır [(Zhang vd., 2008), (Araghi & Paydar, 2013)]. Çözeltiye katılan seramik parçacıkların kaplama süresince çözeltide askıda kalması için; B₄C, WS₂, CNF_s, PTFE, MoS₂, SiO₂, Al₂O₃, Cr-P parçacıkları için Na₃C₆H₅O₇.2H₂O (Araghi & Paydar, 2013), Sodyum Lauril Sülfat (C₁₂H₂₅O₄S.Na) gibi yüzey aktif maddeler (H. Chen vd., 2015) kullanılmıştır. Yüzey aktif maddeler genel olarak elektrolitin ve elektrolit içindeki iki sıvı veya sıvı ile etkileşen katı madde arasındaki yüzey gerilimini düşürerek kaplama reaksiyonlarını artırmaktadır. (Sahoo 2011).

3.1.2. Kaplamaların İçerik Analizleri

Literatür taramasında, üretilen akımsız Ni-P kaplamaların içerik analizleri incelenmiştir. İçerik analizleri için enerji dağılımı spektrometresi (EDS) yönteminin kullanıldığı görülmektedir. Ni-P akımsız kaplamada % ağırlık olarak Ni oranı 85 ile 92 değerleri arasında değiştiği (Sundararajan vd., 2021) ve bu akımsız kaplamalarda % ağırlık olarak 8 ile 15 değerleri arasında P bulunduğu Çizelge 3.5'te gösterilmiştir. Kaplama süresinin artması P içeriğini arttırdığı görülmüştür. P içeriğinin farklılığı kaplama banyosunun karakterizasyonunu etkilemektedir (Matik & Citak, 2011).

Çizelge 3.5 Ni-P akımsız kaplamanın içerik analizi

Akımsız kaplama	Ni (%ağ.)	P (%ağ.)	Takviye parçacık içeriği (%ağ.)	Kaynaklar
Ni-P	89,03	10,97	-----	(Venkatesha & Ranganatha, 2012)
Ni-P	86,83	13,17	-----	(Arulvel vd., 2021)

Ni-P	91	9	-----	(Kundu vd., 2018)
Ni-P	95	5	-----	(Qin vd., 2011)
Ni-P	94,5-93,7	5,5-6,3	-----	(Matik & Citak, 2011)
Ni-P	89,5	10,5	-----	(B. Jiang vd., 2014)
Ni-P	90,91(1h) 91,17(2h) 90,50(3h) 89,84(4h)	9,09 8,83 9,5 10,16	-----	(Sundararajan vd., 2021)
Ni-P	91,42	8,58	-----	(Kundu vd., 2016)

Literatür taramasında gerçekleştirilen akımsız Ni-P/X kaplamaların içerik analizleri incelenmiştir. İçerik analizleri için enerji dağılımı spektrometresi (EDS) yönteminin kullanıldığı görülmektedir. Ni-P/X akımsız kaplamada % ağırlık olarak Ni oranı 55 ile 93 değerleri arasında değiştiği görülmektedir (Chai & Anasyida, 2018). Bu akımsız kaplamalarda % ağırlık olarak 4 ile 21 değerleri arasında P bulunduğu görülmüştür (Sadreddini & Afshar, 2014). P içeriğinin farklılığı kaplama banyosunun karakterizasyonunu etkilemektedir. Akımsız kaplamaya eklenen kompozit parçacıklar içeriklerde değişikliklere neden olduğu görülmüştür. Kompozit parçacıkların kaplamadaki içerik analizlerine bakıldığında, ilave edilen kompozit parçacığın türüne göre farklı oranlarda içeriklere sahip olduğu Çizelge 3.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.6 Ni-P/X akımsız kompozit kaplamanın içerik analizi

Akımsız Kompozit Kaplama	Ni (%ağ.)	P (%ağ.)	Takviye parçacık içeriği (%ağ.)	Kaynaklar
Ni-P-TiN	78,71	20,54	0,75	(B. Chen vd., 2021)
Ni-P-Al ₂ O ₃ 200rpm 250rpm 300rpm	85,03 82,25 58,24	3,76 5,21 7,74	5,92(O) 5,30(Al) 5,81(O) 6,73(Al)19,73(O) 14,29(Al)	(Chai & Anasyida, 2018)
Ni-P-1SiC	89,06	9,53	1,41	(Ghavidel vd., 2020)
Ni-P-MOF	90,54	8,51	0,70(Cu) 0,25(Al)	(Rajabalizadeh vd., 2022)
Ni-P-10SiO ₂	92,61	4,21	3,18	(Sadreddini & Afshar, 2014)
Ni-Mo-P	-----	12,1	-----	(Liu vd., 2016)
Ni-P-C ₃ N ₄	58,78	6,30	20,26(C) 14,66(N)	(Fayyad vd., 2019)
Ni-P-BN(h)	85,28	8,87	2,52(B) 3,33(N)	(S. Li vd., 2020)
Ni-P	90,03	4,91	-----	(Feng vd., 2019)

Literatür taramasında üretilen akımsız Ni-P-W kaplamaların içerik analizleri Çizelge 3.7’de incelenmiştir. İçerik analizleri için enerji dağılımı spektrometresi (EDS) yönteminin kullanıldığı görülmektedir. Ni-P-W akımsız kaplamada % ağırlık olarak Ni oranı 85 ile 95 değerleri arasında değiştiği görülmektedir (Cheng vd., 2016). Bu akımsız kaplamalarda % ağırlık olarak %3 ile 10,3 değerleri arasında P bulunduğu görülmüştür (Mukhopadhyay & Sahoo, 2021). Akımsız Ni-P kaplamasına eklenen tungstenin kaplama içeriğindeki % ağırlığı ise 0,65 ile 11,89 değerleri arasında değişmektedir (J. Li vd., 2015). Tungsten ilavesinin akımsız kaplamaya eklenmesi akımsız kaplama içeriğini değiştirdiği görülmektedir.

Çizelge 3.7 Ni-P-W akımsız kaplamanın içerik analizi

Akımsız Kaplamalar	Ni (%ağ.)	P (%ağ.)	W (%ağ.)	Kaynaklar
Ni-W-P	95	3	2	(Selvi vd., 2014)
Ni-W-P	88	6,5	5,5	(Liu vd., 2012)
Ni-W-P	88,17	5,03	6,97	(J. Li vd., 2015)
Ni-W-P	83-85	8-9	7-8	(Mukhopadhyay & Sahoo, 2021)
Ni-W-P	88	8	4	(Roy & Sahoo, 2012)
Ni-W-P	91,17	8,18	0,65	(X. M. Chen vd., 2008)
Ni-W-P	85,95-84,65	10,3-4,85	3,75-10,5	(Cheng vd., 2016)
Ni-W-P	-----	-----	11,89	(Tao vd., 2013)

Üretilen akımsız Ni-P-W/X kaplamaların içerik analizleri Çizelge 3.8’de incelenmiştir. İçerik analizleri için enerji dağılımı spektrometresi (EDS) yönteminin kullanıldığı görülmektedir. Ni-P-W/X akımsız kaplamada % ağırlık olarak Ni oranı 84 ile 91 değerleri arasında değiştiği görülmektedir (Zhang vd., 2008). Bu akımsız kaplamalarda % ağırlık olarak 2 ile 9 değerleri arasında P bulunduğu görülmüştür (Zhang vd., 2008). Tungstenin akımsız kaplama içindeki % ağırlığı ise 4 ile 6 değerleri arasında değişmektedir (Ranganatha & Venkatesha, 2012). Akımsız Ni-P-W kaplamasına katılan kompozit parçacıkların % ağırlık oranı ise 1 ile 4 arasında değişmektedir. Kompozit parçacıkların ilave edilmesi ile kaplamanın içeriğinin değiştiği görülmektedir (J. Hu vd., 2018). Çizelge 3.8’de görüldüğü gibi bazı içerik analizlerine ulaşamadığı görülmektedir.

Çizelge 3.8 Ni-P-W/X akımsız kompozit kaplamanın içerik analizi

Akımsız Kompozit Kaplamalar	Ni (%ağ.)	P (%ağ.)	W (%ağ.)	Takviye arçacık içeriği (%ağ.)	Kaynaklar
Ni-P-W-CNF _s	86,9	5,8	4,5	2,8	(Akyol vd., 2018)
Ni-W-Cr-P	87,1	5,6	4,1	3,2	(Zhang vd., 2008)
Ni-W-P-B ₄ C	-----	5,1	4,2	-----	(Araghi & Paydar, 2013)
Ni-W-P-MoS ₂	84,75	8,9	4,9	1,45	(Ranganatha & Venkatesha, 2012)
Ni-W-P-nSiO ₂	90,14	2,48	5,96	1,42	(J. Hu vd., 2018)

3.1.3. Kaplamaların Banyo Parametreleri

Literatür taramasında gerçekleştirilen Ni-P akımsız kaplamasının banyon parametreleri incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda banyo parametreleri sıcaklık, pH, kaplama süresi ve manyetik karıştırma parametreleri olduğu karşımıza çıkmaktadır. Ni-P kaplamaların altlık üzerine sağlıklı bir şekilde üretilmesinde bu parametrelerin her biri farklı bir öneme sahiptir. Ni-P akımsız kaplamaların oluşabilmesi için bu parametrelerin bir düzen içinde olması gerekmektedir. Akımsız Ni-P kaplamalarda sıcaklık 65 ile 90 dereceleri arasında olması gerekmektedir (Qin vd., 2011). Akımsız kaplamaların bir diğer önemli çözelti parametresi ise pH derecesidir. Bu parametre çözeltinin alkali veya asidik olmasını ve bundan dolayı kaplamanın karakteristik özelliklerini etkilediği literatür taramasında görülmüştür. Asidik çözelti pH'ı 4 ile 7 pH derecelerinde ve alkali(bazik) çözeltilerin ise 7 ile 11 pH derecelerinde olduğu Çizelge 3.9'da yapılan çalışmalardan görülmüştür (Rajabalizadeh vd., 2018). Bir diğer kritik parametre ise kaplama süresi olarak araştırmacıların karşısına çıkmaktadır. Akımsız kaplamalarda; kaplama yüzeyinin, kaplama kalınlığının, kaplama yapışma derecesinin ve kaplama banyosunun bozulmamasını etkileyen en kritik parametrelerinden biri de kaplama süresidir. Kaplama süresinin optimum düzeyde seçilmesi kaplamanın sağlıklı bir şekilde üretilmesini sağladığı literatür araştırmalarında karşımıza çıkmaktadır (Sundararajan vd., 2021).

Çizelge 3.9 Ni-P Akımsız kaplamaların banyo parametreleri

Akımsız Kaplamalar	Sıcaklık (°C)	pH	Kaplama Süresi (dk)	Manyetik Karıştırma (rpm)	Kaynak
Ni-P	85 ± 5	4,5	120	300-350	(Venkatesha & Ranganatha, 2012)
Ni-P	85	7	60	-----	(Arulvel vd., 2021)
Ni-P	80	4,5	240	-----	(Kundu vd., 2018)
Ni-P	80	6,5-7	1,5-60	-----	(Qin vd., 2011)
Ni-P	85	9	300	-----	(Matik & Cıtak, 2011)
Ni-P	85-90	5 ± 0,1	60	-----	(B. Jiang vd., 2014)
Ni-P	65	6,4	180	-----	(Rajabalizadeh vd., 2018)
Ni-P	85	4-4,5	60-120-180-240	200	(Sundararajan vd., 2021)
Ni-P	80	4,5	240	-----	(Kundu vd., 2016)
Ni-P	87 ± 3	4-5	180	-----	(Karthikeyan & Vijayaraghavan, 2016)

Akımsız kaplamaların üretilmesinde kritik değere sahip parametrelere ek olarak manyetik karıştırma ve ultrasonik karıştırma parametreleri de önem kazanmaktadır. Kompozit parçacıklarının aglomere olmaması için kaplama işleminden önce belli bir süre ultrasonik karıştırma yöntemi ile karıştırılması önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır (Sadreddini & Afshar, 2014). Ultrasonik karıştırmanın yapılmaması kaplamanın sağlıklı bir şekilde kaplanmamasına neden olduğu yapılan çalışmalarda karşımıza çıkmaktadır. Ultrasonik karıştırmadan sonra kaplama işleminde manyetik karıştırmanın da kaplamanın sağlıklı bir şekilde oluşması için kritik bir öneme sahip olduğu araştırmalar sonucunda karşımıza çıkmaktadır (Fayyad vd., 2019). Kaplamanın en ideal bir şekilde gerçekleşebilmesi için bu parametrelerin çözeltinin içeriğine göre optimum şekilde seçilmesi önem arz ettiği Çizelge 3.10’da yapılan çalışmalardan elde edilmektedir.

Çizelge 3.10 Ni-P/X kompozit kaplama banyo parametreler

Akımsız Kompozit Kaplamalar	Sıcaklık (°C)	pH	Kaplama Süresi (dk)	Manyetik Karıştırma (rpm)	Ultrasonik Karıştırma (dk)	Referans
Ni-P-TiN	83 ± 2	4,6-4,8	120	100-300	30	(B. Chen vd., 2021)
Ni-P-Al ₂ O ₃	89	-----	-----	200-250-300	-----	(Chai & Anasyida, 2018)
Ni-P-SiC	75	7	60	-----	30	(Ghavidel vd., 2020)

Ni-P-MOF	65	6,4	180	-----	15	(Rajabalizadeh vd., 2022)
Ni-P-SiO ₂	90 ± 1	4,6 ± 1	90	300	40-120	(Sadreddini & Afshar, 2014)
Ni-Mo-P	90 ± 1	-----	1	-----	-----	(Liu vd., 2016)
Ni-P-C ₃ N ₄	85 ± 1	4,5 ± 1	120	300	60	(Fayyad vd., 2019)
Ni-P-BN(h)	88	4,8	120	150	15	(S. Li vd., 2020)
Ni-P	80 ± 2	9-11	-----	-----	-----	(Feng vd., 2019)

Literatür taramasında gerçekleştirilen Ni-P-W akımsız kaplamasının banyon parametreleri incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda banyo parametreleri sıcaklık, pH, kaplama süresi ve manyetik karıştırma parametreleri olduğu karşımıza çıkmaktadır. Ni-P-W kaplamaların altlık üzerine sağlıklı bir şekilde üretilmesinde bu parametrelerin her biri farklı bir öneme sahiptir. Ni-P akımsız kaplamaların oluşabilmesi için bu parametrelerin bir düzen içinde olması gerekmektedir. Akımsız Ni-P kaplamalarda sıcaklık 65 ile 90 dereceleri arasında olması gerekmektedir (Luo vd., 2018). Akımsız kaplamaların bir diğer önemli çözelti parametresi ise pH derecesidir. Bu parametre çözeltinin alkali veya asidik olmasını ve bundan dolayı kaplamanın karakteristik özelliklerini etkilediği literatür taramasında görülmüştür. Asidik çözelti pH'ı 4 ile 7 derecelerinde ve alkali(bazik) çözeltilerin ise 7 ile 11 pH derecelerinde olduğu Çizelge 3.11'de ki çalışmalardan görülmüştür (Sun vd., 2017). Bir diğer kritik parametre ise kaplama süresi olarak araştırmacıların karşısına çıkmaktadır. Akımsız kaplamalarda; kaplama yüzeyinin, kaplama kalınlığının, kaplama yapışma derecesinin ve kaplama banyosunun bozulmamasını etkileyen en kritik parametrelerinden biri de kaplama süresidir. Kaplama süresinin optimum düzeyde seçilmesi kaplamanın sağlıklı bir şekilde üretilmesini sağladığı literatür araştırmalarında karşımıza çıkmaktadır (Roy & Sahoo, 2012). Akımsız kaplama banyosunun zaman ayarlaması, banyonun stabilitesine çok bağlıdır. Daha uzun bir kaplama süresi, banyo stabil olduğu sürece metalin birikmesinde bir artışa neden olur [Yin X, Hong L, Chen B, Ko TM (2003) J Colloid Interf Sci Elsevier Sci 262(1):89].

Çizelge 3.11 Ni-P-W kaplama banyo parametreler

Akımsız Kaplamalar	Sıcaklık (°C)	pH	Kaplama Süresi (dk)	Referans
Ni-P	80-82	7,1	45	(Selvi vd., 2014)
Ni-W-P	82 ± 2	7	75	
Ni-W-P	80 ± 1	7,5-8	80	(Luo vd., 2018)
Ni-P-ZrO ₂	85 ± 1	5-5,5	60	
Ni-W-P	92 ± 1	9,3	120	(Liu vd., 2012)
Ni-W-P	90 ± 2	9,0	60	(J. Li vd., 2015)
Ni-W-P	90 ± 2	7-8	180	(Mukhopadhyay & Sahoo, 2021)
Ni-W-P	90 ± 2	7-8	180	(Roy & Sahoo, 2012)
Ni-P	82 ± 2	6,4	40	(X. M. Chen vd., 2008)
Ni-W-P	87 ± 2	5	240	
Ni-W-P	75 ± 2	7,5	60	(Sun vd., 2017)
Ni-W-P	90 ± 2	7,8-8,2	60	(Cheng vd., 2016)
Ni-P / Ni-W-P/1 /Ni-W-P/2	45/ 75 / 75	8,5	-----	(Tao vd., 2013)

Akımsız kompozit kaplamaların üretilmesinde alaşım kaplamaları için geçerli olan parametrelerin burada da geçerli olmasının yanısıra, kritik değere sahip parametrelere ek olarak manyetik karıştırma ve ultrasonik karıştırma parametreleri de önem kazanmaktadır (Ranganatha vd., 2012). Kompozit parçacıklarının aglomere olmaması için kaplama işleminden önce belli bir süre ultrasonik karıştırma yöntemi ile karıştırılması önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Ultrasonik karıştırmanın yapılmaması kaplamanın sağlıklı bir şekilde kaplanmamasına neden olduğu Çizelge 3.12’de ki yapılan çalışmalarda gösterilmektedir (J. Hu vd., 2018). Ultrasonik karıştırmadan sonra kaplama işleminde manyetik karıştırmanın da kaplamanın sağlıklı bir şekilde oluşması için kritik bir öneme sahip olduğu araştırmalar sonucunda karşımıza çıkmaktadır. Kaplamanın en ideal bir şekilde gerçekleşebilmesi için bu parametrelerin çözeltinin içeriğine göre optimum şekilde seçilmesi önem arz ettiği görülmektedir.(Ulu vd., 2018).

Çizelge 3.12 Ni-P-W/X akımsız kompozit kaplamaların banyo parametreleri

Akımsız Kompozit Kaplamalar	Sıcaklık (°C)	pH	Kaplama Süresi (dk)	Manyetik Karıştırma (rpm)	Ultrasonik Karıştırma (dk)	Referans
Ni-P-W-CNF _s	90	8-9	60	-----	-----	(Akyol vd., 2018)
Ni-P-W-PTFE	90	8,5	60	300	-----	(Aslan & Duru, 2021)
Ni-P-B-W-TiO ₂	85	5-6	60	300	30	(Ulu vd., 2018)
Ni-W-Cr-P	90-95	4-6-9,2	-----	-----	-----	(Zhang vd., 2008)
Ni-W-P-B ₄ C	82	9	180	-----	-----	(Araghi & Paydar, 2013)
Ni-W-P-WS ₂	80	8	60	500	720	(Ranganatha vd., 2012)
Ni-P-W/Nb ₂ O ₅	85	9	120	150	-----	(H. Chen vd., 2015)
Ni-W-P-MoS ₂	80	8	60	500	720	(Ranganatha & Venkatesha, 2012)
Ni-P-W-Al ₂ O ₃	85	9	60	-----	-----	(H. Chen vd., 2011)
Ni-W-P-nSiO ₂	85 ± 2 °C	9	30-90	-----	15	(J. Hu vd., 2018)

3.1.4. Kaplamaların Üretiminde Kullanılan Altlıklar

Ni-P ve Ni-P/W alaşım esaslı akımsız kompozit kaplamalarda farklı türden kaplama altlıkları kullanılmaktadır. Literatür taramasında kullanılan altlıklar gözlemlendiğinde; yumuşak çelik altlık kullanıldığı (Arulvel vd. 2021; Cheng vd. 2016; Kundu vd. 2016, 2018; Li vd. 2015, 2020; Liu vd. 2012, 2016; Ranganatha ve Venkatesha 2012; Ranganatha vd. 2012; Roy ve Sahoo 2012; Venkatesha ve Ranganatha 2012). AZ31 Mg Alaşımı (Ghavidel vd. 2020; Qin vd. 2011), AISI 1020 düşük karbonlu çelik (Karthikeyan & Vijayaraghavan, 2016; Matik & Citak, 2011), Bakır-Nikel alaşımı CuNi 90/10 (B. Jiang vd., 2014), AM60B magnezyum alaşımı (Rajabalizadeh vd., 2018, 2022), Al5052 alüminyum (Sundararajan vd., 2021), Karbon çelik levhalar (Faraji vd., 2011; Zhang vd., 2008), TL084 boyutunda alınan bakır alaşım (B. Chen vd., 2021), Al 6061 alüminyum (Chai & Anasyida, 2018), Alüminyum 7075-T6 (Sadreddini & Afshar, 2014), API X100 karbon çeliği (Fayyad vd., 2019), ZK61M magnezyum alaşımı (Feng vd., 2019), AZ31B magnezyum alaşımı (Selvi vd., 2014), L80

karbon çeliği (Luo vd., 2018), Fe-600 kalite çelik (Mukhopadhyay & Sahoo, 2021), AZ91D magnezyum alaşımı (Araghi & Paydar, 2013; X. M. Chen vd., 2008; Sun vd., 2017), P-Tipi Si (100) plakalar (Tao vd., 2013), Alüminyum (Akyol vd., 2018), St 37 çeliği (Aslan & Duru, 2021), 6xxx serisi alüminyum (Ulu vd., 2018), NdFeB kalıcı mıknatıs numuneleri (H. Chen vd., 2011, 2015) ve L245 karbon çeliği (J. Hu vd., 2018) gibi farklı altlıklar kullanıldığı görülmüştür.

3.1.5. Temizlik ve Katalitik Aktivasyon Oluşturma Aşaması

Akımsız kaplamanın en kritik işlemi olarak altlık temizleme aşaması literatür taramasında karşımıza çıkmaktadır. Akımsız kaplama metodunda farklı altlıklar kullanıldığı karşımıza çıkmaktadır. Her altlık türünün akımsız kaplama çözeltisine batırılmadan önce temizlenme ve katalitik aktive etme aşaması farklılık göstermektedir. Alüminyum altlık kullanımında temizleme ve katalitik aktivasyon için; (Sundararajan vd., 2021) 'de yaptıkları çalışmada akımsız kaplamayı gerçekleştirmeden önce altlık hazırlama çalışmalarında, belli bir kademeye kadar altlığı zımparaladıkları görülmüştür. Daha sonra temizlik aşamasında aseton ve etanol kullanılarak temizleme işlemi bitirilmiştir. Parlatma işleminde ise nitrik asit ve sülfirik asit kullanılmıştır. Katalitik aktive bölge oluşturmak için zinkat çözeltisine altlık belli bir süre ve sıcaklıkta batırılmıştır, asidik bir yıkamadan sonra tekrar zinkat çözeltisine batırılıp temizleme ve katalitik aktive etme bitirildiği gözlenmiştir.

Çelik altlık kullanımında temizleme ve katalitik aktivasyon için; (Venkatesha & Ranganatha, 2012)'de yaptıkları araştırmada akımsız kaplamayı gerçekleştirmeden önce altlık hazırlama kademesinde; çelik altlığı 2000 ve 4000 SiC zımpara kâğıdı kullanarak parlatmışlardır. Temizlik aşamasında trikloretilen kullanılarak kaplama yağdan ve kirden arındırılmıştır. Katalitik aktivasyon için HCl çözeltisine batırılıp distile edilmiş su ile yıkandıktan sonra akımsız kaplama banyosunda çelik altlığın kaplanması gerçekleştirdikleri görülmüştür.

Magnezyum altlık kullanımında temizleme ve katalitik aktivasyon yüzeyi oluşturmak için; (Qin vd., 2011)'de yaptıkları çalışmada akımsız kaplamayı üretmeden önce altlık hazırlama kademesinde; magnezyum altlığı belli bir zımparalama işleminde tabi tutulduğu görülmüştür. Yağ giderme ve temizleme işleminde etanol kullanılmış ve alkali yıkama çözeltisinde yıkama işlemi tamamlanmıştır. Katalitik aktivasyon işlemi için belli bir oranda

saf suya katılan HF ile katalitik aktivasyonu tamamlanıp distile edilmiş su ile yıkandıktan sonra magnezyum altlık akımsız kaplamaya hazır hale geldiği görülmüştür.

Bakır-Nikel alaşımı CuNi 90/10 altlık kullanımında temizleme ve katalitik aktivasyon yüzeyi oluşturmak için; (B. Jiang vd., 2014)'de akımsız kaplama üzerine olan çalışmalarında alaşım altlık malzemesini belli bir çalışma ile akımsız kaplama yapmaya hazır hale getirdikleri görülmüştür. Yapılan altlık temizlemesinde; alaşım altlık yüzeyi belli bir zımpara derecesine kadar zımparalanıp aseton ile temizlenip distile edilmiş su ile yıkanmıştır. Soyum hidroksit (NaOH) ile yağı giderilip, sülfirik asit (H_2SO_4) çözeltisine batırılıp oksit tabakası giderilmiştir. Son aşamada ise alaşım altlık 1 dakika akımsız kaplamasına batırılarak ve 20 saniye demir çubuklar ile temas ettirilerek katalitik aktivasyonu sağlanmış olup akımsız kaplamaya hazır hale getirildiği gözlenmiştir.

P-Tipi Si (100) plakaların altlık kullanımında temizleme ve katalitik aktivasyon oluşturmak için; (Tao vd., 2013)'de akımsız kaplama üzerine yaptığı çalışmada altlık malzemenin hazırlanması prosedürleri incelenmiştir. Yaptıkları altlık malzeme hazırlığında; altlık malzeme belli bir değer kadar zımparalanmıştır. Temizlik aşamasında ilk önce RCA solüsyonunda yıkanmıştır. Katalitik aktive için Pd solüsyonu kullanılarak aktifleştirme işlemi tamamlanarak distile edilmiş su ile yıkanarak akımsız kaplama banyosuna hazır hale getirildiği gözlemlenmiştir.

NdFeB (Neodyum) kalıcı mıknatıs numuneleri altlık olarak kullanımında temizleme ve katalitik aktivasyon oluşturmak için; (H. Chen vd., 2011)'de yaptıkları akımsız kaplama çalışmalarında altlık hazırlama kademelerini gerçekleştirdikleri gözlenmiştir. Bu kademeler sıralandığında; altlık numuneler zımpara işlemine tabi tutulduktan sonra 5 dakika alkali çözeltisinde ultrasonik bir temizleme yapıldıktan sonra altlık malzemeyi katalitik aktifleştirmek için belli oranlarda $C_7H_6O_6S \cdot 2H_2O$ ve NH_4HF karıştırılarak oda sıcaklığında oluşan çözeltiye altlık malzeme belli bir süre daldırılıp çıkarılıp distile edilmiş su ile yıkanarak akımsız kaplamaya hazır hale getirildiği gözlenmiştir.

3.2. Ni-P ve Ni-P-W Alaşım ve Ni-P/X ve Ni-P-W/X Kompozit Kaplamaların Özellikleri

3.2.1. Kristal Yapı, Yüzey ve Kesit Morfolojisi

Ni-P akımsız kaplamalarda kaplamanın kristal özelliklerini etkileyen en önemli parametre fosfat oranıdır. Yüksek P içeriğine sahip akımsız Ni-P kaplamalar homojen ve amorf yüzey yapısına sahiptir (Venkatesha & Ranganatha, 2012). Kristal boyutu ve akımsız kaplamadaki morfolojiyi etkileyen bir diğer parametre ise sıcaklık parametresidir. Üretilen numuneler 400 °C’de ısıtıldıktan sonra hava ve su ile soğutma işleminde görülmüştür ki su ile soğutmada nodüler boyutta nikelin difüzyonu hava ile soğutmadan daha düşüktür. 400 °C deki ısıtma işlemde faz dönüşümü meydana gelmiştir. Isıl işlemde sıcaklık artışı morfolojik değişikliklere neden olmuştur. Isıl işlem ayrıca kristalit büyümesine neden olmuştur. AQ (havada soğutma) Ni-P kristalit boyutu WQ (suda soğutma) Ni-P tortularına kıyasla daha yüksek bulundu (Arulvel vd., 2021).

Ni-P akımsız kompozit kaplamalarda, kaplamaya eklenen nanoparçacıkların kaplamaların morfolojisi üzerinde etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar gösteriyor ki, tüm kaplamalar amorf mikro yapı karakteristiği sergilemektedir. Ni-P kaplamaya TiN nanoparçacıkların ilavesi, mikro yapıları ve faz dönüşümünü çok az etkiler. Re ilavesi ise kristalleşme sıcaklığında dikkate değer bir artışa neden olur (Chen vd. 2021). Ni-P ve Ni-P-MOF akımsız kaplamalarda karnabahar benzeri yapıya sahip tekdüze bir dağılıma nodüller gözlenmiştir. Akımsız kaplamaya MOF ilavesi kaplamanın fosfor içeriğini arttırarak düşük kristalliğe yol açtığı gözlenmiştir. Akımsız kaplamaya MOF eklenmesi plastik deformasyona karşı bariyer etkisi yaparak dislokasyon hareketini engellediği tespit edilmiştir (Rajabalizadeh vd. 2022).

Ni-P-W akımsız kaplamaların kristallliği ve yüzey morfolojileri değerlendirilmiştir, yapılan çalışmalarda tespit edilmiştir ki, X-ışınının (EDX) analiz sonucunda Ni-P kaplamadaki fosfor içeriği ağırlıkça %6’dır ve Ni-W-P için ağırlıkça %3’e düşürüldüğü görülmüştür. Alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (FESEM) bu dubleks kaplamaların yüzeylerinin incelenmesinde kaplamaların nodüler morfoloji sergilediği tespit edilmiştir. Ayrıca Ni-P/Ni-W-P kaplama daha az küresel, yoğun ve pürüzsüz bir görünüm sergilemiştir (Selvi vd. 2014).

Ni-P-W akımsız kaplamalarına lazer ve fırın tavlama yapılmıştır. Her iki ısıtma işlemi operasyonunda, 200 ile 700 °C 'de fırın tavlama sırasında tamamlanmamış kristalizasyon oluşturduğu tespit edilmiştir (Liu vd. 2012). NaCit/Lac çalışmada belirlenen oran ve 30-40 g/L NiSO₄ konsantrasyonundaki banyo W ve Ni birikimini hızlandırırken, P birikimini yavaşlattığı tespit edilmiştir. Bu kaplama oranında homojen nodüler morfolojiye sahip kristal kaplamanın oluşmasını desteklediği görülmüş. Ayrıca kristal yapı, nodüler morfoloji ve kaplamanın yapışması da her iki faktöre bağlıdır (J. Li vd., 2015). Taguchi tabanlı girişimsel yöntem kullanılarak banyonun bileşimi farklılaştırılmıştır. Optimum çözelti şartları ise; 30 g/L Nikel sülfat konsantrasyonu, 17g/L sodyum hipofosfit konsantrasyonu ve 20g/L sodyum tungstat konsantrasyonu olarak gözlenmiştir. Optimum çözelti şartlarında; Ni-W-P kaplamaların SEM mikrografi testleri sonucunda karnabahar benzeri bir yüzey morfolojisi ortaya çıkardı (Mukhopadhyay & Sahoo, 2021).

Ni-P-W-X akımsız kompozit kaplamaların kristallliği ve yüzey morfolojileri değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler sonucunda; Ni-W-P/Ni-P nano-ZrO₂ dubleks kaplamalar şekilsizdi, ısıtma işleminden sonra ortaya çıkan nikel borürler nedeniyle kristalle olmuşlardır (Luo vd., 2018). Ni-P-W-CNF_s kompozit birikimleri, taramalı elektron mikroskobu, X-Ray kullanılarak karakterize edildi. Kaplamada 60g/L'den 100g/L'ye kadar artan sodyum tungstat miktarları, uygulanan katmanlarda W içeriğinin artmasına ve P içeriğinin azalmasına neden olduğu görülmüştür (Akyol vd., 2018).

PTFE ilavesinin 10g/L olduğu kompozit kaplamada, PTFE tozları matris içerisinde homojen dağılmıştır. Kaplamalar bu açıdan değerlendirildiğinde en iyi sonuç 10g/L PTFE ilavesinde tespit edilmiştir (Aslan & Duru, 2021). Ni-W-Cr-P kompozit alaşımlı kaplamalar üretilmiştir. Bu alaşımlı kaplamaların kristal yapısı tavlama sıcaklığının artması ile değiştiği tespit edilmiştir. Biriktirilmiş Ni-W-Cr-P alaşımlı kaplamalar amorf yapıya sahip, kademeli ısıtma işlemle birlikte 300 °C de kristalleşmeye başlar; 600 °C'de Ni₃P fazı tamamen oluşur, 500 °C'de Ni₁₇-W₃ ve Cr-Fe fazları oluşmuştur; 700 °C'de Ni₃P fazı tamamen Ni'ye ayrışır (Zhang vd., 2008). XRD analiz sonuçlarına bakıldığında Ni-W-P-B₄C kompozit kaplamanın amorf ve nanokristal yapılar oluşturduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Ni-W-P-B₄C kompozit kaplamanın ortalama kristalit boyutu 1,5nm olduğu görülmüştür (Araghi & Paydar, 2013).

3.2.2. Sertlik Davranışları

Ni-P akımsız kaplamaların sertliği değerlendirilmiştir. Akımsız kaplama üzerindeki sertlik çalışmalarında; Isı işlem gören akımsız kaplamaların WQ (su ile soğutma) Ni-P kaplamaların sertliği AQ (hava ile soğutma) Ni-P kaplamaların sertliğinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Maksimum sertlik ise 400 °C de suda soğutma sonucunda ortaya çıktığı görülmüştür (Arulvel vd., 2021). Düşük fosfor oranına sahip akımsız kaplamalarda ise yapılan sertlik ölçümlerinde Ni-P alaşımlı akımsız kaplamanın sertliği ortalama 680 HV_{0,1} değerinde tespit edilirken AISI 1020 çeliğinde ortalama 261 HV_{0,1} sertlik değeri tespit edilmiştir (Matik & Citak, 2011).

Ni-P ile karşılaştırıldığında hem Ni-P-TiN hem de Ni-P-TiN-Re kaplamalar daha yüksek mikro sertlik sergiledikleri görülmüştür (B. Chen vd., 2021). Ni-P akımsız ana bileşimine Al₂O₃ parçacıklarının ilavesi kaplamanın sertliğini iyileştirdi. Ni-P/Al₂O₃ kompozit kaplamanın en yüksek sertliği, 8g/l alümina içeren 95 HV idi (Chai & Anasyida, 2018). Ni-P kaplama çözeltisinde 1g/L nano-SiC'in yüksek sertliğe (795 HV) sahip tek tip Ni-P akımsız kaplama olduğu gözlenmiştir (Ghavidel vd., 2020). Ni-P-MOF akımsız kompozit kaplamada 200 °C ısıtma işlemi mikrosertlikte küçük bir etkiye sahipken, 400 °C'deki ısıtma işlemi mikrosertlikte önemli ölçüde artışın gerçekleştiği görülmüştür (Rajabalizadeh vd., 2022).

Ni-P-W akımsız kaplamaların sertlikleri araştırılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda; Ni-W-P'nin mikrosertliğinin büyüklüğü kaplamada esas olarak çökeltilmiş Ni₃P'nin boyutuna bağlıdır. Lazer ve fırın tavlama karşılaştırıldığında, lazer tavlamanın sonunda oluşan kaplamanın mikrosertliği fırın tavlama ile karşılaştırıldığında daha yüksek olduğu görülmüştür (Liu vd., 2012). Belli bir orandaki NaCit/Lac ve 30-40 g/L NiSO₄ konsantrasyonundaki banyo bu kaplama oranında yüksek mikrosertlik elde edilmesini desteklediği görülmüş, yaklaşık olarak 734-755 HV_{0.02} ve 36-38 N sonuçları elde edilmiştir. Ayrıca mikrosertlik her iki faktöre bağlı olarak değiştiği görülmüştür (J. Li vd., 2015).

Ni-P-W/X akımsız kompozit kaplamaların sertlikleri araştırılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda; Ni-P-W-CNF_s akımsız kompozit kaplama banyosunda 100g/L Na₂WO₄ ve 0,2g/L CNF içeren Ni-P-W-CNF_s akımsız kaplamada parametreleri en iyi olarak

belirlenmiştir. Bu parametrelerde oluşan Ni-P-W (W_3) alaşımları biriktirme işlemi diğerlerine göre daha yüksek mikrosertlik sergilemiştir (Akyol vd., 2018). Ni-W-P/PTFE Kompozit kaplamalar için PTFE konsantrasyonu sırası ile 5, 10 ve 20 g/L olarak belirlemişlerdir. Farklı PTFE ilaveleri ile üretilen kompozit kaplamaların ortalama mikrosertlik değerleri sırasıyla 513HV, 494HV, 392HV olarak ölçülmüştür (Aslan & Duru, 2021). Ni-P-B-W-TiO₂ çok alaşımlı kaplamaları farklı TiO₂ ilavesinde (10, 15, 20 g/L) oluşturulmuştur. Ayrıca ısıtma işlemi (400 °C, 2h) tabii tutulan kompozit kaplamaların mikrosertlikleri araştırılmıştır. Isıtma işleminden önceki mikrosertlikte ise TiO₂ ilavesinin 20g/L olması en yüksek mikrosertliğe sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca ısıtma işleminden sonra tespit edilen en yüksek mikrosertlik ise TiO₂'nin 20 g/L olduğu kompozit kaplamada olduğu görülmüştür (Ulu vd., 2018).

3.2.3. Korozyon Davranışları

Ni-P akımsız kaplamaların korozyon dirençleri araştırılmıştır. Araştırmaların sonucunda; Yüksek oranda fosfor bulunduran çözeltiden elde edilen Ni-P akımsız kaplamanın korozyon direnci, düşük oranda fosfor bulunduran çözeltiden elde edilen Ni-P akımsız kaplamadan daha yüksek olduğu görülmüştür (Venkatesha & Ranganatha, 2012).

Ni-P-SiC akımsız kaplamalar üretilmiştir. 300 °C'de ısıtma işlemi görmüş Ni-P kaplamalar diğer ısıtma işlem sıcaklıklarına göre korozyon direncinde daha iyi performans göstermiştir. Sonuç olarak, 300 °C sıcaklık optimum sıcaklık olarak seçilmiştir. Sonuçlar ayrıca kaplama çözeltisinde 1g/L nano-SiC'in yüksek korozyon direncine sahip tek tip Ni-P akımsız kaplama olduğu gözlemlenmiştir. Daha fazla partikül eklenmesi çözeltide aglomerasyona neden olmuştur ve kaplamanın özelliklerinde olumlu bir etki olmamıştır. En yüksek korozyon direnci, 300 °C'de tavlama işlemi görmüş Ni-P/1SiC çözelti ile oluşan kaplamaya ait olduğu gözlemlenmiştir (Ghavidel vd., 2020). Ni-P ana yapı akımsız kaplamaya MOF parçacıklarının ilave edilmesi korozyon direncini iyileştirmiştir (Rajabalizadeh vd., 2022).

Ni-P-W akımsız kaplamaların korozyon dirençleri araştırılmıştır. Araştırmaları değerlendirdiğimizde; Dumblex akımsız kaplamalar daha düşük korozyon akımı yoğunluğu ve daha yüksek polarizasyon gösterdiği tespit edilmiştir, bundan dolayıdır ki Ni-P/Ni-W-P dubleks akımsız kaplama yapıları gelişmiş bir korozyon direnci sağladığı görülmüştür (Selvi

vd., 2014). Akımsız kaplamada farklı NaCit/Lac oranlarında ve NiSO₄ konsantrasyonlarında çeşitli elektrokimyasal ve tribolojik davranışlar sergilediği tespit edilmiştir. Bundan dolayı kaplamanın en küçük korozyon akım yoğunluğu, en büyük olandan üç kat daha düşük olduğu gözlenmiştir(J. Li vd., 2015). Kaplanmış inşaat demirlerinin gelişmiş korozyon direncini elde etmek için farklı çözelti şatları oluşturuldu, optimum çözelti şatları ise; 30 g/L nikel sülfat konsantrasyonu, 17g/L sodyum hipofosfit konsantrasyonu ve 20g/L sodyum tungstat konsantrasyonu olarak gözlenmiştir. Optimum çözelti şartlarında; yüksek korozyon potansiyel (-258mV) ve düşük korozyon akım yoğunluğu (0,065 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$), çıplak demir ile karşılaştırıldığında elde edilir (-653mV, 11,7 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$). Ni-W-P (optimum çözelti şartları) ise korozyon direncinin geliştiği tespit edildi (Mukhopadhyay & Sahoo, 2021).

Ni-P-W/X akımsız kompozit kaplamaların korozyon dirençleri araştırılmıştır. Araştırmaları değerlendirdiğimizde; Ni-P-W-CNF_s kompozit birikimlerinde en iyi korozyon direncinin biriktirme banyosunda 100g/L Na₂WO₄ ve 0,2g/L CNF içeren Ni-P-W-CNF_s akımsız kaplamada tespit edildiği görülmüştür. Ni-P-W-CNF (CW₂) kompozit kaplamalar diğer kaplamalar ile kıyasla göstermiştir ki %3,5 NaCl çözeltisinde iyi bir korozyon direncine sahip olduğu görülmüştür(Akyol vd., 2018). Ni-W-Cr-P alaşım kaplamanın korozyon direnci ısıtılma işlemi bağli olarak değişmektedir, en yüksek korozyon direnci 800 °C ısıtılma işlemi uygulanan kaplamada görülmüştür (Zhang vd., 2008). Ni-P ve Ni-W-P-B₄C karşılaştırıldığında Ni-W-P-B₄C kaplamanın korozyon direnci daha yüksek olduğu görülmüştür (Araghi & Paydar, 2013).

3.2.4. Aşınma Davranışları

Ni-P akımsız kaplamaların aşınma davranışı araştırılmıştır. Araştırmalar sonucunda elde edilen değerler göstermiştir ki; Aşınmanın, test sıcaklığına bağli olarak hem yapışkan hem de aşındırıcı mekanizmalardan oluştuğu bulunmuştur (Kundu vd., 2018). Yapılan başka bir çalışmada; Aşınma deneyleri sonucunda kaplanmış ve kaplanmamış numunelerdeki aşınma miktarlarının aşınma yükünün artışına bağli olarak arttığı ve en yüksek aşınma miktarının kaplanmamış numunelerde meydana geldiği görülmüştür. Sürtünme sırasında ölçülen kuvvet değerleri karşılaştırıldığında ise 20 N yük altında değerler birbirlerine çok yakinken

40 ve 60 N yük altında gerçekleştirilen ölçümlerde sürtünme kuvvetindeki yükseliş kaplanmış numunelerde daha yüksek değerlerde görülmüştür (Matik & Citak, 2011).

Yapılan Ni-P-TiN ve Ni-P-TiN-Re akımsız kaplamaların aşınma incelemesinde, kaplamalar daha yüksek aşınma direnci sergiler (B. Chen vd., 2021). Gerçekleştirilen Ni-P/Al₂O₃ kompozit kaplama incelendiğinde, Ni-P/Al₂O₃ kompozit kaplamanın aşınma oranı, Ni-P akımsız kaplamaya göre daha düşüktü (Chai & Anasyida, 2018). Ni-P/SiC kaplaması aşınma özellikleri araştırılmıştır, optimum kaplanmış kompozit kaplama (Ni-P/1SiC), belirli oranda en iyi aşınma direncinin olduğu gözlenmiştir (Ghavidel vd., 2020). Ni-P ve Ni-P-MOF akımsız kaplamalar aşınma davranışları değerlendirilmiştir. Akımsız kaplamaya ilave edilen MOF mikrosertliğindeki artıştan oluşan gelişme nedeniyle ısıtılma işleminden önce ve sonra aşınma oranını azalttı (Rajabalizadeh vd., 2022).

Ni-P-W akımsız kaplamaların aşınma davranışı araştırılmıştır. Ni-P-W ana yapılı akımsız kaplamasına eklenen NaCit/Lac oranları ve NiSO₄ konsantrasyonları çeşitli elektrokimyasal ve tribolojik davranışlar sergilediği tespit edilmiştir, sürtünme katsayısı kaplamada 0,21-0,81 aralığında değişir, buna karşılık gelen 0,18-0,66mg/dk'lık aşınma kaybı oranları incelemeler sonucunda tespit edilmiştir (J. Li vd., 2015).

Ni-P-W akımsız kaplamaların aşınma davranışı eklenen kompozit malzemeye göre araştırılmıştır. Ni-P-W-CNF_s kompozit birikimleri aşınma davranışları incelenmiştir. En iyi aşınma ve korozyon direncinin biriktirme banyosunda 100g/L Na₂WO₄ ve 0,2g/L CNF içeren Ni-P-W-CNF_s akımsız kaplamada tespit edildiği görülmüştür. Ni-P-W alaşımlarının aşınma oranı ve sürtünme katsayısı, W içeriğinin artmasıyla önemli ölçüde azalma göstermiştir. CNF'lerin eklenmesi değişime neden olmuştur, karşılaştırıldığında daha yüksek aşınma direnci ve daha düşük sürtünme katsayısı Ni-P-W-CNF_s alaşım birikimi ile gerçekleşmiştir (Akyol vd., 2018). Farklı PTFE ilaveleri ile üretilen kompozit kaplamaların, yapılan aşınma incelemeleri sonucunda en düşük sürtünme katsayısı 0,232μ ile PTFE konsantrasyonun 10g/L olduğu kompozit kaplamada görülmüştür. PTFE ilavesinin 20g/L'ye çıkarılmasıyla ortalama sürtünme katsayısında yaklaşık %60 oranında bir artışla sürtünme katsayısı 0,375μ olduğu görülmüştür (Aslan & Duru, 2021).

3.3. Takviye Fazı Olarak h-BN Parçacık Kullanılan Akımsız Kaplanmış Kompozit Kaplamalar

Akımsız kaplamalara katılan h-BN parçacıklarının kaplamalar üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda; Ni-P/h-BN akımsız kompozit kaplaması üretilmiştir. Kaplama banyosuna CTAB katılmıştır. Katılan CTAB, kompozit kaplamaların yüzey pürüzlülüğü performansı açısından olumlu bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Ni-P kaplamaya katılan hacimce %14,5'lik BN(h) parçacıkları kaplamanın sürtünme katsayısını yaklaşık olarak %75 düşürdüğü görülmüştür ve Ni-P/h-BN akımsız kompozit kaplamaların direnci Ni-P kaplamadan yaklaşık olarak 10 kat daha yüksektir (Hsu vd., 2015).

Ni-P/h-BN akımsız kompozit kaplamalarının aşınma davranışları araştırılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda; aşınma testinin sıcaklığının artmasıyla, Ni-P/h-BN kaplama daha yüksek sürtünme katsayısı ve daha düşük aşınma direnci gösterdiği görülmüştür. Oda sıcaklığında yapılan aşınma testinde, numuneler için hafif bir yapışkan aşınma davranışı (yapışkanlı sürtünme) gözlemlendi. Daha yüksek sıcaklıklardaki aşınma testlerinde ise kaplamalar büyük bir plastik deformasyon ve bilye yüzeyine yüksek kaplama parçacıklarının eşlik ettiği karışık bir yapışkan ve yorulma mekanizması elde edildi (León vd., 2003).

Başarıyla üretilen Ni-P/BN akımsız kompozit kaplamaların korozyon direnci performansı araştırılmıştır. 400°C'deki ısıtılma işlemi nanokompozitlerin yüzey morfolojilerini önemli ölçüde etkilemiştir. Isıl işlem faz dönüşümünde ve tortuların yapısında farklılıklara yol açmıştır. Ni-P/BN akımsız kompozit kaplamaların tavlama işlemi sonucundaki sonuçlarında korozyon hızında %45'lik bir azalma ile diğer Ni-P kaplamalarla karşılaştırıldığında %3,5 NaCl çözeltisinde çok iyi bir korozyon direncine sahip olduğu görülmüştür. Isıl işlem görmüş akımsız kompozit kaplamalar, diğer tüm akımsız kompozit kaplamalara göre çok sert olduğu görülmüştür ve Ni-P akımsız kaplamadan %100 daha yüksek sertliğe sahip olduğu tespit edilmiştir. Isıl işlem görmüş akımsız kompozit kaplamaların üstünlüğü, önemli bir yapısal değişime ve 400°C'de ısıtılma işlemi sonrasında farklı fazların çökmesi olarak görülebilir (Ranganatha & Venkatesha, 2017).

4. MATERYAL VE METOT

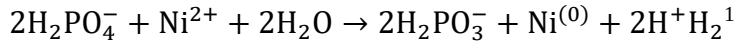
4.1. Materyal

4.1.1. Nikel

Akımsız kaplama çalışmasında metal biriktirme kaynağı olarak nikel sülfat ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) kullanılmıştır. Nikel (II) sülfatın iki formu ticari olarak bulunmaktadır. En yaygın olanı yeşil-mavi, tetragonal heksahidrat ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) dir. Bu nikel sülfatın nikel içeriği %22,3 tür. Sulu çözelti içinde 30,7 ile 53,8 °C arasında kristalleşir. Sulu çözelti içerisinde hidratların ısıtılması dehidrasyona neden olmaktadır. 4 veya 1 molekül içeren hidratlar en kararlı hidratlardır. Nikel sülfatın genellikle elektrolit bakır arıtmanın bir yan ürünü olarak oluşmaktadır. Nikel sülfat kristalleştirildiği bir solüsyon içerisinde bir indirgenme akımı yardımıyla saflaştırılmaktadır. Bir başka nikel sülfat üretme tekniği ise; nikel veya nikel oksidin sülfirik asit içinde çözülmesi ile kristalleşmesi ile üretilmektedir ancak nikel genellikle elektro-kazanma yoluyla nikel metali olarak geri kazanılmaktadır. Nikel sülfatın en yaygın kullanımı, nikel elektro depolama banyolarında elektrolit gibi davranış göstermesidir. Nikel sülfat ayrıca; galvanik kaplamada, akımsız nikel kaplamada, katalizör imalatında ve diğer nikel bileşiklerinin üretiminde kullanıldığı bilinmektedir (Lascelles vd., 2005).

4.1.2. Fosfat

Akımsız kaplama çalışmasında metal indirgeyici madde olarak sodyum hipofosfit ($\text{Na}_2\text{H}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) kullanılmıştır. Sodyum hipofosfit esas olarak endüstriyel alanda metallerin, plastiklerin ve akımsız metal kaplama olarak da adlandırılan kaplama yönteminde seramiklerin indirgenmesi için kullanılmaktadır. Farklı metaller arasında hipofosfitler metallerin altlık üzerine biriktirilmesini sağlamaktadır. Bu metaller arasında hipofosfitler yardımıyla biriktirilen metal ise nikel olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu işleme ise akımsız nikel kaplama denilmektedir. Akımsız kaplama çözeltisinde bulunan nikel tuzları sodyum hipofosfitin bileşiğe katılmasıyla nikel metaline indirgendiği formülde gösterilmiştir (Guyon vd., 2015).



Denklem 4.1

4.1.3. Tungsten

Akımsız kaplama çalışmasında ikincil metal biriktirme kaynağı olarak sodium tungstate (Na_2WO_4) kullanılmıştır. Tungsten benzersiz özellikleri birçok sistemde önemli bir rol almasını sağlamaktadır. Saf element; iyi termal elektriksel iletkenlik, yüksek sertlik ve metaller arasında en yüksek sertliğe sahip olması birçok sistemde kullanılmasını cazip hale getirmektedir. Tungsten, yüksek sıcaklık kararlılığı ve aşınma direncinin gerekli olduğu birçok farklı uygulama alanında kullanılmaktadır. Tungstat bileşiği olan sodyum tungstat (Na_2WO_4) birçok alanda kullanılmaktadır (Dkhalili vd., 2018).

4.1.4. h-BN Kompozit Takviye Parçacıkları

Akımsız kaplama çalışmasında kompozit parçacık olarak h-BN nano parçacıkları kullanılmıştır. Bor nitrid (BN) benzersiz özelliklerinden dolayı çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Örneğin; seramik kompozitlerin yapımında, yüzey kaplamalarında, yalıtkan maddelerin içeriğinde, yağlayıcı özellik barındıran malzemelerde ve benzeri alanlarda kullanıldığı görülmektedir. BN, farklı kristal yapıya sahiptir. Bunlar; eş kenar dörtgen, wurtzite ve amorf kristal yapılarına sahip olduğu görülmekle birlikte farklı bir kristal yapısı da altıgen poliformudur. Bu yapı en kararlı kristal yapıya sahip olanıdır ve grafit benzer bir yapı sergilediği tespit edilmiştir (Haubner vd., 2002). Son yıllarda malzemeler için mekanik dayanım ve benzeri özelliklerin iyileştirilmesi amacıyla birçok çalışma yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmalar sonucunda nano ölçekli h-BN'ye önemli derecede dikkat çekildiği tespit edilmiştir. Son yıllarda birçok araştırmacı BN nano tabakaları, nanolifler, ultra ince kaplamalar, nanoplakalar ve nanokristaller üretmek için kullandıkları görülmüştür (Kostoglou vd., 2015).

4.1.5. Alüminyum (Al 2024-T3) Altlık

AA2024 Al alaşımının kimyasal bileşimi Çizelge 4.1'de, mekanik özellikleri ise Çizelge 4.2'de verilmiştir. Bu alaşımın uygulama alanları olarak somun, cıvata, vida, basınçlı ve farklı makine bileşenleri sıralanabilir. Ayrıca, iyi işlenebilirliğe ve yüksek mukavemete

ihtiyaç duyulan uygulamalar da kullanımı oldukça uygundur. 2024 serili alaşımın, yüksek yorulma dayanımına sahip oluşu serbest makine parçaları için avantaj oluşturmuştur. Genel olarak ürün şekilleri levha, rulo ve lamadır. Dış darbelere ve ortamlara karşı dayanımının az olmasından dolayı sert kaplama gibi bazı koruma yöntemleri ile kullanılması tavsiye edilmektedir. Isıl işlem uygulanabilen 2024 kodlu alaşım; genel mühendislik uygulamaları, kamyon tekerlekleri, savunma ve havacılık sanayi, askeri ekipman, yüksek sertlik, yapısal uygulamalar ve işlenebilirlik gerektiren parçalarda, perçin ve otomotiv sanayisi gibi farklı uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılır (L. Wang vd., 2011).

Çizelge 4.1 AA2024 alaşımının kimyasal bileşimi

Fe	Si	Cu	Cr	Mn	Mg	Zn	Zi +Ti	Diğer	Al
0,5	0,5	3,8-4,9	0,1	0,3-0,9	1,2-1,8	0,25	0,15	0,15	Kalan

Çizelge 4.2 AA2024 serisi alüminyum alaşımının mekanik özellikleri

Temper	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%50)	Sertlik (brinel)
T3	340	475	18	120

4.2. Yöntem

4.2.1. Akımsız Kaplama Üretimi

Endüstriyel tesislerde kullanılan parçalar yüksek korozyon ve aşınmaya maruz kalırlar. Bunların zararlı etkilerinden dolayı metalik yüzeylerde kademeli bir aşınma meydana gelir ki bu da işletme veriminde kayıplara ve bazen de fabrikanın işlerliğinin kötü etkilenmesine sebep olur. Aşınma ve korozyonun bileşik etkisi bu her iki etkinin ayrı ayrı yapacağından çok daha şiddetlidir. Bu bileşik etki madencilik, kimyasal imalat, kâğıt üretimi ve enerji üretimi için şiddetli zarara neden olur. Akımsız kaplama süreci, birçok endüstriyel uygulamaların zorlu ihtiyaçlarını gidermek için Brenner ve Riddell 1946'da akımsız kaplama prosesini icat etmesinden bu yana çok sayıda değişiklik geçirdi (Krishnaveni vd., 2005). Akımsız nikel kaplamalar mükemmel performansları nedeniyle en popüler

işlemlerden biridir. Akımsız nikel kaplamaların alt tabakaya mükemmel yapışması, kaplama kalınlığının homojenliği, yüksek sertlik karakterli olması ve aşınma direnci gibi benzersiz özelliklerinden dolayı endüstriyel olarak önemlidir. Ni'li akımsız kaplamalar farklı kategorilere ayrılmaktadırlar, en önemlisi Ni – P akımsız kaplama kategorisidir. Bu kaplama işlemi yüksek sertliği, amorf yapısı ve iyi işleme yetenekleri nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Teknolojik gelişmelerin getirdiği yeni gereksinimler Ni-P akımsız kaplamanın uygulama alanındaki yüksek gereksinimleri karşılayamamaktadır. Bu nedenle Ni-P akımsız kaplamayı iyileştirmek için, Ni-W-P, Ni-Mo-P, Ni-Cu-P gibi kompozit element yöntemleri ile üçlü ve/veya daha fazla tabakalar geliştirilmiştir (Zhao vd., 2020). Tungsten, yüksek sıcaklıktaki yüksek sertliği ile bilinir; bundan dolayı, akımsız nikel kaplama işlemlerinde üçünü element olarak tungstenin eklenmesi literatürde geniş kapsamlı olarak bildirilmiştir. Ni-WP alaşımlı kaplamalar, güçlü korozyon direnci, iyi aşınma direnci ve yüksek sertlikleri nedeniyle havacılık, elektronik ve korozyon önleyici alanlarda geniş kapsamlı olarak kullanılmaktadır. Ni-WP ve Ni-P kaplama işlemlerini karşılaştırdığımızda, Ni-WP'nin daha yüksek sertliğe ve daha iyi aşınma direncine sahip olduğu araştırmalar sonucunda ortaya çıkmıştır. Özellikle Ni-WP üçlü alaşımlı kaplama işlemleri, W'nin yüksek bağlanma enerjisi ve erime noktası özelliklerini sergilemesinden dolayı büyük bir ilgi görmüştür (W. Wang vd., 2020). Metal matris kompozitler, yüksek özgül mukavemetleri, korozyon ve aşınma dirençleri nedeniyle otomotiv, savuna endüstrilerinde ve havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Sert seramik parçacıkların metalik matrise ilave edilmesi sertliği ve aşınma direncini artırır ve sürtünme katsayısını azaltır. İlave edilen katı parçacıklar, akımsız kaplamaların korozyon direncini de etkileyebilir. Katı parçacıklar, aşındırıcı ortamın matris metaline ulaşmasını fiziksel olarak engeline sebep olursa veya yüzey pasivasyonunu kolaylaştırırsa, kompozit seramik kaplamanın korozyon direnci artar. Kompozit kaplamanın korozyon direncinin azalması ise ilave edilen katı parçacıkların kaplamanın gözenekliliğini arttırması ve galvanik hücrelerin oluşumuna neden olması olarak ifade edilebilir. Ni-W kaplama, yüksek sertlik, iyi korozyon direnci ve endüstriyel uygulamalar için yüksek mekanik özelliklerinden dolayı büyük ilgi görmüştür. Yakın zamanda çeşitli partikül takviyelerinin metal matrisine dahil edilmesi, Ni'nin tribolojik özelliklerini geliştirmenin harika bir yolu olarak gözlenmiştir. Ni-W kaplama alaşımına katılan SiO₂ seramik parçacıkların Ni-W kaplamanın mekaniğini önemli ölçüde iyileştirdiği

gözlenmiştir (Taşci vd., 2019). Bu çalışmada, Ni-P-W-Seramik kompozit kaplamalar Alüminyum 2024 T3 altlıklar üzerine akımsız kaplama yöntemiyle farklı miktarlarda kaplanıp tribokorozif ve termo-mekanik özellikleri analiz edilecektir. Üstün özellikleri ispatlanmış Ni-P-W kaplamalar, üstün katı yağlayıcı ve aşınma direnci olan seramik ile birlikte akımsız kaplama yöntemi ile kombine edilerek literatürde ilk kez Ni-W/Seramik (Hekzagonal bor nitrür (h-BN) kompozit kaplama elde edilecektir. Ni-W-hBN içerik için bu tekniğin kullanımı bulunmamaktadır.

4.2.2 Alüminyum Altlık Hazırlama Aşaması

Metal kaplama yöntemlerinin en popüler olanı akımsız kaplama yöntemidir. Bu yöntem birçok avantajı beraberine getirmektedir. Akımsız kaplamanın avantajlarının yanında dezavantajları da bulunmaktadır, akımsız kaplamadaki en önemli dezavantaj ise altlığın hazırlanmasıdır. Akımsız kaplamada altlığın üzerine kaplama tabakasını oluşabilmesi için harici bir itici güç bulunmamaktadır. Bu itici gücün bulunmaması ise kaplama filminin oluşmasını zorlaştırmaktadır. Bu zorlaştırmanın önüne geçebilmek için ise altlığın iyi hazırlanması gerekmektedir. Altlık otokatalitik kaplama için aktif hale getirilmelidir. Bu aktif hale getirme işleminin birçok protokolü bulunmaktadır. Bu çalışma içinde uygulayacağımız protokol ise birçok adım Şekil 4.1’de içermektedir. Bu ayrıntılı altlık hazırlama protokolü ise Alüminyum altlık olmasından dolayıdır. Alüminyumun akımsız kaplamadaki temel problemi ise aktif bir yüzeyinin olmamasıdır bunun için özel bir altlık hazırlama protokolü gerekmektedir.

Alüminyum altlık hazırlık aşamasında ilk önce yüzeydeki oluşan kalıntı kirlerden 2500 SiC zımpara yöntemi ile arındırılması gerekmektedir (150, 800, 1000, 1200, 1500, 2000, 2500). Zımpara işleminden sonra ise kalıntı giderici olarak aseton ile yıkanması gerçekleştirilir, distile edilmiş su ile durulanır. Daha sonra ise etanol ile yıkanıp distile edilmiş su ile yıkanarak temizlik aşamasının ilk aşamasını başarılı bir şekilde gerçekleştirmiş olduk.

Temizlik sürecinden sonra Alüminyum metalini aktifleştirme süreci izlemektedir. Bu süreçte ise ilk kademe olarak yağdan arındırılması için Trikloroetilene bileşiğinde bekletildikten sonra Sodyum hidroksit bileşiğinde bekletilip distile edilmiş su ile durulanarak yağdan arındırılır. Alüminyum metalini asidik aktivasyon için %25 HF + %75 HNO₃ ile dekapaj

yapılır, 30 sn daldırılır, yıkanır ve tekrar yağ alma için sodyum hidroksit bileşiğinde bekletilir sonra distile edilmiş su ile yıkanır. Tekrar ikinci bir asidik aktivasyon için %25 HF + %75 HNO₃ ile dekapaj yapılır, 30 sn daldırılır ve yıkanır. Bu aktifleştirme işleminden sonra ise aktifleşmiş yüzey 2 dakika zinkat çözeltisine batırılarak yüzeysel bir kaplama gerçekleştirilir ve ardından distile edilmiş su ile yıkanarak, temizlik işlemi için tekrar sodyum hidroksit bileşiğinde bekletilip ardından asidik dekapaj için nitrik asit (%5 HNO₃) bileşiğinde bekletilir. Son olarak zinkat çözeltisine 2. kez 2 dakika bekletilip distile edilmiş su ile durulanması sağlanarak Alüminyum metalimiz Ni-P-W/X akımsız kaplama banyosu için hazır hale gelmiş olmaktadır (Yildiz vd., 2021).



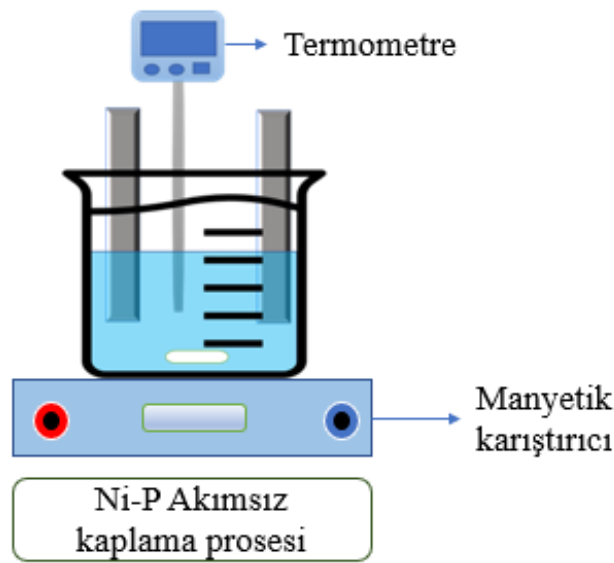
Şekil 4.1 Alüminyum altlık hazırlama aşaması

4.2.3. Alüminyum (Al 2024-T3) Altlığın Otokatalitik (Akımsız Kaplama) Yöntemi

4.2.3.1. Altlığın Ni-P Akımsız Kaplama Banyosunda Kaplanması

Yaptığımız akımsız Ni-P kaplamalar çalışmasında, Çizelge 4.3'te kimyasal bileşimleri verilen malzemeler kullanılarak belirtilen kaplama koşullarında gerçekleştirilmiştir. Akımsız kaplamalarda en büyük sorun olarak kaplama banyosunun bozunmasıdır. Akımsız

banyo bozunmasını önlemek için doğru kaplama içeriğinin ve parametrelerinin hazırlanması gerekmektedir. Bu tez çalışması kapsamında akımsız kaplama banyoları 200 ml'lik cam beherler içerisinde Şekil 4.2'de gösterildiği gibi hazırlanmıştır. Tüm akımsız kaplamalar sıcaklık kontrollü bir manyetik karıştırıcı sayesinde 75 °C' ye getirilerek +2 °C hassasiyetle kaplama süresi boyunca sabit tutulmuştur.



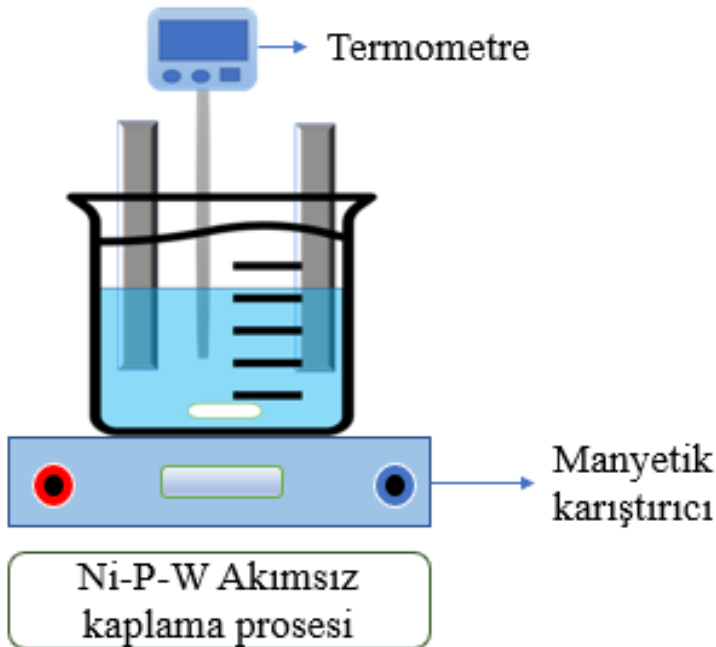
Şekil 4.2 Ni-P akımsız kaplama prosesi

Çizelge 4.3 Akımsız Ni-P kaplama üretim değişkenleri

Akımsız Ni-P Kaplama Üretim Değişkenleri	
NiSO ₄ .6H ₂ O (Nikel sülfat)	40 g/l
Na ₂ H ₂ PO ₂ (Sodyum hipofosfit)	30 g/l
Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ .2H ₂ O (Sodyum sitrat)	20 g/l
HF (Hidroflorik asit)	6 ml/l
CH ₄ N ₂ S (Tiyoure)	0,001 g/l
CH ₃ COONa (Sodyum asetat)	5 g/l
pH	4,5
Sıcaklık	75 °C
Süre	90 dk
Banyo karıştırma hızı	200-300 dev/dk

4.2.3.2. Altıgün Ni-P-W Akımsız Kaplama Banyosunda Kaplanması

Tez çalışmasında yapılan Ni-P-W akımsız kaplamalar Çizelge 4.4'te kimyasal bileşimi verilen malzemeler kullanılarak belirtilen kaplama koşullarına gerçekleştirilmiştir. Akımsız kaplamada en büyük sorun kaplama banyosunun bozulması ve kaplama banyosuna ilave edilen ikinci bir metal tuzu olan sodyum tungstenin ince film kaplamada kaplanmamasıdır. Yapılan deneyler sonucunda tespit edilen en önemli noktalardan bir tanesi banyo içeriklerinin oluşturan bileşiklerin hangi sıra ile çözeltiye eklenecek olmasıdır. Ni-P kaplamalarda bu sıra önemli bir faktör olmadığı görülmüştür. Ni-P-W akımsız kaplamalarında çözeltiye katılan bileşiklerin sırası önem kazanmıştır. Ni-P-W akımsız kaplama çözeltisi oluşturulurken sodyum asetat bileşiği kaplama çözeltisine akımsız kaplama prosesi başlatılmasının hemen öncesinde katılması kaplama birikiminde önemli farklar oluşturduğu tespit edilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında akımsız kaplama banyoları 200 ml'lik cam beherler içerisinde Şekil 4.3'te gösterildiği gibi hazırlanmıştır. Tüm akımsız Ni-P-W kaplamalar sıcaklık kontrollü bir manyetik karıştırıcı sayesinde 75 oC'ye getirilerek +2 oC hassasiyetle kaplama süresi boyunca sabit tutulmuştur.



Şekil 4.3 Ni-P-W akımsız kaplama prosesi

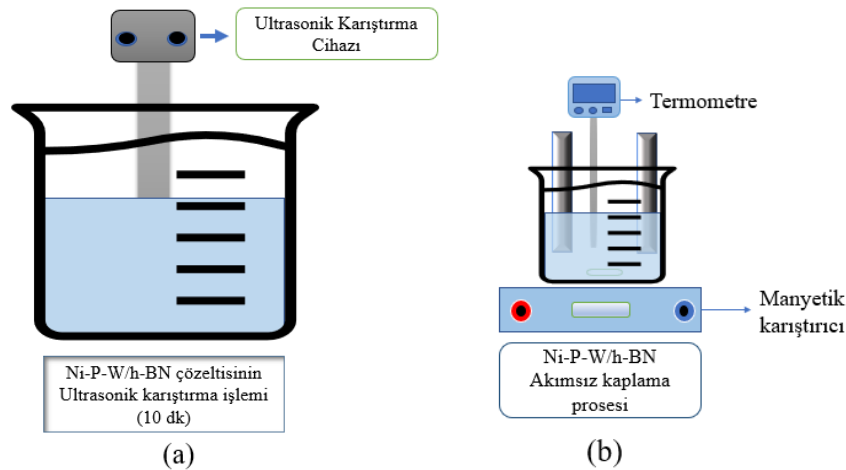
Çizelge 4.4 Akımsız Ni-P-W kaplama üretim değişkenleri

Akımsız Ni-P-W Kaplama Üretim Değişkenleri	
NiSO ₄ .6H ₂ O (Nikel sülfat)	40 g/l
Na ₂ H ₂ PO ₂ (Sodyum hipofosfit)	30 g/l
Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ .2H ₂ O (Sodyum sitrat)	20 g/l
HF (Hidroflorik asit)	6 ml/l
CH ₄ N ₂ S (Tiyoüre)	0,001 g/l
CH ₃ COONa (Sodyum asetat)	5 g/l
Na ₂ WO ₄ (Sodium tungstat)	15 g/l
pH	4,5
Sıcaklık	75 °C
Süre	90 dk
Banyo karıştırma hızı	200-300 dev/dk

4.2.3.3. Altılığın Ni-P-W/h-BN Akımsız Kaplama Banyosunda Kaplanması

Akımsız kaplamaların fiziksel, elektrokimyasal, aşınma ve mikroyapısal özelliklerini kompozit yapıların ilave edilmesiyle oluşan akımsız kompozit kaplamalar bu kritik özellikleri geliştirilebilir ve iyileştirebilir. Birçok nitrürler, karbürler ve oksitler kompozit kaplama elde etmek için takviye elemanı olarak kullanılmaktadır. Bu takviye elemanları arasında h-BN'nin yağlayıcı, mekanik özellikleri gibi benzersiz özelliklerinin olması sebebiyle tercih edilen bir takviye elemanıdır. Tezdeki deneysel çalışmalar kapsamında akımsız h-BN takviyeli Ni-P-W kaplamalar, h-BN nano partiküllerinin Ni-P-W kaplama banyolarına ilave edilmesiyle oluşturulmuştur. Kaplama banyosu bileşimi olarak akımsız Ni-P-W banyosu kullanılmıştır. Kompozit parçacıkların aglomere olmasını engellemek ve akımsız kaplamada biriktirilmesini sağlamak için banyo çözeltisin içine yüzey aktif madde olan 0,1 g/L sodyum dodesil sülfat ilave edilmiştir. Farklı h-BN partikül konsantrasyonlarında hazırlanmış Ni-P-W kaplama banyolarının bileşimleri ve çalışma koşulları Çizelge 4.5'te verilmiştir. Yapılan çalışmalarda Ni-P-W kaplama banyolarına farklı konsantrasyonlarda ilave edilen h-BN partikülü ile kompozit kaplamalar üretilmiştir. Kaplama çözeltisinde 2 g/L h-BN konsantrasyonu en düşük takviye elemanı konsantrasyonu olarak seçilmişken, en yüksek 8 h-BN konsantrasyonu seçilmiştir. Akımsız kaplamaların en büyük dezavantajı kaplama banyosuna ince partiküller dahil edildiğinde kaplama alan yükünün artmasından dolayı kompozit parçacıklarının aglomere olması nedeniyle çözeltinin bozunmasıdır (Agarwala & Agarwala, 2003). Bu nedenden dolayı belli bir seramik parçacık

konsantrasyonunun üstünde çalışmak mümkün olmamaktadır. Bundan dolayı en optimum değerler arasında çalışmak kaplamanın sağlıklı üretilmesi Şekil 4.4'te gösterildiği gibi gerçekleşmektedir.



Şekil 4.4 (a) Ni-P-W/h-BN çözeltisinin ultrasonik karıştırma prosesi, (b) Ni-P-W/h-BN akımsız kompozit kaplama prosesi

Çizelge 4.5 Akımsız Ni-P-W/h-BN kompozit kaplama üretim değişkenleri

Akımsız Ni-P-W/h-BN Kompozit Kaplama Üretim Değişkenleri	h-BN/2	h-BN/4	h-BN/6	h-BN/8
NiSO ₄ .6H ₂ O (Nikel sülfat)	40 g/l	40 g/l	40 g/l	40 g/l
Na ₂ H ₂ PO ₂ (Sodyum hipofosfit)	30 g/l	30 g/l	30 g/l	30 g/l
Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ -2H ₂ O (Sodyum sitrat)	20 g/l	20 g/l	20 g/l	20 g/l
HF (Hidroflorik asit)	6 ml/l	6 ml/l	6 ml/l	6 ml/l
CH ₄ N ₂ S (Tiyoüre)	0,001 g/l	0,001 g/l	0,001 g/l	0,001 g/l
CH ₃ COONa (Sodyum asetat)	5 g/l	5 g/l	5 g/l	5 g/l
Na ₂ WO ₄ (Sodium tungstate)	15 g/l	15 g/l	15 g/l	15 g/l
h-BN (Hegzagonal-Boron Nitrit)	2 g/l	4 g/l	6 g/l	8 g/l
C ₁₂ H ₂₅ NaO ₄ S (Sodyum dodesil sülfat)	0,1 g/l	0,1 g/l	0,1 g/l	0,1 g/l
pH	4,5	4,5	4,5	4,5
Sıcaklık	75 °C	75 °C	75 °C	75 °C
Süre	90 dk	90 dk	90 dk	90 dk
Depolama öncesi ultrasonik karıştırma	10 dk	10 dk	10 dk	10 dk
Banyo karıştırma hızı	200-300 dev/dk	200-300 dev/dk	200-300 dev/dk	200-300 dev/dk

4.2.4. Korozyon Analiz Yöntemleri

Yapılan akımsız kaplama korozyon analizleri CH Instrument elektrokimyasal analiz cihazı (Resim 4.1) ile Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi laboratuvarında analiz edilmiştir. Korozyon deneyleri %3,5 sodyum klorür (NaCl) sulu çözeltisinde gerçekleştirilmiştir.



Resim 4.1 CH Instruments elektrokimyasal analiz cihazı

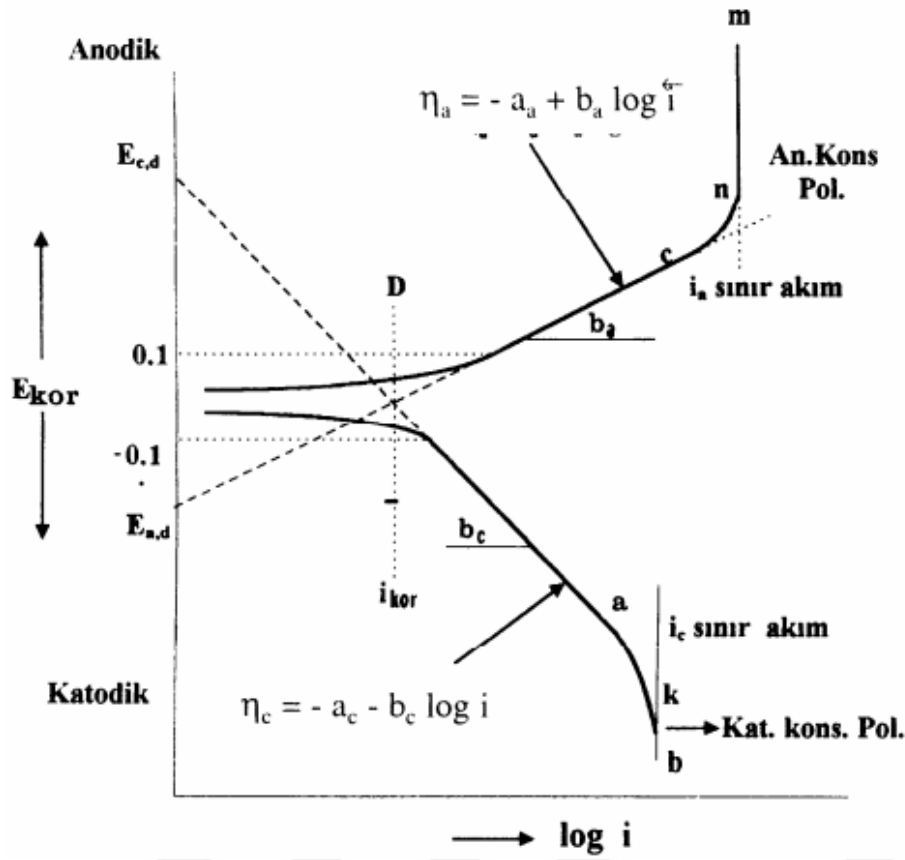
4.2.4.1. Açık Devre Potansiyeli

Açık devre potansiyeli (OCP), açık devre voltajı, dinlenme potansiyeli, korozyon potansiyeli, denge potansiyeli veya sıfır akım potansiyeli olarak da isimlendirilen tahribatsız bir korozyon analiz yöntemidir. Açık devre potansiyelinin pasifliği karşı elektrotun (akımı hücreden geçirmek için) pasif bırakılarak sağlanmaktadır. Açık devre potansiyeli tekniğinde, referans ve çalışma elektrotları arasındaki potansiyel ölçülmektedir. Açık devre potansiyelini korozyon deneyleri için başlangıç olarak cazip hale gelmesini sağlayan durum, termodinamik olarak elektrolitik bir ölçüm yöntemi olmasıdır. Kimyasal sistem özellikleri her zaman dengede olması beklenmeyebilir. Ancak bazı kimyasal sistemler ölçümlere başladığında dengeden uzak durumda olabilmeleriyle birlikte zamanlar dengeye gelebilmektedirler. Bu durumda açık devre potansiyeli korozyon analizleri için oldukça temel bir deney olduğu görülmektedir. Açık devre potansiyeli ile elektrokimyasal sistemlerin kararlılıkları belirlenebilmektedir. Korozyon analizlerinde açık devre potansiyeli önemli bir basamak oluşturmakta ama en doğru cevabı her zaman vermemektedir. Ancak korozyon analizleri için diğer deneylerin dayandığı bir sistemin dinlenme ve denge potansiyelini bulmak için açık devre potansiyeli önem kazanmaktadır. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi ve potansiyodinamik kutuplaşma korozyon analizlerinde referans

yerine açık devre potansiyeline göre ayarlanır (Ünal, 2022). Bu tez çalışmasında açık devre potansiyeli (ADP) deneyleri ağırlıkça %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde yapılmış ve 3600 s süreyle zamanın bir fonksiyonu olarak kaydedildi ve grafikte çizgileri çizdirilmiştir.

4.2.4.2. Tafel Ekstrapolasyon (Potansiyodinamik Kutuplaşma) Yöntemi

Tafel ekstrapolasyon yöntemi, korozyon analiz yöntemleri arasında karşılaştırılma yapıldığında kullanımı daha basit ve kolay olduğu tespit edilmektedir. Bu korozyon analiz yönteminin kolaylığından dolayı sanayide en çok tercih edilen yöntemdir. Katodik potansiyodinamik polarizasyon eğrisinin oluşan korozyon potansiyeline ekstrapolasyon yöntemi ile çok derecelerdeki korozyon hızını görmek ve oluşturulan sistemin korozyon hızını kontrol etmek olanaklıdır. Oluşturulan sistemdeki korozyon hızı yani korozyon akımı; korozyon potansiyelinden başlayarak potansiyostatik ve galvanostatik metotla anodik ve katodik yönde çizilen yarı logaritmik akım yoğunluğu-potansiyel eğrilerinin çizgisel bölgelerinin korozyon potansiyeline ekstrapole edilmesiyle belirlenir. Katodik akım uygulanmadan önce çalışma elektrotunun karşılaştırma elektrotuna karşı voltametrede ölçülen potansiyeline korozyon potansiyeli denir (Gerengi, 2008). Tafel Ekstrapolasyon korozyon analizi deneylerinde serbest korozyon potansiyelinin 250 mV negatifinde ve 250 mV pozitifine doğru 0,166 mV/s hızla tafel eğrileri Şekil 4.5'te ki gibi elde edilmiştir.



Şekil 4.5 Tafel Ekstrapolasyon doğruları yöntemiyle korozyon akımı (I_{kor}) ve korozyon potansiyelinin (E_{kor}) bulunuşu (Gerengi, 2008)

4.2.4.3. Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EES)

Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EES), korozyon, pil ve yakıt hücresi üretimi, biyosensörler, boya karakterizasyonu ve benzeri uygulama alanlarında etkin şekilde kullanılan elektrokimyasal bir analiz tekniğidir. Bu kadar çok alanda kullanılmasının önde gelen sebebi ise yüksek veri elde etme özelliğinden dolayıdır. EES analiz tekniği diğer korozyon analiz tekniklerine göre elektrokimyasal bir sistem hakkında daha detaylı bilgiler verir. EES analiz tekniğinde elektrota çok geniş bir frekans aralığını içeren sinüzoidal elektrokimyasal akım ve potansiyel gönderilerek sistemin bu permütasyona karşı empedans yanıtı elde edilir. Elektrota gelen çoklu frekans uyarımını çok değişkenli hızlarda gerçekleşen birçok elektrokimyasal reaksiyonun özelliklerini anlamamıza olanak sağlar (Tozar, 2012).

Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EES) çalışmalarımız 10 mV genlikli AC akımla 100 kHz-10 mHz (10^{-5} - 10^{-2} Hz) aralığında gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada CH Instrument elektrokimyasal analiz cihazı kullanılarak veriler elde edilmiştir.

4.2.5. Mikrosertlik

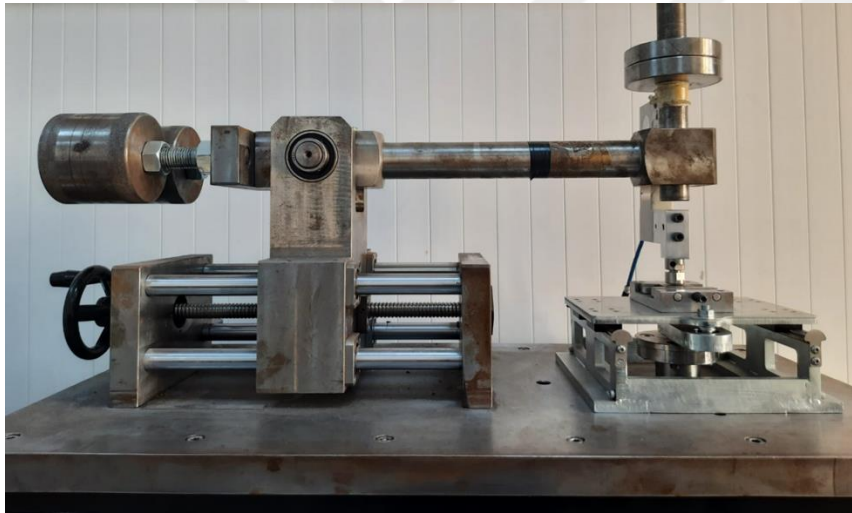
Sertlik, malzemelerin plastik deformasyona karşı gösterdiği direnç olarak ifade edilebilir. Sertlik ölçümlerin farklı uçların kullanıldığı bilinmektedir, bunlar konik ve küresel şekilli ve benzeri standart uçlar olmaktadır. Sertlik ölçümlerinde ucun malzemeye batırılmasına karşı malzemenin gösterdiği mukavemetin ölçülmesiyle sertlik değeri belirlenmektedir. Sertlik ölçümlerinde, seçilen sert uçlu malzeme belirli bir yük ile malzemeye batırılmasıyla malzeme üzerinde bir iz oluşmaktadır. Seçilen bu sert ucun açısı, iz boyutları ve uygulanan yük hesaba katılarak sertlik değeri bulunmaktadır. Malzeme yüzeyinde sertlik testi sonucu bir bozulma meydana gelmiyorsa bu test tahribatsız malzeme muayene testi olarak adlandırılabilir. Bundan dolayı sertlik ölçüm testleri sanayi ortamında kalite kontrol amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu ölçümlerin alınmasında Resim 4.2’de gösterilen Qness 60 M EVO Mikrosertlik test cihazı kullanılmıştır.



Resim 4.2 Mikro sertlik test cihazı

4.2.6. Aşınma Deneyleri ve Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri

İşlemsiz ve kaplanmış Al 2024 T3 numunelerin aşınma ve sürtünme performansı ASTM G133 standardına göre ball-on-disk test cihazında gerçekleştirilmiştir (Resim 4.3). Aşınma test parametreleri ön denemeler sonucunda belirlenmiştir. Deneyler 2 ve 4 N yük altında, 5 mm strok mesafesinde, 10 mm/s kayma hızında ve 9 m kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Aşındırıcı olarak 16,18 GPa sertlikte ve 0,05 µm ortalama yüzey pürüzlülüğünde 6 mm çapında alümina top kullanılmış olup her bir testte topun kullanılmamış yüzeyi temas oluşturacak şekilde top çevrilmiştir. Deneylerden sonra test numuneleri asetonlu bir bez ile silinerek test esnasında yüzeylerde biriken aşınma tozlarından arındırılmıştır.



Resim 4.3 Aşınma test cihaz görünümü



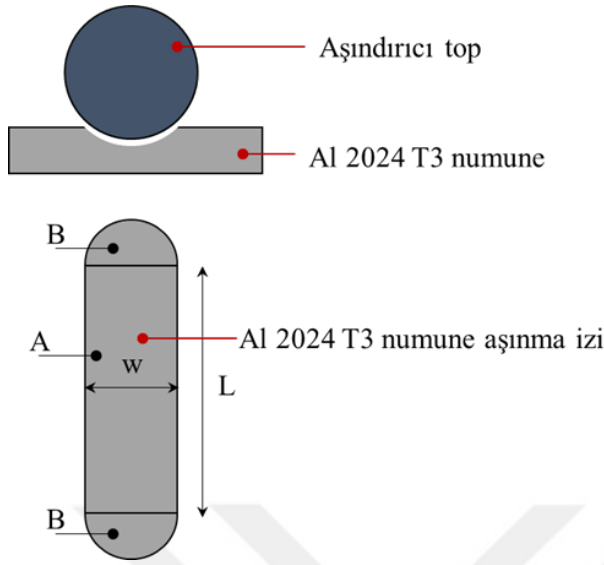
Resim 4.4 Nikon Eclipse MA 100 marka aşınma görüntüleme cihazı

Aşınma testi sonrasında oluşan izlerin görünüşleri Nikon Eclipse MA 100 marka cihaz ile yapılan ölçümlerde 200X ve 500X büyütme ile fotoğraflar çekilmiştir. Görüntü sistemi, Resim 4.4'te gösterilmiştir. Aşınma izi genişlikleri optik mikroskop görüntülerinden ImageJ programı ile ölçülmüştür. Aşınma hacmi Sharma vd., 2013 tarafından geliştirilen Denklem 4.1'de verilen analitik formül ile hesaplanmıştır (Sharma vd., 2013).

$$V_{total} = V_A + V_B = L \left[r^2 \sin^{-1} \left(\frac{w}{2r} \right) - \frac{w}{2} \left(r^2 - \frac{w^2}{4} \right)^{1/2} \right] +$$

$$\frac{\pi}{3} \left[2r^3 - 2r^2 \left(r^2 - \frac{w^2}{4} \right)^{1/2} - \frac{w^2}{4} \left(r^2 - \frac{w^2}{4} \right)^{1/2} \right]^2 \quad \text{Denklem 4.1}$$

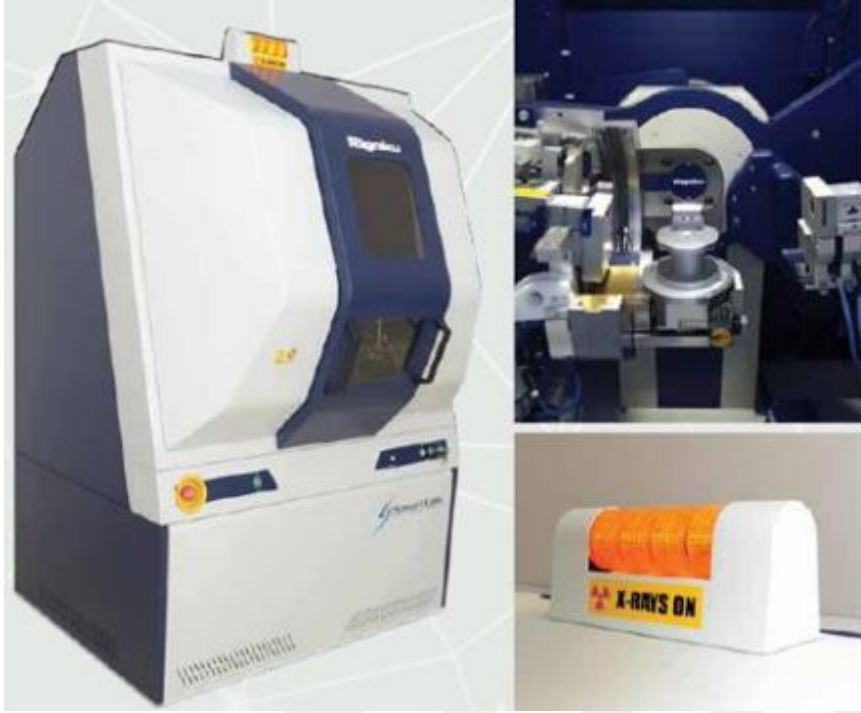
Burada, L strok mesafesi, w aşınma izi genişliği ve r alümina aşındırıcı topun yarıçapıdır. Aşınma izinde A bölgesi silindirik geometriyi B bölgesi ise strok sonlarında oluşan kesik küre geometriyi temsil etmektedir (Şekil 4.6). Numune aşınma hacmi A ve B bölgelerine ait hacim kayıplarının toplamı ile hesap edilmektedir. Aşındırıcı topun test numunelerine kıyasen daha sert olmasından dolayı aşındırıcı topun geometrisinin test esnasında değişmediği ve sadece deney numunesinin aşındığı varsayılmıştır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 Aşınma izi yandan ve üstten görünüşü şematikleri.

4.2.7. X Işını Kırınımı (XRD) Analizi

X-ışını difraksiyonu, incelenen malzemedeki atomlar arası uzaklıklar boyutundadır ve bu özelliğinden dolayı malzemelerin yapısal araştırmalarında kullanımını sağlamaktadır. X-ışını ile malzeme muayenesi tahribatsız malzeme muayenesi tekniği olarak önem kazanmaktadır. X-ışını difraksiyonu, kristal malzemelerde saçılımlar oluşturmaktadır bu saçılımlara kırınım denmektedir. Bu kırınımlar çok miktarda atomu içeren yapıdaki bu saçılımlardan oluşmaktadır ve bu saçılan ışınların bir bölümü birbirini yok ederken (yıkıcı saçılma) diğer bir bölümü ise birbirlerini kuvvetlendirerek yapıcı girişim yani difraksiyon oluşturmaktadırlar. Bragg denklemini sağlayan parametre ise yalnızca kırınım açılarından gelen ışınlar sağlamaktadır. Bragg yasası ise X-ışını dalga boyu ve atomlar arası mesafeyi, kırınan ışının açısı ile ilişkilendirerek, numuneye belirli bir dalga boyunda gönderilmesiyle oluşan açının tespit edilmesiyle, kristal düzlemleri arasındaki d uzaklığının bulunmasında kullanılmaktadır (Ünal, 2022). Bu tez çalışmasında numunelerin X-RD analizi için Resim 4.5'te $2\theta=0-100^\circ$ aralığında, 40 kV ve 30 mA değerlerinde $\text{CuK}\alpha$ radyasyonu üreten ve Mustafa Kemal Üniversitesinde bulunan Teknoloji ve AR-GE Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan RIGAKU Smart LabTM cihazı kullanılarak X-ışını kırınımı (XRD) analizleri ile tespit edilmiştir.



Resim 4.5 RIGAKU Smart LabTM marka XRD cihazı

4.2.8. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Ve Enerji Dağılımı X-Işını Spektroskopisi (EDS) Analizleri

Üretilen kaplamaların (Ni-P, Ni-P-W ve Ni-P-W/h-BN(2-4-6-8)) yüzey topografisi, kaplama kalınlıkları ve içerikleri kesitten yüzeyden alınan SEM görüntüleri ve EDS analizleriyle elde edilmiştir. SEM görüntüleri ile kaplamaların yüzey topografisi, akımsız kaplamaların kalınlıkları, aşınma sonucu oluşan yüzeysel oluşumlar ve kompozit kaplamaların partikül dağılımı da incelenmiştir. SEM ve EDS analizleri Resim 4.6'da görünen ve Ondokuz Mayıs Üniversitesi KİTAM'da bulunan Jeol marka JSM7001F modeli taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır.



Resim 4.6 Jeol marka JSM7001F model SEM ve EDS

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Ni-P, Ni-P-W ve Ni-P-W/h(BN) Akımsız Kaplamaların Mikrosertlik Analizi

Altlık malzemenin ve üretilen Ni-P, Ni-P-W ve Ni-P-W/h-BN kaplamaların sertlikleri Çizelge 5.1’de gösterilmektedir. Veriler göz önüne alındığında yapılan kaplamaların altlık malzemenin sertliğinden daha fazla sertliğe sahip olduğu görülmüştür (Matik & Citak, 2011). Ni-P akımsız kaplamaların sertliğini arttırmak için W eklenmiştir (Liu vd., 2012). W eklenmesi kaplama sertliğinde önemli bir artışa neden olmuştur. Seramik ilave edilen akımsız kaplamalar seramik eklenmeyen kaplamalardan daha yüksektir (Ulu vd., 2018). Kaplamalar arasında bir incelemeye gidildiğinde Ni-P-W/h-BN(4g/L)’nin en yüksek sertlik değerini verdiği görülmüştür. h-BN oranının artması ise sertlik değerinde bir düşüşe neden olduğu görülmüştür.

Çizelge 5.1 Üretilen kaplamaların vickers sertlik değerleri

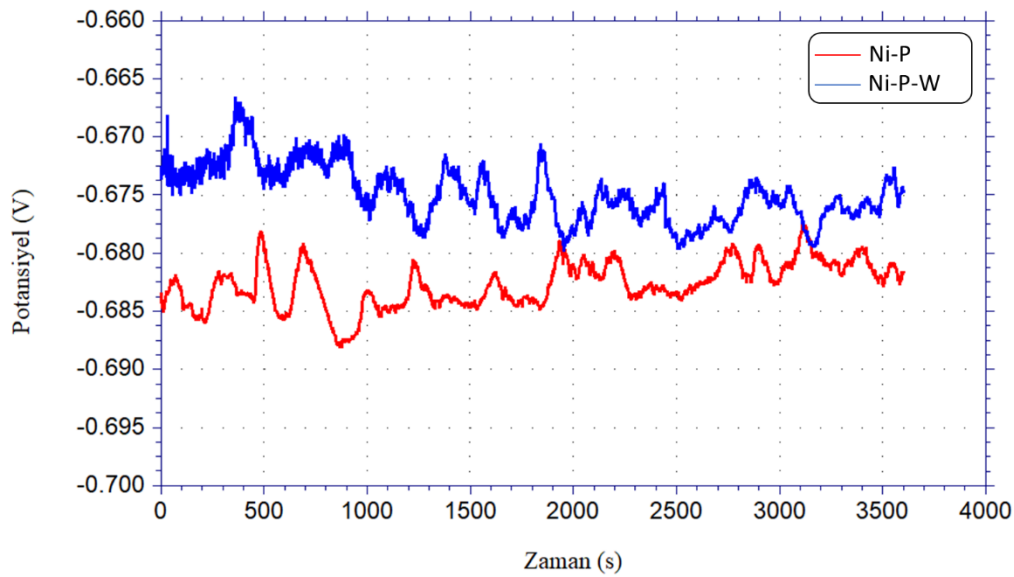
Akımsız Kaplamalar	Sertlik (Vickers) HV
Al2024T3	186,3
Ni-P	492,1
Ni-P-W	502,3
Ni-P-W/h-BN(2g/l)	548,6
Ni-P-W/h-BN(4g/l)	702,6
Ni-P-W/h-BN(6g/l)	504,6
Ni-P-W/h-BN(8g/l)	363

5.2. Akımsız Kaplamaların Korozyon Analizleri

5.2.1. Ni-P ve Ni-P-W Akımsız Kaplamaların; Açık Devre Potansiyeli, Tafel Ekstrapolasyon (Potansiyodinamik Kutuplaşma) Yöntemi ve Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EDS) ile Korozyon Analizleri

Ni-P akımsız kaplamaların açık devre potansiyeli eğrileri ile karşılaştırma amacıyla Ni-P-W alaşım kaplama, açık devre potansiyel eğrileri Şekil 5.1’de verilmiştir. Açık devre

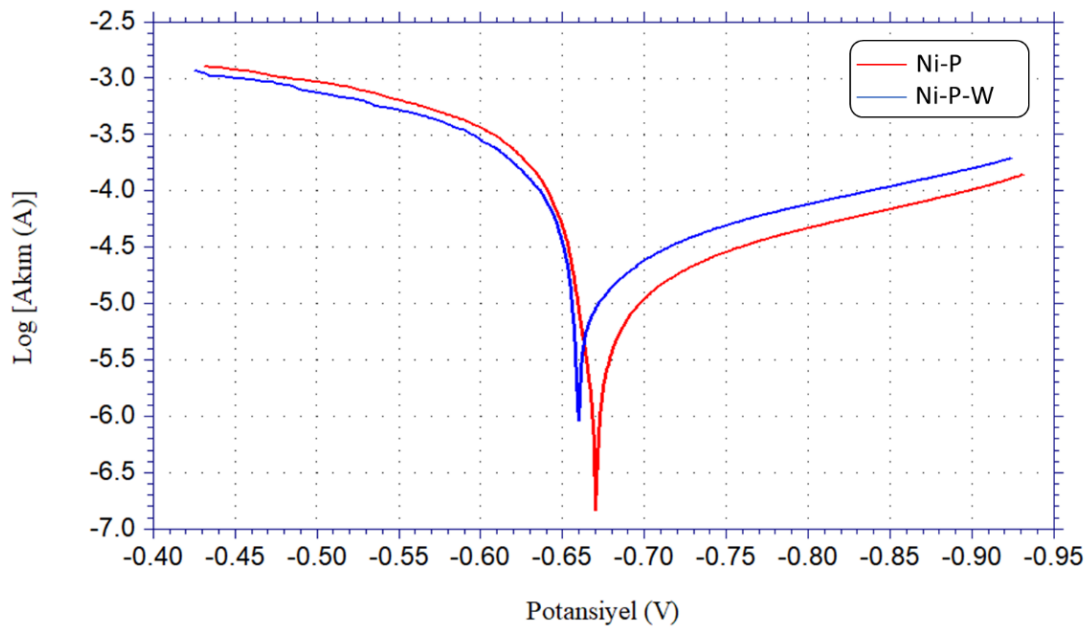
potansiyelleri ağırlıkça %3,5 NaCl çözeltisinde kararlı bir potansiyel değer elde etmek amacıyla 3600 s süreyle kaydedilmiştir. Açık devre potansiyeli iyonik bir çözeltide gerçekleştirilmiştir. Açık devre potansiyeli anodik ve katodik tepkimelerin bir denge potansiyelidir. Şekil 5.1 incelendiğinde Ni-P akımsız kaplamasının potansiyeli -0,683 V başladığı ve Ni-P-W'nin ise -0,672 V de işlem başlangıcında bu potansiyellerde başladığı tespit edilmiştir. 3600 s süre sonunda Ni-P akımsız kaplamanın -0,681 V potansiyelde sonlandığı tespit edilmiştir. Diğer yandan Ni-P-W akımsız kaplamanın 3600 s sonundaki potansiyeli ise -0,674 V'dir. Bu sonuçlar değerlendirilip akımsız kaplamalar karşılaştırıldığında açık potansiyel devre potansiyeline potansiyelleri birbirlerine yakın olduğu bu sonuçlara göre korozyon değerlendirilmesinde korozyon dirençlerinde birbirlerine yakın değerler olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.1 Ni-P ve Ni-P-W arasındaki OCP analizi

Akımsız kaplamalar potansiyodinamik kutuplaşma (Tafel dış değer bulma) yöntemi ile korozyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Potansiyodinamik kutuplaşma deneyleri açık devre potansiyelinin 0,25 V altından 0,25 V üstüne kadar olan potansiyel aralığında 1mV/s tarama hızında ve %3,5 NaCl içeren çözelti içerisinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Ni-P akımsız kaplamasına ilave edilen W içeriğinin korozyon potansiyelini arttırdığı, korozyon akım yoğunluğunun azalttığı ve Ni-W-P kaplamaları korozyon önleme özelliğinin olduğunu gösterir (Shi vd., 2017). Akımsız kaplama numuneleri dengeli bir potansiyel değer elde

etmek amacıyla Tafel ölçümü gerçekleştirilmeden önce %3,5 NaCl içeren çözelti içerisinde 3600 s bekletilmiştir. Bu sürenin değerlendirilmesi amacıyla açık devre potansiyeli elde edilmiş ve incelenmiştir. Şekil 5.2’de Ni-P ve Ni-P-W akımsız kaplamaların Tafel eğrileri ve Çizelge 5.2’te ise korozyon potansiyeli (E_{kor}), korozyon akımı (I_{kor}) ve korozyon hızı verileri sunulmuştur.



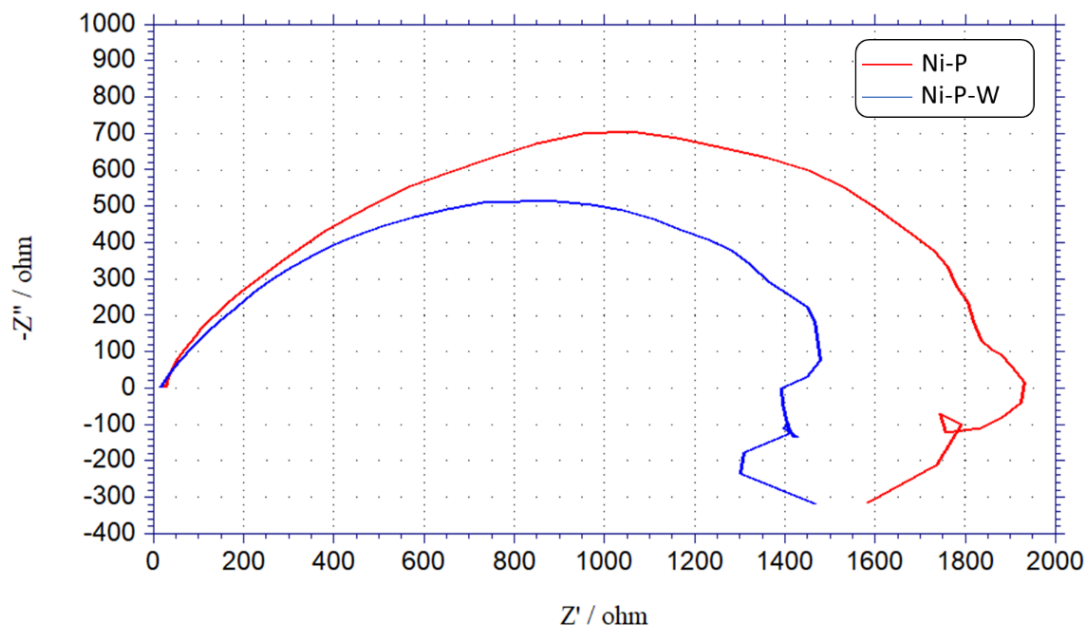
Şekil 5.2 Ni-P ve Ni-P-W akımsız kaplamaların Tafel eğrileri

Çizelge 5.2 Ni-P ve Ni-P-W akımsız kaplamaların korozyon potansiyeli (E_{kor}), korozyon akımı (I_{kor}) ve korozyon hızı verileri

Akımsız Kaplamalar	E_{kor} (V)	I_{kor} (A)	Korozyon hızı (mm/yıl)
Ni-P	-0,670	2,392e-005	5,455e+001
Ni-P-W	-0,660	1,056e-004	2,407e+002

Akımsız Ni-P ve Ni-P-W kaplamaların elektrokimyasal empedans spektroskopisi çalışmaları ise 10 mV genlikli AC akımla 100 kHz – 10 mHz (10^5 - 10^{-2} Hz) aralığında gerçekleştirilmiştir. Yapılan bütün korozyon testlerinde %3,5 sodyum klorür (NaCl) sulu çözeltisinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.3’te EES yöntemi ile elde edilen Ni-P ve Ni-P-W akımsız kaplamalara ait grafiği verilmiştir. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi grafiğinde

tespit edilen veriler incelenmiştir. Yapılan incelemelerde; Ni-P akımsız kaplama 705 - Z'' /ohm tepe değerine ve Ni-P-W akımsız kaplama ise 513 - Z'' /ohm tepe noktasına sahiptir. Grafikte X eksenı incelendiğinde; Ni-P akımsız kaplama 1930 Z' /ohm değerinde ve Ni-P-W akımsız kaplama ise 1478 Z' /ohm değerinde olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen veriler değerlendirildiğinde Ni-P akımsız kaplamanın elektrokimyasal empedans spektroskopisi verilerine göre korozyon direnci Ni-P-W akımsız kaplama ile yakın değere sahip olduğu tespit edilmiştir.

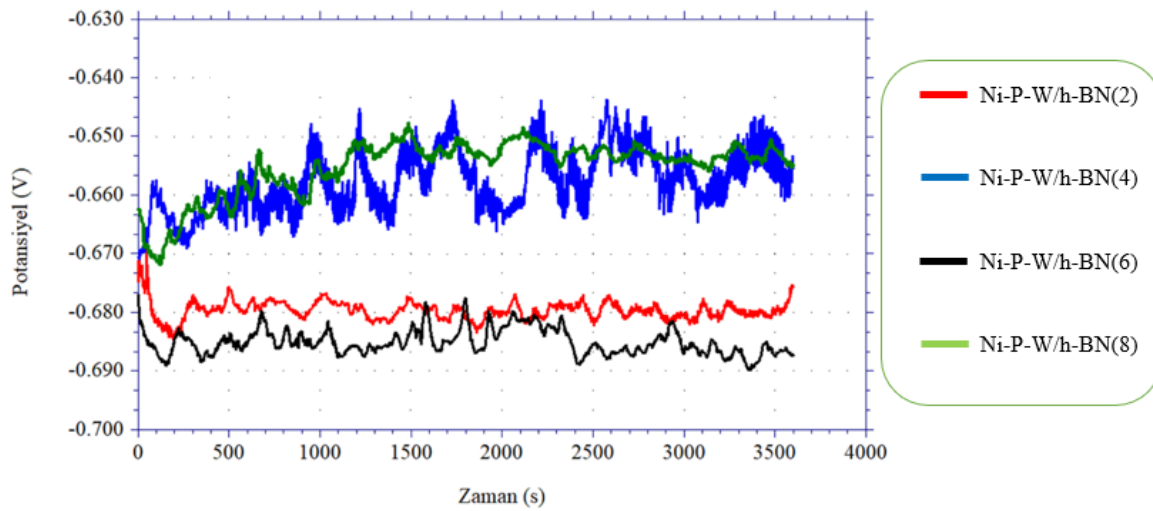


Şekil 5.3 Ni-P ve Ni-P-W arasındaki Empedans analizi eğrileri

5.2.3. Ni-P-W/h(BN) Alaşımlı Kompozit Kaplamaların; Açık Devre Potansiyeli, Tafel Ekstrapolasyon (Potansiyodinamik Kutuplaşma) Yöntemi ve Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EDS) İle Korozyon Analizleri

Ni-P-W/h-BN akımsız kompozit kaplamaların farklı değerlerdeki kaplama çözeltisine katılan h-BN parçacıklarının açık devre potansiyeli eğrileri ile karşılaştırma amacıyla kaplamalar açık devre potansiyel eğrileri Şekil 5.4'te verilmiştir. Bir diğer açık devre potansiyeli korozyon analizi ise Ni-P, Ni-P-W ve Ni-P-W/h-BN akımsız kaplamaların karşılaştırılması Şekil 5.5'te gösterilmiştir. Ni-P-W/h-BN(2gl) akımsız kompozit

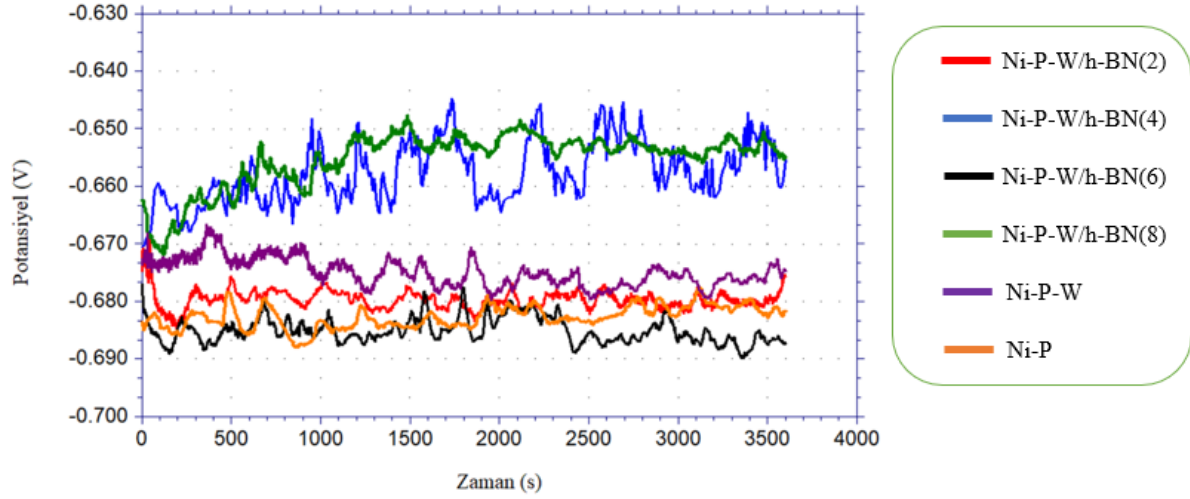
kaplamaların açık devre potansiyeli analizinde başlangıç potansiyeli -0,674 V olarak ve 3600 s sonundaki potansiyeli ise -0,675 olarak tespit edilmiştir. Ni-P-W/h-BN(4gl) akımsız kompozit kaplamaların açık devre potansiyeli analizinde başlangıç potansiyeli -0,67 V olarak ve 3600 s sonundaki potansiyeli ise -0,655 V olarak tespit edilmiştir. Ni-P-W/h-BN(6gl) akımsız kompozit kaplamaların açık devre potansiyeli analizinde başlangıç potansiyeli -0,677 V olarak ve 3600 s sonundaki potansiyeli ise -0,687 V olarak tespit edilmiştir. Ni-P-W/h-BN(8gl) akımsız kompozit kaplamaların açık devre potansiyeli analizinde başlangıç potansiyeli -0,662 V olarak ve 3600 s sonundaki potansiyeli ise -0,655 V olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.4'te açık devre potansiyeli eğrilerinin değerleri değerlendirildiğinde farklı h-BN kaplama oranlarında farklı korozyon potansiyelleri olduğu görülmüştür. Ni-P-W/h-BN(2gl) ve Ni-P-W/h-BN(6gl) oranlardaki akımsız kaplamaların potansiyelleri birbirlerine yakın ve daha eksi tarafta oldukları tespit edilmiştir. Ni-P-W/h-BN(4gl) ve Ni-P-W/h-BN(8gl) oranlardaki akımsız kaplamaların potansiyelleri birbirlerine yakın ve daha artı tarafta oldukları tespit edilmiştir.



Şekil 5.4 Farklı oranlardaki Ni-P-W/h-BN akımsız kompozit kaplamaların OCP analiz eğrileri

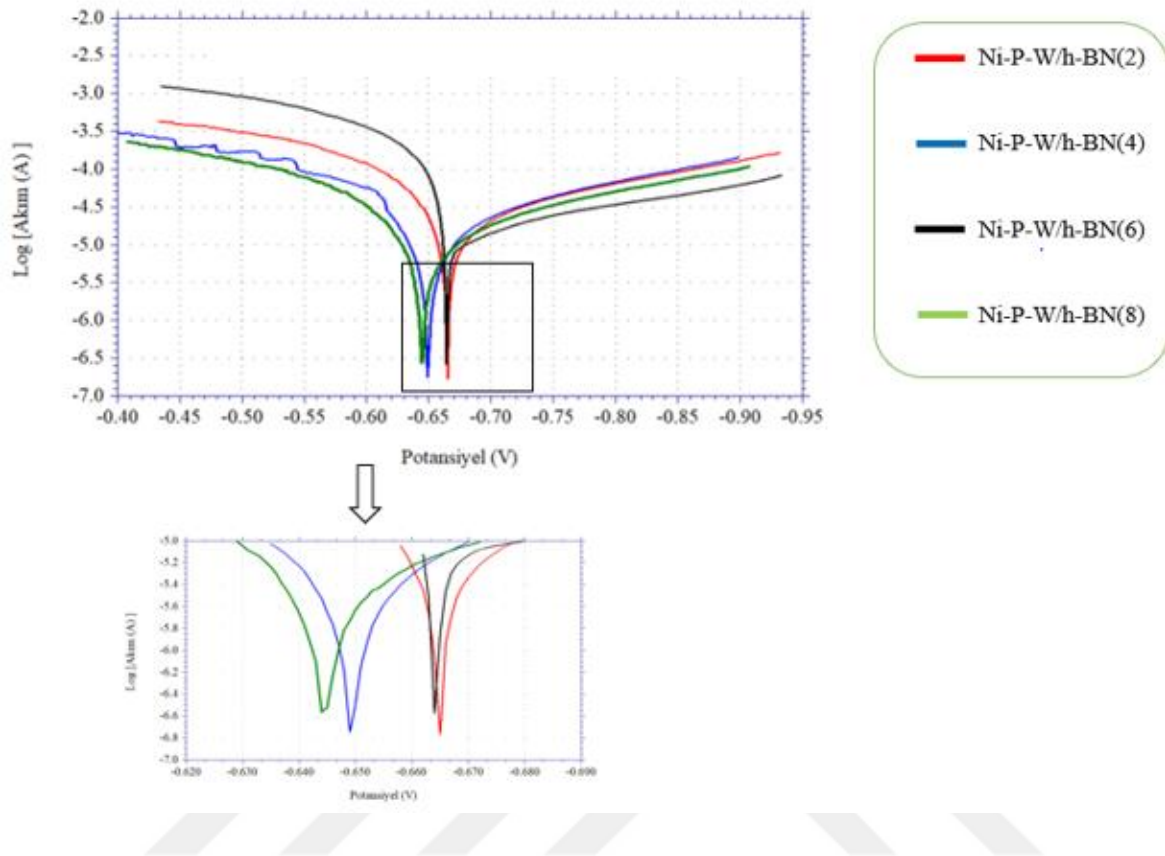
Şekil 5.5'te açık devre potansiyeli grafikleri değerlendirildiğinde Ni-P, Ni-P-W ve farklı oranlardaki Ni-P-W/h-BN akımsız kaplamalar tespit edilen sonuçlara bakıldığında; Ni-P, Ni-P-W, Ni-P-W/h-BN(2gl) ve Ni-P-W/h-BN(6gl) açık devre potansiyelleri birbirlerine

yakın oldukları tespit edilmiştir. En düşük potansiyel sahip olan ise Ni-P-W/h-BN(6gl) akımsız kompozit kaplama olarak tespit edilmiştir. En yüksek potansiyele sahip olan ise Ni-P-W/h-BN(8gl) olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.5 Ni-P, Ni-P-W ve farklı oranlardaki Ni-P-W/h-BN akımsız kaplamaların OCP analizi eğrileri

Şekil 5.2.3.3'te Tafel grafikleri değerlendirildiğinde, Ekor (V) değerlerinin birbirlerine yakın olduğu görülmektedir ve Çizelge 5.4'te değerleri sıralanmıştır. Icor (A) değerleri ise farklılık gösterdiği görülmektedir ve Çizelge 5.4'te değerleri sıralanmıştır.



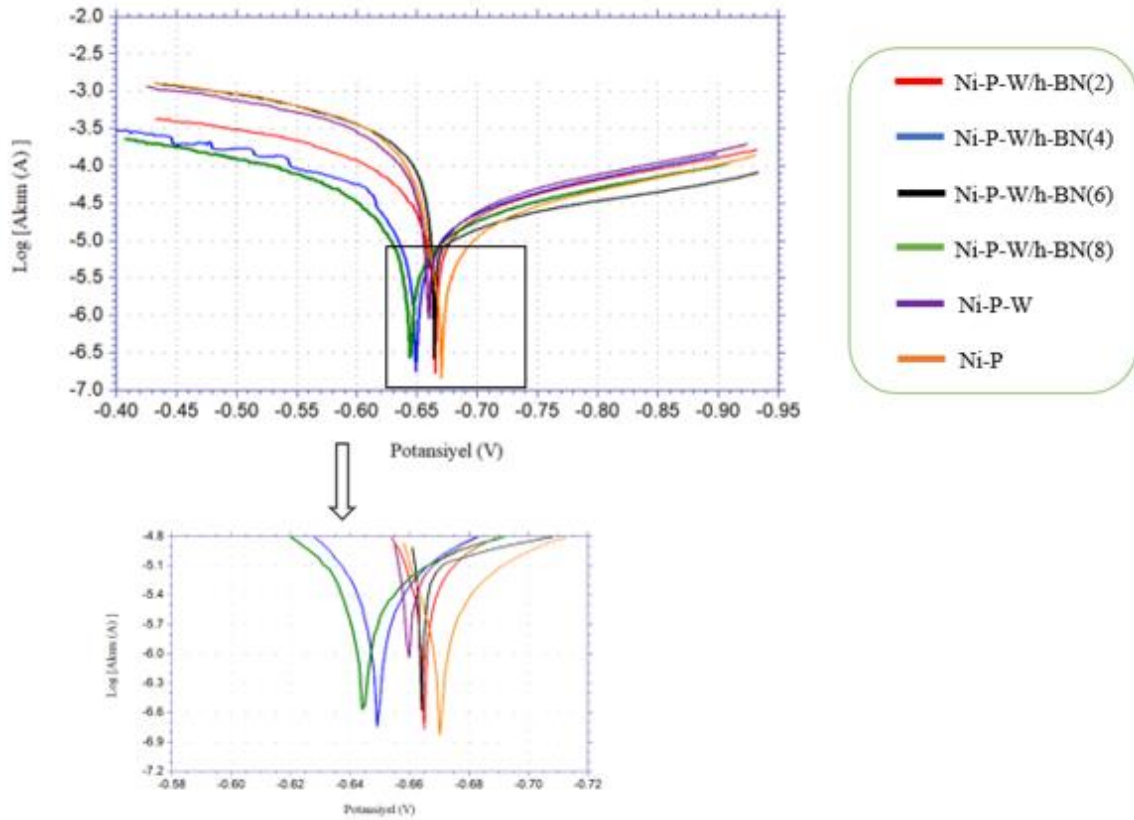
Şekil 5.6 Farklı oranlardaki Ni-P-W/h-BN akımsız kompozit kaplamaların Tafel analizi eğrileri

Çizelge 5.3 Ni-P-W/h-BN akımsız kompozit kaplamaların korozyon potansiyeli (E_{kor}), korozyon akımı (I_{kor}) ve korozyon hızı verileri

Akımsız Kaplamalar	E_{kor} (V)	I_{kor} (A)	Korozyon hızı (mm/yıl)
Ni-P-W/h-BN(2g/l)	-0,665	4,975e-005	0
Ni-P-W/h-BN(4g/l)	-0,649	2,208e-005	0
Ni-P-W/h-BN(6g/l)	-0,664	1.733e-004	0
Ni-P-W/h-BN(8g/l)	-0,644	2,084e-005	0

Şekil 5.6'da Tafel grafikleri değerlendirildiğinde, Ni-P, Ni-P-W ve Ni-P-W/h-BN'nin E_{kor} (V) değerlerinin birbirlerine yakın olduğu görülmektedir ve Çizelge 5.3'te değerleri sıralanmıştır. Ni-P, Ni-P-W ve Ni-P-W/h-BN'nin I_{kor} (A) değerlerinin birbirlerine yakın olduğu görülmektedir ve Çizelge 5.3'te değerleri sıralanmıştır. Ni-P, N-P-W ve N-P-W/h-BN Tafel değerleri değerlendirildiğinde sonuçların birbirine yakın olduğu görülmektedir ve

Tafel sonuçları değerlendirildiğinde korozyon dirençlerinde önemli bir farkın görünmediği tespit edilmiştir.

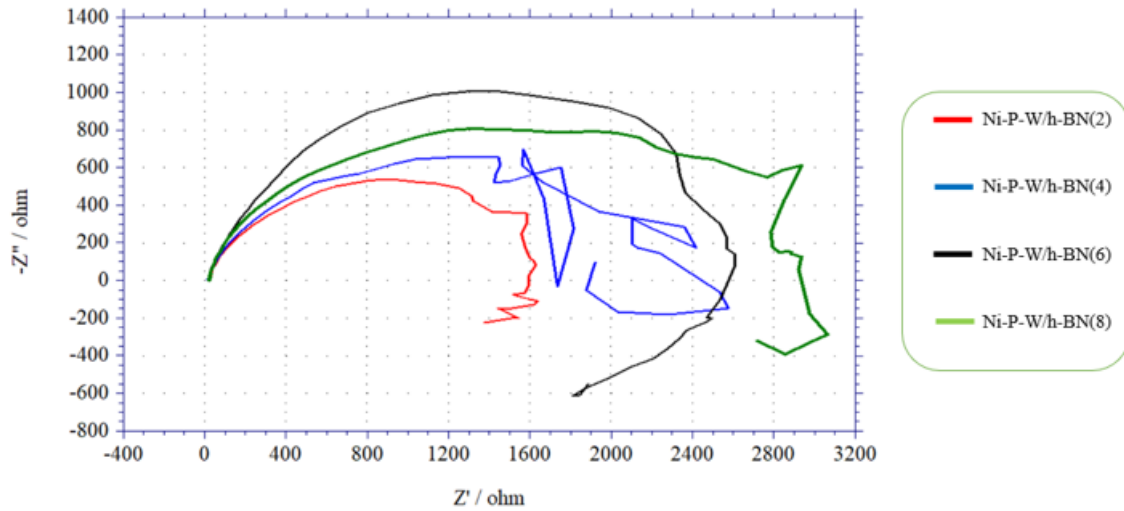


Şekil 5.7 Ni-P, Ni-P-W ve farklı oranlardaki Ni-P-W/h-BN akımsız kaplamaların Tafel analizi eğrileri

Çizelge 5.4 Ni-P ve Ni-P-W akımsız kaplamaların ve Ni-P-W/h-BN akımsız kompozit kaplamaların korozyon potansiyeli (E_{kor}), korozyon akımı (I_{kor}) ve korozyon hızı verileri

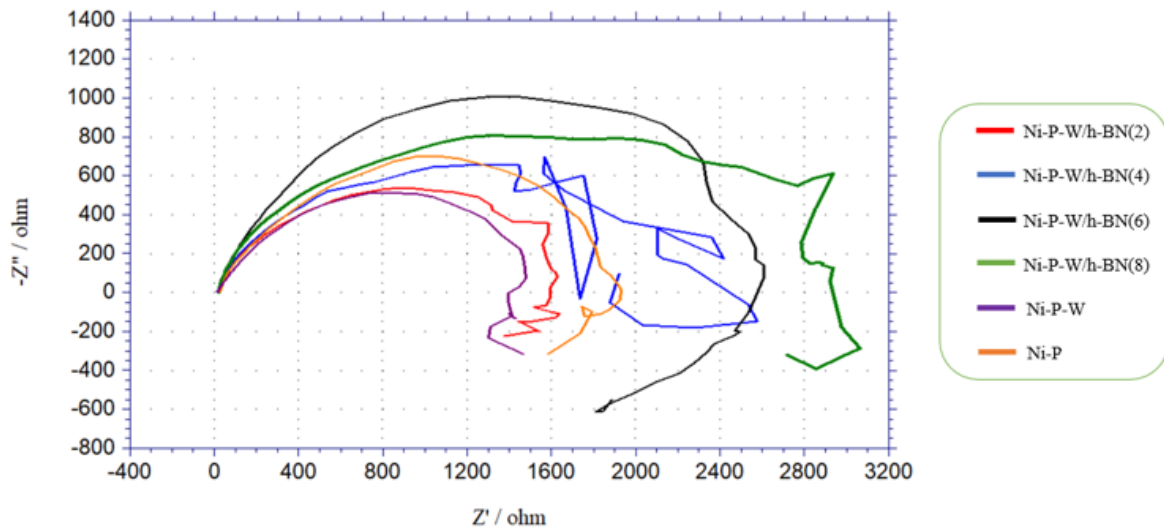
Akımsız Kaplamalar	E_{kor} (V)	I_{kor} (A)	Korozyon hızı (mm/yıl)
Ni-P	-0,670	2,392e-005	5,455e+001
Ni-P-W	-0,660	1,056e-004	2,407e+002
Ni-P-W/h-BN(2g/l)	-0,665	4,975e-005	0
Ni-P-W/h-BN(4g/l)	-0,649	2,208e-005	0
Ni-P-W/h-BN(6g/l)	-0,664	1,733e-004	0
Ni-P-W/h-BN(8g/l)	-0,644	2,084e-005	0

Farklı oranlarda akımsız kaplam çözeltisine ilave edilen h-BN kompozit parçacıkları oluşturulan akımsız Ni-P-W/h-BN kompozit kaplamaların elektrokimyasal empedans spektroskopisi çalışmaları ise 10 mV genlikli AC akımla 100 kHz – 10 mHz (10^5 - 10^{-2} Hz) aralığında gerçekleştirilmiştir. Yapılan bütün korozyon testlerinde %3,5 sodyum klorür (NaCl) sulu çözeltisinde gerçekleştirilmiştir. Akımsız Ni-P-W kompozit kaplamalarına seramik parçacıkların dahil edilmesi, korozyon potansiyelini daha pozitif değerlere taşımış ve korozyon akım yoğunluğu azalmış ve takviyesiz biriktirmelere kıyasla en yüksek E_{corr} 'u sergilediği görülmüştür. Korozyon direncindeki iyileşme, pasif bir katman görevi gören birikimlerdeki seramik parçacıkların oksijen geçirgenliğini azaltabilmesine ve matris ile elektrolit çözeltisi arasındaki elektron ve iyon taşınımını koruyabilmesine bağlanabildiği görülmektedir (Akyol vd., 2018). Şekil 5.8'te EES yöntemi ile elde edilen farklı oranların ilave edilmesi ile elde edilen Ni-P-W/h-BN akımsız kompozit kaplamalara ait grafiği verilmiştir. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi grafiğinde tespit edilen veriler incelenmiştir. Yapılan Şekil 5.8'teki grafiğin y eksenine göre olan incelemelerinde; üretilen Ni-P-W/h-BN(2gl) akımsız kompozit kaplama 537 $-Z''$ /ohm tepe değerine, Ni-P-W/h-BN(6gl) akımsız kompozit kaplama 656 $-Z''$ /ohm tepe değerine, Ni-P-W/h-BN(6gl) akımsız kompozit kaplama 1005 $-Z''$ /ohm tepe değerine ve Ni-P-W/h-BN(8gl) akımsız kaplama ise 795 $-Z''$ /ohm tepe noktasına sahip olduğu tespit edilmiştir. Şekil 5.8'deki grafiğin x eksenine göre olan incelemelerinde; üretilen Ni-P-W/h-BN(2gl) akımsız kompozit kaplama 1632 Z' /ohm değerinde, Ni-P-W/h-BN(4gl) akımsız kompozit kaplama 2414 Z' /ohm değerinde, Ni-P-W/h-BN(6gl) akımsız kompozit kaplama 2611 Z' /ohm değerinde ve Ni-P-W/h-BN(8gl) akımsız kompozit kaplama ise 2936 Z' /ohm değerinde olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen veriler çerçevesinde Şekil 5.8 değerlendirildiğinde; h-BN kompozit parçacık oranının 6gl'ye kadar olan içerikte korozyon artışı sağlandığı tespit edilmiştir. h-BN kompozit parçacık oranının 6gl'yi geçmesi korozyon direncinde azalmanın yaşandığı tespit edilmiştir.



Şekil 5.8 Farklı oranlardaki Ni-P-W/h-BN akımsız kompozit kaplamaların Empedans analizi eğrileri

Şekil 5.9 değerlendirildiğinde; Ni-P, Ni-P-W ve farklı oranlardaki Ni-P-W/h-BN yukarıda veriler çerçevesinde değerlendirmeleri yapılmıştır ve burada ise bütün yapılan akımsız kaplama çalışmasının elektrokimyasal empedans spektroskopisi değerlendirilecektir. Tespit edilen verileri ve şekil 4.8 birlikte incelendiğinde; 2gl'lik h-BN oranı Ni-P korozyon direncinden daha az bir korozyon direncine sahip olduğu ancak Ni-P akımsız kaplamasına ilave edile tungstenden dolayı oluşan korozyon direncindeki azalmayı iyileştirdiği tespit edilmiştir. 4gl h-BN ilaveli akımsız Ni-P-W/h-BN akımsız kaplaması Ni-P korozyon direnci ile benzer değerlere sahip olduğu görülmektedir. 4gl'yi aşan h-BN parçacık ilavesi Ni-P korozyon direncinden dahi iyi bir korozyon direnci gösterdiği tespit edilmiştir. Bu tez çalışmasında EES grafikleri değerlendirildiğinde optimum korozyon direncini veren h-BN kompozit katkılı akımsız kompozit kaplama Ni-P-W/h-BN(6gl) olduğu tespit edilmiştir.

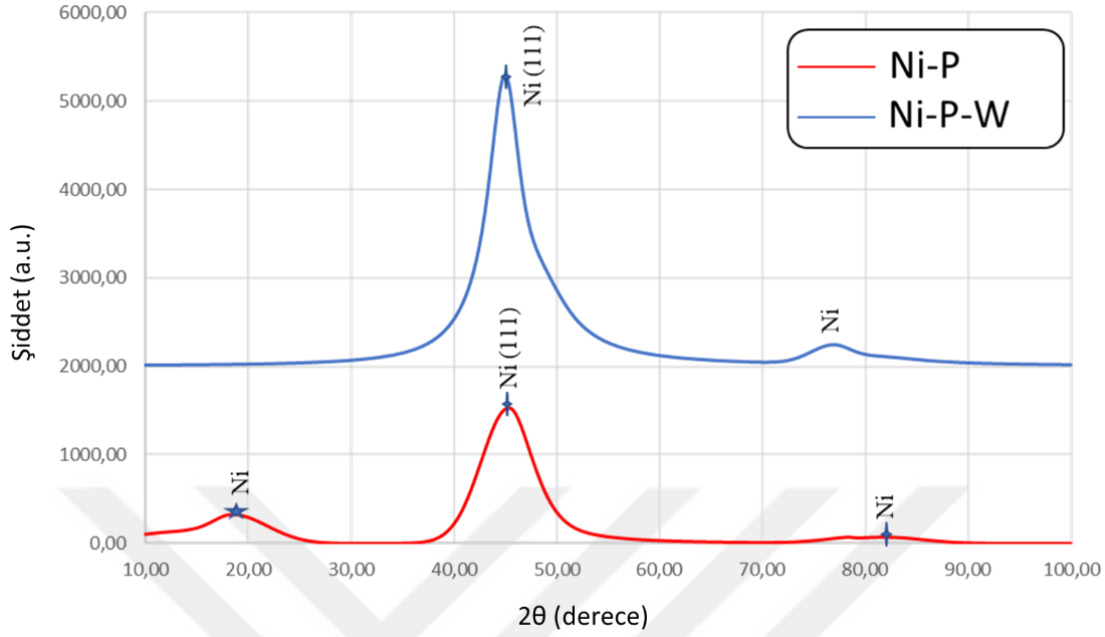


Şekil 5.9 Ni-P, Ni-P-W ve farklı oranlardaki Ni-P-W/h-BN akımsız kaplamaların empedans analizi eğrileri

5.3. Akımsız Kaplamaların XRD Analizleri

5.3.1. Ni-P ve Ni-P/W Alaşımli Akımsız Kaplamaların XRD Analizleri

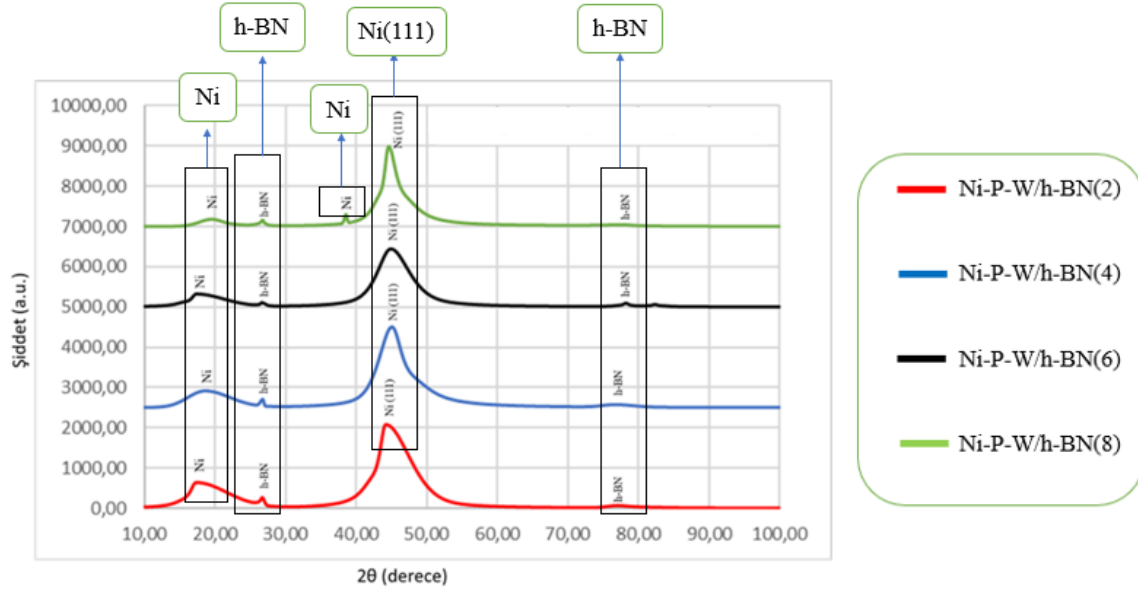
Ni-P ve Ni-P-W alaşım kaplamalarına ait XRD görüntüleri Şekil 5.10’da verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi Ni-P akımsız kaplamanın XRD desenleri incelendiğinde 45° ’de Ni (111) tepesinin diğer değerlere göre çok yüksek şiddette olduğu görülmektedir. Ni (111) tepesinin yanı sıra nikel özü 81,30°’de ve 18,22°’de küçük şiddette XRD desenlerinin oluştuğu görülmektedir. Şekil 5.3.1.1’de Ni-P-W akımsız alaşımli kaplamanın XRD desenleri incelendiğinde 45° ’de Ni (111) tepesinin görüldüğü ve tespit edilen bu desenin diğer desenlerden daha şiddetli olduğu görülmüştür. Ni (111) tepesinin yanı sıra nikel özü 76,74°’de Ni deseni daha düşük şiddette oluştuğu tespit edilmiştir. Ni-P ve Ni-P-W akımsız kaplamaların XRD desenlerini karşılıklı olarak değerlendirildiğinde; Ni-P-W akımsız kaplamasının XRD desenlerinin Ni-P akımsız kaplama XRD desenlerinden farklı bir yapıda olduğu görülmüştür. 18,22°’de nikel özü bir şiddete rastlanmadığı ve Ni-P akımsız kaplamada 81,30°’de oluşan nikel XRD deseni ise 76,74°’de oluşmuş ve şiddeti Ni-P akımsız kaplamanın XRD deseninden daha büyük olduğu görülmüştür.



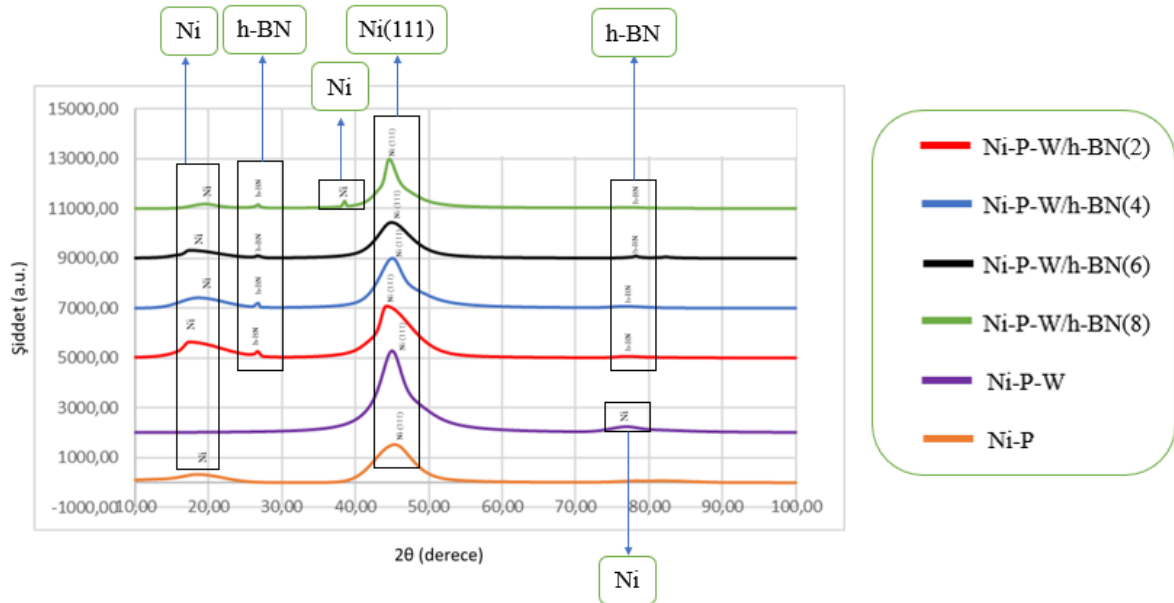
Şekil 5.10 Ni-P ve Ni-P-W alaşımlı akımsız kaplamaların XRD analiz eğrileri

5.3.2. Ni-P-W/h-BN Akımsız Kompozit Kaplamada XRD Analizleri

Ni-P-W/h-BN alaşım kompozit kaplamalarına ait XRD görüntüleri Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi Ni-P-W/h-BN akımsız kaplamanın XRD desenleri incelendiğinde 45° ’de Ni (111) tepesinin diğer değerlere göre çok yüksek şiddette olduğu görülmektedir. XRD görüntülerinde h-BN katkısının olduğunu gösteren tepelerin meydana geldiği görülmüştür. $27^{\circ}(2\theta)$ civarında ve $77^{\circ}(2\theta)$ civarında piklerin meydana geldiği görülmektedir.



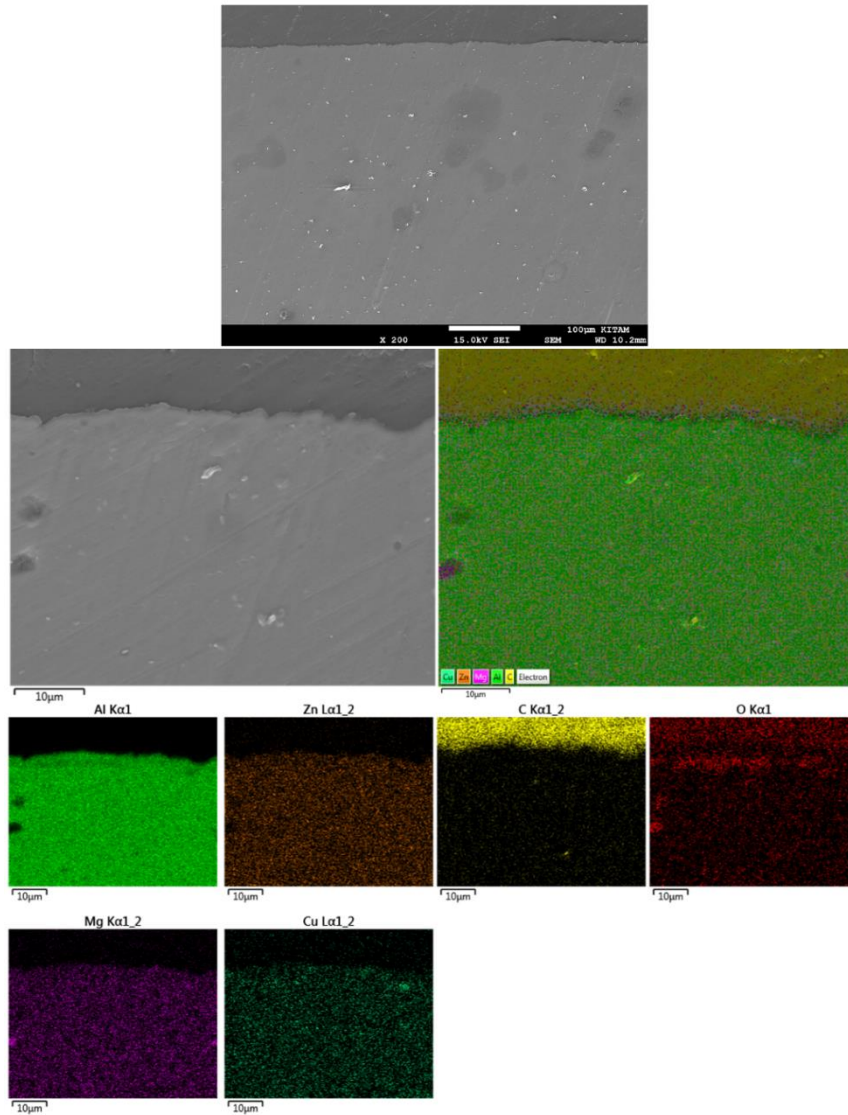
Şekil 5.11 Ni-P/W/h-BN akımsız kompozit kaplamada takviye parçacık h-BN parçacıklarının XRD analiz eğrileri



Şekil 5.12 Ni-P ve Ni-P-W akımsız kaplamalar ve Ni-P/W/h-BN akımsız kompozit kaplamada takviye parçacık h-BN parçacıklarının XRD analiz eğrileri

5.4. Akımsız Kaplamaların Morfoloji ve İçerik (SEM ve EDS) Analizleri

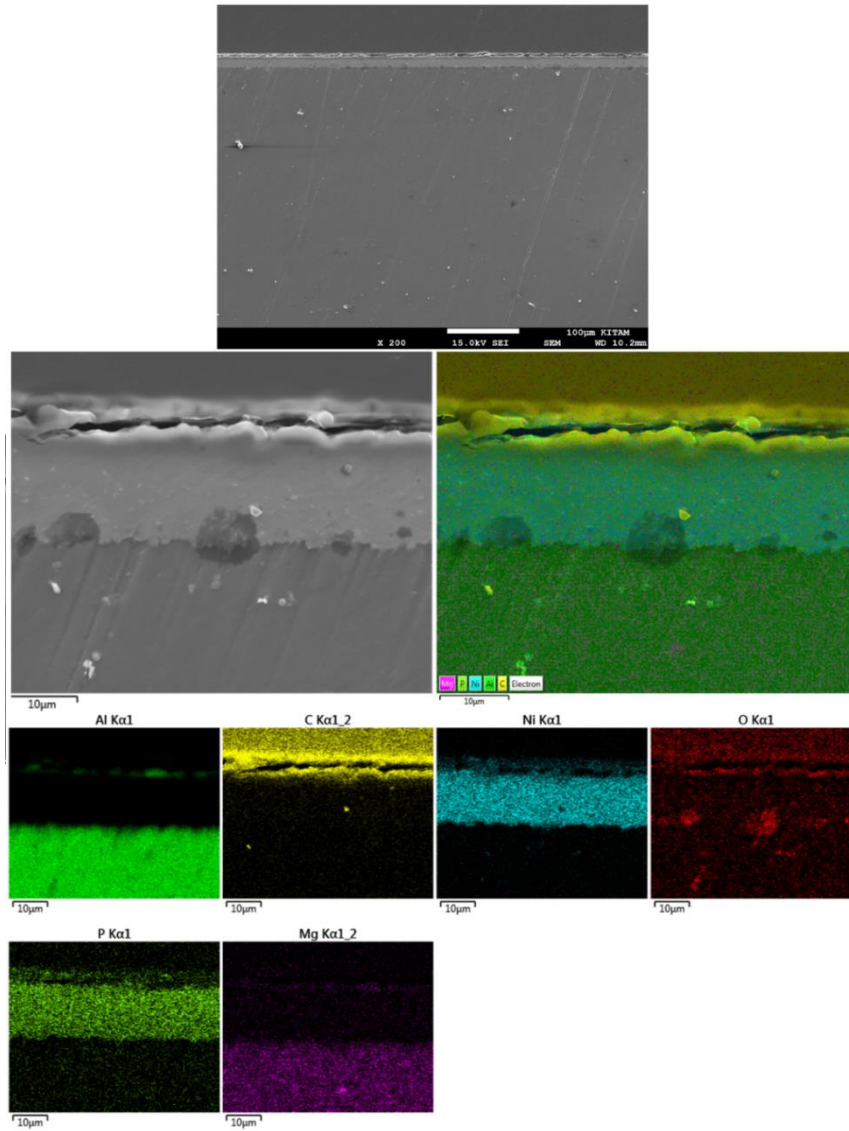
Numune kesitleri alınarak SEM/EDS analizleri yapılmıştır. Alüminyum altlığın Şekil 5.13'teki gibi SEM/EDS görüntüleri bulunmaktadır, yukarıda içeriği belirtilen alüminyum altlığın SEM/EDS görüntüleri ile uyduğu gözlenmektedir. Al 2024 T3 Yüzeyinde oksitlenme gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 5.13 Alüminyum altlık SEM/EDS görüntüleri

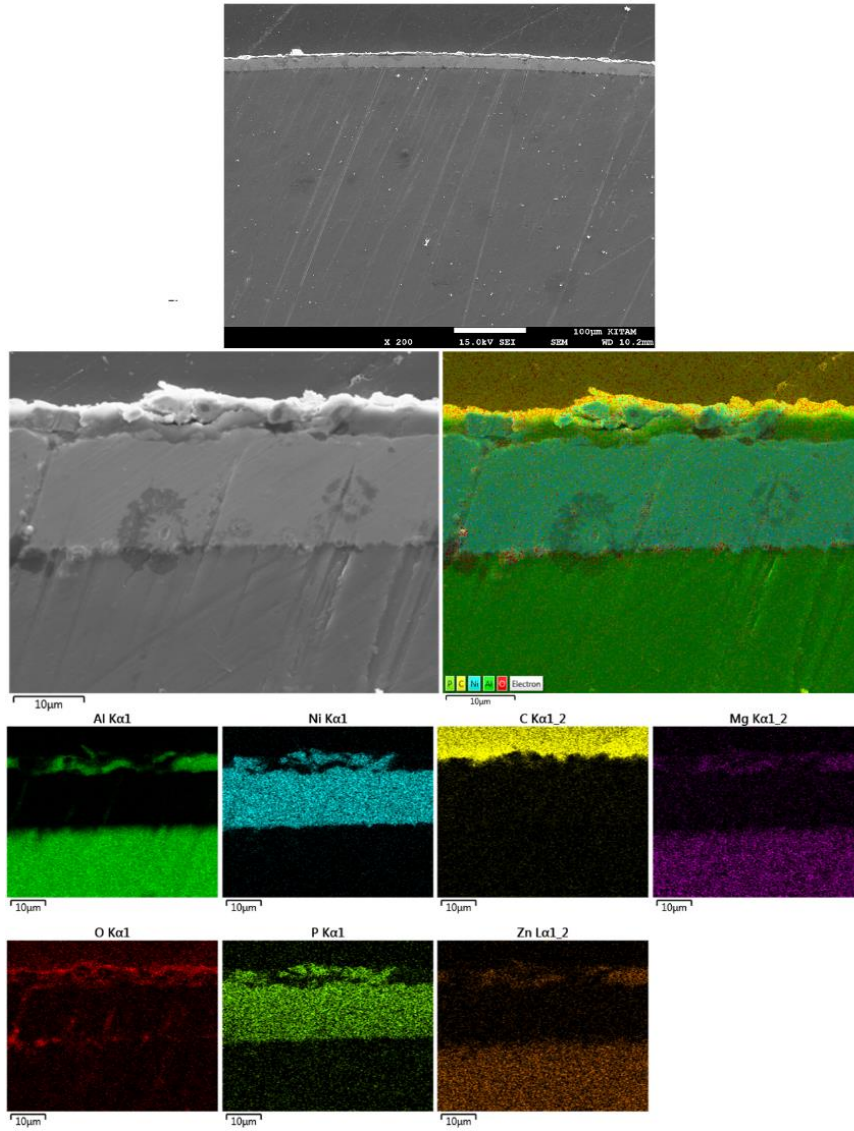
5.4.1. Ni-P ve Ni-P-W Alaşımlı Akımsız Kaplamaların Morfoloji ve İçerik (SEM ve EDS) Analizi

Alüminyum altlık üzerine Ni-P akımsız kaplamanın iyi bir şekilde kaplandığı Şekil 5.14'te görülmektedir. Kaplamanın içerik analizine baktığımız zaman Ni elementinin baskın bir şekilde oluştuğu ve P elementinin ise Ni elementi içinde olduğu Şekil 5.14'te görülmektedir. Altlık malzeme ile kaplama arasında bazı bölgelerde oksitlenme meydana geldiği görülmektedir. Kaplama kalınlığı 10µm ile 20µm arasında değiştiği görülmektedir.



Şekil 5.14 Ni-P akımsız kaplama SEM/EDS analizi

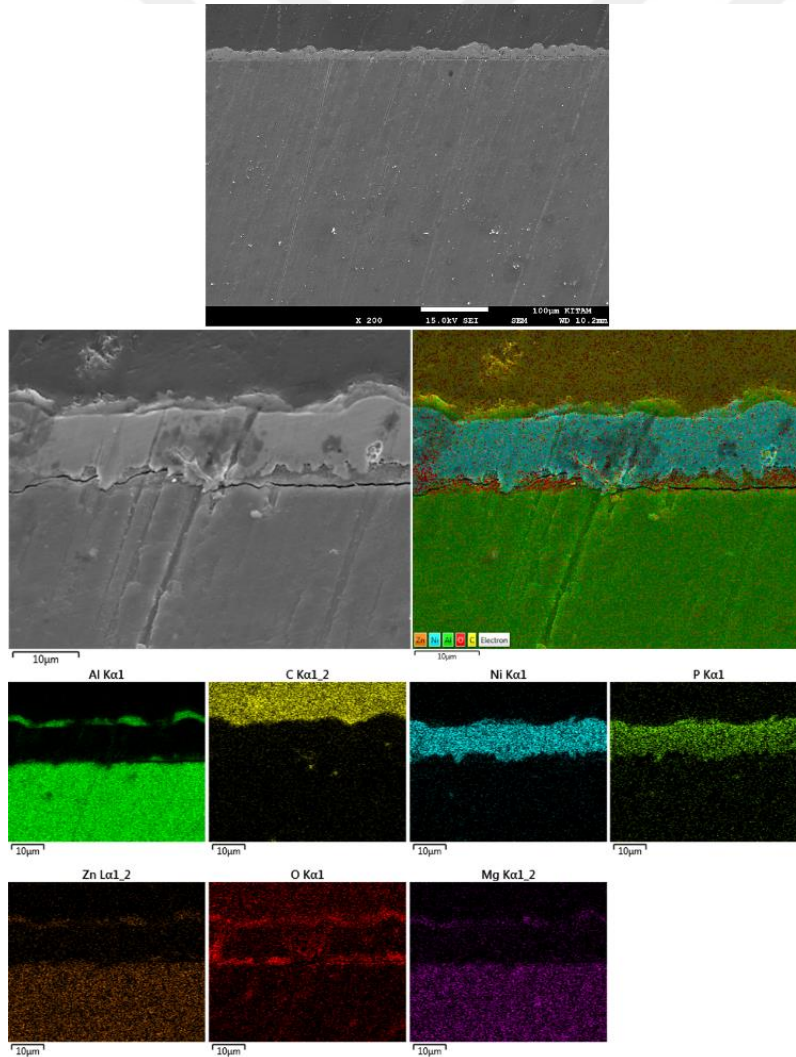
Ni-P-W akımsız kaplamanın SEM/EDS görüntüleri Şekil 5.15'te verilmiştir. Ni-P-W kaplamanın Ni-P kaplamaya göre daha kalın olduğu görülmektedir. Kaplamada Ni ve P elementlerinin olduğu görülmüştür. Kaplama kalınlığının daha kalın olmasının sebebi ise kaplamaya katılan tungsten varlığı olarak değerlendirilmiştir. Kaplama ile altlık arasında oksitlenme meydana geldiği görülmüştür ve oksitlenmeden dolayı kaplamada bazı çatlakların olduğu görülmektedir.



Şekil 5.15 Ni-P-W akımsız kaplama SEM/EDS analizi

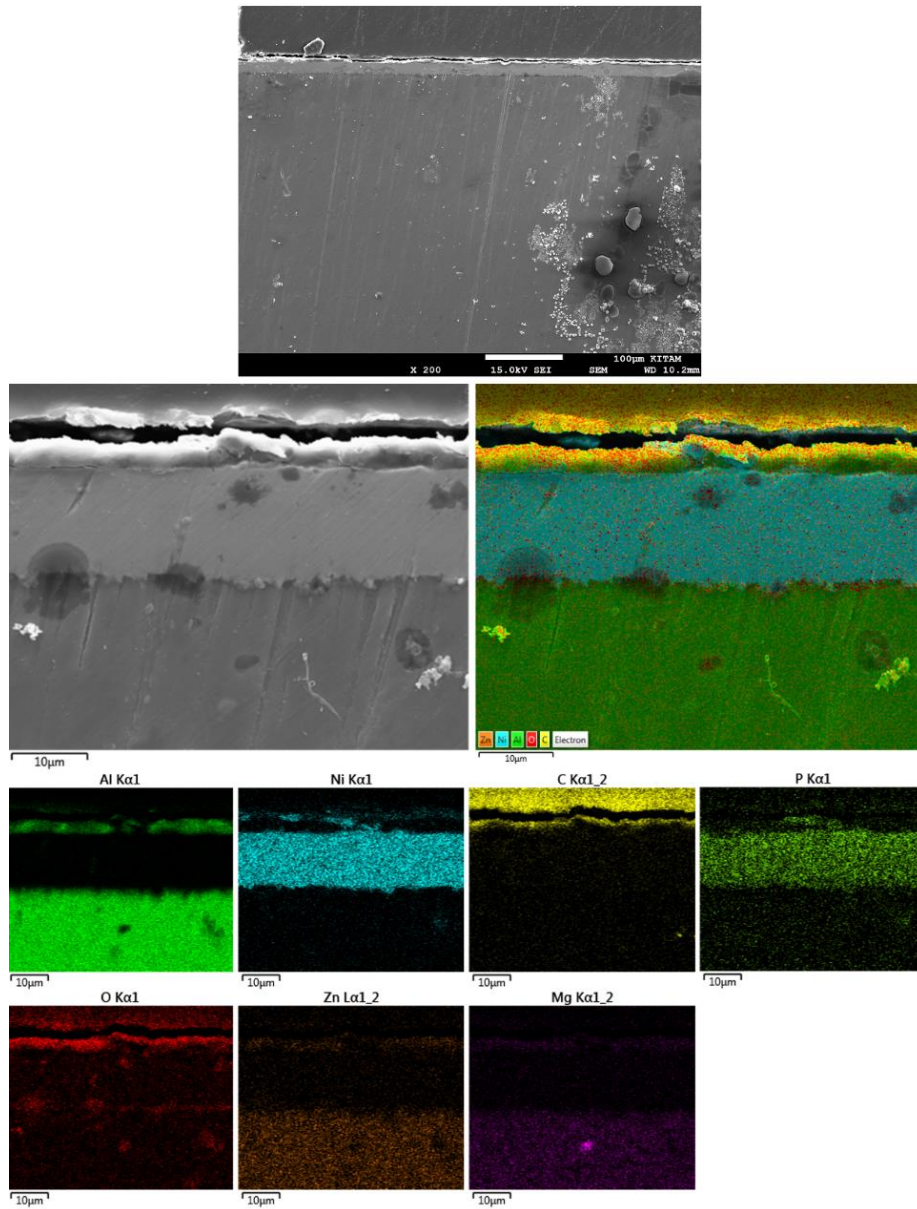
5.4.2. Ni-P-W/h(BN) Akımsız Kompozit Kaplamada Takviye Parçacık h(BN) Tozlarının Morfoloji ve İçerik (SEM ve EDS) Analizi

Ni-P-W/h-BN(2g/L) akımsız kompozit kaplamanın SEM/EDS görüntüleri Şekil 5.16’de verilmiştir. Oluşan kaplama Ni-P ve Ni-P-W kaplamalarından daha düşük kalınlıkta olduğu görülmüştür. Kaplamanın düzgün bir şekilde oluşmadığı girintili çıkıntılı meydana geldiği görülmüştür. Kaplama ile altlık arasında ise diğer kaplamalara göre daha çok oksitlenme olduğu ve kaplama içinde de oksitlenme olduğu görülmektedir ve kaplama yapışma performansının düştüğü görülmektedir. Kaplamada Ni ve P elementlerinin oluştuğu görülmektedir.



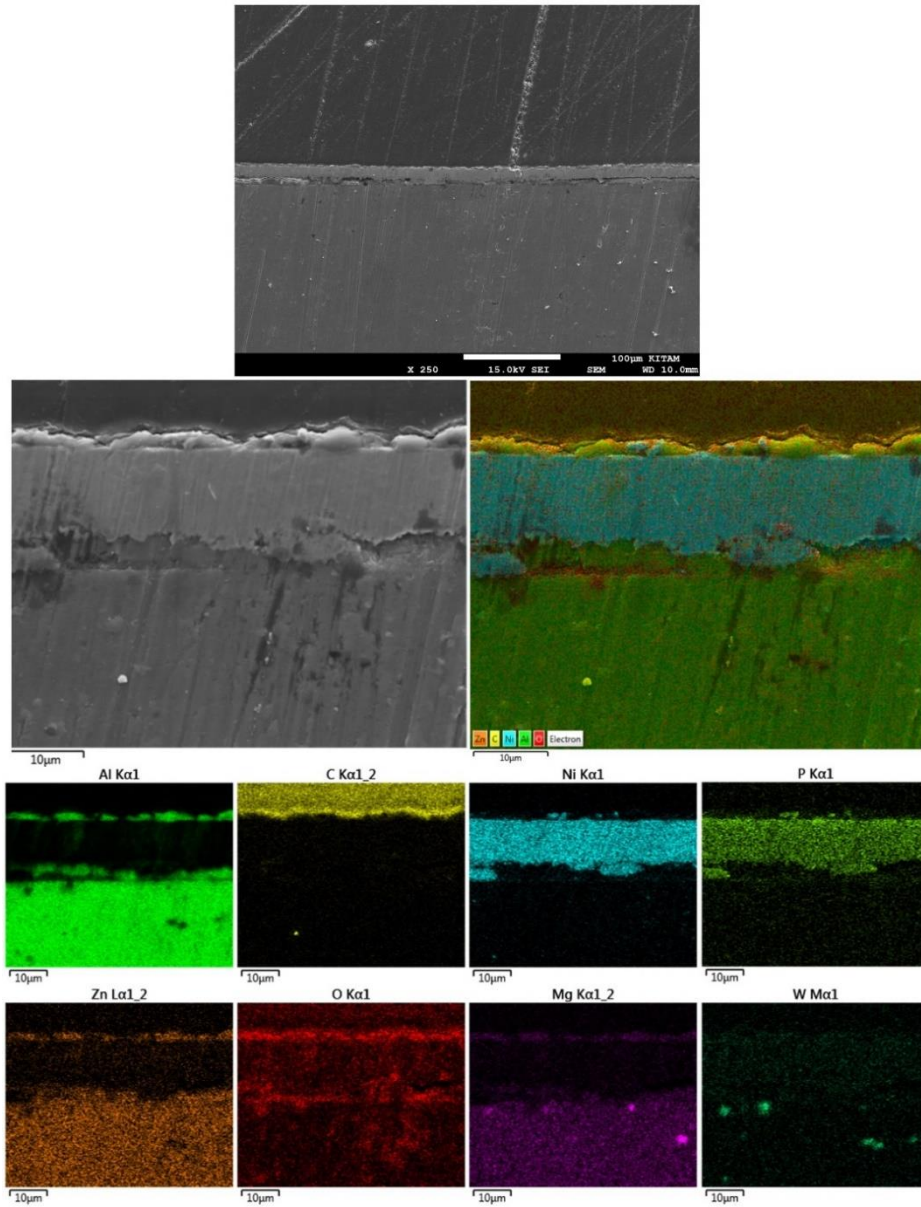
Şekil 5.16 Ni-P-W/h-BN(2g/L) akımsız kaplama SEM/EDS analizi

Ni-P-W/h-BN(4g/L) akımsız kompozit kaplamanın SEM/EDS görüntüleri Şekil 5.17’te verilmiştir. Kompozit kaplamanın kalınlığının 10 μ m ile 20 μ m arasında olduğu görülmektedir. Kaplamanın h-BN katılan kaplamalar arasında en iyi kaplama özelliğine sahip olduğu ve kaplama altlık malzemeye iyi bir şekilde yapıştığı görülmektedir. Ni ve P elementlerinin kaplama içinde bulunduğu görülmektedir. Kaplama ve altlık malzeme arasında oksitlenmenin daha az olduğu ve altlık malzemeye iyi yapışma özelliği sergilemiştir.



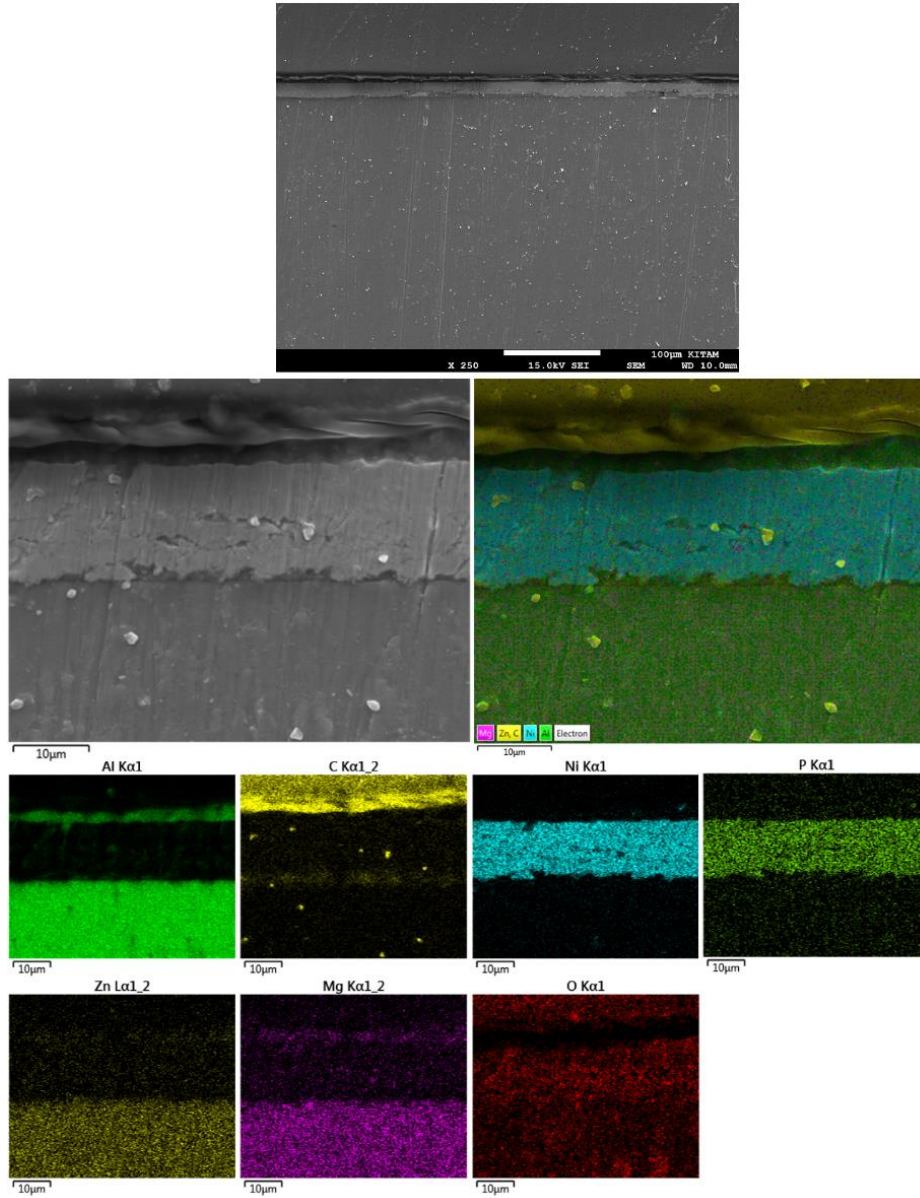
Şekil 5.17 Ni-P-W/h-BN(4g/L) akımsız kaplama SEM/EDS analizi

Ni-P-W/h-BN(6g/L) akımsız kompozit kaplamanın SEM/EDS görüntüleri Şekil 5.18'te verilmiştir. Kaplama kalınlığının h-BN(4g/L)'den daha az olduğu ve kaplama kalınlığının bazı yerlerde düşüp yükseldiği görülmüştür. Kaplama içeriğine baktığımızda Ni ve P elementleri yoğunlukta ve W elementi ise nadir bir şekilde görüldüğü tespit edilmiştir. Kaplama ile altlık malzeme arasında oksitlenmenin h-BN(4g/L)'den daha fazla meydana geldiği ve bu nedenle altlık ile daha düşük yapışma özelliği göstermiştir.



Şekil 5.18 Ni-P-W/h-BN(6g/L) akımsız kaplama SEM/EDS analizi

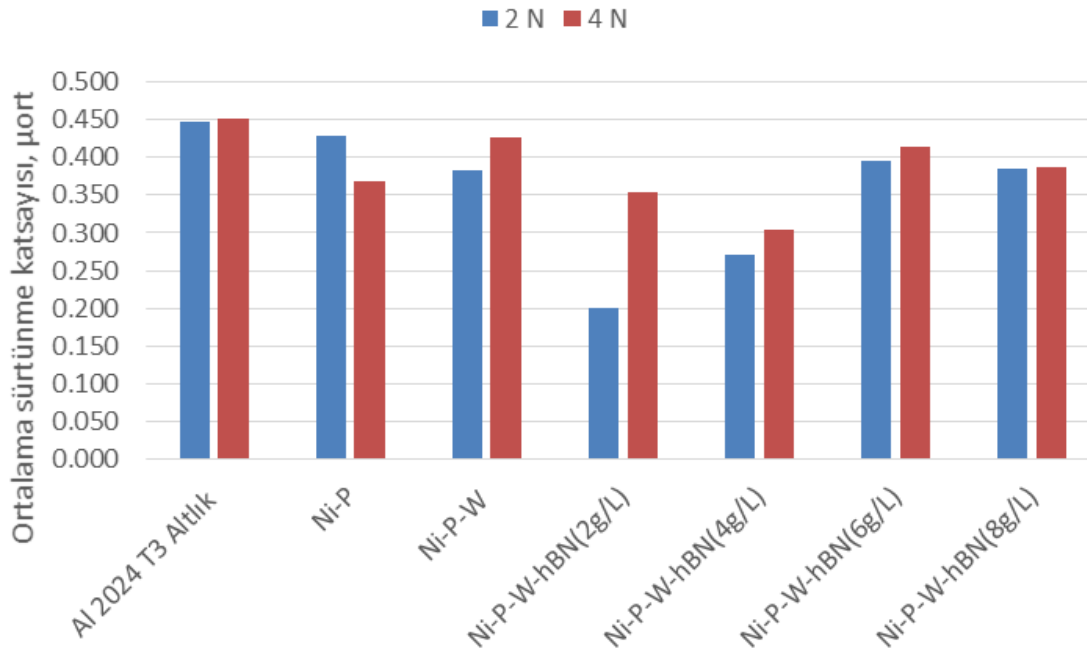
Ni-P-W/h-BN(8g/L) akımsız kompozit kaplamanın SEM/EDS görüntüleri Şekil 5.19'te verilmiştir. Kaplama kalınlığının h-BN(6g/L) ile benzer olduğu görülmüştür. Kaplama ile altlık arasında oksitlenmeden dolayı yer yer tam olarak yapışmadığı ve düzgün oluşmadığı görülmektedir. Kaplama da yer yer yırtılmaların ve çatlamların meydana geldiği tespit edilmiştir. Kaplama içeriğinde Ni ve P elementlerinin bulunduğu görülmüştür.



Şekil 5.19 Ni-P-W/h-BN(8g/L) akımsız kaplama SEM/EDS analizi

5.5. Ni-P, Ni-P-W ve Ni-P-W/h(BH) Akımsız Kompozit Kaplamaların Aşınma Analizleri

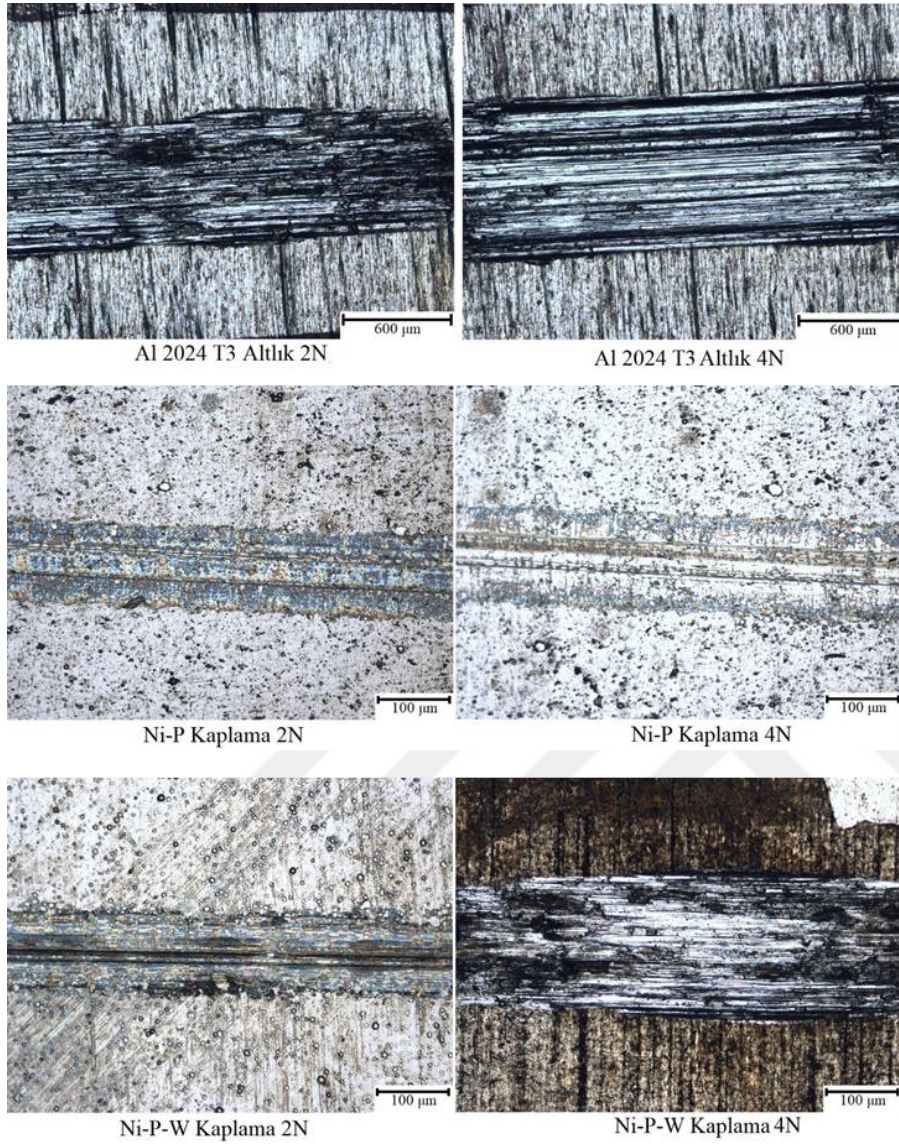
Al 2024 T3 altlık malzeme üzerine yapılan farklı kaplamaların 2 ve 4 N yük altında ortalama sürtünme katsayıları Çizelge 5.5’de verilmiştir. Aşınma deneyleri sonucunda kaplanmış ve kaplanmamış numunelerdeki aşınma miktarlarının aşınma yükünün artışına bağlı olarak arttığı ve en yüksek aşınma miktarının kaplanmamış numunelerde meydana geldiği görülmüştür (Matik & Citak, 2011). 2 N yük altında altlık malzemede 0,45 civarında bulunan ortalama sürtünme katsayısı Ni-P kaplanan yüzeyde 0,43, Ni-P-W kaplanan yüzeyde 0,38 bulunmuştur. Akımsız Ni-P çözeltisine eklenen W’nin gerçekleştirilen Ni-P-W kaplamanın aşınma direncinin Ni-P aşınma direncinden daha yüksektir (Akyol vd., 2018). Ni-P-W kaplama karışımına 2 g/L yoğunlukta h-BN eklenmesi ortalama sürtünme katsayısını taban malzemeye kıyasen %56 azalma ile 0,20 seviyelerine düşürmüştür. Bu durum h-BN’nin yağlayıcı etkisine atfedilebilir. Kaplamaya eklenen h-BN yoğunluğunun 2’den 4 g/L’ye çıkarılması ile ortalama sürtünme katsayısı 0,27 seviyelerine yükselmesi dikkate değer bulunmuştur.



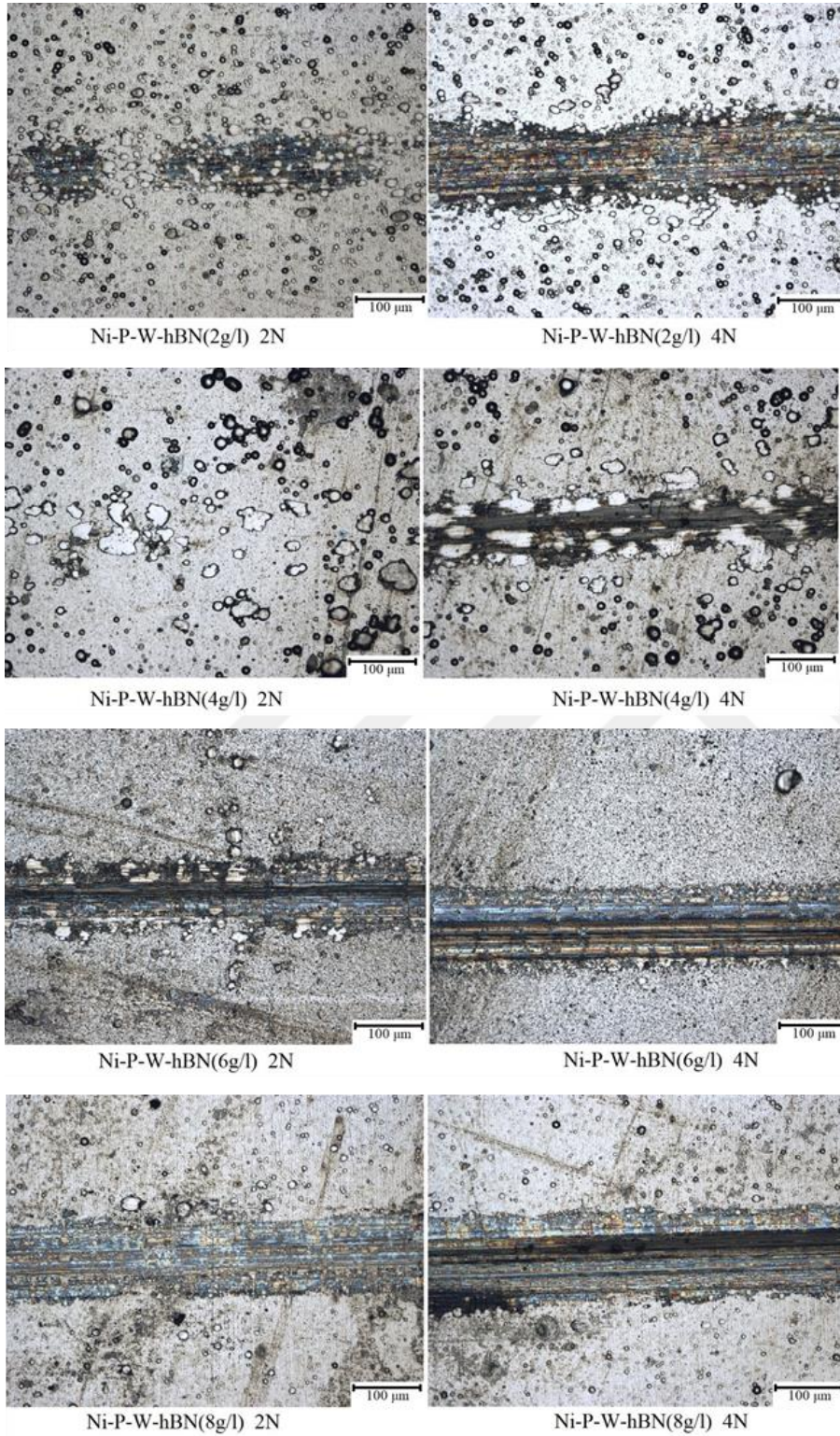
Çizelge 5.5 Ni-P ve Ni-P-W akımsız kaplamaların ve Ni-P-W/h-BN akımsız kompozit kaplamaların aşınma izi genişlikleri optik mikroskop görüntüleri değerleri

Çözeltiye eklenen h-BN yoğunluğunun daha da artması (6 ve 8 g/L) ile ortalama sürtünme katsayısı 0,38-0,39 seviyelerine yükselmiştir. 2 g/L üzerinde artan h-BN yoğunluğu ile sürtünme katsayısının artışı 2 g/L üzerinde yoğunluklarda h-BN nin yapıda homojen olmayan dağılımına, topaklanmasına atfedilebilir. Öte yandan, 4 N yük altında yapılan deneylerde benzer sonuçlar görülmüştür ve en düşük ortalama sürtünme katsayısı Ni-P-W'ye 4 g/L yoğunlukta h-BN'nin ilave edildiği kaplama tabakasında 0,30 olarak elde edilmiştir. Yükün artışı genel olarak ortalama sürtünme katsayısında bir miktar artışı netice vermiştir. Bu durum artan yük ile temas yüzeylerindeki pürüzler (asperities) arasında adesiv yapışma eğiliminin artışına atfedilebilir (Aslan & Duru, 2021).

Numune yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin optik mikroskop görünümüleri Şekil 5.20 ve Şekil 5.21'de verilmiştir. Altlık numunede aşınma izi yönünde oluşan çizikler abrasiv aşınmanın baskın olduğunu göstermektedir. Ni-P, Ni-P-W ve Ni-P-W/h-BN kaplama yapılan yüzeylerde bu çiziklerin azaldığı tespit edilmiştir. 2 N altında test edilen Ni-P-W/h-BN(4 g/L) numune yüzeyinde bu çizikler tamamen ortadan kalkmıştır (Şekil 5.21). h-BN toz oranının 4 g/L üzerine çıkarılması ile çiziklerin tekrar arttığı gözlenmiştir. Bu durum uygun oranda hBN toz kullanılarak yapılan akımsız kaplamaların Al 2024 T3 yüzeylerinde oluşan abrasiv aşınmanın etkisini azalttığını ortaya koymuştur.



Şekil 5.20 Al 2024 T3 taban ve taban üzerine üretilen Ni-P ve Ni-P-W kaplamalara 2 ve 4 N yük altında yapılan aşınma deneyi sonrasında meydana gelen yüzeylerin optik görüntüleri.



Şekil 5.21 Al 2024 T3 taban üzerine farklı yoğunluklarda hBN kullanılarak büyütülen Ni-P-W-hBN kaplamalara 2 ve 4 N yük altında yapılan aşınma deneyi sonrasında meydana gelen yüzeylerin optik görüntüleri.

Aşınma izi genişlikleri ImageJ programı ile optik mikroskop görüntülerinden ölçülmüştür ve aşınma hacimleri ise Denklem 4.1'den elde edilmiştir. İz genişliği ve aşınma hacmi sonuçları Çizelge 5.6'de sunulmuştur.

Çizelge 5.6 Akımsız kaplamaların ve akımsız kompozit kaplamaların aşınma deneyi sonrasında elde edilen aşınma izi genişliği, aşınma hacmi değerleri.

		2 N		4 N	
		Aşınma izi genişliği (μm)	Aşınma hacmi, ΔV (mm^3)	Aşınma izi genişliği (μm)	Aşınma hacmi, ΔV (10^{-3} mm^3)
A1	Al 2024 T3 Altlık	$705,9 \pm 30,5$	$53,128 \pm 2,296$	$869,6 \pm 17,4$	$101,320 \pm 2,022$
A2	Ni-P	$112,7 \pm 3,7$	$0,201 \pm 0,007$	$132,3 \pm 3,8$	$0,326 \pm 0,009$
A3	Ni-P-W	$107,4 \pm 2,4$	$0,174 \pm 0,004$	$187,7 \pm 17,9$	$0,939 \pm 0,090$
A4	Ni-P-W-hBN(2g/L)	$79,0 \pm 6,7$	$0,069 \pm 0,006$	$118,0 \pm 10,9$	$0,231 \pm 0,021$
A5	Ni-P-W-hBN(4g/L)	Aşınma izi gözlenmedi		$85,3 \pm 7,1$	$0,087 \pm 0,007$
A6	Ni-P-W-hBN(6g/L)	$87,5 \pm 9,0$	$0,094 \pm 0,010$	$100,9 \pm 1,6$	$0,144 \pm 0,002$
A7	Ni-P-W-hBN(8g/L)	$104,8 \pm 8,1$	$0,162 \pm 0,012$	$132,3 \pm 6,2$	$0,327 \pm 0,015$

Çizelge 5.6'de görüldüğü üzere Al 2024 T3 altlık malzemede 2 ve 4 N yük altında sırasıyla $53,128 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ ve $101,320 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ olarak ölçülen aşınma hacimleri farklı toz katkılarıyla akımsız kaplama yapıldıktan sonra kayda değer ölçüde azalmıştır. 2 N altında yapılan deneylerde aşınma hacmi Ni-P kaplanan yüzeylerde $0,201 \text{ mm}^3$, Ni-P-W kaplanan yüzeylerde ise $0,174 \text{ mm}^3$ bulunmuştur. Kaplamaya 2 g/L hBN ilavesi ile elde edilen Ni-P-W-hN(2g/L) numunesinin aşınma hacmi Ni-P-W kaplamaya kıyasen %60'lık bir azalma ile $0,069 \text{ mm}^3$ 'e düşmüştür. Kaplamaya 4 g/L hBN dahil edildiği durumda ise optik mikroskop görüntülerinde aşınma izi gözlenmemiştir ve hacim kaybı oluşmadığı kabul edilmiştir. 4

g/L'nin üzerinde dahil edilen hBN aşınma hacmini tekrardan arttırmıştır. Bu durum toz oranının artması ile topaklanma eğilimi oluşumuna atfedilebilir (Araghi & Paydar, 2013). 4 N yük altında yapılan deneylerde en düşük aşınma hacmi yine Ni-P-W-hN(2g/L) numunede $0,087 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ olarak elde edilmiştir. Kaplama tabasındaki hBN yoğunluğunun 4 g/L'den fazla olması hacim kaybında bir miktar artışa sebep olmuştur.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Akımsız kaplamaların endüstride kullanımları yaygınlaşmakta ve akımsız kaplamaların Ni-P bazlı kaplamaları gelişim göstermektedir. Ni-P bazlı kaplamalara eklenen seramik parçacıkların ise akımsız kaplamaların gelişiminde önemli bir yer kapladığı görülmüştür.

Ni-P/X kompozit kaplama Ni-P akımsız kaplamaya göre daha amorf bir yapıya sahiptir. Ni-P ve Ni-P-W alaşım kaplamalarına ait XRD görüntüleri incelendiğinde 450'de Ni (111) tepesinde yüksek şiddette olduğu, nikel özü XRD desenlerinin 81,300'de ve 18,220'de küçük şiddette olmaktadır. XRD görüntülerinde h-BN katkısının olduğunu gösteren tepelerin meydana geldiği görülmüştür. 270(20) civarında ve 770(20) civarında piklerin meydana geldiği görülmektedir.

Ni-P, Ni-P-W ve Ni-P-W/h-BN arasında bir sertlik bakımında değerlendirmeye gidildiğinde, en düşük sertliğe sahip olan akımsız kaplama Ni-P alaşımlı kaplamadır. En yüksek sertliğe sahip akımsız kaplama Ni-P-W/h-BN(4g/l) alaşımlı kompozit kaplama ve h-BN oranının 4g/l daha fazla olması sertlikte düşüşe neden olmuştur.

Ni-P, Ni-P-W ve Ni-P-W/h-BN arasında aşınma direnci 2 ve 4 N yük altında değerlendirmeye gidildiğinde, 2 N yük altında en iyi aşınma direncine sahip akımsız kaplama Ni-P-W/h-BN(2g/l) akımsız kompozit kaplamadır ve h-BN yoğunluğunun daha da artması (6 ve 8 g/L) ile aşınma direncinin kötüleşmektedir. 4 N yük altında yapılan deneylerde benzer sonuçlar görülmüştür ve en yüksek aşınma direncine sahip akımsız kaplama Ni-P-W/h-BN(4g/l) yoğunlukta h-BN'nin ilave edildiği akımsız kompozit kaplamadır.

Ni-P, Ni-P-W ve Ni-P-W/h-BN arasında SEM/EDS bakımında değerlendirmeye gidildiğinde, kaplamaların altlık malzemeye en iyi yapışan, kaplama kalınlığının en yüksek olduğu ve en iyi birikim oluşmuş kaplamalar Ni-P-W alaşımlı kaplama ve Ni-P-W/h-BN(4g/l) alaşımlı kompozit kaplamalardır.

Ni-P, Ni-P-W ve Ni-P-W/h-BN arasında korozyon direnci bakımında değerlendirmeye gidildiğinde, korozyon direncinde en iyi olan akımsız kaplama Ni-P-W/h-BN(8g/l) akımsız kompozit kaplama olduğu görülmüştür.

Akımsız Ni-P kaplamalara eklenen W bileşeni kaplama özelliğini farklı bir şekilde etkilediği görülmüştür. Ni-P akımsız kaplamalara eklenen herhangi parçacık Ni-P-W eklenen parçacığın gösterdiği performanstan daha düşük performans gösterdiği tespit edilmiştir bu durumdan dolayı uygun bileşenlerin bir araya getirilip N-P-W/X gibi farklı üstün performanslara sahip kaplamalar elde edilebilir.



KAYNAKLAR

- Agarwala, R. C., & Agarwala, V. (2003). Electroless alloy/composite coatings: A review. *Sadhana*, 28(3-4), 475-493. <https://doi.org/10.1007/BF02706445>
- Akyol, A., Algul, H., Uysal, M., Akbulut, H., & Alp, A. (2018). A novel approach for wear and corrosion resistance in the electroless Ni-P-W alloy with CNFs co-depositions. *Applied Surface Science*, 453, 482-492. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.05.152>
- Allahkaram, S. R., & Rabizadeh, T. (2012). HIGH CORROSION RESISTANCE OF NI - P /NANO- SIO 2 ELECTROLESS COMPOSITE COATINGS . *International Journal of Modern Physics: Conference Series*, 05, 810-816. <https://doi.org/10.1142/s2010194512002784>
- Al-Maqdasi, Z., Hajlane, A., Renbi, A., Ouarga, A., Chouhan, S. S., & Joffe, R. (2019). Conductive regenerated cellulose fibers by electroless plating. *Fibers*, 7(5). <https://doi.org/10.3390/fib7050038>
- Araghi, A., & Paydar, M. H. (2013). Electroless deposition of Ni-W-P-B 4C nanocomposite coating on AZ91D magnesium alloy and investigation on its properties. *Vacuum*, 89(1), 67-70. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2012.09.011>
- Arulvel, S., Dsilva Winfred Rufuss, D., Sharma, S. S., Mitra, A., Elayaperumal, A., & Jagatheeshwaran, M. S. (2021). A novel water quench approach for enhancing the surface characteristics of electroless nickel phosphorous deposit. *Surfaces and Interfaces*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.100975>
- Aslan, S., & Duru, E. (2021). Akımsız Ni-P-W Kompozit Kaplamalarda PTFE Konsantrasyonunun Sertlik ve Aşınma Üzerinde Etkisi. *European Journal of Science and Technology*. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1016986>
- Bae, S. H., Kim, S., Yi, S. H., Son, I., Kim, K. T., & Chung, H. (2019). Effect of surface roughness and electroless Ni-P plating on the bonding strength of Bi-Te-based thermoelectric modules. *Coatings*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/COATINGS9030213>

- Balaraju, J. N., Sankara Narayanan, T. S. N., & Seshadri, S. K. (2001). Evaluation of the corrosion resistance of electroless Ni-P and Ni-P composite coatings by electrochemical impedance spectroscopy. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 5(5), 334-338. <https://doi.org/10.1007/s100080000159>
- Barati, Q., & Hadavi, S. M. M. (2020). Electroless Ni-B and composite coatings: A critical review on formation mechanism, properties, applications and future trends. *İçinde Surfaces and Interfaces* (C. 21). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100702>
- Baskaran, I., Narayanan, T. S. N. S., & Stephen, A. (2006). Effect of accelerators and stabilizers on the formation and characteristics of electroless Ni-P deposits. *Materials Chemistry and Physics*, 99(1), 117-126. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2005.10.001>
- Bostani, B., Ahmadi, N. P., Yazdani, S., & Arghavanian, R. (2018). Synthesis and characterization of functionally graded nickel-nickel coated ZrO₂ composite coating. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 49(7), 881-892. <https://doi.org/10.1002/mawe.201700019>
- Cai, C., Liu, X. Q., Tan, X., Li, G. D., Wang, H., Li, J. M., & Li, J. F. (2017). A Zr- and Cr(III)-containing conversion coating on Al alloy 2024-T3 and its self-repairing behavior. *Materials and Corrosion*, 68(3), 338-346. <https://doi.org/10.1002/maco.201609067>
- Chai, C. C., & Anasyida, A. S. (2018). Characterization of Electroless Ni-P and Ni-P/Al₂O₃ Composite Coating on Al6061 Alloy. *Journal of Physics: Conference Series*, 1083(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1083/1/012032>
- Chang, H., Pitt, C. H., & Alexander, G. B. (1993). Electroless silver plating of oxide particles in aqueous solution. *İçinde JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE* (C. 28).
- Chen, B., Yan, F., Guo, J., Yan, M. F., & Zhang, Y. (2021). Attractive effects of Re on electroless Ni-P-TiN nanocomposite coating. *Applied Surface Science*, 565. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.150472>

- Chen, H., Gao, Y., Lv, Q., Yang, D., & Lin, X. (2011). Synthesis and properties of electroless Ni-P-W/nano-Al₂O₃ composite coatings deposited on sintered NdFeB permanent magnet. *Advanced Materials Research*, 306-307, 901-906. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.306-307.901>
- Chen, H., Wang, Q., Dong, H., Xi, L., Lin, X., Pan, F., & Ma, Z. (2015). Electroless plating of Ni-P-W coatings containing scattered Nb₂O₅ on sintered NdFeB substrate. *Materials Research*, 18(5), 1089-1096. <https://doi.org/10.1590/1516-1439.032015>
- Chen, Q., & Lua, A. C. (2021). Synthesis of electroless Ni catalyst supported on SBA-15 for hydrogen and carbon production by catalytic decomposition of methane. *International Journal of Energy Research*, 45(2), 2810-2823. <https://doi.org/10.1002/er.5975>
- Chen, X. M., Li, G. Y., & Lian, J. S. (2008). Deposition of electroless Ni-P/Ni-W-P duplex coatings on AZ91D magnesium alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 18(SPEC. ISSUE 1). [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(10\)60225-7](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(10)60225-7)
- Cheng, Y., Cao, S., Hou, Q., Han, D., & Han, Z. (2016). Effect of tungsten addition on the anti-fouling property of the electroless Ni-W-P deposits. *Xiyou Jinshu Cailiao Yu Gongcheng/Rare Metal Materials and Engineering*, 45(8), 1931-1937. [https://doi.org/10.1016/s1875-5372\(16\)30149-7](https://doi.org/10.1016/s1875-5372(16)30149-7)
- Czapczyk, K., Zawadzki, P., & Wierzbicka, N. (2023). Influence of Dispersed Phase Content on the Mechanical Properties of Electroless Nanocomposite Ni-P/Si₃N₄ and Hybrid Ni-P/Si₃N₄/Graphite Layers Deposited on the AW-7075 Alloy. *Materials*, 16(18), 6100. <https://doi.org/10.3390/ma16186100>
- Daniel, S., Banerjee, N., Majumder, M., & Chitrapady Vishweshwara, S. (2023). Effect of Mg on Al-Mg Alloy and Electroless Ni-P Codeposition of nano-Al₂O₃: Mechanical, Wear, and Corrosion Resistance Properties. *Trends in Sciences*, 20(10), 6793. <https://doi.org/10.48048/tis.2023.6793>

- Dkhilalli, F., Megdiche, S., Guidara, K., Rasheed, M., Barillé, R., & Megdiche, M. (2018). AC conductivity evolution in bulk and grain boundary response of sodium tungstate Na_2WO_4 . *Ionics*, 24(1), 169-180. <https://doi.org/10.1007/s11581-017-2193-8>
- Du, S., Li, Z., He, Z., Ding, H., Wang, X., & Zhang, Y. (2018). Effect of temperature on the friction and wear behavior of electroless Ni–P–MoS₂–CaF₂ self-lubricating composite coatings. *Tribology International*, 128, 197-203. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.07.026>
- Faraji, S., Abdul Rahim, A., Mohamed, N., & Sipaut, C. S. (2011). A study of electroless copper-phosphorus coatings with the addition of silicon carbide (SiC) and graphite (Cg) particles. *Surface and Coatings Technology*, 206(6), 1259-1268. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.08.032>
- Farhan, M., Fayyaz, O., Qamar, M. G., Shakoor, R. A., Bhadra, J., & Al-Thani, N. J. (2023). Mechanical and corrosion characteristics of TiC reinforced Ni-P based nanocomposite coatings. *Materials Today Communications*, 36. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106901>
- Fayyad, E. M., Abdullah, A. M., Mohamed, A. M. A., Jarjoura, G., Farhat, Z., & Hassan, M. K. (2019). Effect of electroless bath composition on the mechanical, chemical, and electrochemical properties of new NiP–C 3 N 4 nanocomposite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 362, 239-251. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.01.087>
- Feng, L., Wen, C., Li, J., Li, S., Cheng, D., Bai, J., & Cui, Q. (2019). Effect of $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ as complexing agent on deposition behavior and property of electroless Ni-P coating on ZK61M magnesium alloy. *Materials Research Express*, 6(5). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab0674>
- Gant, A. J., Gee, M. G., & May, A. T. (2004). The evaluation of tribo-corrosion synergy for WC-Co hardmetals in low stress abrasion. *Wear*, 256(5), 500-516. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2003.04.001>
- Gao, H. Q., Wang, L. D., & Fei, W. D. (2007). Electroless plating copper coating of Al₁₈B₄O₃₃ whisker for interface improvement of whisker reinforced aluminium

- matrix composite. *Materials Science and Technology*, 23(12), 1497-1504.
<https://doi.org/10.1179/174328407X239091>
- Gerengi, H. (2008). *Tafel Polarizasyon, Lineer Polarizasyon, Harmonik Analiz ve Dinamik Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi Yöntemleriyle Düşük Karbon Çeliği, Pirinç-MM55 ve Nikalium-118 Alaşımlarının Yapay Deniz Suyunda Korozyon Davranışları ve Pirinç Alaşımlarına Benzotriazol'ün İnhibitör Etkisinin Araştırılması. Doktora Tezi, Fen Bil. Enst., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.*
- Ghavidel, N., Allahkaram, S. R., Naderi, R., Barzegar, M., & Bakhshandeh, H. (2020). Corrosion and wear behavior of an electroless Ni-P/nano-SiC coating on AZ31 Mg alloy obtained through environmentally-friendly conversion coating. *Surface and Coatings Technology*, 382. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125156>
- Gu, C., Lian, J., Li, G., Niu, L., & Jiang, Z. (2005). Electroless Ni-P plating on AZ91D magnesium alloy from a sulfate solution. *Journal of Alloys and Compounds*, 391(1-2), 104-109. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.07.083>
- Guglielmi, N. (1972). Kinetics of the Deposition of Inert Particles from Electrolytic Baths. *Journal of The Electrochemical Society*, 119(8), 1009. <https://doi.org/10.1149/1.2404383>
- Gul, H., Algul, H., Akyol, A., Uysal, M., & Alp, A. (2023). Evaluation of wear and corrosion behavior of electroless Ni-B-P/CNT composite coatings on aluminum surfaces. *Diamond and Related Materials*, 137. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.110075>
- Gul, H., & Usta, İ. (2023). Effect of Alumina Concentration on Morphology, Wear, and Corrosion: Electroless Ni-W-P/Al₂O₃ Composite Coatings on Aluminum Surfaces. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 32(13), 6107-6122. <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08184-x>
- Guo, R. H., Jiang, S. Q., Yuen, C. W. M., & Ng, M. C. F. (2008). TEMPERATURE DEPENDENCE OF ELECTROLESS Ni-P DEPOSITION ON POLYESTER FABRIC. İçinde *Surface Review and Letters* (C. 15, Sayı 5). www.worldscientific.com

- Guyon, C., Méta y, E., Popowycz, F., & Lemaire, M. (2015). Synthetic applications of hypophosphite derivatives in reduction. *Organic & biomolecular chemistry*, 13(29), 7879-7906. <https://doi.org/10.1039/c5ob01032b>
- Hardwicke, C. U., & Lau, Y. C. (2013). Advances in thermal spray coatings for gas turbines and energy generation: A review. İçinde *Journal of Thermal Spray Technology* (C. 22, Sayı 5, ss. 564-576). <https://doi.org/10.1007/s11666-013-9904-0>
- Haubner, R., Wilhelm, M., Weissenbacher, R., & Lux, B. (2002). *Boron Nitrides-Properties, Synthesis and Applications*.
- Hoon Park, S., & Nyung Lee, D. (1988). A study on the microstructure and phase transformation of electroless nickel deposits. İçinde *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE* (C. 23).
- Hsu, C.-I., Hou, K.-H., Ger, M.-D., & Wang, G.-L. (2015). The effect of incorporated self-lubricated BN(h) particles on the tribological properties of Ni-P/BN(h) composite coatings. *Applied Surface Science*, 357, 1727-1735. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.09.207>
- Hu, J., Wang, B., Xu, Y., & Zhou, L. (2018). The Anticorrosive and Antifouling Properties of Ni-W-P-nSiO₂ Composite Coating in A Simulated Oilfield Environment. *JOM*, 70(11), 2619-2625. <https://doi.org/10.1007/s11837-018-3133-4>
- Hu, R., Su, Y., Liu, Y., Liu, H., Chen, Y., Cao, C., & Ni, H. (2018). Deposition Process and Properties of Electroless Ni-P-Al₂O₃ Composite Coatings on Magnesium Alloy. *Nanoscale Research Letters*, 13. <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2608-0>
- Husain, E., Narayanan, T. N., Taha-Tijerina, J. J., Vinod, S., Vajtai, R., & Ajayan, P. M. (2013). Marine corrosion protective coatings of hexagonal boron nitride thin films on stainless steel. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 5(10), 4129-4135. <https://doi.org/10.1021/am400016y>
- Ishikawa, H., Chen, Q., Bin, Y., Komatsu, K., & Matsuo, M. (2007). High electrical conductivity and high corrosion resistance fibers with high modulus and high strength

- prepared by electroless plating of gold on the surface of poly (p-phenylene benzobisoxazole) (PBO). *Journal of Materials Science*, 42(18), 7772-7779. <https://doi.org/10.1007/s10853-007-1639-1>
- Jadhav, N., Jensen, M. B., & Gelling, V. (2015). Tungstate and vanadate-doped polypyrrole/aluminum flake composite coatings for the corrosion protection of aluminum 2024-T3. *Journal of Coatings Technology and Research*, 12(2), 259-276. <https://doi.org/10.1007/s11998-014-9633-4>
- Jiang, B., Jiang, S. L., Ma, A. L., & Zheng, Y. G. (2014). Effect of heat treatment on erosion-corrosion behavior of electroless Ni-P coatings in saline water. *Materials and Manufacturing Processes*, 29(1), 74-82. <https://doi.org/10.1080/10426914.2013.852222>
- Jiang, S. Q., Kan, C. W., Yuen, C. W. M., & Wong, W. K. (2008). Electroless nickel plating of polyester fiber. *Journal of Applied Polymer Science*, 108(4), 2630-2637. <https://doi.org/10.1002/app.27154>
- Jo, I., Pettes, M. T., Kim, J., Watanabe, K., Taniguchi, T., Yao, Z., & Shi, L. (2013). Thermal conductivity and phonon transport in suspended few-layer hexagonal boron nitride. *Nano Letters*, 13(2), 550-554. <https://doi.org/10.1021/nl304060g>
- Kamoutsi, H., Haidemenopoulos, G. N., Bontozoglou, V., & Pantelakis, S. (2006). Corrosion-induced hydrogen embrittlement in aluminum alloy 2024. *Corrosion Science*, 48(5), 1209-1224. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.05.015>
- Karthikeyan, S., & Vijayaraghavan, L. (2016). Investigation of the surface properties of heat treated electroless Ni-P coating. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 94(5), 265-273. <https://doi.org/10.1080/00202967.2016.1208861>
- Khaira, A., Shown, I., Samireddi, S., Mukhopadhyay, S., & Chatterjee, S. (2023). Mechanical and tribological characterization of deep eutectic solvent assisted electroless Ni-P-hBN coating. *Ceramics International*, 49(1), 461-473. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.09.012>

- Khodir, S. A., & Shibayanagi, T. (2007). Microstructure and mechanical properties of friction stir welded dissimilar aluminum joints of AA2024-T3 and AA7075-T6. *Materials Transactions*, 48(7), 1928-1937. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MRA2007042>
- Kim, J. H., Kim, K. H., Park, M. S., Bae, T. S., & Lee, Y. S. (2016). Cu nanoparticle-embedded carbon foams with improved compressive strength and thermal conductivity. *Carbon Letters*, 17(1), 65-69. <https://doi.org/10.5714/CL.2016.17.1.065>
- Kostoglou, N., Polychronopoulou, K., & Rebholz, C. (2015). Thermal and chemical stability of hexagonal boron nitride (h-BN) nanoplatelets. *Vacuum*, 112, 42-45. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2014.11.009>
- 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*.
- Krishnaveni, K., Sankara Narayanan, T. S. N., & Seshadri, S. K. (2005). Electroless Ni-B coatings: preparation and evaluation of hardness and wear resistance. *Surface and Coatings Technology*, 190(1), 115-121. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.01.038>
- Kumar, K., Bansal, V., Sharma, S., Kimothi, S., & Sharma, A. (2023). Microhardness and wear resistance of alkaline electroless Ni-P/Ni-P-ZnO nanocomposite platings. *Materials Today: Proceedings*, 80, 1219-1224. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.12.213>
- Kundu, S., Das, K., & Sahoo, P. (2018). A parametric investigation of high temperature friction performance of electroless Ni-P deposits. İçinde *Materials Today: Proceedings* (C. 5). www.sciencedirect.comwww.materialstoday.com/proceedings2214-7853
- Kundu, S., Das, S. K., & Sahoo, P. (2016). Influence of load and temperature on tribological behaviour of electroless Ni-P deposits. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 149(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/149/1/012046>

- Lascelles, K., Morgan, L. G., Nicholls, D., & Beyersmann, D. (2005). Nickel Compounds. İçinde *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. https://doi.org/10.1002/14356007.a17_235.pub2
- León, O. A., Staia, M. H., & Hintermann, H. E. (2003). High temperature wear of an electroless Ni–P–BN (h) composite coating. *Surface and Coatings Technology*, 163-164, 578-584. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00663-1](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00663-1)
- Li, J., Wang, D., Cai, H., Wang, A., & Zhang, J. (2015). Competitive deposition of electroless Ni-W-P coatings on mild steel via a dual-complexant plating bath composed of sodium citrate and lactic acid. *Surface and Coatings Technology*, 279, 9-15. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.08.017>
- Li, S., Pu, S., You, Z., Sun, C., Li, S., & Zhang, J. (2020). Effect of heat treatment on microstructure and tribology behaviour of electroless Ni-P/BN(h) composite coating. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 98(1), 21-29. <https://doi.org/10.1080/00202967.2020.1694769>
- Ling, G., He, J., & Huang, L. (2004). Size control of silver nanoparticles deposited on silica dielectric spheres by electroless plating technique. *Journal of Materials Science*, 39(8), 2955-2957. <https://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000021490.52788.62>
- Liu, H., Guo, R. X., Viejo, F., & Liu, Z. (2012). Comparison of microstructure and residual stress characteristics of electroless Ni-W-P coatings annealed with a laser and a furnace. *Surface and Coatings Technology*, 206(8-9), 2380-2387. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.10.037>
- Liu, H., Lv, Y. Y., Liu, Z., Liu, H., & Thompson, G. E. (2016). Dry sliding wear behaviour and structural characteristics of laser-annealed electroless Ni–P/Ni–Mo–P duplex coatings. *Tribology International*, 103, 343-351. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.07.014>
- Luo, H., Leitch, M., Zeng, H., & Luo, J. L. (2018). Characterization of microstructure and properties of electroless duplex Ni-W-P/Ni-P nano-ZrO₂ composite coating. *Materials Today Physics*, 4, 36-42. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2018.03.001>

- Mahtab, A., Amini, K., Mohammadian, N., Emami, S. A., & Bina, M. H. (2018). Creation of Ni-B/Ni-P electroless coating on the WC particles without surface activator. *Metallurgical and Materials Engineering*, 23(4), 347-352. <https://doi.org/10.30544/244347>
- Matik, U., & Citak, R. (2011). *Investigation of Adhesive Wear Characteristics of Low Phosphorous Electroless Ni-P Coated AISI 1020 Steel Reinforcement-matrix interface modification for wettability in metal matrix composites View project COMPOSITE PRODUCTION WITH HOT EXTRUSION OF POWDER METAL COMPACT. View project*. <https://www.researchgate.net/publication/299453281>
- Mei, S., Zhou, C., Hu, Z., Xiao, Z., Zheng, Q., & Chai, X. (2023). Preparation of a Ni-P-nanoPTFE Composite Coating on the Surface of GCr15 Steel for Spinning Rings via a Defoamer and Transition Layer and Its Wear and Corrosion Resistance. *Materials*, 16(12). <https://doi.org/10.3390/ma16124427>
- Mukhopadhyay, A., & Sahoo, S. (2021). Corrosion Performance of Steel Rebars by Application of Electroless Ni-P-W Coating - An Optimization Approach using Grey Relational Analysis. *FME Transactions*, 49(2), 445-455. <https://doi.org/10.5937/fme2102445M>
- Nazari, H., Barati Darband, G., & Arefinia, R. (2023). A review on electroless Ni-P nanocomposite coatings: effect of hard, soft, and synergistic nanoparticles. *Çinde Journal of Materials Science* (C. 58, Sayı 10, ss. 4292-4358). Springer. <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08281-1>
- Nemane, V., & Chatterjee, S. (2021). Evaluation of microstructural, mechanical, and tribological characteristics of Ni-B-W-SiC electroless composite coatings involving multi-pass scratch test. *Materials Characterization*, 180. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111414>
- Pakdel, A., Zhi, C., Bando, Y., Nakayama, T., & Golberg, D. (2011). Boron nitride nanosheet coatings with controllable water repellency. *ACS Nano*, 5(8), 6507-6515. <https://doi.org/10.1021/nn201838w>

- Pandian, P., Sundaram, P., Sathishkumar, A., Prabakaran, R., Ganesh Kumar, P., Kim, S. C., Alodhayb, A., Pandiaraj, S., Rasu, E., & Rajaraman, M. (2023). Effect of sodium dodecyl sulfate surfactant on the surface properties of electroless NiP-TiO₂-ZrO₂ composite coatings on magnesium AZ91D substrate. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(9). <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.105028>
- Pedrizetti, G., Paglia, L., Genova, V., Conti, M., Baiamonte, L., & Marra, F. (2023). The Effect of Composition and Heat Treatment on Microhardness of Ni-P and Ni-P-nanoZrO₂ Coatings. *Chemical Engineering Transactions*, 100, 433-438. <https://doi.org/10.3303/CET23100073>
- Qafsaoui, W., Kendig, M. W., Perrot, H., & Takenouti, H. (2015). Effect of 1-pyrrolidine dithiocarbamate on the galvanic coupling resistance of intermetallics - Aluminum matrix during corrosion of AA 2024-T3 in a dilute NaCl. *Corrosion Science*, 92, 245-255. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.12.011>
- Qin, T. N., Ma, L. Q., Yao, Y., Ni, C., Zhao, X. Y., & Ding, Y. (2011). An in situ measure method to study deposition mechanism of electroless Ni-P plating on AZ31 magnesium alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 21(12), 2790-2797. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)61125-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61125-4)
- Rajabalizadeh, Z., Seifzadeh, D., Habibi-Yangjeh, A., Mesri Gundoshmian, T., & Nezamdoust, S. (2018). Electrochemical noise analysis to examine the corrosion behavior of Ni-P deposit on AM60B alloy plated by Zr pretreatment. *Surface and Coatings Technology*, 346, 29-39. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.04.032>
- Rajabalizadeh, Z., Seifzadeh, D., Khodayari, A., & Sohrabnezhad, S. (2022). Corrosion protection and mechanical properties of the electroless Ni-P-MOF nanocomposite coating on AM60B magnesium alloy. *Journal of Magnesium and Alloys*, 10(8), 2280-2295. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.08.013>
- Ralston, K. D., Chrisanti, S., Young, T. L., & Buchheit, R. G. (2008). Corrosion Inhibition of Aluminum Alloy 2024-T3 by Aqueous Vanadium Species. *Journal of The Electrochemical Society*, 155(7), C350. <https://doi.org/10.1149/1.2907772>

- Ralston, K. D., Young, T. L., & Buchheit, R. G. (2009). Electrochemical Evaluation of Constituent Intermetallics in Aluminum Alloy 2024-T3 Exposed to Aqueous Vanadate Inhibitors. *Journal of The Electrochemical Society*, 156(4), C135. <https://doi.org/10.1149/1.3076147>
- Ranganatha, S., & Venkatesha, T. V. (2012). Studies on the preparation and properties of electroless Ni-W-P alloy coatings and its nano-MoS₂ composite. *Physica Scripta*, 85(3). <https://doi.org/10.1088/0031-8949/85/03/035601>
- Ranganatha, S., & Venkatesha, T. V. (2017). Fabrication and anticorrosion performance of Ni-P-BN nanocomposite coatings on mild steel. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 53(5), 449-455. <https://doi.org/10.3103/S106837551705009X>
- Ranganatha, S., Venkatesha, T. V., & Vathsala, K. (2012). Electroless Ni-W-P coating and its nano-WS₂ composite: Preparation and properties. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 51(23), 7932-7940. <https://doi.org/10.1021/ie300104w>
- Rodríguez-Martínez, J. A., Rusinek, A., & Arias, A. (2011). Thermo-viscoplastic behaviour of 2024-T3 aluminium sheets subjected to low velocity perforation at different temperatures. *Thin-Walled Structures*, 49(7), 819-832. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2011.02.007>
- Roy, S., & Sahoo, P. (2012). Corrosion study of electroless Ni-P-W coatings using electrochemical impedance spectroscopy. *Portugaliae Electrochimica Acta*, 30(3), 203-220. <https://doi.org/10.4152/pea.201203203>
- Sadreddini, S., & Afshar, A. (2014). Corrosion resistance enhancement of Ni-P-nano SiO₂ composite coatings on aluminum. *Applied Surface Science*, 303, 125-130. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.02.109>
- Safonov, V., Shishurin, S., Gorbushin, P., Kolomeichenko, A., Kuznetsov, Y., Kalashnikova, L., & Zakharevich, A. (2019). Application of composite electroless nickel coatings on precision parts of hydraulics aggregates. *Tribology in Industry*, 41(1), 14-22. <https://doi.org/10.24874/ti.2019.41.01.02>

- Sard, R. (1970). The Nucleation, Growth, and Structure of Electroless Copper Deposits. *Journal of The Electrochemical Society*, 117(7), 864. <https://doi.org/10.1149/1.2407658>
- Selvi, V. E., Chatterji, P., Subramanian, S., & Balaraju, J. N. (2014). Autocatalytic duplex Ni-P/Ni-W-P coatings on AZ31B magnesium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 240, 103-109. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.12.022>
- Shacham-Diamand, Y., Osaka, T., Okinaka, Y., Sugiyama, A., & Dubin, V. (2015). 30 Years of electroless plating for semiconductor and polymer micro-systems. İçinde *Microelectronic Engineering* (C. 132, ss. 35-45). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2014.09.003>
- Shi, C., Tang, Z., Wang, L., & Wang, L. (2017). Preparation and characterization of conductive and corrosion-resistant wood-based composite by electroless Ni-W-P plating on birch veneer. *Wood Science and Technology*, 51(3), 685-698. <https://doi.org/10.1007/s00226-016-0869-2>
- Shozib, I. A., Ahmad, A., Abdul-Rani, A. M., Beheshti, M., & Aliyu, A. A. (2022). A review on the corrosion resistance of electroless Ni-P based composite coatings and electrochemical corrosion testing methods. İçinde *Corrosion Reviews* (C. 40, Sayı 1, ss. 1-37). De Gruyter Open Ltd. <https://doi.org/10.1515/correv-2020-0091>
- Stankiewicz, A., Masalski, J., & Szczygieł, B. (2013). Impedance spectroscopy studies of electroless Ni-P matrix, Ni-W-P, Ni-P-ZrO₂, and Ni-W-P-ZrO₂ coatings exposed to 3.5% NaCl solution. *Materials and Corrosion*, 64(10), 908-913. <https://doi.org/10.1002/maco.201206856>
- Sudagar, J., Lian, J., & Sha, W. (2013a). Electroless nickel, alloy, composite and nano coatings - A critical review. İçinde *Journal of Alloys and Compounds* (C. 571, ss. 183-204). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.03.107>
- Sudagar, J., Lian, J., & Sha, W. (2013b). Electroless nickel, alloy, composite and nano coatings - A critical review. İçinde *Journal of Alloys and Compounds* (C. 571, ss. 183-204). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.03.107>

- Sun, W. chang, Xu, J. M., Wang, Y., Guo, F., & Jia, Z. W. (2017). Effect of Cerium Oxide on Morphologies and Electrochemical Properties of Ni-W-P Coating on AZ91D Magnesium. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(12), 5753-5759. <https://doi.org/10.1007/s11665-017-3038-3>
- Sundararajan, M., Devarajan, M., & Jaafar, M. (2021). Electroless Ni-P Deposition on an Al5052 Substrate for Thermal Management Applications. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 68(6), 2892-2898. <https://doi.org/10.1109/TED.2021.3069410>
- Tao, Y., Hu, A., Hang, T., Peng, L., & Li, M. (2013). Effect of W addition on the electroless deposited NiP(W) barrier layer. *Applied Surface Science*, 282, 632-637. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.06.023>
- Taşci, S., Özden, R. C., & Anik, M. (2019). Corrosion and Wear Characteristics of Electroless Ni-P, Ni-P-W and Composite Ni-P-W/Al₂O₃ Coatings on AZ91 Sheet. *Metals and Materials International*, 25(2), 313-323. <https://doi.org/10.1007/s12540-018-0199-z>
- Tomlinson, W. J., & Wilson, G. R. (1986). The oxidation of electroless Ni-B and Ni-P coatings in air at 800 to 1000°C. İçinde *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE* (C. 21).
- Tozar, A. (2012). *Düşük karbonlu çeliğin çevreci ZnNi/Polianilin iletken polimer ile kaplanması ve kaplanan çeliğin korozyon davranışının incelenmesi. Yüksek Lisans Lisans Tezi, MKÜ FBE, Fizik Anabilim Dalı.*
- Ulu, S., Algül, H., Akyol, A., Bilaç, O., Gül, H., Uysal, M., & Alp, A. (2018). *Characterization of TiO₂ Reinforced Electroless Ni-P-B-W-TiO₂ Multi Alloy Coatings: The Effect of TiO₂ Concentration (IMMC).*
- Uppada, S., Koon, R., Chintada, V. B., & Koutavarapu, R. (2023). Influence of Heat Treatment on Crystal Structure, Microhardness and Corrosion Resistance of Bilayer Electroless Ni-P-SiC/Ni-P-Al₂O₃ Coatings. *Silicon*, 15(2), 793-803. <https://doi.org/10.1007/s12633-022-02042-6>

- Ünal, E. (2022). *İçten Yanmalı Motorların Sürtünmeli Yüzeyleri İçin Elektrodepolama Metoduyla Ni-B/TiC Nanokompozit Kaplamaların Üretimi Ve Karakterizasyonu. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilimdalı.*
- Venkatesha, T. V., & Ranganatha, S. (2012). Anti corrosive electroless Ni-P films for mild steel materials. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 59(2), 69-75. <https://doi.org/10.1108/00035591211210839>
- Wang, L., Strangwood, M., Balint, D., Lin, J., & Dean, T. A. (2011). Formability and failure mechanisms of AA2024 under hot forming conditions. *Materials Science and Engineering: A*, 528(6), 2648-2656. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.11.084>
- Wang, W., Jü, X., Xu, C., Zhang, W., Mitsuzaki, N., & Chen, Z. (2020). Study on Electroless Plating Ni-W-P Ternary Alloy with High Tungsten from Compound Complexant Bath. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29(12), 8213-8220. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-05312-9>
- Wang, X., Zhao, L., Hu, X., Cheng, Y., Liu, S., Chen, P., & Cui, C. (2017). Fabrication and mechanical behavior of ex situ mg-based bulk metallic glass matrix composite reinforced with electroless Cu-coated SiC particles. *Materials*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/ma10121371>
- Yildiz, R. A., Genel, K., & Gulmez, T. (2021). Effect of electroless Ni-B and Ni-W-B coatings on the corrosion-fatigue behaviour of 7075 Al alloy. *International Journal of Fatigue*, 144. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106040>
- Zhang, L., Jin, Y., Peng, B., Zhang, Y., Wang, X., Yang, Q., & Yu, J. (2008). Effects of annealing temperature on the crystal structure and properties of electroless deposited Ni-W-Cr-P alloy coatings. *Applied Surface Science*, 255(5 PART 1), 1686-1691. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.06.012>
- Zhao, G., Wang, R., Liu, S., Wang, T., Wu, D., Zhang, Y., Chen, J., & Zou, Y. (2020). Microstructure analysis of element W in improving the Ni-P deposit thermal stability. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 5474-5486. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.03.073>

Zou, Y., Zhang, Z., Liu, S., Chen, D., Wang, G., Wang, Y., Zhang, M., & Chen, Y. (2015). Ultrasonic-Assisted Electroless Ni-P Plating on Dual Phase Mg-Li Alloy. *Journal of The Electrochemical Society*, 162(1), C64-C70. <https://doi.org/10.1149/2.0841501jes>



DİZİN

A

AA2024 Al · 34
 abrazyon · 1
 Açık devre potansiyeli · 43, 48
 aglomere · 20, 23, 41
 akımsız · III, VIII, IX, X, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 13,
 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28,
 29, 30, 31, 32, 33, 35, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 47,
 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61,
 62, 63, 64, 65, 66, 67, 70, 71
 akımsız kaplama · III, 1, 2, 4, 5, 10, 12, 18, 25, 29, 30,
 35, 37, 38, 40, 48, 50, 55
 akımsız kompozit kaplama · VIII, X, 55, 56
 Akımsız nikel kaplamalar · 2, 5, 35
 alevle sertleştirme · 1
 alkali · 19, 22, 26
 altlık malzeme · 26, 63, 64
 Alüminyum · VI, IX, X, XI, XIII, 25, 34, 36, 37, 38, 39, 41,
 59, 60
 amorf · 2, 5, 6, 27, 28, 34, 36, 71
 Aşınma · VI, VII, IX, XI, 1, 31, 35, 45, 46, 47, 66, 67, 70,
 72
 aşınma direnci · 2, 6, 31, 32, 36, 71

B

banyo · III, VIII, 1, 8, 10, 12, 14, 19, 20, 21, 22, 23, 27,
 29, 38, 40, 41
 Bragg yasası · 47

D

Daldırma kaplamaları · 1
 dezavantaj · 5, 37
 dislokasyon · 6, 27
 distile · 25, 37
 düşük direnç · 6
 düşük karbonlu çelik · 24

E

Ekstrapolasyon · VI, VII, IX, 44, 48, 51
 elektolitik · 1
 elektriksiz kaplama · 3
 Elektrokimyasal empedans spektroskopisi · 43, 44, 50,
 55
 Elektronik · 1
 elmas · 7
 endüstriyel · III, 2, 3, 33, 34, 35
 enerji dağılımı spektrometresi · 15, 16, 18

F

fiziksel buhar biriktirme · 1

H

h-BN · I, VII, VIII, IX, X, XIII, 32, 34, 37, 41, 42, 47, 51,
 52, 54, 55, 56, 58, 59, 63, 64, 65, 76
 HV · XIII, 29, 48

i

iç oksidasyon · 1
 indikasyonla sertleştirme · 1
 indirgeyici ajan · 4
 inorganik · 3

K

kaplama · III, VIII, IX, X, 1, 2, 3, 4, 5, 8, 10, 12, 14, 16,
 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 32,
 33, 34, 35, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 48, 49, 50, 51,
 52, 55, 56, 57, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 70, 71
 karbür · 1, 2
 karbürleme · 1
 katalitik aktivasyon · 25
 katalitik aktivite · 6
 katalizör · 4, 33
 Katodik akım · 44
 kimyasal · VIII, 1, 3, 34, 35, 38, 39, 43
 kompozit · III, VIII, IX, X, 2, 3, 5, 6, 8, 10, 13, 14, 17, 18,
 19, 20, 21, 23, 24, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 34, 36, 41,
 42, 47, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 58, 59, 62, 63, 64, 65,
 67, 70, 71
 Kompozit · III, V, VI, VII, 1, 2, 3, 8, 10, 12, 14, 15, 17, 18,
 19, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 29, 32, 34, 36, 41, 42, 51,
 58, 62, 63, 66, 72
 korozyon · III, VIII, IX, 1, 2, 3, 6, 7, 29, 30, 31, 32, 35, 43,
 44, 48, 49, 50, 51, 53, 54, 55, 56, 71, 80
 Korozyon deneyleri · 43
 korozyon direnci · 2, 3, 6, 29, 30, 32, 36, 50, 56, 71
 korozyon hızı · VIII, 44, 49, 50, 53, 54
 kristal yapı · III, 27

L

lazerle sertleştirme · 1
 lehimlenebilirlik · 6

M

magnezyum · 24, 25
 manyetik karıştırma · 19, 20, 22, 23
 mekanik · III, VIII, X, 1, 2, 3, 6, 34, 35, 36, 41
 Metal · XIII, XV, 3, 36, 37, 73, 76, 77
 Metal matris · 3, 36
 Mg Alaşımı · 24
 Mikrosertlik · VI, VII, 45, 47
 morfoloji · III, 27

N

Ni-B · 5, 72, 75, 80, 81
 nikel · IX, 2, 5, 8, 10, 28, 30, 33, 34, 35, 57
 nikel klorit · 8
 nikel sülfat · 8, 30, 33
 Ni-P · III, V, VI, VII, VIII, IX, X, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11,
 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25,
 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 36, 38, 39, 40, 41, 42, 47,
 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61,
 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 70, 71, 72, 73, 74, 76, 77,
 78, 79, 80, 81
 Ni-P-W · VIII, IX, 12, 13, 18, 22, 27, 28, 29, 30, 31, 36,
 40, 41, 42, 47, 48, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58,
 61, 62, 66, 67, 71
 Ni-P-W/h-BN · III, VIII, IX, 42, 47, 48, 51, 52, 53, 54, 55,
 56, 57, 58, 62, 63, 64, 65, 66, 67
 Ni-P-W/X · III, 13, 18, 19, 23, 29, 30, 38
 nitrür · 1, 34, 37
 nitrürleme · 1
 Ni-W-P · 2, 12, 13, 14, 15, 18, 19, 22, 23, 24, 27, 28, 29,
 30, 36, 72, 73, 75, 77, 79, 80, 81

O

oksidasyon · 1
 optik mikroskop · VIII, 46, 67
 organik · 1, 3
 otokatalitik · 1, 4, 37

P

parçacık · IX, X, 6, 16, 17, 19, 34, 42, 55, 56, 59, 71

pH · XIV, 4, 8, 19, 20, 21, 22, 23, 39, 41, 42

politetrafloroetilen · 7

S

seramik · 2, 3, 34, 36, 71

seramik parçacıklar · 2

sertlik · III, VIII, 1, 2, 3, 28, 34, 35, 36, 45, 47, 48, 71

sıcaklık · 19, 22, 27, 30, 34, 38, 40

sodyum dodesil sülfat · 41

sodyum hipofosfit · 8, 27, 30, 33

sodyum tungstat · 12, 28, 30, 34

stabilizatör · 8

sürtünme katsayısını · 3, 7, 32, 36, 66

T

Tafel · VI, VII, IX, 44, 48, 49, 50, 51, 53, 54, 74

tane sınırı · 6

taramalı elektron mikroskobu · 27, 28, 47

tribolojik özellikler · 4

Tungsten · VI, XV, 2, 12, 14, 18, 34, 36, 81

U

ultrasonik karıştırma · IX, 20, 23, 42, 43

Ü

üretim · III, VIII, 8, 39, 41, 42

X

X-ışını · 47

Y

yığılma hatası · 6

yorulma · 1, 32, 35

yumuşak çelik · 24

Yüzey · III, V, VI, 1, 26, 45

yüzey aktif madde · 8, 41



TEKNOVERSİTE





teknoversite AYRICALIĞINDASINIZ

İSTE

