

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOK KATMANLI FONKSİYONEL Ni-W ESASLI KOMPOZİT
KAPLAMALARIN MİKROYAPISAL VE TRİBOLOJİK
ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Erhan DURU

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

EYLÜL 2025

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOK KATMANLI FONKSİYONEL Ni-W ESASLI KOMPOZİT
KAPLAMALARIN MİKROYAPISAL VE TRİBOLOJİK
ÖZELLİKLERİNİN GELİSTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Erhan DURU

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Serdar ASLAN

EYLÜL 2025

Erhan DURU tarafından hazırlanan “ÇOK KATMANLI FONKSİYONEL Ni-W ESASLI KOMPOZİT KAPLAMALARIN MİKROYAPISAL VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ” adlı tez çalışması 25.09.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **Doktora tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :

Jüri Üyesi :

Jüri Üyesi :

Jüri Üyesi :

Jüri Üyesi :



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

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

(25/09/2025)

Erhan DURU







TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim süresince hiçbir maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, her zaman yol gösterici tutumuyla bana rehberlik eden, bilgi ve tecrübelerini büyük bir sabır ve anlayışla paylaşan değerli hocam Doç. Dr. Serdar ASLAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım boyunca bilimsel yaklaşımıyla bana yön veren, yapıcı eleştirileri ve destekleriyle gelişimime katkı sağlayan Prof. Dr. Hatem AKBULUT, Prof. Dr. İlkay ŞİŞMAN, Doç. Dr. Mehmet UYSAL ve Dr. Öğr. Üyesi Deniz GÜLTEKİN'e samimi teşekkürlerimi iletirim.

Ayrıca, çalışmamın çeşitli aşamalarında laboratuvar altyapısı ve teknik imkânlarıyla destek sağlayan Munzur Nadir Toprak Elementleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (MUNTEAM) ile Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü (BOREN)'e teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan, desteği, sabrı ve motivasyonu ile bana güç veren sevgili eşim Zeynep'e ve her koşulda yanımda olduklarını hissettiren aileme gönülden teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince katkılarını ve dostluklarını esirgemeyen Dr. Öğr. Görevlisi Fuat KAYIŞ, Dr. Öğr. Görevlisi Özlem GÜLDALI, Murat KAZANCI, Erkut TAŞ, Arş. Gör. Sezer TAN ve isimlerini tek tek sayamadığım tüm değerli mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Yüksek lisans ve doktora eğitimim boyunca aynı çalışma ortamında bulunduğum ve bu süreçte paylaşımlarda bulunduğum arkadaşlarım Engin ALKAN, Mustafa Mahmut SİNGİL ve Mücahit DOĞAN'a da teşekkür ederim.

Erhan DURU



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
ŞİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Kapsamı	2
1.2. Tezin Amacı	2
1.3. Hipotez	3
2. ELEKTROKİMYASAL KAPLAMALAR	5
2.1. Akımsız Kaplamalar	6
2.1.1. Akımsız kaplamanın temel prensipleri	10
2.1.2. Kullanılan kimyasallar ve bileşenler	13
2.1.3. Yaygın akımsız kaplama türleri	16
2.1.4. Uygulama alanları	19
2.2. Akımlı (Elektrodepozisyon) Kaplamalar	22
2.2.1. Akımlı kaplamanın temel prensipleri	24
2.2.2. Akımlı kaplama hücresi ve bileşenleri	26
2.2.3. Kaplama türleri	28
2.2.4. Uygulama alanları	31
3. Ni-W KAPLAMALARIN TEMELLERİ VE ÖZELLİKLERİ	35
3.1. Ni-W Alaşımlarının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	35
3.2. Akımlı Kaplama Yöntemi ile Ni-W Kaplama Üretimi	37
3.2.1. Volframın eş biriktirilmesi: mekanizma ve zorluklar	38
3.2.2. Darbeli akım yöntemiyle kaplama ve mikro-yapısal kontrol	39
3.3. Ni-W Kaplamaların Mikroyapı ve Faz Bileşimi	41
3.3.1. Mikroyapının katman kalitesi üzerindeki rolü	42
3.3.2. Amorf, nanokristalin ve kristalin yapıların oluşumu	44
3.3.3. Faz dağılımı ve elementel analiz	45
3.4. Ni-W Kaplamaların Mekanik, Aşınma ve Korozyon Direnci	46
3.5. Ni-W Kompozit Kaplamalarda Takviye Edici Malzemeler	47
3.5.1. Seramik partiküller (SiC, TiC, Al ₂ O ₃) ile takviye	48
3.5.2. Nadir toprak oksitleri (Er ₂ O ₃ , Y ₂ O ₃) ile fonksiyonel geliştirme	49
3.5.3. Karbon fiber ve grafen oksit ile mekanik dayanım artırımı	50
3.5.4. Takviye edici malzemelerin mikroyapıya etkisi	51
3.5.5. Kompozit kaplamaların korozyon ve aşınma performansı	53
3.5.6. Kaplamaların karakterizasyonu ve performans analizi	54

3.6. Uygulama Alanları ve Endüstriyel Potansiyel	55
3.6.1. Otomotiv ve havacılık sektöründe kullanım alanları	56
3.6.2. Enerji ve petrokimya endüstrisinde korozyon koruma	57
3.7. Sert Krom Kaplamalara Alternatif Olarak Ni-W Kaplamalar	58
4. ÇOK KATMANLI KAPLAMA TEKNOLOJİLERİ	61
4.1. Çok Katmanlı Kaplama Teknolojisinin Temelleri ve Evrimi	61
4.1.1. Çok katmanlı kaplama kavramı.....	62
4.1.2. Tarihsel gelişim süreci ve uygulama alanlarının evrimi	63
4.1.3. Nano ve mikro ölçekli katmanlı yapıların önemi.....	65
4.2. Çok Katmanlı Kaplamaların Avantajları ve Teknolojik Üstünlükleri	66
4.3. Akımlı Kaplama Yöntemiyle Katmanlı Yapıların Sentezlenmesi	68
4.4. Katmanlar Arası Gerilme Dağılımı, Uyum ve Yapışma Mekanizmaları	70
4.5. Çok Katmanlı Kaplamalarda Karakterizasyon Teknikleri	71
4.6. Uygulama Alanlarına Göre Çok Katmanlı Kaplama Sistemlerinin Sınıflandırılması	71
4.7. Katmanlı Yapıların Optimum Performans Parametreleri.....	72
5. LİTERATÜRDEKİ ÖNEMLİ ÇALIŞMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	77
5.1. Katmanlı Kaplamalar Üzerine Yapılmış Çalışmalar	77
5.2. Literatürdeki Eksikler ve İhtiyaçlar	80
5.3. Bu Tezin Literatüre Katkı Potansiyeli	82
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	85
6.1. Altlığın Hazırlanması	85
6.2. Kaplama Banyosu Şartları	86
6.3. Taguchi Optimizasyon Yöntemiyle Ni-W Kaplama Banyosunun Optimizasyonu.....	86
6.4. Grafen ve Al ₂ O ₃ Takviyeli Ni-W Kompozit Kaplamalar.....	90
6.5. Kaplamaların Karakterizasyonu	91
7. BULGULAR VE TARTIŞMA	95
7.1. Taguchi Metodu Yöntemiyle Ni-W Kaplamaların Optimizasyonu	95
7.1.1. Sinyal-Gürültü sonuçları	99
7.1.2. Varyans analizi (ANOVA) sonuçları	103
7.2. Farklı Konsantrasyonlarda Grafen Takviyeli Ni-W/Grafen Kompozit Kaplamalar	106
7.3. Farklı Konsantrasyonlarda Al ₂ O ₃ Takviyeli Ni-W/ Al ₂ O ₃ Kompozit Kaplamalar	115
7.4. Çok Katmanlı Kaplamalar	121
8. SONUÇ ve ÖNERİ.....	151
8.1. Sonuçlar.....	151
8.2. Öneriler.....	153
KAYNAKLAR.....	155
ÖZGEÇMİŞ.....	159

KISALTMALAR

AFM	: Atomik Kuvvet Mikroskobu
ANOVA	: Varyans Analizi
DC	: Doğru Akım
E	: Elastik modül
EDS	: Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi
EIS	: Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi
FESEM	: Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu
GPa	: Gigapaskal
HF	: Hertzian Failure Class (Rockwell-C yapışma testinde sınıflandırma)
HV	: Vickers Sertlik Birimi
OCP	: Açık Devre Potansiyeli
Rpm	: Dakikadaki devir sayısı
S/N	: Sinyal/Gürültü Oranı
SCE	: Doymuş Kalomel Elektrot
SDS	: Sodium Dodecyl Sulfate
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SHE	: Standart Hidrojen Elektrotu
XRD	: X-Işını Difraksiyonu



SİMGELER

A	: Amper
Å	: Angstrom
Al₂O₃	: Alümina
Cdl	: Çift tabaka kapasitansı
cm	: Santimetre
CRX	: X faktörünün toplam varyans içindeki katkı oranı
DFX	: X faktörüne ait serbestlik derecesi
dm	: Desimetre
E_{corr}	: Korozyon potansiyeli
f	: Frekans (Hz)
I_{corr}	: Korozyon akım yoğunluğu
kV	: Kilovolt
n	: Deney sayısı
N	: Newton
N_x	: X faktörüne ait tekrar sayısı
R_{ct}	: Şarj transfer direnci
R_s	: Çözelti direnci
SNR-LB	: “Larger-is-Better” kriterine göre sinyal/gürültü oranı
SSE	: Hata kareler toplamı
SST	: Toplam kareler toplamı
SSX	: X faktörüne ait kareler toplamı
V_x	: X faktörüne ait varyans
$\bar{x}_{ij}$	: Genel ortalama
x_{ij}	: i. gözlemin j. faktördeki değeri
$\bar{x}_{xj}$	: j. seviyede X faktörünün ortalama değeri
y_i	: i. deneyden elde edilen performans değeri
λ	: X-Işını dalga boyu
μ	: Sürtünme katsayısı
Φ	: Faz açısı



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 6.1. Uygulanan sabit kaplama banyosu parametreleri.	86
Tablo 6.2. Ni-W kaplama banyosu bileşenleri ve konsantrasyon seviyeleri.....	88
Tablo 6.3. L16 dizisi ile belirlenen kaplama banyo kombinasyonları.	88
Tablo 6.3. (Devamı) L16 dizisi ile belirlenen kaplama banyo kombinasyonları.....	89
Tablo 6.4. Ni-W/Grafen ve Ni-W/Al ₂ O ₃ kompozit kaplama deney parametreleri. ..	91
Tablo 6.5. Kullanılan cihazlar, marka/model bilgileri ve analiz amaçları.	94
Tablo 7.1. L16 ortogonal diziye göre üretilen 16 adet kaplamanın EDS analizi, kalınlık ve sertlik ölçümleri sonuçları.	98
Tablo 7.2. L16 ortogonal dizisinin özeti.	99
Tablo 7.3. Her seviyede kalınlık için sinyal-gürültü oranı ortalamaları.	100
Tablo 7.4. Her seviyede sertlik için sinyal-gürültü oranı ortalamaları.....	101
Tablo 7.5. Kalınlık ve sertlik için ANOVA sonuçları.....	104
Tablo 7.6. Taguchi sonucu oluşturulan en yüksek kalınlık ve en yüksek sertlik banyolarının kimyasal bileşimleri.	105
Tablo 7.7. Katmansız ve çok katmanlı kaplamaların sertlik, elastik modül, sürtünme katsayısı, aşınma hızı ve aşınma hacmi değerlerinin karşılaştırılması....	139
Tablo 7.8. Korozyon testinden elde edilen Ekor,Ikor ve korozyon hızı değerleri. .	148
Tablo 7.9. Empedans eğrilerine göre fitlenmiş elektrokimyasal performans değerleri.	149



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 7.1. L16 ortogonal diziye göre üretilen 16 adet kaplamanın 500X büyütmedeki yüzey SEM görüntüleri.	95
Şekil 7.2. L16 ortogonal diziye göre üretilen 16 adet kaplamanın 2000X büyütmedeki kesit SEM görüntüleri.	96
Şekil 7.3. L16 ortogonal diziye göre üretilen 16 adet kaplamanın yüzey ve kesit SEM görüntüleri.	97
Şekil 7.4. L16 ortogonal diziye göre üretilen 16 adet kaplamanın 10000X büyütmedeki yüzey FESEM görüntüleri.	97
Şekil 7.5. Kalınlık için ortalama sinyal-gürültü oranı grafikleri.	102
Şekil 7.6. Sertlik için ortalama sinyal-gürültü oranı grafikleri.	103
Şekil 7.7. Taguchi deney tasarımının en yüksek kalınlık için oluşturduğu A3B4C4D4E1 kaplamaları farklı büyütme ölçeklerindeki yüzey ve kesit FESEM görüntüleri.	105
Şekil 7.8. Taguchi deney tasarımının en yüksek sertlik için oluşturduğu A1B3C1D2E2 kaplamaları farklı büyütme ölçeklerindeki yüzey ve kesit FESEM görüntüleri.	106
Şekil 7.9. Farklı grafen konsantrasyonlarında üretilen Ni-W/Grafen kompozit kaplamaların farklı büyütme ölçeklerindeki yüzey FESEM görüntüleri. Hata! Yer işareti tanımlanmamış.	
Şekil 7.10. Farklı grafen konsantrasyonlarında üretilen Ni-W/Grafen kompozit kaplamaların kesit FESEM görüntüleri.	108
Şekil 7.11. Farklı grafen konsantrasyonlarında üretilen Ni-W/Grafen kompozit kaplamaların zeta potansiyeli ölçüm sonuçları.	110
Şekil 7.12. Farklı grafen konsantrasyonlarında üretilen Ni-W/Grafen kompozit kaplamaların XRD analiz sonuçları.	112
Şekil 7.13. Farklı grafen konsantrasyonlarında üretilen Ni-W/Grafen kompozit kaplamaların sertlik ve elastik modül değerleri.	113
Şekil 7.14. Farklı Al ₂ O ₃ konsantrasyonlarında üretilen Ni-W/Al ₂ O ₃ kompozit kaplamaların farklı büyütme ölçeklerindeki yüzey FESEM görüntüleri.	115
Şekil 7.15. Farklı Al ₂ O ₃ konsantrasyonlarında üretilen Ni-W/Al ₂ O ₃ kompozit kaplamaların kesit FESEM görüntüleri.	117
Şekil 7.16. Farklı Al ₂ O ₃ konsantrasyonlarında üretilen Ni-W/Al ₂ O ₃ kompozit kaplamaların zeta potansiyeli ölçümleri.	118
Şekil 7.17. Farklı Al ₂ O ₃ konsantrasyonlarında üretilen Ni-W/Al ₂ O ₃ kompozit kaplamaların XRD analizleri.	120
Şekil 7.18. Farklı Al ₂ O ₃ konsantrasyonlarında üretilen Ni-W/Al ₂ O ₃ kompozit kaplamaların sertlik ve elastik modül değerleri.	120
Şekil 7.19. Katmansız ve çok katmanlı kaplamaların şematik gösterimi.	122
Şekil 7.20. Çok katmanlı kaplamaların yüzey FESEM görüntüleri.	124
Şekil 7.21. Çok katmanlı kaplamaların kesit FESEM görüntüleri.	126
Şekil 7.22. Katmansız ve çok katmanlı kaplamaların yüzey ve kesit FESEM görüntülerinin karşılaştırılması.	128

Şekil 7.23. Katmansız ve çok katmanlı kaplamaların XRD grafiklerinin karşılaştırılması.	128
Şekil 7.24. Katmansız ve çok katmanlı kaplamaların sertlik ve elastik modül değerleri: a) katmansız kaplamaların sertlik değerleri, b) çok katmanlı kaplamaların sertlik değerleri, c) katmansız kaplamaların elastik modül değerleri ve d) çok katmanlı kaplamaların elastik modül değerleri.	130
Şekil 7.25. Katmansız ve çok katmanlı kaplamaların kesit ve yüzeyden alınan sertlik ölçümlerinin görüntüleri.....	132
Şekil 7.26. Daimler-Benz Rockwell-C yapışma testi iz görüntülerinin şematik gösterimi.....	132
Şekil 7.27. Daimler-Benz Rockwell-C yapışma test sonuçları, Rockwell-C batıcı ucunun iz görüntüleri.	133
Şekil 7.28. Daimler-Benz Rockwell-C yapışma testi sonrası Ni-W ve NAG kaplamalarının yüzey ve kesit görüntülerinin karşılaştırılması.....	135
Şekil 7.29. Katmansız ve çok katmanlı kaplamaların sürtünme katsayısı ve aşınma hızı grafikleri: a) katmansız kaplamaların sürtünme katsayısı değerleri, b) çok katmanlı kaplamaların sürtünme katsayısı değerleri, c) katmansız kaplamaların aşınma hızı değerleri ve d) çok katmanlı kaplamaların aşınma hızı değerleri.....	136
Şekil 7.30. Katmansız ve çok katmanlı kaplamaların aşınma bölgelerinin SEM görüntüleri.	140
Şekil 7.31. Katmansız ve çok katmanlı kaplamaların aşınma bölgelerinin üç boyutlu profilometre görüntüleri.	143
Şekil 7.32. Korozyon testinden sonra elde edilen grafikler: a) açık devre potansiyelleri, b) Tafel eğrileri, c) empedans eğrileri, d) Bode eğrisi, e) faz açıları eğrisi ve f) eşdeğer devre.	146

ÇOK KATMANLI FONKSİYONEL Ni-W ESASLI KOMPOZİT KAPLAMALARIN MİKROYAPISAL VE TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, St37 çelik altlık üzerine akımlı kaplama (electrodeposition) yöntemiyle katmansız (tek tabakalı) ve çok katmanlı (multilayer) Ni-W esaslı kompozit kaplamalar geliştirilmiş ve bu kaplamaların yapısal, mekanik, tribolojik ve elektrokimyasal özellikleri kapsamlı biçimde incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, Ni-W alaşım kaplamalarının sınırlı aşınma ve korozyon dayanımını, uygun seramik ve karbon temelli takviyeler ile katmanlı mimari yaklaşımlar kullanarak iyileştirmektir. Böylece hem yüksek sertlik hem de düşük sürtünme katsayısı sergileyen, endüstriyel tribolojik uygulamalara uygun yüzeylerin elde edilmesi hedeflenmiştir.

İlk aşamada, Ni-W kaplama banyosunun optimizasyonu için Taguchi deney tasarımı yaklaşımı uygulanmıştır. Akım yoğunluğu, sıcaklık, pH ve banyo bileşimi gibi parametrelerin farklı kombinasyonları değerlendirilmiş; optimum koşullarda yüksek sertliğe, düzgün morfolojiye ve çatlak içermeyen kompakt yapıya sahip kaplamalar üretilmiştir. Elde edilen bu optimizasyon, sonraki kompozit ve çok katmanlı kaplama üretimlerinde referans koşul olarak kullanılmıştır. Takiben, grafen ve Al_2O_3 takviyeleri farklı derişimlerde banyoya ilave edilerek tek tabakalı kompozit kaplamalar hazırlanmış; son aşamada ise bu üç sistem (Ni-W, Ni-W/Grafen ve Ni-W/ Al_2O_3 farklı sıralamalarda ardışık olarak biriktirilerek çok katmanlı mimariler oluşturulmuştur. Katman dizilimlerinde G, A ve N harfleri sırasıyla grafen takviyeli, Al_2O_3 takviyeli ve yalnızca Ni-W tabakalarını temsil etmektedir. Deneysel planlama süresince banyo koşulları sabit tutularak katkı fazlarının etkileri yalın biçimde ortaya konmuştur.

Kaplamaların karakterizasyonu çok yönlü analizlerle desteklenmiştir. SEM, FESEM ve EDS analizleriyle yüzey morfolojisi, partikül dağılımı ve kompozisyon belirlenmiş; XRD analizleriyle faz oluşumları, kristal yönelimleri ve mikrogerinim değişimleri değerlendirilmiştir. XRD sonuçları, amorf-nanokristalin yapı geçişinin takviye türüne bağlı olarak farklılık gösterdiğini ve Al_2O_3 katkısının tane boyutunu küçülttüğünü ortaya koymuştur. Mikromekanik davranışlar nano ve mikrosertlik testleri ile incelenmiş, elastik modül hesaplamalarıyla birlikte malzeme rijitliği değerlendirilmiştir. Tribolojik testler, kuru kayma koşullarında (5 N yük, 0,1 m/s hız, 500 m mesafe) gerçekleştirilmiş; elektrokimyasal karakterizasyon ise 3,5 % NaCl çözeltisinde potansiyodinamik polarizasyon (Tafel), açık devre potansiyeli (OCP) ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) yöntemleriyle yürütülmüştür.

Tek tabakalı kaplamalarda, Ni-W kaplamasının sertliği 864 HV ve elastik modülü 214 GPa iken, optimum grafen derişimi 150 mg/L olarak belirlenmiş; bu numune nanosertlik yaklaşık 914 HV, elastik modül ise yaklaşık 234 GPa olarak ölçülmüştür. Grafen miktarının 200 mg/L'ye çıkarılmasıyla partikül aglomerasyonu oluşmuş ve buna bağlı olarak sertlik ile elastik modül değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Al_2O_3 katkılı sistemlerde optimum derişim 15 g/L olarak saptanmış; bu koşulda sertlik ~1068

HV, elastik modül ise ~252 GPa değerine ulaşmıştır. Ancak 20 g/L Al₂O₃ ilavesiyle partikül topaklanması ve süreksizlikler meydana gelmiş, mekanik özelliklerde düşüş kaydedilmiştir. Bu sonuçlar, her iki takviyenin de belirli bir derişime kadar mekanik özellikleri artırdığını; ancak aşırı katkı durumunda dispersiyonun bozulduğunu göstermektedir. Tribolojik testlerde, katkısız referans Ni-W kaplama $\mu = 0,49$ sürtünme katsayısı ve $2,08 \times 10^{-6}$ mm³/Nm aşınma hızı ile en zayıf performansı sergilemiştir. Grafen takviyeli Ni-W/G kaplamada sürtünme katsayısı $\mu \approx 0,35$, aşınma hızı $1,76 \times 10^{-6}$ mm³/Nm; Al₂O₃ takviyeli Ni-W/A kaplamada ise sürtünme katsayısı $\mu \approx 0,41$, aşınma hızı $1,71 \times 10^{-6}$ mm³/Nm olarak ölçülmüştür. Bu değerler, grafen katkısıyla sürtünmede yaklaşık %28, Al₂O₃ katkısıyla ise %17 oranında iyileşme sağlandığını göstermektedir. Aynı şekilde aşınma hızlarında da yaklaşık %20'ye varan azalmalar elde edilmiştir. Çok katmanlı yapılarda mekanik, tribolojik ve elektrokimyasal özellikler birlikte değerlendirildiğinde belirgin bir sinerji gözlenmiştir. Tüm dizilimler arasında en düşük sürtünme katsayısı, üst katmanı grafenli olan GAN konfigürasyonunda elde edilmiştir ($\mu \approx 0,27$). Bu değer, tek tabakalı Ni-W kaplamaya kıyasla yaklaşık %45 oranında azalma anlamına gelmektedir. Aşınma dayanımı bakımından en iyi performans, üst katmanı Al₂O₃ içeren AGN diziliminde kaydedilmiştir; bu kaplamada aşınma hızı $1,39 \times 10^{-6}$ mm³/Nm olarak ölçülmüş ve bu değer tek tabakalı Ni-W sistemine göre %33 oranında iyileşme sağlamıştır. Çok katmanlı sistemlerde elde edilen bu değerler, farklı takviye fazlarının katmanlar arasında ardışık olarak kullanılmasıyla ortaya çıkan sinerjik etkiyi sayısal olarak ortaya koymaktadır. Mekanik testler, orta katmanı Al₂O₃ ve üst katmanı grafen içeren çok katmanlı yapıların en yüksek sertlik değerlerine ulaştığını göstermiştir. Bu kombinasyonda ölçülen sertlik 1100 HV'nin üzerinde olup, katmanlar arası çekirdeklenme bölgelerinin tane incelmeye ve yüksek yoğunluklu mikroyapı oluşumuna katkı sağladığı belirlenmiştir. Alt katmanlarda meydana gelen heterojen çekirdeklenme bölgeleri, üst katmanlarda yönelimli büyümeyi teşvik etmiş; böylece kaplama boyunca sertlik dağılımının dengelendiği ve yüzey yoğunluğunun arttığı gözlenmiştir. Bu yapı sayesinde çok katmanlı mimarilerin yalnızca farklı fazların ardışık birleşimi değil, aynı zamanda katmanlar arası etkileşimlerle yeniden şekillenen dinamik bir sistem olduğu ortaya konmuştur.

Sonuç olarak, bu çalışma Ni-W esaslı kompozit kaplamalarda çok katmanlı mimarinin hem mekanik hem tribolojik hem de korozyon performansını eşzamanlı olarak iyileştirebildiğini açıkça ortaya koymuştur. Çok katmanlı sistemlerde, tek tabakalı muadillere kıyasla daha yüksek sertlik, daha düşük sürtünme katsayısı ve daha kararlı pasif film oluşumu gözlenmiştir. Bu bulgular, grafen ve Al₂O₃ takviyelerinin sinerjik etkisiyle optimize edilen Ni-W tabanlı çok katmanlı kaplamaların, özellikle aşınma ve korozyonun birlikte etkili olduğu enerji, savunma, havacılık ve otomotiv endüstrilerinde yenilikçi bir yüzey mühendisliği çözümü sunabileceğini göstermektedir.

ÇOK KATMANLI FONKSİYONEL Ni-W ESASLI KOMPOZİT KAPLAMALARIN MİKROYAPISAL VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

SUMMARY

In this study, single-layer (monolithic) and multilayer Ni–W-based composite coatings were developed on St37 steel substrates via the electrodeposition method, and their structural, mechanical, tribological, and electrochemical properties were comprehensively investigated. The primary objective of this work was to enhance the limited wear and corrosion resistance of conventional Ni–W alloy coatings by employing suitable ceramic and carbon-based reinforcements within a multilayer architectural design. The ultimate goal was to obtain functionally engineered surfaces that exhibit both high hardness and low friction coefficient, suitable for industrial tribological applications operating under simultaneous mechanical and corrosive loads.

In the first stage, the Ni–W plating bath was optimized using the Taguchi experimental design approach. Parameters such as current density, temperature, pH, and bath composition were systematically varied, and the optimal conditions yielded dense, crack-free coatings with uniform morphology and high hardness. The optimized parameters were subsequently used as the baseline for composite and multilayer coating fabrication. Following this optimization, graphene and Al₂O₃ reinforcements were added to the bath at different concentrations to produce single-layer composite coatings. In the final stage, three systems—Ni–W, Ni–W/graphene, and Ni–W/Al₂O₃—were deposited sequentially in different stacking sequences to construct multilayer architectures. In the naming scheme, G, A, and N denote graphene-reinforced, alumina-reinforced, and pure Ni–W layers, respectively. Throughout the experimental process, bath conditions were kept constant to isolate the effects of the reinforcement phases on the coating properties.

The characterization of the coatings was carried out using multiple complementary techniques. SEM, FESEM, and EDS analyses were performed to determine the surface morphology, particle dispersion, and elemental composition, while XRD analyses were employed to identify phase formation, crystallographic orientation, and possible microstrain variations. The XRD results revealed that the amorphous-to-nanocrystalline structural transition strongly depended on the type of reinforcement and that the addition of Al₂O₃ promoted grain refinement. Micromechanical behavior was assessed through nano- and micro-hardness measurements, while elastic modulus values were determined to evaluate the stiffness of the coatings. Tribological tests were performed under dry sliding conditions using a pin-on-disk setup (applied load: 5 N, sliding speed: 0.1 m/s, sliding distance: 500 m). Electrochemical characterization was conducted in 3.5 wt.% NaCl solution using potentiodynamic polarization (Tafel), open-circuit potential (OCP), and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) measurements.

For the single-layer coatings, the hardness and elastic modulus of the plain Ni–W coating were measured as 864 HV and 24 GPa, respectively. The optimum graphene concentration was determined as 150 mg/L, at which the coating exhibited a nano-hardness of ~914 HV and an elastic modulus of ~234 GPa. When the graphene concentration was increased to 200 mg/L, particle agglomeration occurred, leading to a reduction in both hardness and modulus. In the Al₂O₃ reinforced system, the optimum concentration was identified as 15 g/L, corresponding to a hardness of ~1068 HV and an elastic modulus of ~252 GPa. Increasing the Al₂O₃ content to 20 g/L caused particle clustering and discontinuities, resulting in a deterioration of the mechanical properties. These findings quantitatively confirm that both reinforcements improve mechanical performance up to their optimal concentrations, beyond which excessive loading induces agglomeration and a loss of homogeneity.

Tribological analysis demonstrated that the unreinforced Ni–W coating exhibited the poorest performance, with a friction coefficient of $\mu = 0.49$ and a wear rate of $2.08 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$. The incorporation of graphene and Al₂O₃ significantly enhanced tribological behavior. For the Ni–W/graphene coating, the friction coefficient decreased to $\mu \approx 0.35$ and the wear rate to $1.76 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$, whereas for the Ni–W/Al₂O₃ coating, these values were $\mu \approx 0.41$ and $1.71 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$, respectively. These results indicate an approximate 28% reduction in friction for graphene reinforcement and a 17% reduction for Al₂O₃ reinforcement, along with a ~20% decrease in wear rate compared to the pure Ni–W coating.

When multilayer architectures were evaluated in terms of mechanical, tribological, and electrochemical performance, a pronounced synergistic effect was observed. Among all configurations, the lowest friction coefficient was obtained for the GAN sequence (top layer: graphene), with $\mu \approx 0.27$, corresponding to a ~45% decrease relative to the single-layer Ni–W coating. The highest wear resistance was recorded for the AGN configuration, with a wear rate of $1.39 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$, representing a ~33% improvement over the monolithic Ni–W coating. These numerical findings confirm that different reinforcement phases, when deposited sequentially in a multilayer structure, interact synergistically to optimize tribological performance.

Mechanical testing further revealed that the multilayer configuration containing an Al₂O₃ middle layer and a graphene-rich top layer exhibited the highest hardness, exceeding 1100 HV. The enhancement in hardness was attributed to the refined grain structure and the formation of dense microstructures induced by heterogeneous nucleation at interlayer interfaces. The lower layers were found to influence the nucleation behavior of subsequent layers, promoting oriented grain growth and improving coating uniformity. The formation of heterogeneous nucleation zones at interlayer boundaries facilitated better adhesion and load transfer, resulting in a uniform hardness distribution and a denser surface. Thus, the multilayer architecture not only represented the simple stacking of dissimilar phases but also functioned as a dynamic system where interlayer interactions continuously refined the overall microstructure.

In summary, the results demonstrate that the multilayer Ni–W-based composite coatings provide simultaneous improvements in mechanical, tribological, and corrosion performance compared with their monolithic counterparts. Quantitatively, the multilayer systems achieved a ~45% reduction in friction coefficient, a >30% reduction in wear rate, and an approximately 40% increase in corrosion resistance relative to the single-layer Ni–W coating. The observed synergy originates from the

complementary roles of the reinforcements: graphene acts as a solid lubricating film at the surface, reducing shear stresses, while Al_2O_3 serves as a hard load-bearing phase that strengthens the coating and enhances its chemical stability. Furthermore, interlayer interfaces act as barriers against dislocation motion and crack propagation, providing enhanced mechanical integrity.

Overall, this study clearly demonstrates that the integration of graphene and Al_2O_3 within multilayer Ni–W matrices result in a synergistic enhancement of coating performance. The optimized multilayer architectures—particularly GAN and AGN configurations—exhibit excellent durability, superior tribological stability, and improved electrochemical resistance, positioning these coatings as promising candidates for advanced surface engineering applications in energy, defense, aerospace, and automotive industries, where simultaneous wear and corrosion resistance are critically required.





1. GİRİŞ

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan metal yüzeyler, servis ömürleri boyunca aynı anda aşındırıcı, mekanik ve kimyasal zorlanmalara maruz kalmaktadır. Özellikle yüksek sıcaklık, yoğun sürtünme ve korozyon ortamlarda çalışan parçaların ömrü, yüzey özellikleri tarafından belirlenmektedir. Bu nedenle yüzey mühendisliği, yalnızca yüzey özelliklerini değiştiren ama altlık malzemenin tokluğunu koruyan yöntemleriyle, günümüzde stratejik öneme sahip bir araştırma alanı hâline gelmiştir.

Uzun yıllardır sert krom kaplamalar, yüksek sertlikleri ve korozyon dayanımları sayesinde yaygın biçimde kullanılagelmiştir. Ancak insan sağlığına ve çevreye zararları nedeniyle altı değerlikli krom bileşiklerinin kullanımı kısıtlanmış ve alternatif yüzey kaplama çözümleri arayışı hız kazanmıştır. Bu bağlamda nikel esaslı kaplamalar, yüksek aşınma direnci, korozyon dayanımı ve ekonomik uygulanabilirlikleri ile öne çıkmıştır. Nikelin tungsten ile alaşım oluşturması ise kaplamaların sertliğini, yüksek sıcaklık stabilitesini ve genel mekanik performansını önemli ölçüde artırmaktadır. Bu nedenle Ni-W kaplamalar, son yıllarda sert kromun yerini alabilecek çevreci alternatifler arasında en çok ilgi gören sistemlerden biridir.

Bununla birlikte, katmansız (tek tabakalı) Ni-W kaplamalar, yalnızca belirli özellikleri iyileştirmekte başarılı olmuş; fakat aynı anda hem yüksek sertlik hem düşük sürtünme hem de yüksek korozyon direnci sağlama konusunda sınırlı kalmıştır. Bu noktada farklı takviye malzemelerinin matrise eklenmesi ile kompozit kaplamalar geliştirilmiştir. Karbon temelli grafen, yüksek yüzey alanı ve katı yağlayıcı özelliği sayesinde sürtünme katsayısını düşürme ve aşınma davranışını iyileştirme potansiyeli sunarken; Al_2O_3 gibi seramik fazlar, yüksek sertlikleri sayesinde kaplamaların deformasyon direncini ve yük taşıma kapasitesini artırmaktadır. Ancak bu katkıların tek tabakalı sistemlerde uygulanması, homojen dağılım sorunları ve aglomerasyon eğilimleri nedeniyle sınırlı fayda sağlamaktadır.

Bu sınırlılıkların aşılabilmesi için literatürde giderek daha fazla önem kazanan çok katmanlı (multilayer) kaplamalar, farklı işlevlere sahip katmanların ardışık biçimde birleştirilmesiyle geliştirilmiştir. Böylece sert seramik tabakalar yük taşıma kapasitesi

sağlarken, grafen içeren tabakalar sürtünmeyi düşürmekte; Ni-W matrisi ise korozyona karşı bariyer görevi üstlenmektedir. Çok katmanlı yaklaşım, tek bir tabakanın sağlayamadığı özellikleri bir araya getirerek sinerjik bir performans ortaya çıkarmaktadır. Bununla birlikte, Ni-W/Grafen ve Ni-W/Al₂O₃ kompozit kaplamaların çok katmanlı kombinasyonlarının sistematik şekilde incelendiği çalışmalar literatürde oldukça sınırlıdır.

Bu tez çalışması tam bu noktada özgün bir katkı sunmaktadır. Çalışmada önce Ni-W kaplama banyosu Taguchi deneysel tasarım yöntemi ile optimize edilmiş, ardından grafen ve Al₂O₃ katkılarıyla farklı konsantrasyonlarda katmansız kompozit kaplamalar üretilmiştir. Elde edilen en iyi tek tabakalı formülasyonlar, çok katmanlı dizilimlerde birleştirilerek performansları detaylı biçimde karşılaştırılmıştır. Böylece katmansız ve çok katmanlı yapıların mekanik, tribolojik ve korozyon davranışları arasındaki farklar ortaya konmuş; çok katmanlı mimarilerin sunduğu sinerjik etkinin açıklanması hedeflenmiştir.

1.1. Tezin Kapsamı

Bu tez çalışmasının kapsamı, Ni-W esaslı kaplamaların tek tabakalı ve çok katmanlı yapılar hâlinde üretilmesi ve bunların yapısal, mekanik, tribolojik ve korozyon özelliklerinin sistematik olarak karşılaştırılmasına dayanmaktadır. Çalışmada St37 çeliği altlık olarak kullanılmış, kaplamalar akımlı (elektrodepozisyon) yöntemle üretilmiş ve Ni-W banyosu Taguchi deneysel tasarım yöntemi kullanılarak optimize edilmiştir. Optimum parametreler belirlendikten sonra grafen ve Al₂O₃ katkılarıyla katmansız kompozit kaplamalar hazırlanmış, ardından bu en iyi numunelerden hareketle çok katmanlı kaplama sistemleri tasarlanmıştır. Üretilen kaplamalar SEM, FESEM, EDS ve XRD analizleri ile mikroyapısal açıdan, mikrosertlik ve nanoindentasyon testleri ile mekanik açıdan, aşınma testleriyle ile tribolojik açıdan ve elektrokimyasal yöntemlerle korozyon açısından değerlendirilmiştir.

1.2. Tezin Amacı

Tezin temel amacı, Ni-W esaslı tek tabakalı kaplamaların sınırlı performansını aşarak, çok katmanlı yapılar aracılığıyla kaplamaların sertlik, tribolojik davranış ve korozyon direncini aynı anda geliştirmektir. Bu amaç doğrultusunda, Ni-W kaplama banyosunun optimize edilmesi, grafen ve Al₂O₃ katkılarının en uygun konsantrasyonlarının

belirlenmesi, elde edilen en iyi tek tabakalı kaplamalardan çok katmanlı yapılar oluşturulması ve bu yapıların katmansız muadillerine göre performans üstünlüğünün ortaya konulması hedeflenmiştir.

1.3. Hipotez

Bu tez çalışmasının hipotezi, çok katmanlı Ni-W kompozit kaplamaların, katmansız muadillerine göre daha yüksek sertlik, daha düşük sürtünme katsayısı, daha düşük aşınma hızı ve daha yüksek korozyon dayanımı göstereceğidir. Grafen takviyesinin katı yağlayıcı yapısı sayesinde tribolojik performansı, Al_2O_3 takviyesinin ise seramik doğası gereği mekanik dayanımı artıracığı; ancak optimum katkı oranlarının aşılması durumunda aglomerasyon nedeniyle faydanın sınırlanacağı öngörülmektedir. Ayrıca katmanlı tasarımın, farklı katmanların işlevlerini bir araya getirerek sinerjik bir etki yaratacağı; örneğin ara katmanda Al_2O_3 'ün yük taşıma kapasitesi sağlarken, üst katmanda grafenin sürtünmeyi düşüreceği ve Ni-W matrisin korozyon bariyeri görevi üstleneceği düşünülmektedir.



2. ELEKTROKİMYASAL KAPLAMALAR

Kaplama teknolojileri, malzeme yüzeylerinin işlevselliğini geliştirmek adına uzun yıllardır endüstride geniş bir uygulama alanına sahiptir. Özellikle mikro ve nano ölçekte kontrol imkânı sunan kaplama yöntemleri, yalnızca fiziksel dayanımı değil, aynı zamanda korozyon direnci, elektriksel iletkenlik, termal kararlılık ve biyouyumluluk gibi kritik performans kriterlerini de iyileştirebilmektedir. Bu çerçevede elektrokimyasal kaplamalar, metal yüzeylerin işlenmesinde elektrokimyasal ve kimyasal süreçlerin eş zamanlı olarak kullanıldığı, oldukça hassas ve kontrollü bir yüzey modifikasyon yöntemidir.

Elektrokimyasal kaplama yöntemleri genel olarak iki ana grupta değerlendirilmektedir: akımlı (elektrodepozisyon) ve akımsız kaplama. Akımlı, metal iyonlarının harici bir elektrik akımı yardımıyla katot yüzeyinde indirgenerek çöktürülmesine dayanmaktadır. Bu yöntemde akım yoğunluğu, potansiyel, pH, sıcaklık ve banyo bileşimi gibi parametreler doğrudan kaplama morfolojisini, faz yapısını ve performansını belirlemektedir (Bülbül, 2014). Akımlı kaplama, nikel, kobalt, bakır ve tungsten esaslı kaplamaların yanı sıra alaşım ve kompozit yapılar için de yaygın biçimde kullanılmaktadır.

Akımsız kaplama (electroless) ise harici bir elektrik akımı olmaksızın, indirgeme ajanlarının etkisiyle metal iyonlarının yüzeye çöktürülmesine dayanan bir yöntemdir. Bu teknikte reaksiyonun ilerlemesi için banyoya indirgen maddeler eklenmekte, özellikle sodyum hipofosfit, borohidrit türevleri ve bazı organik indirgen ajanlar tercih edilmektedir. İndirgeyici maddenin türü ve konsantrasyonu, reaksiyon kararlılığı ile kaplama yapısını belirleyen en önemli faktörler arasında yer almaktadır. Örneğin, fosfor içeriği yüksek akımsız Ni-P kaplamalar daha amorf bir yapı sergilerken, düşük fosfor içerikli kaplamalar kristalin yapıyı desteklemektedir (Atay, 2008). Akımsız kaplama, enerji verimliliği, karmaşık geometrili parçaların homojen şekilde kaplanabilmesi ve kompozit kaplamaların üretilebilmesi açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Murray, 1997).

Her iki yöntemde de kaplama banyosunun pH değeri, sıcaklığı, iyon konsantrasyonu ve katkı maddeleri büyük önem taşımaktadır. Akımlı yöntemde akım yoğunluğu ve elektrokimyasal parametreler belirleyici olurken, akımsız kaplamada indirgen ajanların kimyasal kinetiği ve çözeltinin kararlılığı kritik rol oynamaktadır. Ayrıca yüzey hazırlama işlemleri (mekanik, kimyasal veya plazma tabanlı yöntemlerle yüzeydeki oksit tabakalarının ve kontaminantların giderilmesi) kaplamanın yapışma gücünü artırarak süreçte kritik bir aşamayı oluşturmaktadır.

Elektrokimyasal kaplamalar, yalnızca tek metal tabakalarının üretiminde değil, aynı zamanda çok katmanlı yapılar ve partikül takviyeli kompozit kaplamaların geliştirilmesinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemlerle elde edilen kaplamalar, yüksek sertlik, iyi yapışma, düşük sürtünme katsayısı ve korozyon direnci gibi özellikler sunmakta; havacılık, otomotiv, elektronik, biyomedikal ve savunma sanayii gibi yüksek performans gerektiren sektörlerde tercih edilmektedir (Despotopoulou ve Burchill, 2002). Özellikle paslanmaz çelik ve alüminyum gibi alaşımlarda yüzey performansını artırmak amacıyla uygulanmakta, biyomedikal alanda ise implant yüzeylerinde biyouyumluluğu geliştirmek, bakteri tutunmasını azaltmak ve doku entegrasyonunu kolaylaştırmak için kullanılmaktadır.

Son yıllarda yapılan çalışmalar, elektrokimyasal kaplamaların çevreci hale getirilmesi, toksik bileşenlerin kullanımının azaltılması ve enerji verimliliğinin artırılması yönünde evrim geçirdiğini ortaya koymaktadır. Geleneksel kaplama çözeltilerinde kullanılan bazı toksik tuzların ve katkıların yerine iyonik sıvılar, biyobozunur indirgen ajanlar ve çevre dostu kompleks oluşturuıcı maddeler önerilmektedir. Ayrıca kaplama sürecinin izlenebilirliğini artırmak amacıyla sensör destekli reaktör sistemlerinin entegrasyonu da yeni yaklaşımlar arasında yer almaktadır (Tseluikin, 2009).

Sonuç olarak elektrokimyasal kaplamalar hem akımlı hem de akımsız kaplama yöntemlerini kapsayan, disiplinler arası bilgi birikimi gerektiren ve sürdürülebilirlik, fonksiyonellik ile yüksek dayanım ilkeleri doğrultusunda gelişmeye devam eden stratejik bir yüzey mühendisliği teknolojisi olarak öne çıkmaktadır.

2.1. Akımsız Kaplamalar

Akımsız kaplama teknolojisi, malzeme yüzey mühendisliğinde önemli bir dönüm noktası olarak kabul edilen, enerji kaynağına ihtiyaç duymaksızın metal iyonlarının yüzeye çöktürülmesini sağlayan kimyasal bir kaplama yöntemidir. Bu yöntemin en

temel özelliği, kaplama işleminin dışarıdan bir elektrik akımı uygulanmaksızın, yalnızca kimyasal indirgenme reaksiyonları sayesinde gerçekleştirilmesidir. Bu yönüyle akımlı kaplama (elektrodepozisyon) yönteminden ayrılır. Akımsız kaplamalar, geometrik olarak karmaşık, girintili çıkıntılı veya iç yüzeylerin kaplanmasında sağladığı avantajlarla ön plana çıkmaktadır. Yöntemin temelinde, metal iyonlarının uygun bir indirgen ajan aracılığıyla metal yüzeye kontrollü biçimde çöktürülmesi yer alır. Oluşan kaplama, yüksek yapışma özelliği, homojen kalınlık dağılımı ve işlevsel yüzey özellikleriyle mühendislik uygulamaları için oldukça elverişlidir (Kıyak, 2008).

Kaplama çözeltisinde yer alan metal tuzları, indirgen ajanlar, kompleksleştirici maddeler ve stabilizatörler arasında kurulan hassas kimyasal denge, bu yöntemin başarısında belirleyici rol oynar. Akımsız kaplama çözeltileri, içerdiği kimyasal türlerin etkileşimleri ve reaksiyon kinetiği açısından son derece dinamik sistemlerdir. Metal iyonu, çözeltideki indirgen ajan tarafından indirgenerek yüzeye metal formunda çökerken, bu sırada ortaya çıkan yan ürünler ve tepkime kalıntıları sistemin dengesini etkileyebilir. Bu nedenle çözeltinin pH değeri, sıcaklığı ve bileşen oranları dikkatle kontrol altında tutulmalıdır. Kimyasal indirgeme reaksiyonu sabit bir hızla ilerlediğinde, kaplama kalınlığı zamanla düzenli biçimde artar ve bu durum, kaplanan yüzeyde homojen bir katman oluşmasını sağlar. Aynı zamanda, bu homojenlik, çok katmanlı ya da fonksiyonel kaplamaların elde edilmesini mümkün kılar. Akımsız kaplamalar, metalik tabakaların yanı sıra kompozit yapıların elde edilmesine de olanak tanıyan esnek bir teknolojidir. Kaplama banyosuna eklenen seramik, polimerik ya da metalik partiküller, kaplama sürecinde çöken metal matrisi içerisine gömülerek kompozit bir yapı oluşmasını sağlar. Bu tip uygulamalar, yüzeyin sertlik, aşınma direnci, termal kararlılık ve elektriksel özellikler açısından optimize edilmesine katkı sunar. Ayrıca kaplama işleminde oluşan tabakanın yoğunluğu, gözeneksizlik oranı ve yapışma karakteri, kaplamanın nihai performansında belirleyici olan parametrelerdir (Trentin ve ark., 2022). Bu nedenle akımsız kaplama sistemleri yalnızca bir yüzey işlemi değil, aynı zamanda çok boyutlu bir mühendislik çözümü olarak değerlendirilmelidir. Bu yöntemin sağladığı en önemli avantajlardan biri, elektriksel olarak iletken olmayan yüzeylerin de kaplanabilmesine olanak tanımasıdır. Özellikle plastik esaslı yüzeyler, seramikler ya da kompozit materyaller, belirli ön işlemler sonrası bu teknikle kaplanabilir hale gelmektedir. Kaplamadan önce yüzeyin mikro

ölçekte hazırlanması, pürüzlendirilmesi ve aktif hale getirilmesi gerekir. Bu ön işlemler, metal iyonlarının yüzeye etkin biçimde bağlanabilmesini sağlayarak, kaplama kalitesinin yüksek olmasına katkıda bulunur. Ayrıca yüzeydeki kontaminantlar, yağ ve oksit kalıntıları giderilerek kaplama işlemine uygun hale getirilir. Bu bağlamda yüzey hazırlığı, akımsız kaplamanın başarısında temel bir aşama olarak değerlendirilmelidir.

Kaplama sürecinde kullanılan indirgen ajanların seçimi hem reaksiyon kinetiğini hem de kaplama yapısının özelliklerini doğrudan belirler. Yaygın olarak kullanılan indirgen ajanlar arasında sodyum hipofosfit, sodyum borohidrit ve dimetilamin boran yer almaktadır. Bu ajanlar, metal iyonlarını indirgerken sistemde fosfor veya bor gibi elementlerin de kaplama yapısına entegre olmasına neden olabilir. Böylece nikel-fosfor ya da nikel-bor alaşımları elde edilerek kaplamanın mekanik, kimyasal ve termal özellikleri farklılaştırılabilir. Özellikle Ni-P kaplamalarda fosfor içeriği arttıkça kaplamanın amorf karakteri artarken, daha düşük fosfor içerikli kaplamalar daha kristalin bir yapı sergiler. Bu durum, uygulama alanına göre kaplama yapısının özelleştirilebilmesini mümkün kılar. Sistem içerisinde kullanılan kompleksleştiriciler, metal iyonlarının çözeltideki kararlılığını artırarak, ani çökelmelerin ve çözelti bozulmalarının önüne geçer. Ayrıca stabilizatörler, reaksiyonun istenmeyen yan ürünler üretmesini engelleyerek işlem sürecinin kontrollü bir şekilde devam etmesini sağlar (Avcı, 2009). Kaplama banyosunun ömrü, bu tür katkı maddelerinin verimli çalışmasına doğrudan bağlıdır. Bu nedenle kimyasal dengeyi sağlayan bileşenlerin optimize edilmesi, akımsız kaplamanın sürdürülebilirliğinde kilit rol oynar. Aynı zamanda çözeltinin düzenli olarak analiz edilmesi, metal iyon konsantrasyonunun ve pH değerinin izlenmesi, kaplama sürecinde kalite standardının korunmasına yardımcı olur.

Akımsız kaplama yönteminin endüstriyel uygulamaları oldukça geniş bir yelpazeye yayılmaktadır. Otomotiv sanayinden havacılık ve savunma sektörüne, elektronik bileşenlerden tıbbi implantlara kadar pek çok alanda bu teknolojiyen yararlanılmaktadır. Özellikle yüksek yüzey hassasiyeti, korozyon direnci ve aşınma dayanımı gerektiren parçalarda akımsız kaplamalar önemli avantajlar sunar. Ayrıca bu yöntem, metalik olmayan yüzeylerin iletken hale getirilmesinde de kullanılarak mikro elektronik üretim süreçlerine entegre edilebilmektedir. Bu yönüyle akımsız kaplama, ileri malzeme mühendisliği uygulamalarında önemli bir araç haline gelmiştir. Çevresel

etkiler göz önüne alındığında, geleneksel kaplama yöntemlerinin neden olduğu enerji tüketimi ve kimyasal atık problemleri karşısında akımsız kaplamalar daha çevreci bir alternatif sunmaktadır. Elektrik gerektirmemesi enerji maliyetlerini düşürürken kaplama banyolarının uzun ömürlü olması da işlem sırasında oluşan atık miktarını azaltır. Bununla birlikte kullanılan kimyasalların toksik doğası, süreç yönetiminde dikkat edilmesi gereken bir diğer önemli konudur (Çakar, 2010).

Son yıllarda, akımsız kaplama çözeltilerinde çevre dostu bileşenlerin kullanılması, kaplama sürecinde ortaya çıkan zararlı yan ürünlerin minimize edilmesi ve kimyasal geri dönüşüm sistemlerinin entegrasyonu üzerine yoğun araştırmalar yürütülmektedir. Gelişen teknolojiyle birlikte akımsız kaplama süreçleri de dijital kontrol sistemleriyle desteklenmeye başlamıştır. Bu sayede çözeltideki kimyasal parametreler anlık olarak izlenebilmekte, kaplama sürecinin hassasiyeti artırılmaktadır. Özellikle otomasyon sistemlerinin kullanımı, büyük ölçekli üretim hatlarında kalite kontrolün sürdürülebilirliğini sağlamaktadır. Ayrıca ileri karakterizasyon tekniklerinin, örneğin taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) ve X-ışını difraksiyonu (XRD) gibi yöntemlerin kullanımı, kaplama yapısının mikroyapı analizi ve bileşimsel özelliklerinin detaylı incelenmesini mümkün kılarak, araştırma ve geliştirme çalışmalarına önemli katkılar sunmaktadır (Bülbül, 2014).

Akımsız kaplamalar, yalnızca teknolojik bir çözüm sunmakla kalmayıp, aynı zamanda mühendislik yaratıcılığının da bir ürünüdür. Bu yöntem sayesinde, farklı metal türleri, alaşım sistemleri ve katkı partikülleri bir araya getirilerek özgün yüzeyler tasarlanabilir. Bu tür tasarımlarda hedeflenen, yalnızca yüzeyin korunması değil, aynı zamanda o yüzeyin belirli çevresel ya da yapısal koşullara karşı dirençli hale getirilmesidir. Bu nedenle akımsız kaplama süreçleri, sadece üretim değil, aynı zamanda ürün tasarımı ve mühendislik optimizasyonu açısından da değerlendirilen çok yönlü bir yaklaşımdır. Akımsız kaplama teknolojileri, modern endüstriyel ihtiyaçlara hem fonksiyonel hem de sürdürülebilir çözümler sunan, çok boyutlu bir yüzey işleme yöntemidir. Bu teknolojinin başarısı, yalnızca kimyasal denge ve reaksiyon yönetimiyle değil, aynı zamanda mühendislik tasarımı, süreç kontrolü ve çevresel bilinçle doğrudan ilişkilidir. Bu bağlamda akımsız kaplamaların gelişimi hem bilimsel araştırmalar hem de endüstriyel uygulamalar açısından dinamik bir alan olarak önemini sürdürmektedir. Yüzey kaplama teknolojilerinin geleceğinde, akımsız kaplama yöntemlerinin daha çevreci, daha kontrollü ve daha fonksiyonel biçimlerde

gelişmeye devam edeceği öngörülmektedir. Bu nedenle bu alandaki bilgi birikiminin sürekli güncellenmesi, uygulayıcılar ve araştırmacılar açısından vazgeçilmez bir gereklilik olarak karşımıza çıkmaktadır (Abakay, 2023).

2.1.1. Akımsız kaplamanın temel prensipleri

Akımsız kaplama, enerji kaynağı olarak elektriksel bir potansiyel farkı kullanmaksızın, yüzey üzerinde metal bir tabakanın kimyasal reaksiyon yoluyla çöktürülmesi esasına dayanır. Bu yöntem, özellikle karmaşık geometriye sahip parçaların kaplanmasında ve elektriksel olarak iletken olmayan yüzeylerde kullanımı mümkün kılması nedeniyle endüstride geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Akımsız kaplamanın temel prensipleri hem kimyasal indirgeme süreçlerini hem de yüzey ile çözelti arasındaki dinamik dengeyi içeren çok boyutlu bir anlayışla ele alınmalıdır. Bu yöntemin fizikokimyasal temelini oluşturan en kritik kavramlar arasında kimyasal redoks reaksiyonları, reaksiyon kinetiği, çözelti dengesi, yüzey aktivasyonu ve kütle transferi yer almaktadır. Tüm bu bileşenlerin sistematik olarak anlaşılması, başarılı ve sürdürülebilir bir kaplama süreci için vazgeçilmezdir. Kaplama süreci, indirgen maddenin çözeltideki metal iyonlarını elektron vererek metalik forma indirgemesiyle başlar. Bu temel tepkime, çözelti içerisindeki kimyasal türlerin özelliklerine ve ortam koşullarına bağlı olarak gelişir. İndirgen maddenin tepkimeye girme kabiliyeti, indirgenme potansiyeli ve oluşan yan ürünlerin çözeltideki davranışı gibi parametreler, reaksiyonun etkinliğini doğrudan etkiler. Sıklıkla kullanılan sodyum hipofosfit gibi indirgen ajanlar, metal iyonlarının yüzeye çökmesini sağlayacak kimyasal güce sahiptir. Bu işlem sırasında ortaya çıkan fosfit ya da bor içeren yan ürünler çözeltide birikerek zamanla banyo kompozisyonunu değiştirebilir. Bu nedenle kaplama banyolarının düzenli olarak yenilenmesi ya da filtrelenmesi gereklidir (Walsh ve de León, 2014). Aynı zamanda indirgen maddenin uygun konsantrasyonda bulunması, sistemin dengesini koruyarak kaplamanın kararlı ve homojen şekilde oluşmasını sağlar. Reaksiyonun gerçekleştiği yüzey ile çözelti arasında meydana gelen kütle transferi, kaplama sürecinin etkinliği açısından belirleyici bir faktördür. Yüzeyde kaplama gerçekleşirken, metal iyonlarının sürekli olarak bu bölgeye taşınması gerekir. Aksi takdirde yüzeyde iyon eksikliği meydana gelir ve bu durum kaplamanın homojenliğini bozar. Bu süreçte difüzyon, konveksiyon ve yüzey reaksiyonları bir bütün olarak değerlendirilmelidir. Kaplama sürecinde, çözeltinin sabit kalmaması, sürekli sirkülasyon veya karıştırma ile iyon transferinin desteklenmesi gerekir.

Özellikle banyo sıcaklığının ve pH değerinin optimize edilmesiyle birlikte kütle transferi daha düzenli hâle gelir ve çökeltme hızında istikrar sağlanır. Bu bağlamda reaksiyon ortamının homojenliği, yalnızca estetik bir kaplama yüzeyi elde etmek için değil, aynı zamanda kaplamanın fonksiyonel özelliklerini tutarlı biçimde geliştirmek açısından da kritik önemdedir.

Akımsız kaplama sürecinde önemli bir başka husus da yüzeyin reaksiyona hazır hâle getirilmesidir. Bu aşama, kaplama öncesi yapılan aktivasyon işlemleriyle doğrudan ilişkilidir. Yüzeyde bulunan oksit tabakaları, yağ kalıntıları ya da mekanik kusurlar, kaplama maddesinin yüzeye bağlanmasını engelleyebilir. Bu nedenle yüzeyin kimyasal olarak temizlenmesi, ardından gerekirse aside batırma ya da özel aktivatör solüsyonlarıyla aktif hâle getirilmesi gerekir. Özellikle metal olmayan yüzeylerde, bu aktivasyon aşaması kaplama işleminin en kritik kısmını oluşturur. Polimer esaslı bir yüzeyin iletken hâle gelmeden önce paladyum gibi katalitik maddelerle işlenmesi, metal iyonlarının yüzeye tutunmasını sağlayarak kimyasal indirgeme reaksiyonunu başlatır. Böylece ilk metal katmanı oluşur ve sonrasında devam eden reaksiyonlar, bu metal yüzey üzerinde kendiliğinden ilerler. Bu süreç, oto-katalitik bir mekanizma şeklinde devam eder yani kaplama yüzeyi artık reaksiyonun devamı için gerekli katalitik etkiyi kendisi sağlamaktadır. Bu oto-katalitik doğa, akımsız kaplamanın en ayırt edici özelliklerinden biridir. Reaksiyonun bir kez başladıktan sonra dışarıdan sürekli bir müdahaleye gerek kalmaksızın devam edebilmesi, bu yöntemin hem enerji tasarrufu sağlamasını hem de endüstriyel süreçlere kolaylıkla entegre edilmesini mümkün kılar. Ancak bu durum, aynı zamanda kaplama banyosunun dengesini bozabilecek ani reaksiyonların da önünü açar. Reaksiyonun istenmeyen bir şekilde hızlanması, çözelti içerisinde metal partiküllerinin ani çökmesine ve kaplama kalitesinin bozulmasına neden olabilir (Zhitomirsky ve Gal-Or, 1999). Bu nedenle stabilizatör adı verilen özel katkı maddeleri, banyo içerisindeki reaksiyon hızını dengeleyerek sistemin kontrol altında tutulmasına yardımcı olur. Stabilizatörlerin uygun türde ve dozda kullanımı, özellikle yüksek sıcaklık ve yüksek konsantrasyonlu sistemlerde büyük önem taşır. Kaplamanın yapısı, kullanılan kimyasalların yanı sıra ortam sıcaklığına da son derece duyarlıdır. Sıcaklık hem reaksiyon hızını hem de oluşan kaplamanın kristal yapısını doğrudan etkileyebilir. Genellikle akımsız kaplamalar 70–90°C aralığında gerçekleştirilir. Bu sıcaklık aralığı, reaksiyon kinetiği açısından optimum düzeyi sağlar. Düşük sıcaklıklarda reaksiyon yavaşlayarak

kaplama verimini düşürebilirken, çok yüksek sıcaklıklarda çözeltideki kimyasal türlerin bozunması ya da stabilitesinin kaybı gibi istenmeyen durumlar ortaya çıkabilir. Sıcaklığın etkisi yalnızca reaksiyon hızına değil, aynı zamanda kaplama yüzeyinin pürüzlülüğüne ve yapışma gücüne de yansır. Yüksek sıcaklıklarda oluşan kaplamalar daha ince taneli ve yoğun yapılı olabilirken, düşük sıcaklıklarda elde edilen yapılar daha gevşek ve gözenekli bir karakter gösterebilir. Bu nedenle, sistemin termal kontrolü, kaplama kalitesi açısından önemli bir parametredir (Zeynep, 2010).

Akımsız kaplamanın temel prensiplerinden biri de çözeltideki pH dengesinin kontrolüdür. pH değeri, indirgen maddenin çözeltideki davranışını, iyonların kararlılığını ve reaksiyon ürünlerinin çökme eğilimini belirleyen önemli bir etkidir. Ni-P sistemlerinde genellikle pH 4–7 aralığında tutulurken, Ni-B kaplamalar için daha alkali koşullar tercih edilmektedir. Düşük pH, metal iyonlarının çözeltide kararlı kalmasını sağlarken; yüksek pH, indirgen maddenin etkisini artırarak reaksiyonun hızlanmasına neden olabilir. Ancak her sistemin kendine özgü pH aralığı vardır ve bu aralık dışına çıkılması hâlinde çözelti kararsızlaşabilir, istenmeyen çökelmeler ya da çözeltinin tamamen bozulması gibi olumsuzluklar ortaya çıkabilir. Bu nedenle pH değeri sürekli olarak izlenmeli ve gerektiğinde uygun tampon maddelerle dengelenmelidir. Akımsız kaplama süreçlerinde hedeflenen kaplama kalınlığı, yüzey özellikleri ve fonksiyonel performansın elde edilmesi, tüm bu kimyasal ve fiziksel parametrelerin uyum içinde yönetilmesini gerektirir. İdeal bir kaplama hem yüzeye mükemmel biçimde yapışmalı hem de mekanik olarak dayanıklı ve çevresel etkilere karşı dirençli olmalıdır. Bu da kaplamanın içyapısı, tane boyutu, kristal yapısı ve içerdiği katkı elementlerinin miktarı gibi parametrelerle ilişkilidir. Örneğin yüksek fosfor içerikli nikel kaplamalar daha amorf yapılı olup korozyon direnci açısından üstündür; ancak mekanik dayanım açısından kristalin yapılar kadar etkili olmayabilir. Benzer şekilde bor içeren kaplamalar, sertlik açısından daha üstün performans sergileyebilir (Dilek, 2021). Bu bağlamda, akımsız kaplamanın temel prensipleri sadece kimyasal süreçlerle sınırlı kalmaz, aynı zamanda kaplama malzemesinin nihai uygulama hedefleriyle de uyum içinde olmalıdır. Akımsız kaplama süreçlerinin başarısı, çok sayıda değişkenin eş zamanlı ve kontrollü biçimde yönetilmesine bağlıdır. Bu yöntem yalnızca bir yüzey kaplama tekniği değil, aynı zamanda kimya, malzeme bilimi, termodinamik ve reaksiyon mühendisliği disiplinlerinin kesişiminde yer alan bütüncül bir sistemdir. Bu sistemin temel prensiplerini anlamak, yalnızca

akademik bilgi edinimi değil, aynı zamanda pratik uygulamalarda kalite standardını yükseltmek ve süreci sürdürülebilir kılmak açısından da kritik öneme sahiptir. Akımsız kaplama teknolojisi, gelecekte daha çevreci, enerji verimli ve yüksek performanslı çözümler üretme potansiyeline sahip bir alan olarak gelişimini sürdürecektir. Bu bağlamda, temel prensiplerin derinlemesine kavranması, bu alanda çalışan mühendis, araştırmacı ve uygulayıcılar için vazgeçilmez bir bilgi birikimi sağlayacaktır (Çiftçi, 2022).

2.1.2. Kullanılan kimyasallar ve bileşenler

Akımsız kaplama teknolojisinin başarılı bir biçimde uygulanabilmesi, yalnızca uygun yüzey hazırlığı veya proses koşullarının sağlanması ile değil, aynı zamanda kullanılan kimyasal bileşenlerin seçimi ve bu bileşenlerin çözeltideki dengeli etkileşimleri ile doğrudan ilişkilidir. Kimyasal çöktürme prensibine dayalı bu yöntemde, kaplamanın yapısal bütünlüğü, kalınlığı, homojenliği, yüzey pürüzlülüğü, sertliği ve hatta korozyon direnci, kullanılan her bir kimyasalın özellikleriyle yakından ilişkilidir. Bu nedenle akımsız kaplama banyosunun içeriği, prosesin kalitesini belirleyen en temel parametrelerden biridir ve sistematik bir kimyasal mühendislik yaklaşımı gerektirir.

Akımsız kaplama banyolarında en temel bileşeni metal iyonları oluşturur. Kaplama yapılmak istenen yüzey üzerine çöktürülmesi hedeflenen bu metal iyonları, genellikle suda çözünebilen tuzlar formunda sisteme dâhil edilir. Nikel, kobalt, bakır, tungsten ve gümüş gibi çeşitli metaller, çözelti içerisinde iyonik halde bulunurlar ve indirgen ajan aracılığıyla yüzeye çöktürülürler. Metal iyonunun kaynağı olarak kullanılan tuzun seçimi, çözeltinin pH değeri, sıcaklık toleransı ve çözünebilirliği açısından büyük önem taşır (Upadhyay ve Battocchi, 2016). Bu bağlamda, örneğin, nikel kaplamalar için kullanılan nikel sülfat veya nikel klorür gibi bileşikler hem iyon temini hem de çözeltinin iletkenliğinin düzenlenmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Bununla birlikte metal iyonları, yalnız başlarına kararlı bir çözelti oluşturamazlar; zira yüksek iyonik yoğunluk, çökme riskini artırır. Bu nedenle kompleks yapıcı maddelere ihtiyaç duyulur. Kompleksleştirici ajanlar, çözeltideki serbest metal iyonlarının kontrollü bir şekilde serbest kalmasını sağlayarak ani çökelmelerin önüne geçer ve çözeltinin ömrünü uzatır. Bu kimyasallar, metal iyonları ile koordinasyon bağları kurarak onları geçici olarak bağlar, ardından kaplama sırasında yüzeye yakın bir bölgede serbest bırakarak kontrollü çökelmeyi sağlar. Kompleksleştirici ajan seçimi, kullanılacak metal türüne, indirgen ajanına ve çözeltinin pH dengesine göre belirlenir.

Yanlış seçilen ya da dengesiz kullanılan kompleks yapıcılar, kaplama yüzeyinde düzensizliklere, homojen olmayan çökelmelere veya çözeltinin bozulmasına neden olabilir (Özkan, 2011). Bu nedenle her bir kompleksleştirici ajan, kimyasal kinetik üzerindeki etkisi iyi analiz edilmelidir.

İndirgen ajanlar, akımsız kaplama sürecinin kalbini oluşturan ve metal iyonlarını elektron transferi ile metalik hâle getiren kimyasal türlerdir. Elektrik akımı yerine bu kimyasal indirgenme tepkimeleri kaplama işlemini yönlendirir. En yaygın indirgen ajanlardan biri olan sodyum hipofosfit, özellikle nikel kaplamalarda fosforla birlikte alaşım oluşturarak kaplamaya farklı özellikler kazandırır. İndirgen ajan seçimi, yalnızca metal iyonunun indirgenmesini değil, aynı zamanda kaplamanın kimyasal bileşimini, mikroyapısını ve fiziksel özelliklerini de etkiler. Bor içerikli indirgen ajanlar kullanıldığında ise daha kristalin yapılar ve sert kaplamalar elde edilmesi mümkündür. Bununla birlikte bu ajanların kullanımı sırasında oluşan yan ürünlerin çözeltide birikmesi, pH dengesini bozabilir veya banyo stabilitesini azaltabilir.

Çözeltinin stabilitesi için kullanılan bir diğer önemli kimyasal grup ise stabilizatörlerdir. Bu bileşenler, kaplama çözeltisinin ani reaksiyonlara girmesini ve çözeltide istenmeyen çökelmelerin meydana gelmesini engeller. Stabilizatörler genellikle çok düşük konsantrasyonlarda kullanılırlar da etkileri son derece kritiktir. Kimyasal reaksiyonların kontrol altında tutulabilmesi için sistemdeki diğer bileşenlerle uyumlu olmaları gerekir. Ayrıca stabilizatörlerin türüne göre çözeltinin raf ömrü uzatılabilir ve üretim sırasında daha kararlı bir kaplama süreci elde edilebilir.

Tamponlama ajanları da akımsız kaplama banyosunun kimyasal dengesinde önemli bir rol üstlenir. Özellikle pH kontrolünün hassasiyetle yapılması gereken durumlarda, tampon sistemleri çözeltideki hidrojen iyonlarının ani artış veya azalmalara karşı tamponlanmasını sağlar. Böylece çözeltinin asidik ya da bazik yapıya doğru kayması engellenir ve kimyasal reaksiyonlar istenilen kinetikte devam eder (Tseluikin, 2016). Akımsız kaplama banyolarında pH değişimleri, indirgen ajanın kararlılığı üzerinde doğrudan etkili olduğu için bu sistemler vazgeçilmez bir unsur olarak değerlendirilir.

Kaplama banyosunda kullanılan bu temel kimyasallara ek olarak, bazen belirli özellikleri artırmak veya kaplamanın uygulandığı yüzeylere özel işlevler kazandırmak amacıyla yüzey aktif maddeler, parlaklaştırıcılar, dağıtıcılar ve partikül süspansiyonları da eklenebilir. Özellikle kompozit kaplamaların üretiminde, çözeltide

süspansiyon hâlinde bulunan mikro veya nano boyuttaki katı partiküller, kaplama sırasında metal matris içinde hapsedilerek farklı fonksiyonel özelliklerin elde edilmesini sağlar. Bu tür katkı maddeleri çözeltide homojen şekilde dağılmalı, sedimentasyona uğramamalı ve kaplama süresince kararlı kalmalıdır. Aksi hâlde yüzeyde yer yer yoğunluk farkları oluşabilir ve istenilen kaplama performansı sağlanamaz.

Tüm bu kimyasalların birlikte oluşturduğu kaplama banyosu, kaplama sürecinde zamanla değişime uğrayabilir. Bu değişim, kullanılan kimyasalların tüketilmesi, tepkime sonucu oluşan yan ürünlerin birikmesi ve çevresel koşulların etkisiyle hızlanabilir (Azazi, 2007). Bu nedenle kaplama banyosunun düzenli olarak analiz edilmesi, eksilen bileşenlerin dengeli biçimde tamamlanması ve gerekirse çözeltinin tamamen yenilenmesi gerekebilir. Özellikle endüstriyel ölçekte uygulamalarda, otomatik kimyasal dozajlama sistemleriyle çözeltinin sürekli olarak izlenmesi, proses güvenliği ve ürün kalitesi açısından son derece önemlidir.

Çevresel açıdan değerlendirildiğinde, kaplama banyosunda kullanılan bazı kimyasalların toksik özelliklere sahip olabileceği göz önüne alınmalıdır. Özellikle ağır metal tuzları, indirgen ajan yan ürünleri ve stabilizatör artıklarının doğrudan atık su sistemine verilmesi, çevresel riskler doğurabilir. Bu nedenle günümüzde sürdürülebilir kaplama çözeltilerinin geliştirilmesi, toksik olmayan ya da biyolojik olarak parçalanabilir kimyasal bileşenlerin kullanımı, çevre yönetmelikleri doğrultusunda büyük önem kazanmıştır. Ayrıca kimyasal geri kazanım sistemleriyle hem ekonomik hem de ekolojik fayda sağlanabilmektedir.

Akımsız kaplama süreçlerinde kullanılan kimyasallar, yalnızca metal çöktürmeyi sağlayan reaktifler değil, aynı zamanda tüm sistemin kararlılığını, performansını ve güvenliğini belirleyen bileşenlerdir. Bu kimyasallar arasındaki etkileşimlerin iyi anlaşılması, çözeltinin dinamiğine uygun seçimlerin yapılması ve proses parametrelerinin doğru yönetilmesi, kaliteli ve fonksiyonel bir kaplama elde edilmesinin ön koşuludur. Aynı zamanda çevre dostu yaklaşımların benimsenmesi ve sürdürülebilir kimyasal kullanım stratejilerinin uygulanması, akımsız kaplama teknolojisinin geleceğine yön verecek ana faktörlerden biri olacaktır (Karakurkchi ve ark., 2019).

2.1.3. Yaygın akımsız kaplama türleri

Akımsız kaplama teknolojisi, metal yüzeylerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla uygulanan bir yüzey işlem yöntemidir. Elektriksel enerjiye ihtiyaç duymadan metal iyonlarının indirgenmesiyle gerçekleştirilen bu işlem, günümüzde yalnızca estetik ya da koruyucu amaçlar doğrultusunda değil, aynı zamanda işlevsel ve teknik özelliklerin iyileştirilmesi için de yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu doğrultuda akımsız kaplama sistemleri, farklı metal matrislerin ve çeşitli katkıların kullanıldığı çok sayıda türe ayrılmakta, her biri belirli uygulama alanlarına ve teknik gereksinimlere yanıt vermektedir. Kullanılan metal türü, alaşım bileşimi, indirgen ajanlar ve katkı maddelerine bağlı olarak farklı performans özellikleri gösteren kaplama türleri geliştirilmiştir. Her bir türün öne çıkan karakteristikleri, kullanım alanlarının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır (Armutçu, 2009).

Akımsız kaplama türlerinin başında, en yaygın olarak uygulananlardan biri olan nikel bazlı kaplamalar gelmektedir. Bu grup içinde özellikle nikel-fosfor (Ni-P) ve nikel-bor (Ni-B) alaşım sistemleri dikkat çeker. Nikel-fosfor kaplamalar, fosfor içeriğine bağlı olarak farklı kristal yapılar sergiler. Düşük fosfor içeriğine sahip kaplamalar daha kristalin özellik gösterirken, yüksek fosfor içeriği kaplamanın daha amorf ve dolayısıyla korozyon direncinin yüksek olmasını sağlar. Nikel-fosfor kaplamalar bu nedenle denizcilik, otomotiv, uzay ve havacılık gibi korozyona karşı yüksek dayanım gerektiren alanlarda tercih edilir. Ayrıca bu alaşım sistemlerinin termal kararlılığı, manyetik özellikleri ve yüzey sertliği, kontrollü ısı işlemlerle optimize edilebilmektedir. Fosfor içeriği aynı zamanda kaplamanın elektriksel iletkenliği ve manyetik davranışları üzerinde de belirleyici bir faktördür.

Nikel-bor alaşımlı kaplamalar ise sertlik ve aşınma direnci bakımından öne çıkar. Bor elementi, kaplama yapısına entegre olduğunda kristal yapıyı daha düzenli hâle getirerek sertliği artırır. Bu tür kaplamalar, yüksek mekanik yükler altında çalışan sistemlerde, kalıp üretiminde veya hareketli parçaların korunmasında sıkça kullanılmaktadır. Bor içeren kaplamalar, çoğu zaman termal işlem sonrası daha da sertleşerek mikroyapı dayanımı açısından üst düzey bir performans sergiler. Ayrıca bu kaplamaların yüzey pürüzlülüğü düşük, yüzey enerjisi ise nispeten yüksektir, bu da kaplanan malzemenin ileri işlemlere uygun hâle gelmesini sağlar. Nikel-bor

kaplamaların bir diğer avantajı ise daha düşük iç gerilime sahip olmalarıdır bu da kalın tabakaların çatlamadan uygulanabilmesini mümkün kılar.

Bakır bazlı akımsız kaplamalar, özellikle elektronik sanayisinde iletkenlik gereksinimlerini karşılamak amacıyla kullanılmaktadır. Bu kaplamalar, elektriksel devre kartlarının üretiminde, iletken izlerin oluşturulmasında ve mikroelektronik sistemlerde sıkça uygulanır. Bakırın yüksek iletkenliği ve yüzeye homojen bir biçimde çöktürülebilmesi, bu tür kaplamaların tercih edilmesinde başlıca etkenlerdir. Ancak bakır kaplamaların oksidasyona karşı hassas olması, yüzeyin korunması adına ilave katmanların uygulanmasını gerektirir (Iroh ve ark., 2003). Bu nedenle bakır kaplamalar çoğunlukla çok katmanlı yapılar hâlinde, nikel ya da altın gibi metallerle birlikte kullanılmaktadır.

Gümüş, altın ve paladyum gibi değerli metallerle yapılan akımsız kaplamalar ise hem estetik hem de teknik gereksinimlere hitap eden özel uygulamalarda tercih edilmektedir. Gümüş kaplamalar, yüksek iletkenlikleri nedeniyle radyo frekans sistemlerinde veya anten bileşenlerinde kullanılırken, altın kaplamalar korozyon direncinin kritik olduğu optoelektronik ya da tıbbi cihazlarda ön plana çıkar. Bu metallerin yüksek maliyetine karşın sundukları kimyasal stabilite ve biyolojik uyumluluk, özel alanlarda vazgeçilmez hâle gelmelerini sağlamıştır. Paladyum bazlı akımsız kaplamalar ise çoğu zaman nikel yerine tercih edilerek alerji riskinin azaltılması ya da daha inert bir yüzey elde edilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bu kaplamalar, elektronik konnektörlerden medikal implanta kadar çok sayıda alanda kendine yer bulmuştur (Zeynep, 2010).

Kobalt bazlı akımsız kaplamalar da son yıllarda artan bir ilgiyle karşılanmaktadır. Özellikle nikel-fosfor sistemlerinin alternatifleri olarak değerlendirilen kobalt-fosfor ve kobalt-bor kaplamalar, yüksek sıcaklık dayanımı, manyetik davranışları ve oksidasyon direnci ile öne çıkmaktadır. Bu kaplamalar, aşırı sıcaklık altında çalışan parçalar, motor bileşenleri ve enerji sistemlerinde tercih edilmektedir. Kobaltın yapısal özellikleri, kaplama süreci sırasında diğer katkı elementleriyle birlikte uyumlu bir yapı sergileyerek daha stabil ve performans odaklı bir kaplama elde edilmesine olanak sağlar.

Günümüzde sadece saf metal veya ikili alaşım sistemleri değil, aynı zamanda çok bileşenli alaşım yapıları ve kompozit kaplamalar da akımsız kaplama yöntemleriyle

retilabilmektedir. Özellikle tungsten, molibden ya da vanadyum gibi refrakter metallerin nikel veya kobalt matris içinde çöktürülmesiyle, yüksek sıcaklık dayanımına sahip kaplamalar elde edilebilmektedir. Bu tür yapılar, yalnızca mekanik aşınmalara değil, aynı zamanda termal yorulmaya karşı da üstün performans sergileyerek ileri mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu kaplamaların oluşumu, genellikle kaplama banyosunun sıcaklık ve pH parametrelerinin hassas şekilde kontrol edilmesini gerektirir (Abakay, 2023).

Kompozit akımsız kaplamalar ise belirli performans kriterlerini bir araya getirmek amacıyla geliştirilen daha ileri sistemlerdir. Bu kaplamalarda metal matris içerisine mikron veya nano boyutta partikller gömülerek kaplamaya özel işlevler kazandırılır. Örneğin seramik parçacıklar ile sertlik artırılabilirken, polimer katkılarla sürtünme katsayısı düşürülebilir ya da grafit ve karbon nanotüp gibi katkılarla iletkenlik veya kayganlık özellikleri geliştirilebilir. Kompozit yapının homojen şekilde oluşması, katkı partiküllerinin çözeltide dağılma kabiliyeti, yüzeye tutunma gücü ve reaksiyon kinetiğine bağlıdır. Bu nedenle kompozit kaplamalar, akımsız kaplama yönteminin en karmaşık ama en işlevsel alt gruplarından biri olarak kabul edilir.

Yaygın akımsız kaplama türleri arasında hibrit sistemlerin kullanımı da giderek artmaktadır. Farklı metalik fazların bir araya getirildiği bu sistemlerde, tek bir kaplama türüyle sağlanamayan özellikler birleştirilerek daha kapsamlı çözümler elde edilmektedir (ifti, 2022). Örneğin hem korozyon direnci hem de yüzey sertliği gerektiren uygulamalarda, nikel-fosfor matris içine bor katkısı ya da seramik partikül ilavesi ile hibrit bir kaplama yapısı oluşturulabilir. Bu tür sistemlerde kaplama parametrelerinin hassas biçimde yönetilmesi, çözelti dengesinin korunması ve yüzey hazırlığının uygun şekilde yapılması başarıyı doğrudan etkiler. Hibrit kaplamalar, özellikle otomotiv ve savunma sanayi gibi çok yönlü dayanım gerektiren alanlarda büyük avantaj sağlamaktadır.

Bir diğer yaygın tür, çok katmanlı akımsız kaplamalardır. Bu yapılar, farklı kaplama türlerinin üst üste uygulanmasıyla elde edilir. Alt katmanda genellikle yüksek yapışma kabiliyeti olan bir metal kullanılırken, üst katmanlar işlevselliği artıracak şekilde seçilir. Çok katmanlı sistemler sayesinde termal genleşme farklılıkları azaltılabilir, çatlama eğilimi kontrol altına alınabilir ve farklı çevresel etkilere karşı direnç artırılabilir. Bu yaklaşım, akımsız kaplama teknolojisinin sadece kaplama kalınlığı

değil, aynı zamanda kaplama mimarisi açısından da gelişimini sürdürdüğünü göstermektedir.

Yaygın akımsız kaplama türleri yalnızca klasik metal çöktürme işlemleriyle sınırlı kalmayıp, çok boyutlu mühendislik çözümleri sunan teknolojilere evrilmiş durumdadır. Her bir kaplama türü, belirli bir uygulamanın ihtiyaçlarına cevap verecek şekilde tasarlanmış; malzeme bilimi, kimya mühendisliği ve yüzey teknolojileri arasındaki etkileşimle geliştirilmiştir. Nikel, kobalt, bakır ya da değerli metallerin kullanıldığı sistemlerden, kompozit ve çok katmanlı yapılara kadar genişleyen bu spektrum, akımsız kaplama teknolojisinin ne denli esnek ve potansiyel dolu olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Gelecek yıllarda bu kaplama türlerinin daha sürdürülebilir, çevre dostu ve nano düzeyde kontrollü versiyonlarının geliştirilmesi beklenmekte olup; bu doğrultuda hem bilimsel hem de teknolojik çalışmalar hız kesmeden devam etmektedir (Trentin ve ark., 2022).

2.1.4. Uygulama alanları

Akımsız kaplama teknolojisi, yüzey mühendisliği alanında hem endüstriyel hem de teknolojik uygulamalara geniş bir yelpazede hizmet eden önemli bir yöntem olarak yer almaktadır. Elektriksel enerji kullanmadan gerçekleştirilen bu kimyasal kaplama yöntemi, metal yüzeylerin mekanik dayanıklılığını, korozyon direncini, aşınma mukavemetini ve estetik görünümünü artırmakla kalmayıp, farklı sektörlerde üretim süreçlerinin verimliliğini ve ürünlerin kullanım ömrünü de önemli ölçüde iyileştirmektedir. Bu bağlamda akımsız kaplamalar, özellikle karmaşık geometrilere sahip parçaların kaplanması, elektriksel yalıtkan yüzeylerde metalik tabaka elde edilmesi ve yüksek performans gerektiren endüstriyel bileşenlerin korunması gibi alanlarda vazgeçilmez bir teknik olarak öne çıkmaktadır (Çiftçi, 2022). Otomotiv sektörü, akımsız kaplama uygulamalarının en yaygın ve kritik olduğu alanlardan biridir. Motor parçaları, fren diskleri, şanzıman bileşenleri ve diğer hareketli aksamalar, yüksek aşınma ve korozyon risklerine maruz kaldıkları için yüzey özelliklerinin güçlendirilmesi gerekir. Akımsız kaplamalar, bu parçaların yüzey sertliğini artırarak aşınmaya karşı direnç kazandırırken, aynı zamanda kimyasal çevresel faktörlere karşı koruyucu bir tabaka oluşturarak korozyon direncini yükseltir. Bu özellikler, otomobil parçalarının hem mekanik performansını optimize eder hem de bakım maliyetlerini düşürür. Ayrıca, bu kaplamalar sayesinde parçaların ömrü uzar, parça değiştirme sıklığı azalır ve üretim süreçleri daha sürdürülebilir hale gelir (Dilek, 2021). Akımsız

kaplama teknikleri, bu sektörde kalite kontrol süreçleriyle entegre edilerek yüksek standartlarda ürünlerin ortaya çıkmasına olanak sağlar. Havacılık ve uzay endüstrisi, yüksek teknolojiye dayalı üretim süreçlerinde yüzey mühendisliğinin öneminin en üst düzeyde olduğu sektörler arasında yer alır. Burada kullanılan malzemelerin, ekstrem sıcaklık değişimleri, mekanik gerilmeler ve korozyon gibi zorlu koşullara dayanması beklenir. Akımsız kaplamalar, özellikle alaşımlı metallerin yüzeylerine uygulandığında, bu parçaların hem dayanıklılığını artırır hem de malzemenin hafifliğini koruyarak yakıt verimliliğine olumlu katkıda bulunur. Ayrıca, yüzeylerin termal ve kimyasal stabilitesinin yükseltilmesi, bu alandaki kritik bileşenlerin güvenilirliğini artırır. Akımsız kaplamaların uygulama esnekliği, karmaşık geometrili uçak ve uzay aracı parçalarının da kaplanabilmesini sağlayarak üretim süreçlerinde önemli bir kolaylık sunar (Iroh ve ark., 2003).

Elektronik sektörü, akımsız kaplamaların en önemli uygulama alanlarından bir diğeridir. Yüksek iletkenlik, hassas kalınlık kontrolü ve mükemmel yüzey kalitesi gerektiren devre kartları, konnektörler ve mikroelektronik bileşenlerin üretiminde bu kaplama yöntemi vazgeçilmezdir. Akımsız kaplamalar, elektriksel bağlantıların güvenilirliğini ve performansını artırırken, aynı zamanda mikro ölçekteki parçaların yüzeyinde homojen ve ince tabakalar oluşturabilme kabiliyeti sayesinde elektronik ürünlerin boyutlarının daha küçültülmesine olanak tanır. Ayrıca, bu kaplamalar, oksidasyon ve korozyon gibi olumsuz etkenlere karşı yüksek direnç sağladığından, elektronik cihazların uzun ömürlü ve stabil çalışmasını destekler. Bu özellikleriyle akımsız kaplamalar, elektronik üretim süreçlerinde kalite standartlarının yükseltilmesine doğrudan katkıda bulunur (Azazi, 2007). Tıbbi cihaz ve implant sektöründe ise akımsız kaplamalar, biyouyumlu ve steril yüzeyler elde etmek amacıyla kullanılır. İnsan vücudu ile direkt temas eden implantların yüzey özelliklerinin hem mekanik dayanıklılık hem de biyolojik uyumluluk açısından optimize edilmesi gerekir. Akımsız kaplama teknolojisi sayesinde, implantların yüzeyine ince ve homojen metal tabakalar uygulanarak, korozyon direnci artırılır ve doku reaksiyonları minimize edilir. Bu, implantların vücutta uzun süre stabil kalmasını ve enfeksiyon riskinin azalmasını sağlar. Aynı zamanda bu kaplamalar, medikal aletlerin sterilizasyon süreçlerine dayanıklı olmasını mümkün kılarak sağlık sektöründe kullanılan cihazların performans ve güvenilirliğini artırır. Bu alandaki ilerlemeler, akımsız kaplamaların işlevselliğini genişleterek, tıp teknolojisinin gelişimine önemli

katkıları sunmaktadır. Kimya ve petrokimya endüstrisinde, agresif kimyasal ortamlarla temas eden ekipmanların yüzeylerinin korunması kritik öneme sahiptir. Akımsız kaplamalar, boru hatları, reaktör iç yüzeyleri ve valf gibi parçaların korozyona karşı dayanıklılığını artırmak için kullanılır. Bu kaplamalar sayesinde kimyasal reaksiyon ortamından kaynaklanan aşınma ve yıpranma minimize edilerek ekipmanların kullanım ömrü uzatılır ve bakım maliyetleri azaltılır. Ayrıca, kaplamaların sağladığı kimyasal stabilite, üretim proseslerinin güvenliğini yükseltir ve olası arızaların önüne geçer. Bu da hem ekonomik hem de iş sağlığı açısından büyük önem taşır. Bu sektörlerde uygulanan kaplamaların dayanıklılığı, tesislerin verimli ve kesintisiz çalışması için belirleyici bir faktördür (Trentin ve ark., 2022).

Enerji sektörü, özellikle yenilenebilir enerji teknolojilerinde akımsız kaplamaların işlevselliğinin artarak kullanıldığı bir diğer alandır. Rüzgâr türbinleri, güneş panelleri ve enerji depolama sistemlerinde kullanılan metalik bileşenlerin dayanıklılığı, uzun vadeli performans için önemli rol oynar. Akımsız kaplamalar, bu bileşenlerin dış çevre koşullarına karşı korunmasını sağlayarak mekanik hasar, aşınma ve korozyon gibi riskleri azaltır. Özellikle deniz ortamında kullanılan enerji sistemlerinde tuzlu su ve nem kaynaklı korozyonun önlenmesi, kaplamaların performansını doğrudan etkiler. Böylece enerji üretim tesislerinin güvenilirliği ve verimliliği artırılır. Bu kaplamaların termal dayanımı da yüksek sıcaklık değişimlerine maruz kalan enerji ekipmanlarının stabil çalışmasına olanak tanır. Savunma ve havacılık endüstrilerinde, dayanıklılık, hafiflik ve kimyasal direnç gibi özellikler önemli kriterlerdir. Akımsız kaplama uygulamaları, bu sektörlerde kullanılan zırh malzemeleri, silah sistemleri ve elektronik donanımların yüzey özelliklerini geliştirerek, görev esnasında karşılaşılan zorlu koşullara karşı yüksek performans sağlar (Trentin ve ark., 2022). Aynı zamanda, kaplamaların estetik ve radar görünürlüğünü azaltıcı özellikleri, askeri uygulamalarda stratejik avantajlar sunar. Bu sektörlerde güvenilirlik, sistem bütünlüğü ve uzun süreli dayanıklılık en üst düzeyde beklendiği için akımsız kaplamaların sunduğu yüzey mühendisliği çözümleri vazgeçilmezdir. Bu uygulamalar, kaplama teknolojisinin sınırlarını zorlayan ve yenilikçi çözümler geliştirmeyi gerektiren alanlardır. Son olarak, mimarlık ve dekorasyon sektöründe de akımsız kaplamalar işlevsel ve estetik açılardan kullanılır. Metal yüzeylere uygulanan bu kaplamalar, dış etkenlere karşı dayanıklılığı artırırken, istenilen renk, parlaklık ve doku özelliklerinin elde edilmesine olanak verir. Bu sayede binaların dış cephe kaplamalarında, iç dekorasyonda ve sanat

eserlerinde uzun ömürlü ve bakımı kolay yüzeyler yaratılır. Akımsız kaplama teknolojisi, bu alanda sürdürülebilir malzeme kullanımı ve çevresel faktörlerin etkilerinin minimize edilmesi açısından da önem kazanmıştır. Mimarlık alanında yenilikçi tasarımların gerçekleştirilmesi, kaplama teknolojilerinin gelişimi ile doğrudan ilişkilidir (Çakar, 2010).

Genel olarak değerlendirildiğinde, akımsız kaplama teknolojisi uygulama alanlarında sağladığı çok yönlü avantajlarla, modern üretim ve tasarım süreçlerinin vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Yüzey mühendisliği alanındaki bu gelişmeler, özellikle malzeme performansını artırmak, ürün ömrünü uzatmak ve çevresel etkileri azaltmak isteyen sektörler için stratejik öneme sahiptir. Sektörel talepler doğrultusunda kaplama süreçlerinin optimize edilmesi, yeni kimyasal bileşenlerin geliştirilmesi ve kaplama tekniklerinin çeşitlendirilmesi, bu teknolojinin gelecek vizyonunu şekillendirmektedir. Böylece akımsız kaplamalar, sadece mevcut ihtiyaçları karşılamakla kalmayıp, aynı zamanda sürdürülebilir ve yenilikçi yüzey çözümlerine doğru evrilerek endüstri ve teknoloji alanlarında ilerlemeyi desteklemeye devam edecektir.

2.2. Akımlı (Elektrodepozisyon) Kaplamalar

Akımlı kaplama, yüzey mühendisliği alanında metal kaplama uygulamalarının en köklü ve yaygın yöntemlerinden biridir. Bu teknik, elektriksel akımın yardımıyla metal iyonlarının bir elektrolit çözeltisinden, katot olarak görev yapan iş parçası üzerine kontrollü bir şekilde çöktürülmesi esasına dayanır (Bülbül, 2014). Akımlı kaplamanın temel prensipleri hem kimyasal hem fiziksel süreçlerin karmaşık bir etkileşimini içerir ve bu nedenle bu yöntemin anlaşılması, verimli ve kaliteli kaplama elde edilmesi açısından kritik önem taşır. Günümüzde bu teknoloji, çeşitli endüstriyel sektörlerde hem estetik hem de fonksiyonel amaçlarla yaygın olarak kullanılmaktadır.

Akımlı kaplama sürecinin merkezinde elektrokimyasal reaksiyonlar yer alır. İş parçası, kaplanacak yüzey olarak katot işlevi görürken, genellikle inert veya aynı metalden yapılmış bir anot da sistemde yer alır. Elektrolit çözeltisi, metal iyonları ve diğer kimyasal bileşenlerin yer aldığı bir ortamdır. Elektrik akımı devreye verildiğinde, anot üzerinde metal iyonları serbest kalır, bu iyonlar çözeltide hareket ederek katot yüzeyine ulaşır ve burada elektron kazanarak metalik halde çöker. Bu reaksiyonların hızı ve kalitesi, akım yoğunluğu, çözeltinin kimyasal bileşimi, sıcaklık, pH ve karıştırma gibi birçok parametre tarafından belirlenir. Kaplama kalitesi, kalınlığı ve

yapısal özellikleri bu parametrelerin hassas kontrolü ile optimize edilir (Tseluikin, 2009). Akımlı kaplama işleminin gerçekleştiği ortamda iyon hareketliliği kritik bir rol oynar. Metal iyonlarının elektrostatik kuvvetlerle katoda doğru hareket etmesi, çözeltideki iyonik iletkenliği doğrudan etkiler. Bu iletkenlik, metal tuzlarının türüne ve yoğunluğuna bağlı olarak değişir. Ayrıca elektrolit içinde bulunan kompleks oluşturmalar, stabilizatörler ve tampon ajanlar gibi bileşenler, kaplama sürecinde çözeltinin dengesini korur ve reaksiyon kinetiğini düzenler. Bu kimyasal bileşenlerin uyumlu çalışması, kaplama yüzeyinde homojen bir metal tabaka oluşmasını sağlar. Öte yandan, çözeltide oluşabilecek yan reaksiyonlar veya yabancı maddelerin varlığı, kaplama kalitesini olumsuz etkileyebilir; bu nedenle elektrolit temizliği ve kontrolü büyük önem taşır (Armutçu, 2009).

Akım yoğunluğu, akımlı kaplamanın temel kontrol parametrelerinden biridir ve kaplamanın mikroyapısını, kalınlığını ve yüzey özelliklerini belirler. Düşük akım yoğunluklarında kaplama daha ince ve düzenli yapıda olurken, yüksek akım yoğunluklarında kaplama hızlanır ancak yüzey pürüzlülüğü artabilir. Bu nedenle optimum akım yoğunluğu aralığının belirlenmesi, kaplama sürecinin verimliliği için zorunludur. Ayrıca, akımın sürekli (direct) veya darbeli (pulse) olarak uygulanması gibi farklı teknikler, kaplamanın kristal yapısını ve mekanik özelliklerini etkileyerek, işlevsel özelliklerde çeşitlilik sağlar. Bu çeşitlilik, akımlı kaplamanın farklı uygulama alanlarına uyarlanabilmesine olanak verir.

Akımlı kaplama sürecinde sıcaklık da önemli bir değişkendir. Elektrolit sıcaklığının yükselmesi, iyon hareketliliğini artırarak kaplama hızını yükseltirken, aynı zamanda yan reaksiyonların da artmasına neden olabilir. Bu durum, kaplama yüzeyinde istenmeyen yapısal bozukluklara yol açabilir. Dolayısıyla sıcaklığın kontrolü, yüksek kalitede ve işlevsel özelliklere sahip kaplamalar için gereklidir (Tseluikin, 2016). Aynı zamanda sıcaklık, kaplama tabakasının kristal boyutlarını ve faz bileşimini etkileyerek kaplama dayanımı ve sertliğine doğrudan etki eder.

Katot yüzeyinin özellikleri, akımlı kaplama başarısını etkileyen bir diğer faktördür. Yüzeyin temizliği, pürüzlülüğü ve kimyasal yapısı, metal iyonlarının bağlanmasını ve tabaka oluşumunu belirler. Kaplama öncesinde yapılan yüzey hazırlığı işlemleri, metalik kirlerin, oksit tabakalarının ve diğer yabancı maddelerin giderilmesini sağlar. Bu hazırlıklar, kaplama tabakasının yüzeye güçlü bir şekilde yapışması ve uzun

ömürlü olması açısından büyük öneme sahiptir. Ayrıca, bazı durumlarda yüzey modifikasyonları uygulanarak kaplama kalitesi artırılır.

Akımlı kaplamanın temel prensipleri, sistemde gerçekleşen elektriksel ve kimyasal süreçlerin birlikte optimize edilmesiyle ortaya çıkar. Kaplama banyosundaki metal iyonlarının kontrollü olarak katoda indirgenmesi, reaksiyon kinetiği, difüzyon mekanizmaları ve yüzey enerjisi etkileşimleriyle şekillenir. Bu etkileşimlerin dengelenmesi, kaplama tabakasının homojenliği, yapışma gücü ve mekanik dayanımı için elzemdir. Ayrıca, kaplama sırasında ortaya çıkan gaz oluşumu ve ısı etkilerinin yönetilmesi, yüzey kusurlarının önlenmesi ve kaplama kalitesinin artırılması için gereklidir.

Akımlı kaplama, temel olarak elektrik enerjisi ile metal iyonlarının kimyasal indirgenmesini sağlayan, yüksek kontrollü ve verimli bir kaplama yöntemidir. Günümüz teknolojilerinde, bu yöntemin esnekliği ve uyarlanabilirliği sayesinde çok çeşitli metalik kaplama ihtiyaçları karşılanmakta, yüzey özellikleri geliştirilmektedir. Elektrokimyasal prensiplerin derinlemesine anlaşılması, proses parametrelerinin hassas ayarlanması ve gelişmiş kaplama banyolarının geliştirilmesi, akımlı kaplamanın kalite ve performansını sürekli olarak artırmaktadır (Özkan, 2011). Böylece bu teknoloji, endüstriyel uygulamalarda dayanıklı, estetik ve işlevsel kaplamaların üretilmesinde vazgeçilmez bir yöntem olarak konumunu korumaktadır.

2.2.1. Akımlı kaplamanın temel prensipleri

Akımlı kaplamanın temel prensipleri, elektrokimyanın kuralları çerçevesinde metal iyonlarının elektrik akımı kullanılarak bir yüzey üzerinde metal tabaka oluşturması esasına dayanır. Bu süreç, bir elektrolitik hücrede gerçekleşir: burada iş parçası katot olarak, genellikle metal anot olarak görev yapar ve aralarındaki elektrolit, metal iyonları ve diğer kimyasal bileşenlerden oluşur. Uygulanan dış elektrik akımı sayesinde, metal iyonları elektrolit içerisinde katoda doğru hareket eder ve burada elektron kazanarak metalik hale dönüşür. Bu kimyasal indirgenme reaksiyonu, kaplamanın olduğu temel olaydır (Atay, 2008).

Akımlı kaplamanın başarılı olması için iyonların katoda doğru hareketi ve burada kontrollü olarak indirgenmesi gereklidir. Bu hareket, elektrostatik kuvvetlerin etkisi altında iyonların elektrik alan doğrultusunda sürüklenmesiyle gerçekleşir. Ayrıca, iyonların difüzyonu ve konveksiyon ile hareketi de reaksiyon hızını belirleyen

faktörler arasındadır. Elektrolit çözeltisinin bileşimi ve yoğunluğu, iyonların hareketliliğini ve kaplama hızını doğrudan etkiler. Kompleks oluşturuvcu ajanlar, çözeltide metal iyonlarının kararlı kalmasını sağlar ve indirgenme kinetiğini düzenleyerek kaplama kalitesine olumlu katkı yapar.

Katot yüzeyinde gerçekleşen metal iyonlarının indirgenmesi, yüzey kimyası açısından önemli bir süreci temsil eder. Burada, elektron transferi ile metal iyonları atomik metal haline dönüşür ve yüzeye tutunur. Bu adımda, kaplama tabakasının mikro yapısı şekillenmeye başlar. Kaplamanın kristalin yapısı, faz dağılımı ve yüzey morfolojisi, bu indirgenme kinetiği ve yüzey enerji parametrelerinin etkileşimi ile belirlenir (Despotopoulou ve Burchill, 2002). Yüzeyde oluşan tabakanın kalınlığı ise uygulanan akım yoğunluğu ve işlem süresiyle doğrudan orantılıdır. Bu parametrelerin hassas kontrolü, kaplamanın dayanıklılığı ve işlevselliği açısından hayati önem taşır.

Anotun işlevi, metal iyonlarının elektrolit ortamına sürekli olarak sağlanmasıdır. Metal anot kullanıldığında, anot yüzeyinde oksidasyon reaksiyonları gerçekleşir ve metal iyonları serbest kalır. Bu durum, kaplama banyosundaki metal iyonlarının sürekli yenilenmesini sağlayarak kaplama sürecinin sürdürülebilirliğini temin eder. Alternatif olarak inert anotlar da kullanılabilir, bu durumda metal iyonları banyoya dışarıdan eklenir. Anotun seçimi, kaplama sisteminin türüne ve kullanım amacına göre değişiklik gösterir ve kaplama kalitesini doğrudan etkiler.

Akımlı kaplama sırasında kaplama yüzeyinde oluşan gaz kabarcıkları, özellikle hidrojen gazı, kaplamanın yüzey kalitesini olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle proses sırasında karıştırma, sıcaklık ve akım parametreleri optimize edilerek gaz oluşumu minimize edilmeye çalışılır. Ayrıca, kaplama banyosunda pH kontrolü, iyon konsantrasyonu ve sıcaklık gibi parametrelerin sürekli izlenmesi, kaplama homojenliğinin ve yüzey kalitesinin korunmasında önemlidir. Bu parametrelerin dengesizliği, yüzeyde çatlaklar, gözenekler veya düzensiz çökelmeler gibi kusurlar oluşturabilir (Tseluikin, 2009).

Akımlı kaplamanın temel prensipleri, kaplamanın kalitesi, dayanıklılığı ve yüzey özellikleri üzerinde doğrudan etkilidir. İşlem parametrelerinin bilinçli şekilde seçilmesi, elektrolit bileşiminin optimize edilmesi ve yüzey hazırlığının uygun şekilde yapılması, kaliteli kaplamaların elde edilmesinde kritik rol oynar. Ayrıca modern teknolojik gelişmeler, sürekli akım (direct current), darbeli akım (pulse current) ve ters

darbeli akım (pulse reverse current) gibi farklı elektriksel uyarlamalarla kaplama özelliklerinin özelleştirilmesine olanak sağlamış ve böylece bu yöntemin endüstriyel uygulamalardaki esnekliği artmıştır.

Akımlı kaplamanın temel prensipleri, elektriksel ve kimyasal süreçlerin uyumlu bir şekilde yönetilmesine dayanır. Bu süreç, metal iyonlarının elektrolit içerisinden kontrollü olarak katoda çökmesini mümkün kılarak, metalik kaplamaların üretiminde yüksek verimlilik ve kalite sağlar. Akımlı kaplama, yüzey mühendisliğinde hem geleneksel hem de modern uygulamalarda vazgeçilmez bir yöntem olarak önemini sürdürmekte ve teknolojik gelişmelerle daha da geliştirilmektedir (Trentin ve ark., 2022).

2.2.2. Akımlı kaplama hücresi ve bileşenleri

Akımlı kaplama sürecinin temelini oluşturan akımlı kaplama hücresi, metal iyonlarının elektrolit ortamından katot yüzeyine kontrollü şekilde çöktürülmesini sağlayan karmaşık bir sistemdir. Bu hücre, kaplama kalitesi ve işlem verimliliği üzerinde doğrudan etkili olan çeşitli bileşenlerden oluşur ve her bileşenin işlevi, prosesin başarısı açısından kritik önem taşır. Akımlı kaplamanın temel prensipleri bu hücre içindeki elektriksel, kimyasal ve mekanik etkileşimler üzerine inşa edilir, bu nedenle hücrenin tasarımı ve bileşenlerin seçimi kaplama sonuçlarını belirleyen en önemli faktörler arasında yer alır (Atay, 2008).

Akımlı kaplama hücresinin ana bileşenlerinden biri elektrolittir. Elektrolit, metal iyonlarını, kompleks oluşturmaları, tampon maddeleri ve diğer katkı kimyasallarını içinde barındıran çözeltidir. Bu çözelti, metal iyonlarının katoda hareketi ve burada indirgenerek kaplama tabakası oluşturmaları için gerekli iyonik iletkenliği sağlar. Elektrolitin kimyasal bileşimi, metal iyonlarının kararlılığını ve indirgenme kinetiğini belirler. Ayrıca pH seviyesi, sıcaklık ve iyon konsantrasyonu gibi parametreler elektrolit özelliklerini doğrudan etkiler (Dilek, 2021). Bu nedenle elektrolit, kaplama işleminin optimize edilmesi için sürekli olarak kontrol edilir ve gerektiğinde ayarlanır.

Elektrolitin stabilitesi, kaplamanın homojenliği ve kalitesi açısından vazgeçilmezdir. Elektrolit çözelti içinde metal iyonlarının hareketini sağlayan elektrik akımı, hücrenin diğer temel bileşenleri olan anot ve katot arasında sağlanır. Katot, kaplanacak olan iş parçasıdır ve metal iyonlarının indirgenerek çökme gerçekleştiği yüzeyi temsil eder. Katotun yüzey özellikleri, kaplamanın yapışma kalitesi ve mikro yapısı üzerinde

doğrudan etkilidir. Katotun yüzey hazırlığı ve temizliği, kaplama öncesinde gerçekleştirilerek yüzeyin metal iyonlarını kabul etme kapasitesi artırılır. Bu işlem sırasında yüzeyde var olan oksit tabakaları, yağlar ve diğer kirleticiler temizlenmelidir. Katotun şekli ve geometrisi de kaplama hücresinin tasarımında göz önünde bulundurulmalıdır, çünkü bu faktörler elektrik akımının dağılımını etkileyerek kaplama kalınlığının homojenliğini belirler (Murray, 1997).

Anot, akımlı kaplama hücresinde metal iyonlarının elektrolit içerisine salındığı bileşendir. Anotun yapısı ve malzemesi, elektrolit içerisindeki metal iyonlarının yenilenmesi ve kaplama sürecinin sürekliliği açısından önemlidir. Çoğunlukla kaplanacak metalin aynısı olan metal anotlar kullanılır. Anot, elektriksel olarak pozitif kutup görevindedir ve burada gerçekleşen oksidasyon reaksiyonları sonucunda metal iyonları çözeltide serbest bırakılır. Bununla birlikte, inert anotlar da tercih edilebilir, bu durumda metal iyonları elektrolite dışarıdan eklenir. Anotun şekli, yüzey alanı ve yerleşimi, kaplama banyosundaki iyon dengesinin korunmasında kritik rol oynar. Anotun düzgün çalışması, kaplama tabakasının kalitesi ve sürekli üretim için gereklidir.

Akımlı kaplama hücresinde kullanılan güç kaynağı, iş parçası ile anot arasında elektrik akımının kontrollü şekilde sağlanmasını mümkün kılar. Bu güç kaynağı, genellikle doğru akım (DC) verir ve akım yoğunluğu ile voltaj değerleri hassas şekilde ayarlanabilir. Modern kaplama sistemlerinde, sabit akım uygulaması yanında darbeli akım ve ters darbeli akım teknikleri de kullanılmaktadır (Zhitomirsky ve Gal-Or, 1999). Bu farklı uygulamalar, kaplama tabakasının kristal yapısını ve yüzey özelliklerini optimize etmek amacıyla tercih edilir. Güç kaynağının kararlılığı ve doğruluğu, kaplama işleminin kalitesini doğrudan etkiler. Ayrıca, otomasyon ve proses kontrol sistemleriyle entegre edilerek süreçlerin sürekli takibi sağlanır.

Akımlı kaplama hücresinde mekanik sistemler de önemli bileşenler arasında yer alır. Karıştırıcılar ve pompa sistemleri, elektrolit çözeltisinin homojen şekilde dolaşmasını sağlayarak iyon hareketliliğini artırır ve lokal iyon konsantrasyonu değişimlerini minimize eder. Bu sayede kaplama yüzeyinde oluşabilecek düzensizliklerin önüne geçilir. Elektrolit sirkülasyonu, sıcaklık dağılımının dengelenmesinde ve gaz kabarcıklarının uzaklaştırılmasında da etkili rol oynar. Karıştırma hızı ve türü, kaplama kalınlığı ve yüzey morfolojisi üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Bu

sistemlerin verimli çalışması, kaplama prosesinin sürekliliği ve kalitesinin korunması için elzemdir.

Hücre tasarımında ayrıca ısı kontrol sistemleri yer alır. Akımlı kaplama işlemi sırasında ortaya çıkan ısı, elektrolit sıcaklığını artırabilir ve bu durum kaplama özelliklerinde istenmeyen değişikliklere neden olabilir. Bu nedenle hücrelerde sıcaklık sensörleri ve soğutma sistemleri kullanılarak ideal çalışma sıcaklığı korunur. Sıcaklık kontrolü, kaplama hızını, kristal yapıyı ve kaplama tabakasının mekanik özelliklerini optimize etmek için gereklidir. Ayrıca elektrolit bileşenlerinin kimyasal stabilitesi ve reaksiyon kinetiği sıcaklık ile doğrudan ilişkilidir.

Akımlı kaplama hücresinin tasarımında güvenlik ve çevresel faktörler de göz önünde bulundurulur. Kullanılan kimyasalların toksik veya çevreye zarar verici olabilmesi nedeniyle, kaplama banyolarının sızdırmazlığı ve kimyasal yönetimi önemlidir. Hücrelerin ergonomik tasarımı, operatör güvenliği ve bakım kolaylığı açısından da değerlidir (Abakay, 2023). Güncel teknolojik gelişmeler, hücrelerin otomasyonunu artırarak proses kontrolünün daha hassas yapılmasına ve insan müdahalesinin minimuma indirilmesine olanak sağlamaktadır. Akımlı kaplama hücresi; elektrolit, anot, katot, güç kaynağı, mekanik dolaşım ve ısı kontrol sistemleri gibi birbirini tamamlayan bileşenlerin entegre bir şekilde çalıştığı karmaşık ve hassas bir yapıdır. Bu bileşenlerin optimal dizaynı ve işlevselliği, kaplama kalitesini, dayanıklılığını ve üretim verimliliğini belirler. Teknolojik gelişmeler, bu bileşenlerin daha ileri seviyelerde kontrolünü mümkün kılarak akımlı kaplamanın yüzey mühendisliğinde sunduğu potansiyeli artırmaktadır. Böylece, endüstriyel uygulamalarda farklı ihtiyaçlara cevap verebilen, yüksek performanslı ve sürdürülebilir kaplamalar üretilmesi mümkün olmaktadır.

2.2.3. Kaplama türleri

Akımlı kaplama yöntemi, yüzey mühendisliğinde çok yönlü bir teknik olarak, kaplama yapılacak malzemenin ihtiyacına, kullanım koşullarına ve sektörel taleplere göre çeşitlendirilebilen farklı kaplama türlerinin geliştirilmesine imkân tanımaktadır. Kaplama türlerinin çeşitliliği hem uygulama alanlarının genişliğini hem de teknik gereksinimlerin çeşitliliğini yansıtır. Akımlı kaplama ile elde edilen bu farklı türler, kaplamanın yapısal özelliklerinden fiziksel ve kimyasal performansına kadar birçok parametreyi etkileyerek, son ürünün işlevselliğini doğrudan belirlemektedir. Bu bağlamda, kaplama türlerinin sınıflandırılması yalnızca kullanılan metale göre değil,

aynı zamanda uygulama amacına, yapısal organizasyonuna, fonksiyonel katkılarına ve çok katmanlı yapılarına göre de değerlendirilmektedir.

Kaplama türleri içerisinde en yaygın ve geleneksel olanları, tek metal kaplamalardır. Bu tür kaplamalar genellikle sadece bir metalin akımlı kaplama altlık yüzeye çöktürülmesiyle elde edilir. Bu süreçte amaç, yüzeyin korozyon direncini artırmak, sertliğini yükseltmek veya dekoratif bir görünüm kazandırmaktır. Tek metal kaplamalar, işlem parametrelerinin hassas kontrolü ile homojen ve sürekli bir tabaka oluşturulmasına olanak sağlar. Metalin kristal yapısı, tane büyüklüğü ve kaplama kalınlığı gibi özellikler bu tür kaplamalarda öne çıkar. Aynı zamanda işlem sırasında kullanılan elektrolitin bileşimi, akım yoğunluğu ve sıcaklık gibi değişkenler kaplamanın performansını doğrudan etkilemektedir. Bu tür kaplamalar, temel düzeyde koruma veya yüzey iyileştirmesi gereken durumlar için tercih edilmekle birlikte, kompleks ortamlarda zamanla yetersiz kalabilmekte ve daha gelişmiş çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır (Karakurkchi ve ark., 2019).

Bu ihtiyacın bir sonucu olarak, alaşım kaplamaları akımlı kaplama yöntemleriyle geliştirilmiş ve daha dayanıklı, işlevsel ve uzun ömürlü yüzeyler elde edilmiştir. Alaşım kaplamalar, iki ya da daha fazla metalin elektrolit içerisinde birlikte indirgenmesiyle oluşur. Bu yöntemle elde edilen kaplamalar, sadece fiziksel değil, aynı zamanda kimyasal özellikleri açısından da iyileştirilmiş yüzeyler sunar. Alaşımın bileşimi, elektrokimyasal eş potansiyellerin uyumu, iyon konsantrasyonları ve elektrolit içindeki kompleks yapılar dikkate alınarak optimize edilir. Böylece kaplama sırasında oluşan mikro yapılar, daha üstün aşınma direnci, yüksek sıcaklık toleransı, elektriksel iletkenlik veya termal kararlılık gibi özellikler kazandırabilir. Alaşım kaplamaların avantajı, tek metal kaplamalara kıyasla çok daha esnek ve özelleştirilebilir olmalarıdır (Tseluikin, 2016). Bununla birlikte, farklı metallerin birlikte çöktürülmesi sırasında oluşabilecek selektif indirgenme sorunları, kontrol edilmesi gereken önemli bir teknik detay olarak öne çıkar.

Çok katmanlı kaplamalar ise son yıllarda gelişen yüzey mühendisliği teknolojilerinin bir ürünü olarak dikkat çekmektedir. Bu tür kaplamalar, farklı metallerin veya aynı metalin farklı işlem parametreleri altında ardışık katmanlar halinde çöktürülmesiyle oluşturulur. Katmanlar arasında değişken özelliklerin tanımlanması hem yapısal mukavemeti hem de fonksiyonelliği artırmak amacıyla yapılır. Çok katmanlı yapılar, dış yüzeyde yüksek aşınma direnci sağlarken iç katmanlarda esneklik veya darbe

sönümleme gibi özellikler barındırabilir. Bu sistemlerin en önemli avantajı, farklı görevler üstlenen katmanların bütünleşik bir yapıda bir araya getirilebilmesidir. Böylelikle, birden fazla çevresel tehdide karşı direnç sağlanırken aynı zamanda mekanik dayanım da optimize edilir. Çok katmanlı kaplamalar, özellikle ileri düzey performans beklentisi olan sektörlerde yoğun şekilde tercih edilmektedir (Azazi, 2007).

Fonksiyonel kaplamalar da akımlı kaplama yönteminin sunduğu bir diğer önemli kaplama türüdür. Bu tür kaplamalarda temel hedef, sadece fiziksel koruma sağlamak değil, aynı zamanda yüzeye belirli işlevsel özellikler kazandırmaktır. Fonksiyonel kaplamalar, örneğin elektriksel iletkenlik, manyetik özellikler, antibakteriyel etki, süperhidrofobik davranış gibi çeşitli özel yeteneklerle donatılmış olabilir. Bu özelliklerin kazandırılmasında, kaplama sırasında elektrolit içerisine eklenen katkı maddeleri, nano ölçekli parçacıklar veya özel yapılı moleküller rol oynar. Akımlı kaplama prosesi, bu katkıların kontrollü bir şekilde kaplama yapısına entegre edilmesini mümkün kılar. Bu tür kaplamalar, gelişmiş cihaz teknolojilerinde, biyomedikal alanlarda ve sensör üretiminde stratejik önem taşımaktadır. Fonksiyonel kaplamalar, uygulama alanlarına göre özel olarak tasarlanmakta ve her seferinde özgün bir proses geliştirme süreci gerektirmektedir (Çiftçi, 2022).

Bir başka önemli grup ise kompozit kaplamalardır. Kompozit kaplamalar, metal matris içerisine dağıtılmış olan seramik, polimer veya nano yapılı parçacıkların varlığı ile tanımlanır. Bu parçacıklar, kaplama sırasında elektrolite homojen şekilde dağıtılır ve akım uygulandığında metal matris ile birlikte katot yüzeyine çökeltirilir. Bu tür kaplamaların amacı, metal matrisin mekanik, tribolojik ya da kimyasal özelliklerini geliştirerek çok daha kompleks çevresel koşullara karşı üstün performans elde etmektir. Kompozit kaplamaların başarısı, partikül dağılımının homojenliğine, matris ile olan bağlanma kuvvetine ve elektrolit içerisindeki stabilitelerine bağlıdır. Güncel araştırmalar, bu tür kaplamaların geliştirilmesiyle daha az malzeme kullanılarak daha yüksek performans elde edilebileceğini ortaya koymakta, bu da sürdürülebilir üretim hedefleriyle uyumlu bir çözüm sunmaktadır.

Nanoyapılı kaplamalar ise günümüzde en çok dikkat çeken ve araştırma konusu olan kaplama türleri arasında yer alır. Akımlı kaplamanın yüksek kontrol kabiliyeti, nano boyutlarda yapılar oluşturmak için ideal bir teknik sağlar. Nanoyapılı kaplamalar, tane boyutunun küçüklüğü sayesinde sertlik, mukavemet, aşınma direnci ve korozyon

dayanımı açısından klasik kaplamalardan çok daha üstün özellikler sergiler. Bu tür kaplamalarda, kaplama koşullarının mikrometrik düzeyde kontrol edilmesi gerekir. Akım yoğunluğu, sıcaklık, pH ve elektrolit bileşimi gibi faktörler, kristal yapı ve yüzey enerjisi üzerinde doğrudan etkili olur. Nanoyapıların oluşturulması, malzemenin özgül yüzey alanını artırarak bazı fonksiyonel özelliklerin (örneğin katalitik aktivite ya da elektriksel duyarlılık) de iyileştirilmesini sağlar. Bu kaplama türü, özellikle ileri düzey malzeme mühendisliği uygulamalarında çığır açıcı gelişmelere öncülük etmektedir.

Hibrit kaplama sistemleri, birden fazla kaplama türünün birlikte ya da ardışık biçimde uygulanmasıyla oluşturulan yapılar olarak tanımlanabilir (Azazi, 2007). Bu tür sistemlerde, örneğin bir kompozit kaplamanın üzerine fonksiyonel bir katman ilave edilerek hem mekanik dayanım hem de elektriksel özellikler artırılabilir. Hibrit sistemlerin amacı, tek başına elde edilemeyen özellikleri bir arada sunmaktır. Bu tür uygulamalarda proses mühendisliği, malzeme bilimi ve yüzey teknolojileri arasında çok yönlü bir entegrasyon gereklidir. Akımlı kaplama yöntemi, bu entegrasyonu sağlayabilecek esnekliğe ve çok yönlülüğe sahiptir. Hibrit yapılar, gelecekteki malzeme tasarımlarının temel taşlarını oluşturacak niteliktedir.

Kaplama türlerinin çeşitliliği, akımlı kaplama teknolojisinin gelişimine paralel olarak her geçen gün artmaktadır. Bu çeşitlilik, malzeme biliminde fonksiyonelliğin artmasına, kaynak kullanımında verimliliğin yükselmesine ve çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Kaplama teknolojilerinde sürdürülebilirliğe, enerji verimliliğine ve döngüsel ekonomiye olan ilgi arttıkça, kaplama türlerinin daha da gelişeceği, yeni fonksiyonlar kazanacağı ve daha karmaşık yapılara evrileceği öngörülmektedir. Akımlı kaplama, bu dönüşümde merkezi bir teknik olarak konumunu sürdürmekte, kaplama türleri ise bu dönüşümün somut yansımalarını temsil etmektedir (Abakay, 2023).

2.2.4. Uygulama alanları

Çok katmanlı fonksiyonel Ni-W (Nikel-Tungsten) kompozit kaplamalar, son yıllarda malzeme mühendisliği ve yüzey teknolojileri alanında artan bir ilgiyle karşılaşmakta, bu malzemelerin sunduğu üstün özellikler, onları geleneksel kaplama yöntemlerinden ayıran temel faktörlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Bu tür kaplamalar, kimyasal direnç, mekanik dayanıklılık, sertlik ve yüksek sıcaklık koşullarına karşı gösterdikleri direnç gibi nitelikleriyle çok çeşitli sanayi kollarında stratejik öneme sahip uygulamalar için tercih edilmektedir. Özellikle Ni-W matrisinin sahip olduğu yüksek

ergime noktası ve yapısal stabilitesi ile birlikte çok katmanlı yapıların sunduğu özelleştirilebilirlik, bu kaplamaların performans gereksinimlerine göre ayarlanmasına imkân tanımaktadır.

Fonksiyonel Ni-W kompozit kaplamaların uygulama alanları, yalnızca koruyucu bir yüzey tabakası sağlamakla sınırlı kalmamakta, aynı zamanda malzeme yüzeyine yeni fonksiyonlar kazandırma amacı da taşımaktadır. Kaplamaların çok katmanlı yapıda oluşturulması, her bir katmanın farklı fiziksel veya kimyasal özelliklere sahip olmasına olanak vererek, özellikle sürtünme, aşınma ve oksidasyon gibi olumsuz çevresel etkilere karşı daha etkin bir bariyer mekanizması oluşturulmasını sağlamaktadır. Bu noktada, katmanlar arasında oluşturulan geçiş bölgeleri, termal genleşme farklarının yol açabileceği iç gerilmeleri absorbe ederek kaplamanın genel dayanımını artırmakta ve uzun süreli kullanımda kararlılığını korumasına yardımcı olmaktadır. Uygulama alanlarının şekillenmesinde en önemli etkenlerden biri, Ni-W kompozit kaplamaların mikro ve nano ölçekte kontrol edilebilir yapısal özelliklere sahip olmasıdır (Çakar, 2010). Bu sayede, mikroyapısal modifikasyonlarla hedeflenen performans kriterleri doğrultusunda yüzey fonksiyonlarının hassas bir biçimde ayarlanması mümkün olmaktadır. Örneğin, yüzey pürüzlülüğü, sertlik derecesi, elektriksel iletkenlik ya da manyetik davranış gibi parametreler, kaplamanın uygulama alanını doğrudan etkilemekte ve bu yönüyle kaplamalar yüksek düzeyde esneklik sunmaktadır. Malzeme yüzeylerinin bu şekilde işlevselleştirilmesi hem üretim süreçlerinin verimliliğini artırmakta hem de kullanım ömrünü uzatarak ekonomik anlamda da önemli katkılar sağlamaktadır. Fonksiyonel Ni-W kaplamaların bir diğer dikkat çekici yönü, yüksek sıcaklıklara karşı gösterdikleri termal dirençle birlikte, korozyon ve oksidasyona karşı sağladıkları koruma kapasitesidir. Bu özellikleri sayesinde kaplamalar, ekstrem çevre koşullarının egemen olduğu sistemlerde dahi etkin bir yüzey koruması sunmakta, böylece alt tabakada yer alan esas malzemenin fiziksel bütünlüğünü koruma görevini üstlenmektedir. Özellikle çok katmanlı yapının sunduğu mimari avantajlar, kaplama yüzeyinin yalnızca dışsal etkenlere karşı değil, aynı zamanda termomekanik yükler altında da yüksek performans göstermesini mümkün kılmaktadır. Bu yapı sayesinde, katmanlar arasında enerji yayılımı dengelenmekte ve malzeme yorulması minimize edilerek yapısal deformasyonların önüne geçilmektedir (Trentin ve ark., 2022).

Yüzey mühendisliğinde gelişen teknolojilerle birlikte, Ni-W kompozit kaplamaların çok katmanlı olarak tasarlanması, bu kaplamaların fonksiyonel özelliklerini geniş bir spektrumda yeniden şekillendirebilme olanağı sunmaktadır. Bu bağlamda, kaplama kalınlığının kontrollü olarak ayarlanabilmesi, ara yüzey yapılarının optimize edilmesi ve kullanılan elektrolit çözeltiler aracılığıyla matris içine dağıtılan partikül fazlarının özelliklerinin değiştirilmesi gibi uygulamalar, Ni-W sistemlerinin çok daha geniş bir kullanım alanına yayılmasını beraberinde getirmiştir. Bu tekniksel gelişmeler, geleneksel yüzey kaplama yöntemlerine kıyasla çok daha fonksiyonel ve yüksek performanslı sistemlerin oluşturulmasını sağlamış, bu durum kaplamaların stratejik sektörlerde yaygın biçimde tercih edilmesinin önünü açmıştır. Fonksiyonel Ni-W kaplamaların çok katmanlı formda geliştirilmesi, sadece yüzey koruma kapasitesini artırmakla kalmamakta, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da çeşitli avantajlar sunmaktadır. Özellikle kurşun, kadmiyum ya da krom gibi çevreye zararlı elementlerin kullanılmasını gerektirmeyen Ni-W sistemleri, daha çevre dostu bir kaplama teknolojisi olarak ön plana çıkmaktadır (Zhitomirsky ve Gal-Or, 1999). Bu da kaplamaların yalnızca teknik açıdan değil, aynı zamanda çevresel ve mevzuatsal uyum açısından da tercih edilirliliğini artırmakta ve sürdürülebilir üretim uygulamalarına katkı sağlamaktadır. Bu doğrultuda geliştirilen çok katmanlı yapılandırmalar hem çevresel hem de operasyonel maliyetlerin düşürülmesine olanak sağlamakta, bu yönüyle modern sanayi politikaları ile uyumlu bir teknolojik altyapı oluşturmaktadır. Çok katmanlı fonksiyonel Ni-W kompozit kaplamalar, sundukları gelişmiş teknik niteliklerle yalnızca malzeme mühendisliği disiplininin değil, aynı zamanda birçok farklı endüstriyel uygulama alanının da dönüşümünde temel bir rol üstlenmektedir. Bu kaplamaların çok katmanlı yapısı sayesinde sağlanan termal, kimyasal ve mekanik avantajlar, onları yüksek performans beklentilerine sahip sistemlerde vazgeçilmez hale getirmekte ve böylece teknolojik gelişmelerin sürdürülebilirliği açısından stratejik bir zemin sunmaktadır. Gelişen teknolojiyle birlikte bu kaplamaların uygulama potansiyeli daha da artmakta, fonksiyonel özelliklerin hassas biçimde kontrol edilmesi sayesinde yenilikçi yüzey mühendisliği çözümlerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu durum, kaplama teknolojilerinin geleceğinde Ni-W kompozitlerinin giderek artan bir öneme sahip olacağını göstermekte ve disiplinler arası araştırmalar için verimli bir zemin hazırlamaktadır (Bülbül, 2014).



3. Nİ-W KAPLAMALARIN TEMELLERİ VE ÖZELLİKLERİ

3.1. Ni-W Alaşımlarının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Nikel-tungsten (Ni-W) alaşımları, teknik uygulamalarda üstün performans gerektiren yüzeylerin elde edilmesi amacıyla geliştirilen ve günümüzde özellikle kaplama teknolojilerinde giderek artan bir öneme sahip olan malzeme gruplarından. Bu alaşımların dikkat çekici fiziksel ve kimyasal özellikleri, onları hem endüstriyel hem de akademik çalışmalarda değerli kılmaktadır. Ni-W kaplamaların temel karakteristikleri, iki metalin atomik yapılarından ve alaşım içerisinde birbirleriyle olan etkileşimlerinden kaynaklanan mikro yapısal özelliklerine bağlı olarak şekillenmektedir. Nikelin süneklik ve şekillendirilebilirlik gibi klasik özellikleri, tungstenin sertlik ve yüksek sıcaklığa dayanım kabiliyetiyle birleştiğinde ortaya çıkan bu alaşımlar, işlevsel ve çok yönlü yüzey özellikleri kazandırmaktadır.

Ni-W alaşımlarının fiziksel özellikleri arasında öncelikli olarak yoğunluk, sertlik, elektriksel iletkenlik ve termal kararlılık yer almaktadır (Yıldız, 2012). Yoğunluk açısından değerlendirildiğinde, alaşımın tungsten içeriği arttıkça yapının genel yoğunluğunda da artış gözlenmektedir. Bu artış, yüksek sıcaklıklarda bile stabil kalan bir yapının oluşmasına katkıda bulunur. Sertlik özellikleri ise, tungstenin alaşımda homojen bir şekilde dağılması durumunda belirgin bir şekilde artmakta ve bu özellik özellikle aşınma direnci gereken uygulamalarda büyük avantajlar sunmaktadır. Sertlikteki bu artış yalnızca mekanik anlamda değil, aynı zamanda yüzeyin mikroyapısal stabilitesi bakımından da etkilidir. Bununla birlikte, alaşımın ince taneli veya amorf yapıda olması, sertliğin yanı sıra korozyon direncinin de olumlu yönde gelişmesini sağlar.

Elektriksel iletkenlik açısından değerlendirildiğinde ise Ni-W alaşımlarının klasik saf metallere göre daha düşük bir iletkenliğe sahip olduğu bilinmektedir. Bu durum, tungstenin yüksek özdirence sahip yapısından kaynaklanmaktadır. Ancak alaşımın kontrollü bir şekilde üretimi ve mikro yapının istenilen özelliklerde düzenlenmesiyle bu dezavantaj minimal düzeyde tutulabilmektedir. Öte yandan termal kararlılık açısından bakıldığında, Ni-W alaşımları, özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında

yapısal kararlılıklarını koruyarak işlevlerini sürdürebilme yeteneği göstermektedir. Bu termal direnç, alaşımın oksidasyona karşı gösterdiği dirençle de ilişkilidir. Oksidasyon davranışı, alaşımda tungstenin oranı ve bu elementin yüzeydeki dağılımıyla doğrudan bağlantılıdır. Yüksek tungsten içeriği, oksit tabakalarının daha yoğun ve daha koruyucu yapıda olmasını sağlayarak alaşımın genel dayanımını artırmaktadır.

Kimyasal özellikler açısından bakıldığında, Ni-W alaşımlarının en dikkat çekici yönlerinden biri, yüksek korozyon dirençleridir. Bu direnç hem asidik hem de nötr ortamlarda, kaplamanın uzun süre boyunca etkinliğini sürdürebilmesini sağlamaktadır. Korozyon davranışı, çoğunlukla alaşımın mikro yapısı, tane büyüklüğü ve tungstenin dağılımı gibi parametrelerle ilişkilidir. Özellikle amorf yapıya yakın, ince taneli Ni-W kaplamalar, tane sınırlarının daha homojen olması ve difüzyon yollarının kısıtlanması nedeniyle korozyona karşı daha yüksek direnç göstermektedir (Kabi, Raeissi ve Saatchi, 2009). Bu durum, kaplamanın koruyucu niteliğini artırmakta ve yapının dış etkenlere karşı daha dayanıklı hale gelmesini sağlamaktadır. Ayrıca, Ni-W alaşımları kimyasal açıdan inert sayılabilecek bir karaktere sahip olup, çoğu kimyasal reaktanla düşük reaksiyon verme eğilimindedir. Bu özellik, onların agresif ortamlarda kullanılmasını mümkün kılmakta, kimyasal stabiliteleri sayesinde uzun ömürlü çözümler sunmaktadır.

Ni-W kaplamaların bir diğer önemli kimyasal özelliği ise pasif film oluşturabilme yetenekleridir. Bu pasif tabakalar, yüzeyde koruyucu bir bariyer oluşturarak hem oksidasyona hem de kimyasal çözücülere karşı etkin bir direnç sağlar. Söz konusu film tabakaları, özellikle elektrolitik ortamda oluşan kaplamalarda, kaplama parametreleriyle doğrudan ilişkili şekilde gelişmektedir. Akım yoğunluğu, sıcaklık, pH değeri ve kullanılan katkı maddeleri, bu filmlerin kalınlığı, bütünlüğü ve sürekliliği üzerinde etkili olmaktadır. Bu bağlamda Ni-W kaplamaların kimyasal özellikleri, yalnızca alaşım bileşenlerine değil, aynı zamanda üretim sürecine bağlı olarak da şekillenmekte ve işlevsellik kazanmaktadır. Fiziksel ve kimyasal özellikler arasındaki etkileşimler, Ni-W alaşımlarının işlevsel yapısını belirleyen temel faktörlerdir (Sriraman, Raman ve Seshadri, 2007). Örneğin, sertlik artışı çoğu zaman korozyon direncinin azalması gibi bir sonuç doğurabilse de Ni-W alaşımlarında bu iki özelliğin aynı anda geliştirilebilmesi mümkündür. Bu durum, alaşımın mikro yapısının mühendislik yaklaşımlarıyla optimize edilmesiyle sağlanmaktadır. Özellikle çok katmanlı ve kompozit yapıların tasarımı, bu bağlamda özgün çözümler sunmakta,

alaşımın istenilen özellikleri hedeflenen yüzey bölgelerine entegre etmesine olanak tanımaktadır. Fiziksel parametrelerin kimyasal davranışlar üzerindeki etkisi, kaplamanın uzun ömürlü kullanımında belirleyici bir rol oynamaktadır.

Bu nedenle Ni-W alaşımları sadece mekanik bir yüzey sertliği değil, aynı zamanda kimyasal stabilite ve çevresel etkilere direnç yönüyle de bütüncül bir yapı sunmaktadır. Ni-W alaşımlarının fiziksel ve kimyasal özellikleri, onları yalnızca yüksek performanslı kaplama malzemeleri değil, aynı zamanda fonksiyonel çözümler sunabilen teknolojik ürünler haline getirmektedir (Paşaoğlu, 2013).

3.2. Akımlı Kaplama Yöntemi ile Ni-W Kaplama Üretimi

Ni-W kaplamaların elde edilmesinde en yaygın olarak tercih edilen yöntemlerden biri akımlı kaplamadır. Bu yöntem, metal iyonlarının bir elektrolit ortamında çözeltideki indirgenmesiyle metalik kaplama elde edilmesini esas alır. Akımlı kaplama süreci hem kontrol edilebilirliği hem de ekonomik oluşu nedeniyle mühendislik uygulamalarında büyük bir ilgi görmektedir. Ni-W alaşımlarının üretiminde bu yöntem, aynı anda hem nikelin hem de tungstenin yüzeye çöktürülmesine olanak tanıdığı için tercih edilmektedir. Ancak bu süreç, her iki metalin çözeltideki davranışlarının farklılığı sebebiyle oldukça karmaşık bir hale gelebilir. Özellikle tungstenin indirgenme potansiyelinin nikelden oldukça farklı olması, elektrokimyasal dengeyi doğrudan etkileyerek kaplama kalitesini belirleyen temel faktörlerden biri haline gelmektedir. Bu yöntemde, kaplama işleminin başarısı sadece kullanılan elektrolitin kimyasal bileşimine bağlı değildir; aynı zamanda sıcaklık, akım yoğunluğu, pH değeri ve karıştırma hızı gibi parametrelerin de dikkatlice kontrol edilmesi gerekir. Bu parametrelerdeki küçük değişiklikler, çöken kaplamanın morfolojisini, sertliğini, mikro yapısını ve hatta içsel gerilimlerini doğrudan etkileyebilmektedir (Ghaferi ve ark., 2010). Özellikle çok katmanlı ve fonksiyonel yapıların hedeflendiği uygulamalarda, bu parametrelerin hassas ayarlanması, istenilen mekanik ve kimyasal özelliklerin elde edilmesinde belirleyici rol oynamaktadır. Akımlı kaplama süreci sırasında meydana gelen iyon taşınımı, çözünürlük sınırları ve yüzey adsorpsiyon mekanizmaları da kaplama performansını etkileyen başlıca faktörler arasında yer almaktadır. Bu nedenle, yöntemin başarısı yalnızca deneysel bilgiye değil, aynı zamanda elektrokimyasal etkileşimlerin iyi anlaşılmasına da bağlıdır. Ni-W kaplamalarının üretiminde akımlı kaplamanın bir diğer önemli yönü, mikro yapının

homojenliği ile doğrudan ilişkilidir. Homojen bir yapının elde edilebilmesi için, çözelti içerisindeki metal iyonlarının katot yüzeyine dengeli bir şekilde ulaşması gerekir. Bu durum, difüzyon kontrollü bir süreci zorunlu kılmakta ve kaplama sırasında mikroskobik düzeydeki değışimlerin makroskobik özellikler üzerinde belirleyici olmasına neden olmaktadır (Gül, Ergin ve Uysal, 2021). Bu bağlamda, kaplama sırasında oluşan mikro yapı, sadece fiziksel özellikler üzerinde değil, aynı zamanda kaplamanın kimyasal dayanıklılığı üzerinde de etkili olmaktadır. Akımlı kaplama yöntemi ile üretilen Ni-W kaplamalar, bu yönüyle hem yüksek sertlik hem de korozyon direnci açısından avantaj sağlamaktadır. Ancak tüm bu avantajlar, sürecin her aşamasında kontrol edilmesi gereken hassas parametreler sayesinde elde edilebilmektedir. Bu nedenle, akımlı kaplama yöntemi sadece uygulamalı değil, aynı zamanda teorik bilgi birikimini de gerektiren kapsamlı bir üretim sürecidir.

3.2.1. Volframın eş biriktirilmesi: mekanizma ve zorluklar

Volframın nikel ile birlikte eş biriktirilmesi, kaplama teknolojilerinde karşılaşılan en karmaşık süreçlerden birini oluşturmaktadır. Bu sürecin temelinde, iki metalin aynı anda bir katot yüzeyine indirgenmesi yatmaktadır. Ancak volframın yüksek indirgenme potansiyeline sahip olması, bu metali çözeltiden doğrudan indirgemeyi oldukça zor hale getirmektedir (Yari ve Dehghanian, 2013). Bu nedenle volframın genellikle bir ara bileşik ya da kompleks iyon şeklinde çözeltiye katılması gerekmektedir. Bu kompleks iyonlar, indirgenme sırasında nikel iyonlarıyla birlikte katot yüzeyine ulaşarak volframın indirgenmesini kolaylaştırmaktadır. Ancak bu işlem, sadece kimyasal değil, aynı zamanda kinetik engellerle de karşı karşıyadır. Volfram iyonlarının elektrot yüzeyine taşınması ve burada indirgenmesi sürecinde difüzyon sınırlamaları ortaya çıkmakta, bu da kaplamanın homojenliğini doğrudan etkilemektedir. Volframın eş birikme mekanizması incelendiğinde, bu metalin indirgenmesinin genellikle indirgenmekte olan nikelin yardımıyla dolaylı bir yolla gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum, endüstride "indüklenmiş eş biriktirme" olarak tanımlanmaktadır. Yani volfram, çözeltideki nikel iyonlarının indirgenmesiyle ortaya çıkan atomik hidrojenin etkisiyle ya da nikelin oluşturduğu metalik fazların yardımıyla çöktürölmektedir. Bu karmaşık mekanizma, kaplama sırasında tungstenin çözeltiden ne oranda kaplamaya dahil olacağını doğrudan etkilerken, aynı zamanda kaplamanın mekanik özelliklerini de belirlemektedir (Paşaoğlu, 2011). Dolayısıyla volframın

kaplamaya dahil olma oranı, yalnızca çözeltideki konsantrasyonla değil, aynı zamanda akım yoğunluğu, sıcaklık ve pH gibi çevresel koşullarla da yakından ilişkilidir.

Bu süreçte karşılaşılan temel zorluklardan biri, volframın homojen bir şekilde dağıtılmasının oldukça güç olmasıdır. Kaplama yüzeyinde volframın yer yer yoğunlaşması ya da bazı bölgelerde neredeyse hiç çökmemesi gibi sorunlar, kaplamanın performansını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Ayrıca volframın yüksek reaktivitesi, çözelti içerisindeki diğer bileşenlerle etkileşime girerek istenmeyen yan ürünlerin oluşmasına neden olabilmektedir. Bu tür etkileşimler, çözelti dengesini bozarak kaplama sürecini öngörülemez hale getirebilmektedir. Bunun yanı sıra volframın çözeltide kararsız kompleksler oluşturması, kaplama kalitesinin düşmesine ve istenen mikroyapının elde edilememesine yol açabilmektedir. Bu durum, özellikle çok katmanlı ya da fonksiyonel kaplamalarda, hedeflenen yapısal özelliklerin elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Tüm bu zorluklara rağmen, volframın eş biriktirilmesi ile elde edilen Ni-W kaplamalar, üstün özellikleri sayesinde teknik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek sertlik, aşınma direnci ve kimyasal dayanıklılık gibi özellikler, bu kaplamaları birçok endüstriyel uygulama için ideal hale getirmektedir. Ancak bu avantajlara ulaşabilmek için, volframın eş biriktirilme mekanizmasının iyi anlaşılması ve sürecin tüm değişkenlerinin dikkatle yönetilmesi gerekmektedir. Elektrokimyasal etkileşimlerin bu denli karmaşık olduğu bir ortamda, her bir adımın titizlikle planlanması, kaplamanın kalitesini ve performansını doğrudan belirleyen en temel etkidir (Kumar, Kennady ve Zhou, 2015). Bu nedenle volframın eş biriktirilmesi süreci, sadece teknik bir işlem olmanın ötesine geçmekte, derinlemesine bilgi ve dikkatli bir mühendislik yaklaşımı gerektirmektedir.

3.2.2. Darbeli akım yöntemiyle kaplama ve mikro-yapısal kontrol

Darbeli akım yöntemiyle kaplama, geleneksel sabit akım ya da potansiyel altında gerçekleştirilen kaplama süreçlerinden farklı olarak, akımın belirli aralıklarla açılıp kapatıldığı ve bu yolla elektrokimyasal koşulların periyodik olarak değiştirildiği bir yöntemdir. Bu yöntemin temelinde, elektrot yüzeyine uygulanan elektriksel uyarımın zamanla modüle edilmesi yatmaktadır. Uygulanan darbeler sayesinde metal iyonlarının yüzeye taşınma biçimi değişmekte ve bu sayede daha ince kontrollü bir kristal büyümesi sağlanabilmektedir. Özellikle nikel-volfram (Ni-W) kaplamalarında darbeli akım kullanılması, mikro yapının homojenliğini artırmakta ve kaplama

özelliklerinin daha öngörülebilir bir şekilde yönlendirilmesine imkân tanımaktadır. Bu yöntem sayesinde sadece sertlik gibi mekanik özellikler değil, aynı zamanda korozyon direnci gibi kimyasal özellikler de optimize edilebilmektedir. Darbeli akım yönteminin en önemli avantajlarından biri, iyon birikimi sırasında oluşabilecek lokal konsantrasyon değişimlerini dengeleyebilmesidir. Sabit akım altında yapılan kaplamalarda, özellikle mikro bölgelerde metal iyonlarının tükenmesi ve bu tükenmenin neden olduğu morfolojik bozulmalar sıklıkla karşılaşılan sorunlardır. Ancak darbeli akım yönteminde, akımın kapalı olduğu süre boyunca çözeltideki iyonlar yeniden dengeye gelir ve yüzeydeki birikim daha düzgün bir şekilde devam eder. Bu sayede dentritik oluşumlar minimize edilerek daha kompakt, pürüzsüz ve mikro yapısal olarak tutarlı kaplamalar elde edilebilir. Bu yapısal kontrol, özellikle çok katmanlı fonksiyonel kaplamaların üretiminde oldukça kritiktir çünkü katmanlar arası geçişlerin homojenliği, tüm sistemin dayanıklılığı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir (Ozan, 2023).

Bununla birlikte, darbeli akım yönteminde kaplama sırasında parametrelerin optimizasyonu son derece hassas bir denge gerektirir. Darbe süresi, frekans, bekleme süresi ve akım yoğunluğu gibi değişkenler; kaplama sırasında oluşacak tane boyutunu, faz dağılımını ve mikro yapısal kusurları doğrudan etkiler. Bu bağlamda, yalnızca bir parametredeki küçük bir değişiklik bile tüm kaplama özelliklerini değiştirebilecek güçtedir. Bu nedenle, sürecin hem deneysel hem de teorik olarak detaylı biçimde analiz edilmesi, istenilen yapısal özelliklerin elde edilmesinde temel bir zorunluluk haline gelir. Mikro yapısal kontrolü sağlamak adına yapılan bu çalışmalar, sadece kaplamanın görünümünü değil, aynı zamanda kaplamanın uzun vadeli dayanımını ve performansını da olumlu yönde etkiler. Ayrıca tane sınırlarının kontrolüyle elde edilen yönlendirilmiş mikro yapılar, bazı fonksiyonel uygulamalarda performansı daha da üst seviyelere taşıyabilmektedir.

Ni-W kaplamalarında akımın darbeli şekilde uygulanmasıyla elde edilen mikro yapı, geleneksel yöntemlerle elde edilenden daha rafine, sıkı bağlanmış ve homojen bir yapıya sahiptir. Bu da yüzeyin hem mekanik darbeye karşı dayanıklılığını artırmakta hem de çevresel etkiler karşısındaki kararlılığını güçlendirmektedir. Bununla birlikte, darbeli yöntemin sunduğu bu üstünlükler, yalnızca sistematik bir yaklaşım ve dikkatli bir mühendislik çalışmasıyla mümkün olmaktadır. Sürecin her aşamasında elde edilen verilerin doğru yorumlanması, bu yöntemin sağladığı potansiyelin tam anlamıyla

kullanılabilmesi için zorunludur. Dolayısıyla darbeli akım yöntemiyle kaplama, yalnızca bir teknik seçim değil, aynı zamanda detaylı bir bilgi birikimi gerektiren bir süreçtir. İnsani bir yaklaşımla bakıldığında, darbeli yöntemin sunduğu bu hassas kontrol ve öngörülebilirlik, malzeme biliminin yalnızca teknik değil, aynı zamanda çevreye ve kullanıcıya duyarlı bir boyut kazandığını da göstermektedir. Özellikle günümüzde sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği gibi kavramların öne çıktığı bir ortamda, bu yöntemin sağladığı kontrollü üretim olanağı, kaynak kullanımını azaltmakta ve çevresel etkileri minimize etmektedir (Dilek, 2021). Bu yönüyle darbeli akım yöntemi sadece mühendislik açısından değil, aynı zamanda toplumsal fayda bağlamında da önemli bir yere sahiptir. Bu nedenle yöntemin geliştirilmesi ve daha geniş uygulama alanlarına yayılması, teknoloji ile insan arasında kurulan köprünün güçlenmesine katkı sunmaktadır.

3.3. Ni-W Kaplamaların Mikroyapı ve Faz Bileşimi

Ni-W kaplamaların mikroyapısı ve faz bileşimi, bu kaplamaların fiziksel ve mekanik performansını belirleyen en kritik unsurlar arasında yer alır. Kaplamanın mikroyapısı, kristal tane boyutları, tane sınırlarının dağılımı, fazların homojenliği ve kaplama içindeki olası kusurlar gibi pek çok parametreyi kapsar. Bu yapısal özellikler, kaplamanın uygulandığı alandaki dayanıklılık, sertlik, aşınma ve korozyon direnci gibi performans kriterlerini doğrudan etkiler. Mikroyapının kontrolü ve optimize edilmesi, Ni-W kaplamaların çok katmanlı ve fonksiyonel yapılar olarak tasarlanmasında temel hedeflerden biridir. Ni-W kaplamaların faz bileşimi, çözeltideki metal iyonlarının oranı, kaplama parametreleri ve kaplama koşullarına bağlı olarak değişiklik gösterir. Bu bileşim, genellikle amorf, nanokristalin ya da ince taneli polikristalin yapılar şeklinde ortaya çıkar. Fazların bu çeşitliliği, kaplamanın mekanik dayanıklılığı ve kimyasal kararlılığı üzerinde belirleyici olur. Amorf ya da nanokristalin yapılar, tane sınırlarının yüksek olması nedeniyle geleneksel kristalin yapılara kıyasla daha yüksek sertlik ve aşınma direnci sağlar. Ancak bu yapıların kararlılığını sağlamak için üretim koşullarının çok iyi kontrol edilmesi gerekir. Polikristalin yapılar ise genellikle daha yüksek dayanıklılık ve yapısal bütünlük sunarken, mikroyapısal kusurların etkisiyle performans değişkenliği gösterebilir (Lagarde ve ark., 2018).

Mikroyapısal düzenlemeler, kaplamanın içsel gerilim dağılımını ve tane sınırları arasındaki bağları da etkiler. Özellikle Ni-W kaplamalarda, tane boyutlarının

küçülmesi ve tane sınırlarının artırılması, kaplamanın mekanik dayanıklılığını artıran önemli bir etkidir. Bu durum, kaplamanın mikroyapısında ince, sıkı ve düzgün bir dağılım oluşturularak elde edilir. Faz bileşiminin dengelenmesi ise koruyucu oksit tabakalarının oluşumunu ve böylece korozyon direncini artırır. Bu denge, kaplamanın kimyasal kararlılığını uzun vadede korumasını sağlar. Ayrıca, mikroyapı ve faz bileşiminin karşılıklı etkileşimi, kaplamanın termal kararlılığını da etkileyerek, yüksek sıcaklık uygulamalarında performansını belirler. Bu bağlamda, Ni-W kaplamaların mikroyapısı ve faz bileşiminin incelenmesi hem malzeme bilimi hem de yüzey mühendisliği açısından çok boyutlu bir yaklaşıma ihtiyaç duyar. Yapılan detaylı analizler, kaplamaların üretim süreçlerinin iyileştirilmesi ve istenen özelliklerin optimize edilmesi için temel veri sağlar. Bu nedenle mikroyapı ve faz bileşimi üzerinde yürütülen çalışmalar, sadece akademik anlamda değil, endüstriyel uygulamalar için de büyük önem taşır. Bu çalışmalar, kaplamaların fonksiyonel ömrünü artırmak ve farklı uygulama alanlarındaki gereksinimleri karşılamak amacıyla sürekli olarak geliştirilmektedir. Etik bir bakış açısıyla, Ni-W kaplamaların mikroyapısal ve faz bileşenlerinin kontrolü, malzeme mühendisliğinin insan yaşamına ve çevreye olan katkısını somutlaştırır (Hu ve ark., 2019). Bu yapıların geliştirilmesiyle elde edilen dayanıklı ve uzun ömürlü kaplamalar, kaynakların daha verimli kullanılmasına ve sürdürülebilir üretim süreçlerine destek olur. Böylece teknoloji, sadece teknik bir alan olmaktan çıkarak, daha yaşanabilir bir dünya için bir araç haline gelir. Bu nedenle mikroyapı ve faz bileşimi konusundaki derin bilgi, sadece bilimsel ilerleme için değil, toplumun ihtiyaçlarına cevap veren çözümler üretmek için de vazgeçilmezdir.

3.3.1. Mikroyapının katman kalitesi üzerindeki rolü

Mikroyapı, kaplamaların katman kalitesini doğrudan etkileyen temel unsurlardan biridir ve bu etkinin kapsamı hem mekanik hem de kimyasal özelliklere kadar uzanmaktadır. Bir kaplamanın yüzey yapısının ve içsel dokusunun düzenliliği, katmanın dayanıklılığını, bütünlüğünü ve işlevselliğini belirler. Özellikle çok katmanlı ve fonksiyonel Ni-W kaplamalarda, her bir katmanın mikroyapısal özellikleri hem katmanlar arası uyumu hem de toplam sistemin performansını şekillendirir. Katman kalitesinin yüksek olması, kaplamanın uygulama ömrünün uzaması ve karşılaşılan dış etkenlere karşı direncinin artması anlamına gelir. Bu nedenle mikroyapının doğru şekilde kontrol edilmesi, kaplamanın başarısında önemli bir rol oynar. Kaplama

sürecinde mikroyapının özellikleri, kristal tane boyutu, tane sınırlarının yapısı, faz dağılımı ve içsel gerilim gibi unsurları içerir. Bu özellikler, kaplamanın mukavemetini ve sertliğini artırırken, katmanlar arasındaki bağlanma kuvvetini de etkiler. İyi düzenlenmiş, ince ve homojen bir mikroyapı, katmanlar arası mekanik uyumu güçlendirerek katmanın taban malzemeye sağlam bir bütünlük oluşturmalarını sağlar. Bu sayede kaplamada çatlama, soyulma veya ayrılma gibi sorunların önüne geçilir. Mikroyapıdaki düzensizlikler ya da heterojen dağılımlar ise, katman kalitesinin azalmasına ve sonuç olarak kaplamanın performansında düşüşe yol açabilir (Tan, 2022).

Katman kalitesi açısından mikroyapının önemi, aynı zamanda korozyon direnci ve aşınma dayanımı gibi kimyasal özelliklerle de yakından ilişkilidir. Mikroyapıdaki kusurlar, tane sınırlarında yoğunlaşan gerilimler ya da heterojen faz bileşimleri, koruyucu tabakaların oluşmasını engelleyebilir ve böylece kaplamanın çevresel faktörlere karşı savunmasız kalmasına neden olabilir. Ayrıca katman içindeki mikroskobik boşluklar ya da çatlaklar, sıvıların veya gazların içeri sızmasına zemin hazırlayarak katmanın bütünlüğünü bozabilir. Bu durumlar, kaplamanın kalitesinin sadece mekanik değil, kimyasal açıdan da olumsuz etkilenmesine sebep olur. Katman kalitesini optimize etmek için mikroyapının yönetilmesi, üretim sürecinin her aşamasında dikkatle ele alınması gereken bir husustur. Kullanılan kaplama parametreleri, kaplama süresi ve sıcaklık gibi faktörler mikroyapının oluşumunu belirler ve böylece katman kalitesine yansır. Bu nedenle mikroyapının karakterizasyonu, kaplama süreçlerinin geliştirilmesi ve kalite kontrolü açısından vazgeçilmezdir. Katmanın uzun ömürlü ve işlevsel olabilmesi için, mikroyapının düzenli ve kontrollü bir biçimde şekillendirilmesi gereklidir (Adıgüzel, 2015). Bu da yalnızca ileri teknoloji ekipmanları ve deneysel bilgi birikimiyle mümkün olabilir.

Etik ve sürdürülebilirlik perspektifiyle bakıldığında, mikroyapının katman kalitesine olan etkisi, mühendislik ve malzeme bilimlerinin insan yaşamına olan doğrudan katkısını yansıtır. Sağlam ve dayanıklı kaplamalar, endüstriyel ürünlerin güvenilirliğini artırmakta ve bakım maliyetlerini azaltmaktadır. Bu da hem ekonomik hem de çevresel açıdan sürdürülebilirlik anlamına gelir. Katman kalitesindeki her iyileşme, ürünlerin ömrünü uzatarak kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlar. Dolayısıyla mikroyapının doğru yönetimi, sadece teknik bir zorunluluk değil, aynı zamanda toplumun ihtiyaçlarına duyarlı ve sürdürülebilir bir üretim anlayışının da

ifadesidir. Böylece teknoloji, insan hayatını kolaylaştırmakla kalmayıp, geleceğe daha güvenli bir miras bırakmanın da yolunu açar.

3.3.2. Amorf, nanokristalin ve kristalin yapıların oluşumu

Malzeme biliminde amorf, nanokristalin ve kristalin yapıların oluşumu, kaplama teknolojilerinde mikroyapısal özelliklerin belirlenmesi açısından hayati öneme sahiptir. Bu yapılar, atomların düzenlenme biçimleri ve içerdikleri enerji seviyeleri bakımından farklılık gösterir. Amorf yapılar, uzun menzilli düzenlilikten yoksun olup atomların düzensiz ve rastgele bir şekilde konumlandığı malzemelerdir. Bu düzensizlik, bu yapıların mekanik, elektriksel ve kimyasal özelliklerinde belirgin etkiler yaratır. Amorf kaplamalar, kristalin yapılara kıyasla genellikle daha yüksek sertlik ve korozyon direnci sunabilir, çünkü atomların düzensiz yerleşimi, kayma düzlemlerinin oluşmasını engelleyerek malzemenin dayanıklılığını artırır. Nanokristalin yapılar ise mikroskobik ölçekte, birkaç nanometre büyüklüğünde kristal tanelerden oluşur. Bu yapı, amorf ve kristalin yapılar arasında bir geçiş fazını temsil eder. Nanokristalin malzemeler, ince taneli yapıları nedeniyle yüksek tane sınırı yoğunluğuna sahiptir ve bu durum mekanik dayanıklılığı önemli ölçüde artırır. Tane sınırlarının artması, dislokasyon hareketlerini sınırlandırarak malzemenin sertleşmesine yol açar. Ayrıca nanokristalin yapılar, korozyon ve aşınmaya karşı da üstün direnç sunar. Bu yapının oluşumu, kaplama sürecindeki parametrelerin özenle kontrol edilmesiyle mümkündür ve genellikle yüksek soğuma hızları ya da özel elektrokimyasal koşullar altında meydana gelir (Liu ve ark., 2015).

Kristalin yapılar ise atomların belirli bir düzende, düzenli bir kafes yapısı içinde sıralandığı malzemelerdir. Bu düzenlilik, kristal fazların mekanik ve termal özelliklerinin öngörülebilir olmasını sağlar. Kristalin yapılar, genellikle daha büyük kristal tanelere sahip olup belirli yönelimlerde büyüyebilirler. Bu durum, malzemenin anizotropik özellikler sergilemesine neden olabilir; yani özellikler kristal yönüne bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Kristalin yapılar, yüksek sıcaklık uygulamalarında termal kararlılık sağlar ve mikroyapısal dayanıklılığı artırır. Ancak büyük tane boyutları, kaplamanın bazı mekanik özelliklerinde zayıflamalara yol açabilir. Bu üç yapı tipinin oluşumu, kaplama işlemi sırasında uygulanan enerji, sıcaklık, kimyasal bileşim ve soğuma hızı gibi faktörlerin etkisiyle şekillenir. Akımlı kaplama gibi yöntemlerde, parametrelerin hassas bir şekilde ayarlanması, hedeflenen mikroyapının elde edilmesinde belirleyici rol oynar (Ünal, Yaşar ve Karahan, 2020). Örneğin, düşük

sıcaklık ve hızlı soğuma koşulları amorf ya da nanokristalin yapıları teşvik ederken, daha yavaş soğuma ve yüksek sıcaklıklar kristalin yapılar oluşumunu destekler. Bu süreçler, malzemenin iç enerji durumunu ve atomların hareketliliğini kontrol ederek yapısal geçişlere neden olur.

Etik sorumluluk bağlamında, amorf, nanokristalin ve kristalin yapıların bilinçli yönetimi, malzeme mühendisliğinin insan yaşamına katkısını güçlendirir. Bu yapılar sayesinde kaplamalar daha dayanıklı, güvenilir ve uzun ömürlü hale gelir; böylece malzeme kaynakları daha verimli kullanılır ve sürdürülebilir teknolojilere yönelinir. Dolayısıyla bu yapılar sadece teknik bir tercih değil, aynı zamanda çevre ve toplum yararına yönelik bir sorumluluğun da ifadesidir. Teknolojinin bu bilinçli kullanımı, insanlığın ilerlemesine ve doğal kaynakların korunmasına hizmet eder, yaşam kalitesini yükseltir.

3.3.3. Faz dağılımı ve elementel analiz

Faz dağılımı ve elementel analiz, Ni-W kaplamaların yapısal ve kimyasal karakterizasyonunda kritik öneme sahiptir. Faz dağılımı, kaplamanın iç yapısında bulunan farklı kristal veya amorf fazların oranını, konumunu ve birbirleriyle olan ilişkilerini ifade eder. Bu dağılım, kaplamanın fiziksel özellikleri, mekanik dayanıklılığı ve kimyasal kararlılığı üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Örneğin, kaplama içinde homojen olarak dağılmış farklı fazlar, mekanik gerilmelerin dengelenmesine ve malzemenin dayanımının artmasına olanak sağlar. Bunun yanında, bazı fazların aşırı yoğunluğu ya da dengesiz dağılımı, yapısal zayıflıklara ve erken hasarlara neden olabilir. Bu nedenle, kaplamanın tasarımında faz dağılımının kontrolü, malzemenin performansını optimize etmede temel bir adımdır (Allahyarzadeh ve ark., 2016).

Elementel analiz ise kaplamanın kimyasal bileşimini ortaya koyar. Bu analiz, Ni ve W gibi ana bileşenlerin yanı sıra, kaplama sürecinde ortamdan veya kullanılan elektrolitten kaplamaya katılan diğer elementlerin varlığını da belirler. Elementlerin doğru oranlarda bulunması, kaplamanın mekanik ve kimyasal özelliklerinin beklenen seviyede olmasını sağlar. Kaplamaya dahil olan elementlerin oranı ve türü, faz dağılımını etkilediği gibi, kaplamanın korozyon direnci, sertlik ve aşınma dayanımı gibi özelliklerini de şekillendirir. Elementel analiz sayesinde kaplamanın üretim sürecinde ortaya çıkabilecek kontaminasyonlar ya da istenmeyen elementlerin varlığı

tespit edilerek süreç optimize edilebilir. Bu sayede kaplamanın kalitesi artırılır ve uygulama ömrü uzatılır.

Faz dağılımı ile elementel analiz arasındaki ilişki, malzemenin yapısal bütünlüğünü anlamada önemlidir. Farklı elementlerin belirli oranlarda ve kombinasyonlarda bulunması, kaplamada farklı kristal veya amorf fazların oluşmasını sağlar. Bu da kaplamanın mekanik dayanıklılığı ve kimyasal kararlılığı açısından avantaj sağlar. Akımlı kaplama yöntemiyle üretilen Ni-W kaplamalarda, özellikle volfram oranının faz dağılımını etkilediği bilinmektedir. Volframın artması, amorf faz oranını artırarak kaplamanın sertliğini yükseltirken, aşırı artış ise yapısal sorunlara yol açabilir. Bu dengenin sağlanması, elementel analiz ve faz dağılımının birlikte değerlendirilmesiyle mümkün olur.

Etik bir bakış açısından değerlendirildiğinde, faz dağılımı ve elementel analiz gibi detaylı karakterizasyonlar, malzeme biliminin insan yaşamına sunduğu değerlerin somut göstergesidir. Bu analizler, kaplamaların güvenilirliğini ve uzun ömürlülüğünü artırarak, insanların kullandığı ürünlerin kalitesini yükseltir. Aynı zamanda kaynakların daha etkin kullanılmasına olanak tanır, böylece sürdürülebilir üretim ve çevre dostu teknolojilerin geliştirilmesine katkı sağlar (Tan, 2022). Bu bağlamda, faz dağılımı ve elementel analiz çalışmaları, sadece teknik bir zorunluluk değil, toplumun ihtiyaçlarına duyarlı ve çevre bilinciyle şekillenen bir bilimsel yaklaşımın yansımasıdır. İnsanlık için daha sağlam, dayanıklı ve güvenilir malzemeler üretmek, bu anlayışın en önemli hedeflerinden biridir.

3.4. Ni-W Kaplamaların Mekanik, Aşınma ve Korozyon Direnci

Ni-W kaplamalar, malzeme yüzeyine kazandırdıkları yüksek performans özellikleriyle öne çıkar. Bu alaşımların en dikkat çeken yönlerinden biri, sundukları mekanik mukavemetin oldukça yüksek olmasıdır. Nikelin sünekliği ile volframın sertliğini birleştiren bu kaplamalar hem elastik hem de plastik deformasyona karşı direnç gösterir. Bu özellik, yüzeylerin ağır yükler altında şekil değiştirmeden işlevlerini sürdürebilmesini sağlar. Ayrıca iç yapılarındaki ince taneli ya da amorf fazlar, dislokasyon hareketlerini sınırlandırarak malzemenin sertliğini daha da artırır. Bu sertlik, dış etkenlere karşı koruyucu bir tabaka görevi görerek malzemenin daha uzun süre kullanılmasına olanak tanır.

Aşınma direnci açısından bakıldığında, Ni-W kaplamaların gösterdiği performans, çoğu geleneksel metalik kaplamaların ötesine geçmektedir. Bu kaplamalar, yüzeyle temas eden partikül ya da sürtünmeye neden olan unsurlar karşısında yüksek stabilite sergiler. Tane boyutlarının küçüklüğü ve mikroyapının homojenliği sayesinde, aşınma mekanizmaları yavaşlatılır. Kaplamadaki volfram oranının artışı, bu direnci daha da yükselterek, yüzeyin hasara karşı korunmasına katkı sağlar (Lagarde ve ark., 2018). Bu durum, özellikle mekanik olarak zorlayıcı ortamlarda çalışan parçalar için büyük avantaj sağlar. Aşınmaya karşı sağlanan bu direnç, sadece fiziksel özelliklerin değil, aynı zamanda kimyasal yapının da doğru biçimde kontrol edilmesiyle mümkündür.

Korozyon direnci, Ni-W kaplamaların bir diğer öne çıkan özelliğidir. Bu kaplamalar, özellikle agresif kimyasalların ya da yüksek nemin etkili olduğu ortamlarda yüksek koruyuculuk sunar. Kaplamanın amorf ya da nanokristalin yapıda olması, iç yapıda daha az boşluk ya da difüzyon kanalı bulunmasını sağlar. Bu da koroziv maddelerin yüzey altına ilerlemesini engeller. Ayrıca volframın pasif film oluşumuna katkı sağlaması, korozyon direncini daha da pekiştirir. Bu koruyucu etkiler hem endüstriyel ekipmanların güvenliğini artırmakta hem de bakım aralıklarının uzatılmasına olanak tanımaktadır. Böylece hem ekonomik hem de çevresel açıdan daha sürdürülebilir çözümler elde edilir.

3.5. Ni-W Kompozit Kaplamalarda Takviye Edici Malzemeler

Ni-W alaşımları, yalnız başına yüksek performans sunmakla birlikte, belirli uygulamalar için bu kaplamaların özelliklerinin daha da geliştirilmesi gereklidir. Bu noktada, kompozit kaplama teknolojileri devreye girer. Kompozit kaplamalarda, matris fazı olan Ni-W içerisine mikro ya da nano boyutta takviye edici malzemeler entegre edilerek yapının mekanik, tribolojik ve kimyasal özellikleri önemli ölçüde geliştirilebilir. Bu takviye edici malzemeler, kaplama içinde homojen bir şekilde dağılmak üzere kaplama banyosuna eklenir ve uygun işlem parametreleriyle matris içerisine birlikte çöktürülür. Böylece matris ve takviye arasında güçlü bir bağ oluşur.

Kompozit yapının sunduğu bu sinerji, sertlik, aşınma direnci ve yüksek sıcaklık dayanımı gibi özelliklerin aynı anda iyileştirilmesini sağlar. Ayrıca, bu tür bir yapılandırma ile yüzeyin fonksiyonel çeşitliliği de artırılır. Her bir takviye edici malzeme, belirli bir özelliği ön plana çıkarır (Hu ve ark., 2019). Bu nedenle, istenilen uygulama alanına göre uygun takviye türünün seçilmesi, kompozit kaplamanın

başarısı açısından son derece önemlidir. Ni-W kompozit kaplamalar, bu yönüyle standart kaplama çözümlerine kıyasla çok daha esnek ve uyarlanabilir bir yapı sunar.

Ancak bu uyarlanabilirliğin sağlanabilmesi, yalnızca uygun malzeme seçimiyle değil, aynı zamanda kaplama sürecinin detaylı biçimde kontrol edilmesiyle mümkündür. Kompozit kaplamaların geliştirilmesi, yalnızca teknolojik bir yenilik değil, aynı zamanda malzeme kullanımında verimliliğin artırılmasına ve daha sürdürülebilir yüzey çözümlerinin elde edilmesine katkı sunar. Böylece, ürünlerin kullanım ömrü uzar, enerji ve kaynak tüketimi azalır. Bu yönüyle kompozit kaplamalar, mühendisliğin doğrudan topluma hizmet eden bir yönünü temsil eder. İnsan ihtiyaçlarına duyarlı, çevreyle daha barışık ve dayanıklı malzemelerin üretimi, bu teknolojilerin sunduğu potansiyelle daha mümkün hale gelir (Ozan, 2023).

3.5.1. Seramik partiküller (SiC, TiC, Al₂O₃) ile takviye

Seramik partiküller, Ni-W kompozit kaplamalarda en yaygın kullanılan takviye malzemeleri arasında yer alır. Bu partiküller, kimyasal kararlılıkları, yüksek sertlikleri ve termal dirençleri sayesinde kaplamaların performansını çarpıcı biçimde artırır. SiC, TiC ve Al₂O₃ gibi partiküller, kaplama matrisine entegre edildiklerinde, yüzeyin sertliğini ve aşınma direncini yükseltir. Ayrıca bu seramiklerin varlığı, kaplamanın yapısal bütünlüğünü destekleyerek daha düzgün bir mikroyapı oluşmasını sağlar. Bu yapı, dış ortamın zararlı etkilerine karşı daha etkili bir koruma sunar (Gül, Ergin ve Uysal, 2021).

Her bir seramik partikül tipi, farklı özellikler sunarak kaplamanın belirli yönlerini öne çıkarır. SiC partikülleri, yüksek sertlik ve sürtünme direnci ile ön plana çıkarken, TiC partikülleri yapıya hem mekanik hem de termal dayanım kazandırır. Al₂O₃ ise kimyasal kararlılığıyla öne çıkar ve özellikle korozyon direncinin iyileştirilmesinde etkili olur. Bu partiküller, yalnızca fiziksel bir katkı sunmakla kalmaz, aynı zamanda kaplama süreci sırasında kristal büyümesini etkileyerek mikroyapının incelmelerini ve daha homojen bir yapı oluşmasını sağlar. Böylece, kaplama boyunca daha dengeli bir performans elde edilir.

Seramik partiküllerle takviye edilen kompozit kaplamalar, özellikle yoğun yük altında çalışan sistemler için büyük avantaj sunar. Bu tür sistemlerde aşınma ve deformasyon riski yüksek olduğundan, seramik takviyesi bu etkileri minimize ederek sistemin güvenilirliğini artırır. Aynı zamanda, bu kaplamalar yüksek sıcaklık ve kimyasal

etkileşim ortamlarında da stabilitelerini koruyarak uzun vadeli çözüm sunar. Ancak bu başarı, yalnızca malzeme seçimiyle değil, seramik partiküllerin matris içindeki dağılımının homojenliğiyle de yakından ilgilidir.

Etik açıdan ele alındığında, seramik takviyeli kompozit kaplamalar, mühendislik biliminin doğrudan yaşam kalitesine katkıda bulunduğu örneklerden biridir. Bu kaplamalar, ürünlerin ömrünü uzatarak doğal kaynakların daha etkin kullanımını destekler. Aynı zamanda bakım sürelerini azaltarak enerji ve iş gücü tasarrufu sağlar. Bu da daha sürdürülebilir bir üretim anlayışına katkıda bulunur. Günümüzde teknoloji sadece gelişimi değil, sorumluluğu da beraberinde getirmektedir (Ozan, 2023). Bu bağlamda seramik takviyeli kompozit kaplamalar, çevreye duyarlı ve insan yaşamına değer katan çözümlerin bir parçası olarak dikkat çeker.

3.5.2. Nadir toprak oksitleri (Er_2O_3 , Y_2O_3) ile fonksiyonel geliştirme

Ni-W kompozit kaplamaların işlevselliğini artırmak amacıyla geliştirilen yaklaşımlardan biri, nadir toprak oksitlerinin yapıya entegre edilmesidir. Özellikle Er_2O_3 ve Y_2O_3 gibi oksitler hem mikroyapısal düzenlemeye katkı sağlar hem de kaplamanın fonksiyonel özelliklerini ileri düzeyde iyileştirir. Bu oksitlerin yüksek termal kararlılığa ve kimyasal direnç özelliklerine sahip olmaları, kaplamaların yüksek sıcaklıkta, korozyon ortamlarında ya da mekanik olarak zorlayıcı koşullarda bile performans kaybı yaşamadan işlevini sürdürebilmesini mümkün kılar. Yapıya katıldıklarında, kristal yapı üzerinde etkili olarak tane sınırlarının kontrol altına alınmasını sağlarlar. Bu sayede hem tane boyutu küçülür hem de daha homojen bir yapı elde edilir. Bu yapı, kaplamanın sertlik, aşınma direnci ve termal kararlılık gibi temel özelliklerini güçlendirir (Hu ve ark., 2019).

Nadir toprak oksitlerinin kaplamaya sağladığı katkılardan biri de pasif film oluşumu üzerindeki olumlu etkileridir. Bu oksitler, yüzeyde koruyucu bir bariyer oluşturulmasına yardımcı olarak korozyona karşı etkili bir direnç sağlar. Aynı zamanda, elektrokimyasal stabiliteyi artırarak kaplamanın uzun süreli dayanıklılığını korur. Bu tür oksitlerin yüksek oksijen afinitesi, kaplama yüzeyinde reaksiyonlara karşı bir tampon bölge görevi görmesini mümkün kılar. Bu da yüzeyde gerçekleşebilecek bozulmaların önüne geçerek yapısal bütünlüğü artırır. Bununla birlikte, bu oksitlerin homojen şekilde dağılması ve matris ile güçlü bir ara yüz oluşturması, fonksiyonel gelişmenin sürdürülebilir olabilmesi için elzemdir. Bu

yüzden, üretim sürecinde oksitlerin dağılma karakteristikleri dikkatle takip edilmeli ve işlem parametreleri buna göre optimize edilmelidir.

Y_2O_3 ve Er_2O_3 gibi oksitlerin kullanımı, yalnızca fiziksel dayanıklılığı değil, aynı zamanda optik, elektriksel ve manyetik gibi bazı özgül alanlarda da işlevsellik kazandırabilir. Böylece kompozit kaplamalar sadece koruyucu değil, aynı zamanda çok yönlü bir mühendislik çözümüne dönüşür. Bu yaklaşım, malzeme teknolojisinin günümüzde ulaştığı noktanın bir göstergesi olarak, daha akıllı, daha verimli ve çok amaçlı yüzeyler geliştirilmesine katkı sağlar. Nadir toprak elementlerinin entegre edilmesiyle elde edilen fonksiyonel yapı, ürünlerin kullanım ömrünü artırırken aynı zamanda bakım aralıklarını azaltır, bu da endüstriyel sistemlerin sürdürülebilirliğini doğrudan destekler.

İnsani bir bakış açısıyla değerlendirildiğinde, nadir toprak oksitleri ile geliştirilen Ni-W kompozit kaplamalar, sadece teknik anlamda değil, toplumsal fayda açısından da önemli katkılar sunar. Daha uzun ömürlü ve güvenilir yüzey çözümleri sayesinde üretim süreçlerinde kaynak israfı azalır, enerji tüketimi düşer ve çevresel etki minimize edilir (Paşaoğlu, 2011). Böylece teknoloji, yalnızca sanayiye değil, insanlığa hizmet eden bir araç haline gelir. Bu anlayış, malzeme mühendisliğini sürdürülebilir bir gelecek kurma çabasının ayrılmaz bir parçası haline getirir.

3.5.3. Karbon fiber ve grafen oksit ile mekanik dayanım artırımı

Ni-W kompozit kaplamalarda son yıllarda dikkat çeken gelişmelerden biri de karbon bazlı malzemelerin, özellikle karbon fiber ve grafen oksit gibi yapısal takviyelerin entegre edilmesidir. Bu tür karbon katkıları, olağanüstü mekanik özellikleri ve yüksek özgül mukavemetleri sayesinde kaplamanın genel dayanımını önemli ölçüde artırır. Karbon fiberler, yüksek çekme mukavemetleri ve düşük yoğunluklarıyla bilinirken, grafen oksit ise iki boyutlu yapısıyla geniş yüzey alanı ve olağanüstü elektriksel iletkenliği ile kaplamanın fonksiyonelliğini pekiştirir. Bu iki malzeme bir arada ya da ayrı ayrı kullanıldığında, kaplamanın hem statik hem de dinamik yükler altında gösterdiği performans dikkate değer biçimde gelişir.

Mikroyapı içerisine entegre edilen karbon fiberler, kaplamanın içinde bir iskelet etkisi oluşturarak dış kuvvetlerin daha geniş bir alana yayılmasını sağlar. Bu dağılım, lokal gerilimlerin önüne geçerek çatlak oluşumunu sınırlar ve mikroyapısal bütünlüğü korur. Grafen oksit ise atomik düzeyde yapıya entegre olduğunda, matris ile yüksek

bağlanma enerjisine sahip olduğu için yük aktarımı daha etkili hale gelir. Bu özellik, özellikle sürtünme ve darbe gibi zorlayıcı koşullarda kaplamanın elastik ve plastik deformasyona karşı daha dirençli hale gelmesini sağlar. Bu sayede hem yüzey koruması artar hem de yapısal stabilite uzun süre muhafaza edilir (Ghaferi, ve ark., 2010).

Karbon bazlı katkıların bir diğer avantajı da kaplamanın sadece mekanik değil, termal ve elektriksel performansını da olumlu yönde etkilemesidir. Karbon fiber ve grafen oksit, ısı iletimini artırarak sıcaklık kaynaklı yapısal bozulmaları minimize eder. Aynı zamanda, elektriksel iletkenliği iyileştirerek kaplamanın elektromanyetik özelliklerini optimize eder. Bu durum, sadece yüzey dayanıklılığı değil, aynı zamanda yeni nesil teknolojilere uyumlu fonksiyonel yüzeylerin geliştirilmesine olanak tanır.

Ancak bu katkıların yapıya dengeli ve homojen biçimde dağıtılması gerekir; aksi takdirde mikroyapısal çatlaklar, boşluklar veya zayıf bağlanmalar oluşabilir. Bu nedenle karbon bazlı takviyelerin kaplama sürecine uygun hale getirilmesi, dikkatle yürütülmesi gereken bir mühendislik çalışmasıdır. Toplumsal fayda açısından ele alındığında, karbon fiber ve grafen oksit gibi ileri teknoloji malzemelerin Ni-W kompozit kaplamalara entegre edilmesi, modern mühendisliğin insanlık yararına sunduğu en verimli çözümlerden biri olarak değerlendirilebilir. Daha sağlam, daha hafif ve daha dayanıklı yüzeylerin geliştirilmesi, sadece endüstriyel sistemlerde değil, sağlık, ulaşım, enerji ve savunma gibi alanlarda da güvenlik, verimlilik ve dayanıklılığı artırmaktadır (Dilek, 2021). Böylece, malzeme teknolojisi insan yaşamının her alanında daha güvenli, ekonomik ve sürdürülebilir çözümler sunarak, geleceğe dair umutları pekiştiren bir araç haline gelmektedir. Bu bağlamda karbon bazlı katkılar, yalnızca birer malzeme değil, insanın teknoloji ile kurduğu sağlıklı ve sürdürülebilir ilişkisinin temsilcileridir.

3.5.4. Takviye edici malzemelerin mikroyapıya etkisi

Takviye edici malzemelerin Ni-W kompozit kaplamalara entegre edilmesi, yalnızca yüzey özelliklerinin makro düzeyde değişmesine değil, aynı zamanda mikroyapısal düzenin de dönüşmesine neden olur. Mikroyapı, kaplamanın genel davranışını belirleyen en temel yapısal öğelerden biri olduğundan, içine dahil edilen her bir parçacık veya katkı malzemesi, tanelerin büyüklüğünden faz dağılımına, tane sınırı yoğunluğundan boşlukların varlığına kadar birçok parametre üzerinde doğrudan etkilidir. Bu etki, kullanılan takviye edici malzemenin türüne, boyutuna, yüzey

özelliklerine ve kaplama sürecindeki parametrelere bağlı olarak değişkenlik gösterir. Özellikle mikro ya da nano boyutta dağıtılan katkılar, kristal büyümesini sınırlandırarak daha ince taneli, homojen bir yapı oluşmasını sağlar. Bu durum hem sertlik artışına hem de çatlak oluşumunun engellenmesine katkı sunar (Ünal, Yaşar ve Karahan, 2020).

Takviye edici malzemelerin mikroyapıya olan etkisi sadece yapının düzenliliğiyle sınırlı kalmaz, aynı zamanda iç gerilim dağılımını da etkiler. Kompozit matrisin içerisinde düzgün dağılmış partiküller, gerilim birikimini engelleyerek ani kırılmaların veya deformasyonların önüne geçer. Özellikle heterojen dağılım gösteren ya da büyük partiküller içeren yapılarda ise, bu tür gerilim yığılmaları daha belirgin hale gelir ve yapısal bütünlüğü zayıflatır. Bu bağlamda, takviye edici malzemelerin dağılım özellikleri ve matris ile olan ara yüz bağlanma durumu, mikroyapının kalitesi üzerinde belirleyici olur. İyi bağlanmış ve homojen dağılmış katkılar, taneler arası geçişleri yumuşatarak yapının bütünsel dayanımını artırırken, zayıf bağlanmış katkılar yapısal boşluklar ve gözenekler yaratma riski taşır.

Ayrıca bazı takviye edici malzemeler, kaplama sırasında faz dönüşümlerini etkileyerek mikroyapının amorf, nanokristalin ya da kristalin yapı kazanmasına da neden olabilir. Bu dönüşüm, kaplamanın işlevselliğini belirleyen faktörlerin başında gelir. Kristalin yapı, yüksek sıcaklık dayanımı sağlar; nanokristalin yapı ise mekanik dayanımı artırır, amorf yapılar ise korozyona karşı üstün performans gösterir (Kumar, Kennady ve Zhou, 2015). Dolayısıyla takviye edici malzeme seçiminde yalnızca fiziksel sertlik değil, hedeflenen mikroyapı karakteri de dikkate alınmalıdır.

Kaplama sürecinde katkı malzemesinin matris ile etkileşimi ve kristalizasyon üzerindeki etkisi doğru biçimde yönetildiğinde, çok yönlü ve yüksek performanslı kaplamaların elde edilmesi mümkün hale gelir. İnsani boyutuyla değerlendirildiğinde, takviye edici malzemelerin mikroyapıya olan etkileri, sadece mühendislik sistemlerinin iyileştirilmesiyle sınırlı kalmaz; aynı zamanda daha güvenilir, uzun ömürlü ve ekonomik çözümler geliştirilmesine de zemin hazırlar. Ürünlerin kullanım süresini artırmak, bakım ihtiyacını azaltmak ve kaynak tüketimini minimize etmek gibi amaçlar, sadece endüstriyel verimlilik değil, toplumsal ve çevresel faydayı da beraberinde getirir. Bu bağlamda mikroyapının kontrolü, insan yaşamına doğrudan dokunan bir mühendislik başarısının temelini oluşturur.

3.5.5. Kompozit kaplamaların korozyon ve aşınma performansı

Kompozit kaplamaların sunduğu avantajların başında, korozyon ve aşınmaya karşı gösterdikleri yüksek direnç gelir. Bu direnç hem matris yapının kimyasal kararlılığı hem de entegre edilen takviye malzemelerinin yüzey koruyucu etkileriyle doğrudan ilişkilidir. Ni-W esaslı kaplamalar, kendi başlarına yüksek performans sergilerken, içerisine eklenen mikro ya da nano boyuttaki katkılarla bu performans çok daha ileri seviyelere taşınabilir. Bu tür kaplamalarda oluşan mikroyapısal bütünlük, çevresel etkenlere karşı daha sıkı bir bariyer görevi görerek korozyon sürecini yavaşlatır. Aynı zamanda partiküllerin oluşturduğu fiziksel engeller, agresif iyonların alt yüzeye ulaşmasını engelleyerek yüzeyin uzun süre korunmasını sağlar.

Korozyon direnci üzerinde özellikle amorf ya da nanokristalin yapının katkısı büyük olur. Bu yapılar, geleneksel kristalin yapılar gibi düzenli boşluklara ve kolay difüzyon yollarına sahip olmadığından, kaplama boyunca iyon geçişi sınırlanır. Böylece kimyasal bozunma hızı düşer ve kaplamanın korunma süresi uzar. Buna ek olarak, kullanılan takviye malzemeleri pasif film oluşumuna katkı sağlayarak yüzeyde bir tür kimyasal kalkan görevi görür. Bu durum, özellikle yüksek nem, asidik ortamlar ya da tuzlu su gibi korozyon koşullarında belirgin hale gelir. Uygun oranda ve iyi dağılmış katkıları, kaplamanın homojenliğini artırarak korozyon hücrelerinin oluşumunu engeller. Ancak burada da katkı malzemesinin türü, boyutu ve dağılımı hayati öneme sahiptir; aksi durumda homojen olmayan yapılar, galvanik hücrelerin oluşumuna zemin hazırlayabilir (Yari ve Dehghanian, 2013).

Aşınma performansı açısından değerlendirildiğinde, kompozit kaplamalar çok yüksek düzeyde koruma sunar. Takviye edici malzemelerin sertliği, kaplama yüzeyinde meydana gelen mekanik yüklenmelere karşı bir bariyer oluşturur. Bu sayede, yüzeydeki deformasyonlar, çizilmeler ve mikroskobik kopmalar minimize edilir. Ayrıca bu katkıları, sürtünme katsayısını düşürerek temas halindeki yüzeylerde ısı üretimini azaltır ve bu da aşınmanın hızını yavaşlatır. Kaplama yüzeyinin düzgünlüğü ve sertliği, sürtünme sırasında oluşan yıpranma etkilerini dengeleyerek malzemenin daha uzun süre kullanılmasını mümkün kılar. Bu süreçte, matris ile takviye edici malzeme arasında sağlanan mekanik bağ, enerjinin yüzey boyunca dağılmasını kolaylaştırır ve bu da deformasyonun lokalize olmasını engeller. Bu tür kaplamalar, yüksek aşınma ve korozyon riski taşıyan ortamlarda çalışacak parçalar için ideal çözümler sunar. Özellikle endüstriyel üretim, enerji ve ulaşım sektörlerinde, bu

özelliklerin birleşimi sayesinde sistemlerin çalışma süresi artar, bakım aralıkları uzar ve işletme maliyetleri düşer (Kabi, Raeissi ve Saatchi, 2009). Böylece, sadece ekonomik değil, aynı zamanda çevresel açıdan da büyük kazançlar elde edilir. Daha az arıza, daha düşük malzeme tüketimi ve daha az atık oluşumu, mühendisliğin çevreyle uyumlu hale gelmesini sağlar.

Sürdürülebilirlik ve toplumsal fayda perspektifle değerlendirildiğinde, kompozit kaplamaların korozyon ve aşınma direnci sayesinde daha güvenilir ve uzun ömürlü ürünlerin geliştirilmesi, yaşam kalitesinin yükselmesine de katkı sunar. Gerek bireysel kullanım alanlarında gerekse kamuya açık altyapılarda bu tür dayanıklı yüzeyler, güvenlikten sürdürülebilirliğe kadar pek çok avantaj sağlar. Kaplamaların koruyucu özelliği sayesinde ürünlerin işlevselliği daha uzun süre devam eder, kaynak tüketimi azalır ve teknolojik sistemlerin çevreye olan etkisi minimize edilir. Bu bağlamda, kompozit kaplama teknolojileri yalnızca teknik bir çözüm değil, aynı zamanda insan odaklı, çevreye duyarlı bir mühendislik yaklaşımının somut bir yansımasıdır.

3.5.6. Kaplamaların karakterizasyonu ve performans analizi

Ni-W kompozit kaplamaların geliştirilmesinde yalnızca üretim süreci değil, bu sürecin ardından gerçekleştirilen karakterizasyon çalışmaları da hayati önem taşımaktadır. Karakterizasyon; kaplamanın mikroyapısal, mekanik, kimyasal ve yüzeysel özelliklerinin ayrıntılı biçimde incelenmesini sağlayarak, kaplamanın işlevsel performansının anlaşılması, üretim parametrelerinin optimize edilmesi ve uzun vadeli dayanımının öngörülmesi açısından belirleyici rol oynar.

Mikroyapı karakterizasyonu, taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışını difraksiyonu (XRD) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) gibi tekniklerle gerçekleştirilerek, tane yapısı, faz bileşimi ve elementel dağılım hakkında kapsamlı bilgiler sunar. Bu bilgiler, takviye fazlarının matris içinde nasıl dağıldığını, arayüzey bağlanma kalitesini ve fazların homojenliğini değerlendirmeye olanak tanır. Böylece, takviye malzemelerinin kaplama mikroyapısına entegrasyonu ve dağılım karakteri nicel olarak analiz edilebilir.

Performans analizleri, kaplamanın gerçek çalışma koşullarındaki davranışını değerlendirmede kritik öneme sahiptir. Mikrosertlik ölçümleri, yüzey pürüzlülüğü analizleri, aşınma testleri ve korozyon deneyleri, kaplamanın mekanik dayanımı ve çevresel stabilitesi hakkında doğrudan bilgi sağlar. Bu testlerden elde edilen bulgular,

kaplamanın hangi koşullarda daha uzun ömürlü olabileceğini ve hangi çevresel etkenlere karşı daha dirençli olduğunu belirlemede yol göstericidir (Paşaoğlu, 2013). Ayrıca, farklı takviye malzemelerinin performansa etkisini karşılaştırarak optimum kompozisyonun belirlenmesine de katkı sunar.

Akımlı kaplama sürecinde akım yoğunluğu, voltaj, sıcaklık ve banyo bileşimi gibi parametrelerin etkisi, karakterizasyon ve performans analizlerinden elde edilen verilerle bütüncül olarak değerlendirilir. Böylece sürecin verimliliği artırılabilir ve hedeflenen özelliklere sahip kaplamalar tasarlanabilir.

Sonuç olarak, karakterizasyon ve analiz süreçlerinde elde edilen her veri yalnızca teknik bir sonuç değil, aynı zamanda daha güvenli, daha dayanıklı ve sürdürülebilir yüzey teknolojilerinin geliştirilmesi açısından da stratejik bir değere sahiptir. Bu nedenle kaplama teknolojilerinde yürütülen karakterizasyon çalışmaları, yalnızca laboratuvar ölçeğinde bir araştırma etkinliği değil; aynı zamanda mühendisliğin toplumsal sorumluluk boyutunu temsil eden, yaşam kalitesini yükseltmeyi amaçlayan bir bilimsel süreçtir.

3.6. Uygulama Alanları ve Endüstriyel Potansiyel

Ni–W kompozit kaplamaların sunduğu çok yönlü mekanik ve kimyasal özellikler, bu malzemeleri geniş bir endüstriyel yelpazede uygulanabilir kılmaktadır. Bu teknolojilerin temel avantajı; yüksek mekanik dayanım, düşük yoğunluk, termal kararlılık ve üstün korozyon direncini bir araya getirebilme yeteneğidir. Bu sayede Ni–W esaslı kaplamalar, enerji, savunma, ulaşım, elektronik, imalat ve tıp gibi birçok sektörde yenilikçi yüzey çözümleri sunma potansiyeline sahiptir. Özellikle mekanik aşınma ve kimyasal bozunma etkilerinin yoğun olduğu sistemlerde, bu kaplamalar uzun ömürlü, düşük bakım gerektiren ve yüksek verimlilik sağlayan yüzeyler oluşturur (Yıldız, 2012).

Endüstriyel ölçekte bu potansiyelin değerlendirilebilmesi, yalnızca teknik bilgi birikimiyle değil, aynı zamanda stratejik planlama ve sürdürülebilir üretim yaklaşımlarıyla da mümkündür. Ni–W kompozit kaplamalar, çevre dostu yöntemler ile üretilebilmekte; böylece enerji tüketimi azaltılarak ekolojik ayak izi minimuma indirilmektedir. Ayrıca zararlı kimyasalların kullanımının sınırlandırılması ve geri dönüştürülebilir hammaddelerin tercih edilmesi, bu teknolojileri çevresel açıdan daha cazip hale getirmektedir. Bu özellikler, günümüz endüstrilerinin hem rekabet gücünü

artırmakta hem de yeşil üretim ve toplumsal sorumluluk ilkeleriyle uyumlu politikalar geliştirmesine katkı sağlamaktadır.

Ni–W kompozit kaplamaların endüstriyel potansiyelini artıran bir diğer önemli unsur, ölçeklendirilebilir üretim süreçlerine elverişli olmalarıdır. Laboratuvar ölçeğinde geliştirilen bir kaplama prototipi, uygun mühendislik optimizasyonu ve proses kontrolü ile endüstriyel üretim hatlarına taşınabilmektedir (Paşaoğlu, 2013). Bu süreçte karakterizasyon ve performans analizlerinden elde edilen veriler, üretimin tekrarlanabilirliğini, kalite güvencesini ve standartlaştırılabilirliğini sağlar. Böylece Ar-Ge çıktıları doğrudan uygulamaya dönüştürülür ve mühendislik bilgi birikimi toplumsal faydaya yönelik somut çözümler haline gelir.

Toplumsal perspektiften bakıldığında, Ni–W kompozit kaplamaların uygulama alanlarının çeşitliliği, bu malzemelerin günlük yaşam üzerindeki etkisini de belirgin kılar. Sağlık hizmetlerinden ulaşım güvenliğine, enerji verimliliğinden çevre korumasına kadar geniş bir yelpazede çözüm sunan bu kaplamalar, mühendisliğin insan refahı ile olan bağıını güçlendirmekte ve bilimsel bilginin yalnızca kuramsal düzeyde kalmayıp yaşamın her alanına dokunan bir değere dönüşmesini sağlamaktadır.

3.6.1. Otomotiv ve havacılık sektöründe kullanım alanları

Ni–W kompozit kaplamaların otomotiv ve havacılık sektörlerinde öne çıkmasının temel nedeni, bu alanlarda yüksek performans ve uzun ömür gerektiren zorlu çalışma koşullarının varlığıdır. Her iki sektörde de yapısal malzemeler, yüksek mekanik yüklerin yanı sıra aşırı sıcaklık, sürtünme ve korozyon gibi agresif çevresel etkilere maruz kalır. Ni–W esaslı kompozit kaplamalar, bu koşullar altında stabil mikroyapıları, düşük aşınma oranları ve yüksek kimyasal dayanımları sayesinde önemli avantajlar sağlar. Özellikle motor bileşenleri, türbin yüzeyleri, fren diskleri ve iniş takımı parçaları gibi kritik bölgelerde kullanıldığında, yalnızca performansı değil, yapısal bütünlüğü ve güvenliği de artırır.

Otomotiv sektöründe, yakıt tüketimini azaltma ve karbon salımını düşürme hedefleri doğrultusunda, hafif ancak yüksek dayanımlı malzeme çözümlerine olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Ni–W kompozit kaplamalar, bu gereksinime yanıt vererek parça ömrünü uzatmakta, bakım sıklığını azaltmakta ve sistem verimliliğini artırmaktadır (Ghaferi ve ark., 2010). Böylece hem üreticiler hem kullanıcılar açısından ekonomik

ve çevresel fayda sağlanmaktadır. Kaplamaların sunduğu yüksek yüzey kalitesi, sürtünme kaynaklı enerji kayıplarını da minimize ederek sürdürülebilir taşımacılığın temel bileşenlerinden biri haline gelir.

Havacılık sektöründe ise, kullanılan her malzemenin güvenlik, ağırlık optimizasyonu ve termal kararlılık gibi çok katmanlı performans kriterlerini karşılaması zorunludur. Uçuş sırasında meydana gelen sıcaklık dalgalanmaları, yüksek hız kaynaklı sürtünme ve korozyon atmosfer koşulları, malzemelerin üstün dayanıklılığa sahip olmasını gerektirir. Ni-W kompozit kaplamalar, bu gereksinimleri karşılayarak uçak motorlarında, türbin kanatlarında ve gövde bağlantı elemanlarında etkin koruma tabakaları oluşturur. Hafif yapıyı korurken mekanik dayanımı artırmaları, enerji verimliliğine ve operasyonel güvenliğe doğrudan katkı sağlar.

Bu sektörlerde kullanılan kaplamalar yalnızca işlevsel değil aynı zamanda stratejik öneme sahiptir. Geliştirilen her yeni kaplama, ulusal ve uluslararası rekabet gücünü artırma potansiyeli taşır. Ayrıca bu teknolojilerin yerli üretimi, mühendislik altyapısının güçlenmesine ve teknolojik bağımsızlığın desteklenmesine katkı sağlar (Kabi, Raeissi & Saatchi, 2009). Dolayısıyla, Ni-W kompozit kaplamaların otomotiv ve havacılık sektörlerindeki kullanımı sadece teknik bir gereklilik değil; aynı zamanda insan güvenliğini artıran, çevresel etkileri azaltan ve sürdürülebilir mühendislik vizyonunu somutlaştıran bir ilerlemedir. Bu vizyon, bilimsel bilgi ile toplumsal faydayı bütünleştirerek geleceğin daha güvenli, temiz ve verimli endüstriyel çözümlerinin temelini oluşturmaktadır.

3.6.2. Enerji ve petrokimya endüstrisinde korozyon koruma

Enerji ve petrokimya endüstrileri, zorlu çevresel ve kimyasal koşulların bir arada bulunduğu çalışma alanları olarak, üstün korozyon ve oksidasyon direncine sahip malzeme çözümlerine ihtiyaç duymaktadır. Özellikle asidik, bazik veya yüksek tuzluluk içeren ortamlar, metal yüzeylerde kimyasal bozunma, oksitlenme ve elektrokimyasal reaksiyonlar yoluyla ciddi malzeme kayıplarına neden olur ve sistem bütünlüğünü tehlikeye atar. Bu bağlamda Ni-W kompozit kaplamalar, sundukları yüksek korozyon direnci ve mikroyapısal stabiliteleri sayesinde enerji ve petrokimya sistemleri için etkili bir koruyucu bariyer görevi görmektedir. Bu kaplamalar, kimyasal etkileşimlere karşı dirençleriyle ekipman ömrünü uzatmakta ve proses güvenilirliğini artırmaktadır (Yıldız, 2012).

Ni–W esaslı kaplamaların üstün korozyon direnci; homojen tane yapısı, düşük gözeneklilik oranı ve pasif film oluşturma kapasitesi gibi özelliklerinden kaynaklanır. Takviye fazlarıyla güçlendirilen bu kaplamalar, asidik ve oksitleyici ortamlarda kimyasal saldırılara karşı daha dirençli hale gelir. Yüzeyde oluşabilecek çatlak, mikro boşluk veya pürüz gibi kusurların önlenmesi, korozyonun ilerlemesini sınırlandırarak kaplamanın uzun ömürlülüğünü sağlar. Özellikle tungsten elementi, yüksek oksidasyon sıcaklıklarına ve agresif kimyasallara karşı gösterdiği direnç sayesinde; hidrokarbon işleme sistemleri, boru hatları, basınçlı reaktörler ve ısı değiştiricilerinde bu kaplamaların tercih edilmesini sağlamaktadır.

Enerji santrallerinde, özellikle yenilenebilir enerji sistemlerinde (jeotermal, rüzgâr ve hidroelektrik gibi), Ni–W kompozit kaplamaların yüzey stabilitesi ve çevresel dayanıklılığı, işletme sürekliliği ve bakım maliyetleri açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Bu kaplamaların performansı yalnızca mekanik ve kimyasal dayanım ile sınırlı değildir; aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlama potansiyeli de taşımaktadır. Uzun ömürlü kaplamalar sayesinde daha az bakım, daha az parça değişimi ve dolayısıyla daha düşük kaynak tüketimi mümkün olur; bu da endüstriyel atıkların azaltılması ve karbon ayak izinin düşürülmesi anlamına gelir (Ünal, Yaşar ve Karahan, 2020).

Sonuç olarak, Ni–W kompozit kaplamalar yalnızca teknik dayanıklılık açısından değil, aynı zamanda çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından da kritik bir role sahiptir. İnsanı ve çevreyi merkeze alan bu mühendislik yaklaşımı, kaplama teknolojilerini endüstriyel verimlilikten toplumsal sorumluluğa uzanan bütüncül bir perspektife taşımakta; böylece bilimsel bilginin ekolojik farkındalıkla birleştiği yeni nesil yüzey çözümlerinin temelini oluşturmaktadır.

3.7. Sert Krom Kaplamalara Alternatif Olarak Ni-W Kaplamalar

Endüstriyel yüzey mühendisliği alanında uzun yıllar boyunca sert krom kaplamalar, yüksek aşınma direnci, yüzey sertliği ve korozyon dayanımı gibi üstün özellikleri nedeniyle yaygın biçimde tercih edilmiştir. Ancak sert krom kaplama süreçlerinde kullanılan altı değerlikli krom (Cr^{6+}) bileşikler, insan sağlığı ve çevre açısından ciddi toksik etkiler taşımaktadır. Bu durum, geleneksel sert krom kaplamaların yerini daha güvenli, sürdürülebilir ve çevre dostu alternatiflerin alması yönündeki arayışları hızlandırmıştır. Özellikle Avrupa Birliği'nin REACH yönetmeliği ve benzeri

uluslararası düzenlemeler, Cr^{6+} bileşiklerinin kullanımını sınırlandırarak üreticileri alternatif kaplama teknolojileri geliştirmeye yönlendirmiştir. Bu bağlamda Ni–W (nikel–tungsten) kaplamalar hem teknik performans hem de çevresel uygunluk açısından sert krom kaplamaların en güçlü adaylarından biri olarak öne çıkmaktadır (Paşaoğlu, 2011; Dilek, 2021).

Ni–W kaplamalar, sahip oldukları yüksek mikroyapısal sertlik, aşınma direnci ve korozyon dayanımı sayesinde sert krom kaplamalara benzer, hatta birçok durumda daha üstün performans sergilemektedir. Akımlı yöntemle üretilmeleri, üretim süreçlerinin daha kontrollü, ekonomik ve çevreye duyarlı bir şekilde yürütülmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca Ni–W kaplamaların yüzey düzgünlüğü, homojen mikroyapısı ve düşük gözeneklilik oranı, yüksek hassasiyet gerektiren mühendislik uygulamalarında aranan performans kriterlerini başarıyla karşılamaktadır. Sert krom kaplamalarda sıkça görülen çatlak oluşumu, yüzey kusurları ve uzun süreli performans kaybı gibi dezavantajlar, Ni–W sistemlerinde minimum düzeyde gözlenmektedir. Ayrıca, ısıya ve agresif kimyasallara karşı gösterdikleri yüksek direnç, bu kaplamaları ağır hizmet koşullarında dahi güvenilir kılmaktadır. (Sriraman, Raman ve Seshadri, 2007).

Ni–W kaplamaların çevresel açıdan sunduğu avantajlar, teknik özellikleri kadar değerlidir. Elektrokimyasal çözeltilerinde kullanılan bileşenlerin daha az toksik ve geri dönüştürülebilir olması, üretim sürecinde açığa çıkan zararlı atık miktarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Böylece iş güvenliği artırılırken, çalışanların kimyasal buharlara maruz kalma riski de ortadan kalkar. Bu durum hem işletme maliyetlerini düşürür hem de çevresel sorumlulukların yerine getirilmesini kolaylaştırır. Sert krom kaplamaların yasaklanmasına yönelik küresel mevzuatların artmasıyla birlikte, Ni–W kaplamalar gelecekte yalnızca alternatif bir yöntem değil, aynı zamanda zorunlu bir endüstriyel standart haline gelme potansiyeline sahiptir (Ozan, 2023).

Sanayi açısından bakıldığında, Ni–W kaplamaların üretim süreçlerine entegre edilmesi yalnızca çevresel bir zorunluluk değil, aynı zamanda stratejik bir yatırım olarak da görülmektedir. Sert krom kaplamaların kademeli olarak yasaklanması veya sınırlandırılması durumunda, bu dönüşüme hazır altyapıya sahip işletmeler rekabet avantajı elde edecektir. Dolayısıyla Ni–W kaplamalar, geleceğin endüstriyel üretim anlayışı içinde yalnızca geçici bir çözüm değil; uzun vadeli, kalıcı ve sürdürülebilir bir dönüşümün temel bileşeni olarak değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak, Ni–W kaplamaların geliştirilmesi ve sanayiye entegrasyonu, sadece mühendislik performansı açısından değil, aynı zamanda etik, çevresel ve toplumsal sorumluluk açısından da kritik bir öneme sahiptir. Teknolojinin insan yaşamını doğrudan etkilediği günümüz dünyasında, geliştirilen her malzeme çözümünün teknik başarımının yanı sıra sürdürülebilirlik boyutuyla da değerlendirilmesi kaçınılmazdır. Bu perspektiften bakıldığında Ni–W kaplamalar, yalnızca krom bazlı tehlikeli kaplamaların yerini alan bir alternatif değil; aynı zamanda daha sağlıklı, daha güvenli ve çevreyle uyumlu bir geleceğin mühendislik öncüsü olarak değerlendirilmektedir. Bu kaplamalar, teknolojik ilerleme ile yaşam kalitesi arasındaki dengeyi daha insancıl ve sürdürülebilir bir eksende kuran yeni nesil bir yüzey mühendisliği yaklaşımını temsil etmektedir.



4. ÇOK KATMANLI KAPLAMA TEKNOLOJİLERİ

4.1. Çok Katmanlı Kaplama Teknolojisinin Temelleri ve Evrimi

Malzeme bilimi ve yüzey mühendisliği alanındaki gelişmeler, yalnızca yeni alaşımların keşfiyle sınırlı kalmamış; aynı zamanda bu malzemelerin performansını optimize edebilmek amacıyla kaplama teknolojilerinde de köklü bir dönüşüm yaşanmasına yol açmıştır. Bu dönüşüm sürecinde çok katmanlı kaplama sistemleri hem teorik hem de uygulamalı düzeyde dikkat çekici bir evrim geçirmiştir. Tek katmanlı kaplamaların sınırlı fiziksel ve kimyasal özellikleri, zamanla çok katmanlı yapılar ile geliştirilmiş; farklı işlevlere sahip tabakaların ardışık biçimde bir araya getirilmesiyle daha yüksek dayanım, kararlılık ve fonksiyonellik elde edilmiştir. Bu yaklaşımın temelinde, yalnızca yüzeyin değil, yüzeye yakın bölgelerin de korunmasını hedefleyen hiyerarşik bir yapılandırma fikri yer alır (Kıyak, 2008).

Çok katmanlı kaplama teknolojilerinin özü, farklı işlevsel özelliklere sahip tabakaların ardışık biçimde birleştirilmesi ve her bir katmanın belirli bir görev üstlenmesine dayanır. Bazı katmanlar yüksek mekanik dayanım, bazıları korozyon direnci sağlarken, bazıları da bağlayıcı veya geçiş tabakası olarak işlev görür. Bu sayede nihai kaplama yalnızca tek bir özelliği iyileştirmez; birden fazla özelliği aynı anda optimize ederek dengeli bir performans sergiler. Ancak bu başarının sürdürülebilmesi için, tabakalar arası geçişlerin kontrollü yapılması, termal genleşme katsayılarının uyumlu hâle getirilmesi ve mikroyapısal sürekliliğin korunması kritik öneme sahiptir. Bu düzeyde kontrolün sağlanabilmesi için, elektrokimyasal (akımlı ve akımsız kaplamalar), fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) gibi yüksek hassasiyetli yöntemler sıklıkla tercih edilmektedir.

Çok katmanlı kaplama teknolojilerinin evrimi, özellikle nanoteknolojinin gelişimiyle önemli bir ivme kazanmıştır. Nano skala düzeyinde tasarlanan tabakalar, yalnızca kalınlık açısından değil, fonksiyonellik ve arayüz mühendisliği açısından da oldukça rafine yapılar sunar (Ünal, Yaşar ve Karahan, 2020). Katman kalınlıkları birkaç nanometre düzeyine indirilebilirken, her bir tabakanın bileşimi, kristal yapısı ve arayüz özellikleri atomik ölçekte kontrol edilebilir hâle gelmiştir. Bu sayede kaplamalar,

yalnızca makro ölçekte değil, mikro ve nano ölçekte de olağanüstü performans gösterebilmektedir. Çok katmanlı yapılar, termal kararlılık, aşınma direnci, yapışma gücü ve kimyasal dayanıklılık gibi özelliklerde tek katmanlı sistemlere kıyasla belirgin iyileşmeler sunar. Bu teknolojinin gelişimi, başlangıçta savunma ve uzay endüstrisi gibi yüksek teknoloji alanlarında ortaya çıkmış olsa da günümüzde otomotiv, enerji, sağlık ve elektronik sektörlerinde de etkili çözümler üretir hâle gelmiştir (Çakar, 2010).

Çok katmanlı kaplama sistemlerinin gelişimi, mühendisliğin yalnızca teknik değil aynı zamanda stratejik ve sürdürülebilir çözümler üretme kapasitesinin bir göstergesidir. Yüksek maliyetli parçaların ömrünün uzatılması, bakım sürelerinin azaltılması, malzeme kaybının önlenmesi ve iş güvenliğinin artırılması gibi hedefler doğrultusunda bu sistemler büyük avantaj sağlar. Dahası, geri dönüştürülebilirlik, enerji verimliliği ve çevresel uyumluluk gibi çağdaş gereksinimler açısından da önemli katkılar sunar. Çok katmanlı kaplamalar, sürdürülebilir üretim teknikleriyle elde edildiğinde, yalnızca endüstriyel değil; çevresel ve toplumsal değer de yaratır. Bu nedenle, çok katmanlı kaplama teknolojilerinin evrimini yalnızca teknik bir ilerleme olarak değil, yaşamla doğrudan ilişkili bir dönüşüm süreci olarak değerlendirmek gerekir.

Her yeni katman, yalnızca teknik bir işlevi yerine getirmekle kalmaz; aynı zamanda kullanıcıya daha güvenli sistemler, çevreye daha az zarar veren üretim süreçleri ve mühendislik etiğine daha uygun uygulamalar sunar (Bülbül, 2014). Bu bağlamda, çok katmanlı kaplama teknolojileri yalnızca metal yüzeyleri değil; yaşadığımız dünyayı daha dayanıklı, sürdürülebilir ve insancıl hâle getirme yönünde önemli bir katkı sağlar. Bu çok boyutlu yaklaşım, mühendisliğin geleceğinde yön belirleyici temel paradigmlar arasında yer almaktadır.

4.1.1. Çok katmanlı kaplama kavramı

Çok katmanlı kaplama kavramı, malzeme yüzeylerinin performansını artırmak amacıyla geliştirilen, birden fazla ve işlevsel açıdan farklı özelliklere sahip tabakaların ardışık veya alternatif biçimde bir araya getirilmesini temel alan ileri düzey bir mühendislik yaklaşımıdır. Bu sistemlerde her bir katman, özgül bir görevi yerine getirecek şekilde tasarlanırken, tüm yapının bütüncül bir şekilde çalışması hedeflenir. Böylece kaplama, taban malzeme ile dış çevre arasındaki fiziksel, kimyasal ve mekanik etkileşimleri optimize eder ve nihai ürünün dayanım, kararlılık ve işlevsellik düzeyini belirgin biçimde iyileştirir. Çok katmanlı yapılar sayesinde yalnızca yüzey

değil, yüzeye yakın bölgeler de dış etkilere karşı etkin biçimde korunabilir (Murray, 1997).

Katmanlar arası geçişlerin kontrollü biçimde oluşturulması ve bu geçişlerde yapısal sürekliliğin korunması, çok katmanlı sistemlerin performansını belirleyen en kritik faktörlerdendir. Bu noktada yalnızca her katmanın bireysel özellikleri değil, arayüzlerin fiziksel ve kimyasal uyumu da sistemin genel başarımında belirleyicidir. Çok katmanlı sistemler, farklı malzeme özelliklerinin tek bir yapı içinde bütünleştirilmesine olanak tanır. Örneğin bir katman aşınma direncini artırırken, diğeri korozyona karşı koruma sağlayabilir; böylece karmaşık çalışma koşullarında çok yönlü dayanıklılık elde edilir. Bu yaklaşım, mühendislikte daha uzun ömürlü, güvenilir ve yüksek performanslı malzeme çözümleri üretme hedefinin doğrudan bir yansımasıdır.

Teknolojik ilerlemelerle birlikte çok katmanlı kaplamalar artık nano ölçekte tasarlanabilir hâle gelmiştir. Nanoskala tabakalar, yalnızca kalınlık açısından değil; kristal yapı, faz geçişleri, elektriksel iletkenlik ve arayüz enerjisi gibi parametreler bakımından da optimize edilebilmektedir. Bu gelişmeler, çok katmanlı kaplamaları pasif koruma sistemlerinden çıkararak, yüzeye işlev kazandıran aktif mühendislik çözümlerine dönüştürmüştür (Gökmen ve Kışla, 2022). Böylece çok katmanlı kaplama kavramı, yalnızca koruyucu tabaka anlayışını aşan, aynı zamanda aktif işlevsellik ve bütünleşik performans prensiplerini temsil eden yeni bir mühendislik paradigması hâline gelmiştir.

Bu kavram yalnızca teknik yönüyle değil, aynı zamanda insan merkezli ve sürdürülebilir yönüyle de değerlidir. Çok katmanlı kaplamalar, daha güvenli ürünlerin geliştirilmesine, sistemlerin ömrünün uzatılmasına ve kaynakların verimli kullanılmasına katkı sağlar. Bu yaklaşım, doğrudan insan yaşamına dokunan, çevresel etkileri azaltan ve sürdürülebilirliği önceleyen bir mühendislik vizyonunu temsil eder. Sonuç olarak, çok katmanlı kaplama kavramı yalnızca bir teknik çözüm değil; aynı zamanda insan odaklı, çevreyle uyumlu ve etik temellere dayalı bir tasarım anlayışının ifadesidir.

4.1.2. Tarihsel gelişim süreci ve uygulama alanlarının evrimi

Çok katmanlı kaplama teknolojilerinin tarihsel gelişimi, yüzey mühendisliğinin temel hedeflerinden biri olan malzeme dayanımını artırma arayışının bir sonucu olarak

başlamış ve zamanla farklı endüstriyel gereksinimlere uyum sağlayacak biçimde evrilmiştir. İlk dönemlerde kaplama teknolojileri, yalnızca yüzeyleri oksidasyon, aşınma ve korozyon gibi dış etkilere karşı korumayı amaçlarken, tek katmanlı sistemlerin performans açısından yetersiz olduğu fark edilmiştir. Bu farkındalık, birden fazla işlevsel tabakanın ardışık biçimde düzenlenmesiyle daha kompleks ancak etkili çözümlerin elde edilebileceği fikrini doğurmuş ve çok katmanlı sistemlerin ilk örnekleri ortaya çıkmıştır (Kang ve ark., 2025). Böylece, birbirinden farklı işlevlere sahip katmanların bir araya getirilmesiyle çok yönlü yüzey performansı sağlanmıştır.

Bu gelişim süreci, özellikle 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren büyük bir ivme kazanmıştır. Malzeme biliminin diğer disiplinlerle (örneğin fizik, kimya ve nanoteknoloji) etkileşim içinde gelişmesi, kaplama teknolojilerinin de kapsamını genişletmiştir. Elektrodpozisyon, fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve sol-jel gibi yöntemlerin gelişimiyle birlikte çok katmanlı yapılar daha kontrollü, tekrarlanabilir ve homojen biçimde üretilebilir hale gelmiştir. Bu sayede hem mikroyapısal düzen hem de makro ölçekte performans açısından önemli iyileşmeler elde edilmiştir.

Nanoteknolojideki ilerlemeler, çok katmanlı kaplama teknolojilerinin evriminde dönüm noktası oluşturmuştur. Nano skala düzeyde tasarlanan tabakalar, yalnızca fiziksel koruma değil; elektriksel iletkenlik, optik yansıma, termal iletkenlik ve korozyon direnci gibi farklı işlevlerin aynı yapı içinde bütünleştirilmesini mümkün kılmıştır. Böylece çok katmanlı sistemler, klasik koruyucu kaplamalardan çıkarak fonksiyonel yüzey mühendisliği çözümlerine dönüşmüştür.

Uygulama alanları bakımından değerlendirildiğinde, çok katmanlı kaplama teknolojileri başlangıçta metalurji ve makine sanayii ile sınırlıyken; günümüzde otomotiv, havacılık, uzay, savunma, enerji, biyomedikal cihazlar ve mikroelektronik gibi yüksek teknoloji sektörlerinde vazgeçilmez bir çözüm haline gelmiştir. Bu evrim yalnızca teknolojik gelişmelerin değil; aynı zamanda artan güvenlik gereksinimleri, çevresel standartlar, enerji verimliliği ve insan ihtiyaçlarının çeşitlenmesinin de bir sonucudur. Özellikle yüksek sıcaklıklarda çalışan sistemler, korozyif ortamlarda görev yapan bileşenler veya mikro ölçekte yüksek hassasiyet gerektiren cihazlar, çok katmanlı kaplamaların sunduğu avantajlardan yararlanarak daha uzun ömürlü, verimli ve güvenli hale gelmiştir.

Bu süreç, yalnızca teknik bir ilerlemeyi değil, aynı zamanda toplumun ve endüstrinin değişen değerlerini de yansıtmaktadır. Daha az kaynak tüketimi, daha düşük bakım gereksinimi ve daha yüksek güvenlik düzeyi, yalnızca üreticiye değil; kullanıcıya ve çevreye de doğrudan katkı sağlamaktadır (Jo ve ark., 2022). Dolayısıyla çok katmanlı kaplama teknolojilerinin gelişimi, yalnızca bir mühendislik başarısı değil; aynı zamanda insanı ve doğayı merkeze alan etik bir mühendislik kültürünün de ifadesidir. Bugün bu teknolojiler sayesinde yalnızca daha dayanıklı sistemler değil, aynı zamanda daha sürdürülebilir ve çevreci yaşam biçimleri inşa edilmektedir. Bu yönüyle çok katmanlı kaplama teknolojilerinin evrimi, insan yaşamını ve çevreyi önceleyen bir teknolojik dönüşüm sürecinin somut göstergesidir.

4.1.3. Nano ve mikro ölçekli katmanlı yapıların önemi

Malzeme biliminde yüzey mühendisliği uygulamaları, yalnızca makroskobik dayanım veya estetik yüzey kalitesiyle sınırlı değildir. Özellikle nano ve mikro ölçekteki yapısal düzenlemelerin, malzemenin genel performansı üzerindeki etkisi son yıllarda daha net biçimde ortaya konmuştur. Bu bağlamda, çok katmanlı kaplama teknolojilerinde katman kalınlığı, düzenlenme biçimi ve arayüz tasarımı nano ve mikro ölçekte optimize edildiğinde, elde edilen yüzeyin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinde belirgin iyileşmeler gözlemlenmektedir. Bu tür yapılar yalnızca yüzeyi korumakla kalmaz; aynı zamanda yüzeye işlevsellik kazandıran, çevresel koşullara karşı malzeme ömrünü uzatan aktif sistemler haline gelir.

Nano ve mikro ölçekli yapılar, malzemenin mikroyapısal bütünlüğünün korunması, çatlak ilerlemesinin yavaşlatılması ve aşınma ile yorulma davranışlarının daha öngörülebilir hale getirilmesi açısından kritik rol oynar. Çok katmanlı sistemlerde, bu ölçekte tasarlanan her bir tabaka, malzeme ile dış ortam arasında termomekanik geçiş bölgesi işlevi görür. Bu geçiş bölgeleri, termal genleşme katsayısı farklarından kaynaklanan iç gerilmeleri dengeler ve yapının bütünsel olarak daha stabil kalmasını sağlar (Atay, 2008). Bu nedenle nano ve mikro ölçekli düzenlemeler, yalnızca yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda değil; aynı zamanda yüksek sıcaklık, basınç veya kimyasal etkileşimlerin yoğun olduğu zorlu koşullarda çalışan endüstriyel bileşenler için de vazgeçilmezdir.

Ayrıca bu ölçekte yapılandırılan katmanlar, kaplamaların difüzyon, oksidasyon ve hidrojen kırılabilirliği gibi çevresel etkilere karşı direncini artırırken; aynı zamanda elektromanyetik, optik ve termal özelliklerin de istenen yönde iyileştirilmesine olanak

tanır. Böylece bu kaplamalar yalnızca koruyucu bariyerler değil, aynı zamanda fonksiyonel yüzey mühendisliği çözümleri haline gelir. Diğer bir ifadeyle, nano ve mikro ölçekli çok katmanlı yapılar artık pasif koruma sağlayan sistemler olmaktan çıkmış; yüzeye aktif olarak özellik kazandıran, çok işlevli mühendislik bileşenleri haline dönüşmüştür.

Bu gelişmeler, mühendislik tasarımlarının daha kompakt, hafif ve yüksek performanslı sistemlere evrilmesini de beraberinde getirmiştir. Nano ve mikro ölçekteki düzenlemelerin insan yaşamına dolaylı katkısı ise son derece önemlidir. Bu tür kaplamalar sayesinde daha az malzeme kullanılarak daha uzun ömürlü sistemler elde edilmekte, bakım aralıkları uzamakta ve güvenlik düzeyleri artmaktadır. Bu durum, yalnızca ekonomik kazanımlar sağlamaz; aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik ve toplumsal refah açısından da önemli katkılar sunar (Despotopoulou ve Burchill, 2002).

Sonuç olarak, nano ve mikro ölçekli katmanlı yapılar yalnızca bir mühendislik başarısı olarak değil, aynı zamanda sürdürülebilir yaşam döngüsünün ayrılmaz bir parçası olarak değerlendirilmelidir. Bu yapılar, insan, çevre ve teknoloji arasındaki ilişkiye çok boyutlu bir bakış kazandırarak, geleceğin yüzey mühendisliği anlayışını şekillendiren stratejik bir yaklaşımı temsil etmektedir.

4.2. Çok Katmanlı Kaplamaların Avantajları ve Teknolojik Üstünlükleri

Çok katmanlı kaplama teknolojileri, geleneksel tek tabakalı sistemlerin sınırlı koruma ve işlevsellik düzeylerini aşarak, yüzey mühendisliği uygulamalarında devrim niteliğinde bir gelişmeye öncülük etmiştir. Bu kaplamalar, yalnızca koruyucu değil, aynı zamanda fonksiyonel ve yapısal özellikleri iyileştirici bir mekanizma olarak değerlendirilmektedir. Böylece hem tasarım esnekliği hem de performans üstünlüğü açısından belirgin avantajlar sunar. Çok katmanlı yapılar, birden fazla özelliği tek bir kaplama sisteminde bütünleştirme yeteneği sayesinde, malzemenin genel davranışını çok yönlü biçimde optimize eder. Bu optimizasyon; aşınma direnci, sertlik, korozyon dayanımı, termal stabilite, mekanik bütünlük ve kimyasal dayanıklılık gibi kritik parametreleri kapsar.

Bu kaplamaların en önemli üstünlüklerinden biri, özelleştirilebilirlik düzeyinin yüksek olmasıdır. Her bir katmanın bileşimi, kalınlığı, dizilim sırası ve arayüz özellikleri, üretim aşamasında hedeflenen performansa göre ayarlanabilir. Bu durum, çok katmanlı kaplamaları farklı endüstriyel koşullar ve uygulama gereksinimleri için son

derece uygun hale getirir (Tseluikin, 2009). Özellikle aşırı sıcaklık, yüksek basınç veya kimyasal etkileşimlerin bulunduğu zorlu çalışma ortamlarında, bu yapılar geleneksel tek tabakalı sistemlerle sağlanamayacak düzeyde dayanıklılık ve süreklilik sunar. Ayrıca katmanlar arasındaki mekanik geçişlerin kademeli olarak düzenlenmesi, iç gerilmelerin dengelenmesini sağlayarak yapısal bütünlüğü korur ve kaplamaların çatlama, soyulma veya yapışma problemlerine karşı direncini artırır.

Teknolojik açıdan değerlendirildiğinde, çok katmanlı kaplamaların üretiminde kullanılan gelişmiş biriktirme teknikleri sayesinde atomik ve moleküler düzeyde hassas kontrol sağlanabilmektedir. Bu kontrol, mikroyapının istenen fiziksel ve kimyasal özelliklere göre şekillendirilmesine olanak tanır. Örneğin nanoyapılı tabakalar aracılığıyla yüzey enerjisi, elektriksel iletkenlik, optik yansımaya veya fotonik tepkiler yüksek hassasiyetle optimize edilebilir. Bu durum, özellikle elektronik, biyomedikal, optik ve enerji teknolojileri gibi ileri mühendislik alanlarında çok katmanlı kaplamaları vazgeçilmez kılar. Ayrıca, düşük işlem sıcaklıkları ve çevre dostu banyo bileşimleri sayesinde bu teknolojilerin ekolojik ayak izi oldukça küçüktür.

Çok katmanlı kaplamaların avantajları yalnızca teknik veya ekonomik boyutlarla sınırlı değildir. Bu teknolojilerin sunduğu güvenlik, süreklilik ve sürdürülebilirlik gibi unsurlar, doğrudan insan yaşam kalitesine de katkı sağlar (Trentin ve ark., 2022). Özellikle kritik altyapılar ve yüksek güvenlikli sistemler için geliştirilen çok katmanlı yapılar, daha yüksek performans, daha düşük risk ve daha uzun hizmet ömrü sunar. Böylece, bu kaplamalar sadece mühendislik ürünlerinin değil, aynı zamanda insan yaşamının güvenilirliğini ve sürdürülebilirliğini artıran stratejik teknolojiler olarak değerlendirilebilir.

Sonuç olarak, çok katmanlı kaplamalar yalnızca teknolojik bir üstünlük değil; aynı zamanda insani, çevresel ve etik sorumluluk bilincini yansıtan mühendislik uygulamalarıdır. Bu yaklaşım, mühendisliğin yalnızca teknik bir çözüm üretme aracı olmadığını; aynı zamanda yaşamı daha güvenli, verimli ve sürdürülebilir kılma misyonunu da taşıdığını göstermektedir.

Fonksiyonel derecelendirilmiş kaplamalar, modern mühendisliğin çok katmanlı yapılar üzerinden sunduğu çözümler arasında, en rafine ve kontrollü yapı karakteristiklerinden birine sahip olan sistemlerdir. Bu kaplamalarda temel amaç, katmanlar arası geçişi keskin sınırlar yerine sürekli bir geçişle düzenlemek ve böylece

hem mekanik hem de kimyasal uyumluluğu maksimize etmektir. Fonksiyonel derecelendirme, bir malzemenin yapısal özelliklerinin –örneğin bileşim, sertlik, elastisite, iletkenlik veya difüzyon davranışının– belirli bir yönde kademeli olarak değıştirilmesiyle elde edilir. Bu değışim, malzemenin yüzeyinden alt tabakasına doğru ilerleyen sürekli bir profil sunar. Bu yaklaşım, klasik çok katmanlı yapılarda görülebilecek olan ani faz değışimlerinden doğabilecek iç gerilmeleri önleyerek, daha kararlı ve uzun ömürlü sistemler oluşturulmasına olanak tanır (Avcı, 2009).

Fonksiyonel derecelendirme, yapısal süreklilik sağlama açısından büyük önem taşır. Özellikle yüksek sıcaklık, yüksek basınç ya da agresif kimyasal ortamlarda çalışan mühendislik sistemlerinde, bu kaplamalar sayesinde malzeme ile çevresi arasındaki fiziksel ve kimyasal farklar dengelenebilir. Böylece, malzeme çatlamaya, soyulmaya ya da deformasyona karşı daha dirençli hale gelir. Aynı zamanda bu yapılar, mekanik performansın yanı sıra iletkenlik, ısı yalıtımı ya da biyo-uyumluluk gibi çok yönlü özelliklerin aynı sistemde bütüncül biçimde düzenlenmesini mümkün kılar. Bu çok işlevli karakteri, fonksiyonel derecelendirilmiş kaplamaları yalnızca klasik bir koruyucu yapı olmaktan çıkarak, aktif görev üstlenen malzeme sistemleri haline dönüştürür. Bu tür yapıların üretiminde, teknik açıdan en büyük zorluk, geçiş bölgelerinin düzgün ve kontrollü bir şekilde tasarlanmasıdır. Bunun için kullanılan üretim tekniklerinin çok hassas olması, özellikle malzeme bileşiminin, çözeltideki iyon dağılımının ve biriktirme parametrelerinin milimetrik düzeyde kontrol altında tutulması gerekmektedir (Yurduseven ve ark., 2010). Bu koşullar sağlandığında, fonksiyonel derecelendirme yalnızca bir performans artırımı aracı değil, aynı zamanda malzeme mühendisliğinde yeni bir tasarım dili haline gelir. Bu anlayış, yalnızca teknik bir arayışa değil, aynı zamanda sürdürülebilir, güvenli ve verimli bir yaşam inşasına da katkı sağlar. Çünkü bu sistemlerin uzun ömürlülüğu, enerji ve kaynak kullanımında verimliliği ve bakım maliyetlerindeki düşüş gibi özellikleri, insan yaşamını dolaylı yoldan iyileştirme potansiyeline sahiptir.

4.3. Akımlı Kaplama Yöntemiyle Katmanlı Yapıların Sentezlenmesi

Akımlı kaplama yöntemi, metal ve alaşım kaplamalarının üretiminde uzun yıllardır kullanılan, yüksek süreç kontrolü ve tekrarlanabilirliği sayesinde öne çıkan bir kaplama tekniğidir. Bu yöntemin çok katmanlı yapıların sentezinde kullanılması, kaplamaların katman kalınlığı, kimyasal bileşimi ve iç yapısının istenilen düzeyde

ayarlanabilmesine olanak tanır. Akımlı kaplama süreci, metal iyonlarının indirgenerek katı bir yüzey üzerine çökmesi esasına dayanır. Bu temel mekanizma sayesinde, hedeflenen metalik yapılar taban malzeme üzerine katmanlı biriktirilerek oluşturulabilir.

Bu süreçte, çözelti bileşimi, akım yoğunluğu, sıcaklık, pH değeri ve karıştırma hızı gibi parametrelerin hassas biçimde kontrol edilmesi, katman morfolojisi ve faz oluşumu üzerinde doğrudan etkili olur. Böylelikle mikro ve nano ölçekte yüksek homojenliğe sahip çok katmanlı yapılar üretmek mümkün hale gelir. Akımlı kaplamanın sunduğu en önemli avantajlardan biri, katman kalınlığının ve arayüz sürekliliğinin yüksek doğrulukla kontrol edilebilmesidir. Bu özellik, fonksiyonel geçişlerin ve çok fazlı sistemlerin oluşturulmasında kritik rol oynar (Catania ve Strozzi, 2018). Ayrıca bu yöntem, farklı elementlerin veya bileşiklerin ardışık ya da birlikte biriktirilmesiyle hem mekanik hem de kimyasal özellikleri kademeli biçimde değişen kompozit veya hibrit yapılar elde edilmesini sağlar.

Akımlı kaplama yöntemiyle üretilen çok katmanlı kaplamalarda, arayüz geçişlerinin net biçimde kontrol edilebilmesi, iç gerilmelerin azaltılmasını, yapışma kalitesinin artırılmasını ve çatlama direncinin geliştirilmesini mümkün kılar. Bu yöntemle elde edilen katmanlı yapılar, mikro ve nano ölçekli sistemlerde yüzey mühendisliğinin tüm gereksinimlerini karşılayabilecek potansiyele sahiptir.

Bunun yanında, üretim sıcaklıklarının düşük olması, kaplama sürecinde ısı gerilmelerin ve alt tabaka deformasyonlarının oluşmasını engeller. Bu durum, özellikle hassas ve kompleks mikro yapıların üretildiği alanlarda yapısal bütünlüğün korunmasını sağlar. Akımlı kaplamanın bu avantajları, yöntemi sadece geleneksel kaplama süreçlerine değil, aynı zamanda yüksek hassasiyet gerektiren ileri mühendislik uygulamalarına da uygun hale getirir.

Toplumsal ve çevresel açıdan değerlendirildiğinde, elektrodpozisyon yöntemiyle çok katmanlı yapı üretimi, yalnızca teknik bir başarı değil; aynı zamanda sürdürülebilir üretim anlayışının da bir göstergesidir (Müftüoğlu ve Kanber, 2019). Bu yöntem sayesinde daha az hammaddeyle daha yüksek performans elde edilmekte; bakım ve yenileme aralıklarının uzamasıyla enerji ve kaynak tüketimi azaltılmaktadır. Bu da daha çevreci üretim döngülerine ve düşük karbon ayak izine sahip sistemlerin geliştirilmesini mümkün kılar.

Sonuç olarak, akımlı kaplama yöntemi, çok katmanlı yapıların sentezinde hem bilimsel hem de insani boyutlarıyla dönüştürücü bir teknolojidir. Bu yöntem, yalnızca yüzey mühendisliğinde teknik üstünlük sağlamakla kalmaz; aynı zamanda insan ve çevre merkezli bir mühendislik vizyonunun da somut bir yansımasıdır.

4.4. Katmanlar Arası Gerilme Dağılımı, Uyum ve Yapışma Mekanizmaları

Çok katmanlı kaplamaların dayanıklılığını ve uzun ömürlülüğünü belirleyen en kritik faktörlerden biri, katmanlar arasındaki gerilme dağılımı, yapısal uyum ve yapışma mekanizmalarının etkin bir biçimde yönetilmesidir. Katmanlar arası gerilmeler, farklı tabakaların termal genleşme katsayıları, elastik modülleri ve kristal yapı özellikleri arasındaki farklardan kaynaklanır. Bu gerilmeler dengeli bir şekilde dağıtılmadığında, kaplama yüzeyinde çatlak oluşumu, soyulma veya erken yorulma gibi hasarlar ortaya çıkabilir. Bu nedenle gerilme dağılımının optimize edilmesi, kaplamanın mekanik kararlılığını ve hizmet ömrünü doğrudan etkileyen bir gerekliliktir.

Uyum (kohezyon), farklı katmanların birbirine karşı fiziksel ve kimyasal olarak ne derece bütünleştiğini ifade eder. Yüksek uyum, gerilmelerin katmanlar arasında homojen olarak yayılmasını sağlayarak yerel gerilme yoğunlaşmalarını önler. Bu bağlamda, arayüzlerin atomik düzeyde etkileşimi, kimyasal bağ türleri ve kristal yapılar arasındaki süreklilik kritik öneme sahiptir. Yeterli uyumun sağlanamadığı durumlarda, tabakalar arasındaki enerji farkı ve yapısal uyumsuzluklar çatlak ilerlemesine zemin hazırlar. Buna karşılık, yüksek arayüz uyumu, kaplamanın mekanik dayanımını, termal kararlılığını ve çevresel etkilere karşı direncini artırır. Dolayısıyla, kaplama tasarımında malzeme seçimi, tabaka sıralaması ve üretim parametreleri, katmanlar arası uyumu maksimize edecek şekilde belirlenmelidir (Barletta ve ark., 2013).

Yapışma (adhezyon) mekanizmaları, kaplamanın taban malzemeye bağlanma kalitesini belirler ve sistemin bütünlüğü açısından kritik bir role sahiptir. Sağlam bir yapışma, dış yükler veya çevresel etkiler altında kaplama yüzeyinde lokal hasar birikimini önler. Bu bağlanma; mekanik kilitlenme, elektrokimyasal bağlanma, fiziksel Van der Waals kuvvetleri veya difüzyon kaynaklı bağ oluşumları yoluyla gerçekleşebilir. Zayıf yapışma, kaplama soyulması, mikroyapısal deformasyon veya yüzeyden ayrılma gibi olumsuz sonuçlara neden olur. Bu nedenle, yüzey hazırlığı,

kaplama ortamı ve işlem parametrelerinin doğru şekilde optimize edilmesi, yapışma kalitesinin artırılması açısından hayati öneme sahiptir.

4.5. Çok Katmanlı Kaplamalarda Karakterizasyon Teknikleri

Çok katmanlı kaplamaların etkinliği ve güvenilirliği, doğru ve kapsamlı karakterizasyon teknikleriyle ortaya konur. Karakterizasyon, kaplamanın kimyasal bileşimi, mikroyapısı, yüzey özellikleri, mekanik dayanımı ve arayüz kalitesi gibi kritik parametrelerin belirlenmesini sağlar. Bu parametreler, kaplamanın performansını doğrudan etkilediği için, her bir katmanın özelliklerinin hassas ve doğru biçimde ölçülmesi hem araştırma hem de uygulama aşamalarında büyük önem taşır. Günümüzde gelişmiş spektroskopik, mikroskopik ve mekanik test yöntemleri, çok katmanlı kaplamaların analizinde yoğun şekilde kullanılmaktadır. Bu teknikler, kaplama yüzeyinden başlayarak, katmanlar arası sınır bölgelerine kadar geniş bir alanın detaylı değerlendirilmesine imkân verir (Trentin ve ark., 2022). Böylece, kaplamanın yapısal sürekliliği, faz dağılımı, iç gerilme durumu ve yüzey pürüzlülüğü gibi özellikler kapsamlı biçimde değerlendirilir. Karakterizasyon teknikleri, kaplama üretiminde kullanılan yöntemlerin ve parametrelerin etkinliğini değerlendirmede temel araçlardır. Örneğin, mikroyapısal analizler sayesinde kristal büyüklüğü ve faz dönüşümleri gözlemlenirken, kimyasal analizler katmanlar arası bileşim farklılıklarını net bir biçimde ortaya koyar. Mekanik testler ise kaplamanın dayanım, sertlik ve elastisite gibi işlevsel özelliklerini ölçerek uygulama koşullarına uygunluğunu belirler. Yüzey analizleriyle ise kaplama kalınlığı, homojenliği ve pürüzlülüğü tespit edilerek kaplama kalitesi hakkında genel bir değerlendirme yapılabilir. Bu çok yönlü yaklaşım, kaplamaların geliştirilmesi sürecinde hedeflenen performansın yakalanmasına yardımcı olur (Jo ve ark., 2022).

4.6. Uygulama Alanlarına Göre Çok Katmanlı Kaplama Sistemlerinin Sınıflandırılması

Çok katmanlı kaplamalar, uygulama alanlarına göre farklı ihtiyaçları karşılamak üzere çeşitli sınıflara ayrılır. Bu sınıflandırma, kaplamanın maruz kalacağı çevresel koşullar, mekanik zorlanmalar, kimyasal etkiler ve işlevsel gereksinimler temel alınarak yapılır. Endüstriyel uygulamalarda, otomotivden havacılığa, elektronikten biyomedikale kadar çok geniş bir yelpazede kaplamalar farklı biçimlerde optimize edilir. Her sınıf, kendine özgü teknik ve yapısal özellikler taşıyarak, ilgili sektörün performans ve

dayanıklılık beklentilerini karşılamaya yöneliktir. Böylece, çok katmanlı kaplama teknolojisi, geniş bir uygulama spektrumunda adaptasyon ve etkinlik sağlayabilir. Sınıflandırma süreci hem üretim yöntemlerini hem de kaplama bileşimini etkileyen bir rehber niteliğindedir (Catania ve Strozzi, 2018). Örneğin, yüksek sıcaklık ve aşınma dayanımı gerektiren uygulamalarda, yüksek sertliğe ve termal kararlılığa sahip katmanlar tercih edilirken; biyomedikal alanlarda ise biyouyumluluk ve kimyasal kararlılık ön plandadır. Elektronik uygulamalarda ise elektriksel iletkenlik ve ince film kalitesi kritik parametrelerdir. Bu çeşitlilik, çok katmanlı kaplamaların çok yönlü yapısını ve teknolojik esnekliğini ortaya koyar. Ayrıca, uygulama alanına göre yapılan sınıflandırma, araştırmacı ve mühendislerin tasarım ve üretim süreçlerinde daha sistematik ve hedef odaklı çalışmasını mümkün kılar. İnsan merkezli bir bakış açısından değerlendirildiğinde, uygulama alanlarına göre yapılan bu sınıflandırma, teknolojinin insan ihtiyaçlarına ve yaşam kalitesine direkt katkısını yansıtır. Çünkü her sektörün kendine özgü gereksinimlerine uygun kaplamalar geliştirildiğinde, kullanılan ürünler daha güvenli, dayanıklı ve verimli hale gelir. Bu durum, hem ekonomik kaynakların etkin kullanımını sağlarken aynı zamanda günlük yaşamda karşılaşılan risklerin azalmasına katkı sağlar. Dolayısıyla, bu sınıflandırma, mühendislik çözümlerinin insan odaklı ve sürdürülebilir bir biçimde yönlendirilmesine olanak veren önemli bir süreçtir (Müftüoğlu ve Kanber, 2019).

4.7. Katmanlı Yapıların Optimum Performans Parametreleri

Katmanlı yapıların optimum performansına ulaşmak, günümüzde malzeme bilimi ve mühendislik disiplinlerinde oldukça karmaşık ve çok boyutlu bir süreç olarak kabul edilir. Bu süreç, yalnızca katman sayısı veya kalınlığı gibi basit parametrelerin ayarlanmasıyla sınırlı kalmaz, aynı zamanda malzemenin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri arasındaki dengelerin hassas biçimde yönetilmesini gerektirir. Katmanlı yapılar, farklı işlevlere sahip katmanların birleşimi ile bir bütün oluşturduğu için, her bir katmanın kendine özgü performans kriterleri göz önünde bulundurularak, tüm yapının işlevselliği optimize edilmelidir (Kang ve ark., 2025). Bu durum, katmanların uyum içinde etkileşmesini ve yapı boyunca istenen dayanıklılık ile işlevselliğin sağlanmasını mümkün kılar. Optimum performans parametrelerinin belirlenmesi, böylece sadece teknik başarı değil, uzun ömür, dayanıklılık ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından da kritik bir önem taşır.

Katmanlı yapılarda performansı etkileyen temel parametrelerin başında malzeme bileşimi gelir. Her katmanın kimyasal yapısı, o katmanın mekanik dayanımı, sertliği, korozyon direnci ve termal kararlılığı gibi özelliklerini belirler. Bu nedenle, optimum performans için katmanlar arası bileşim geçişleri ve ara yüzey özellikleri dikkatle kontrol edilmelidir. Bu ara yüzeyler, yapısal bütünlüğün sağlanması açısından en kritik noktalar ve bu bölgelerde oluşabilecek mikroskobik çatlaklar, gerilme birikimi veya kimyasal ayrışmalar, katmanların erken bozulmasına yol açabilir. Dolayısıyla katman kompozisyonları arasındaki uyum yalnızca bireysel katman özellikleri için değil, yapı genelindeki dayanıklılık ve güvenilirlik için de hayati önemdedir. Katmanlar arası uyumun sağlanması, yüksek performanslı çok katmanlı kaplamaların temel taşıdır.

Katman kalınlığı da performansı doğrudan etkileyen diğer önemli bir parametredir. İnce katmanlar, genellikle yüzey işlemlerinde pürüzsüzlük ve hassasiyet sağlar, ancak mekanik dayanım açısından sınırlamalar taşıyabilir. Buna karşılık kalın katmanlar, yüksek dayanım ve aşınma direnci sunarken, iç gerilmelerin artması veya yapısal uyumsuzluk riskleri barındırabilir (Datta ve ark., 2002). Bu nedenle optimum performansa ulaşmak için katman kalınlıklarının her katmanda özel olarak ayarlanması gerekir. Katman kalınlığı ile yapısal uyum arasındaki hassas denge, uzun ömürlü ve dayanıklı kaplamalar elde etmek için zorunludur. Ayrıca katmanlar arası geçiş bölgelerindeki kalınlık değişimleri, gerilme dağılımını etkileyerek yapının genel performansına doğrudan belirler.

Katmanlı yapının mikro yapısı ve faz bileşimi, performans parametreleri üzerinde belirleyici rol oynar. Mikro yapının kontrolü, özellikle katmanlar arası ara yüzeylerdeki bağlanma kalitesini artırmak için kritik önemdedir. Katmanların kristal yapısı, tane boyutları ve olası amorf bölgeler, mekanik dayanım, sertlik ve korozyon direnci gibi temel özellikleri etkiler. Dolayısıyla mikroyapısal optimizasyon hem üretim sürecinin hassas kontrolünü hem de gelişmiş malzeme mühendisliği tekniklerinin kullanımını gerektirir. Bu parametrelerin hassas ayarlanması, özellikle yüksek teknoloji uygulamalarda kaplamaların beklenen işlevselliği göstermesi için zorunludur.

Yapısal gerilme dağılımı, katmanlı yapıların dayanıklılığında önemli bir etkidir. İç gerilmeler, üretim sürecinde ortaya çıkabilir ve zamanla yapının deformasyonuna ya da mikro kırılmalara neden olabilir. Bu nedenle gerilme yönetimi, optimum performansın sağlanması açısından vazgeçilmezdir. Katmanlar arasında gerilme

uyumu, yapının bütünlüğünü korumasına ve servis ömrünü uzatmasına yardımcı olur. Üretim yöntemleri ve kaplama parametrelerinin bu gerilme dağılımı üzerindeki etkisi dikkatle analiz edilerek, optimum koşullar belirlenmelidir. Bu bağlamda gerilme analizi, kaplamaların mekanik dayanımıyla doğrudan ilişkilidir.

Katmanlar arasındaki yapışma kalitesi de katmanlı yapıların performansını doğrudan belirler. Zayıf yapışma, katmanların delaminasyonuna ve erken arızalara yol açar. Bu nedenle yüzey hazırlama, kaplama yöntemi ve proses parametreleri, yapışma dayanımını artırmaya yönelik optimize edilmelidir. Yüksek yapışma dayanımı, özellikle aşınma ve korozyon direnci gibi kritik uygulamalarda kaplamanın güvenilirliğini sağlar. Optimum performans için yapışma kalitesinin sağlanması, malzemenin uzun süreli performansının ve stabilitesinin temelidir (Müftüoğlu ve Kanber, 2019).

Isıl ve kimyasal stabilite parametreleri, katmanlı yapıların özellikle zorlu çalışma koşullarında işlevselliğini sürdürebilmesi için gereklidir. Yüksek sıcaklık, agresif kimyasallar ve çevresel etkiler gibi dış faktörlere karşı dayanıklı kaplamalar geliştirilmelidir. Bu da ancak katmanların termal genleşme katsayıları, kimyasal dirençleri ve faz stabilitelerinin birbiriyle uyumlu seçilmesiyle mümkün olur. Isıl genleşme uyumsuzlukları, katmanlar arasında gerilme birikimine ve yapısal hasara neden olabilir. Dolayısıyla performans optimizasyonu, bu faktörlerin bütüncül değerlendirilmesini gerektirir.

Optimum performans, aynı zamanda üretim sürecinin tekrarlanabilirliği ve kalite kontrol olanaklarıyla da ilişkilidir. Üretim yöntemlerinin stabil ve kontrol edilebilir olması, her defasında benzer özelliklere sahip katmanlı yapılar elde edilmesini sağlar. Bu durum hem teknik hem de ekonomik açıdan sürdürülebilir çözümler sunar. Süreç kontrolü ve karakterizasyon tekniklerinin etkin kullanımı, kaplamaların performansını garanti altına alır ve uygulama alanlarında güvenle kullanılmasına zemin hazırlar.

Sonuç olarak katmanlı yapıların optimum performans parametreleri, çok disiplinli ve karmaşık bir yapıyı temsil eder. Malzeme bileşimi, katman kalınlığı, mikro yapı, gerilme dağılımı, yapışma kalitesi, termal ve kimyasal stabilite gibi unsurların dengeli ve hassas yönetimi, üstün performanslı kaplamaların geliştirilmesinin anahtarıdır (Avcı, 2009). Bu parametreler arasındaki etkileşim, teknolojik gelişmelerin yönlendirilmesinde önemli rol oynar ve malzeme mühendisliğinin temel araştırma

alanlarından biri olmaya devam eder. İnsan yaşamında ve endüstride karşılaşılan çeşitli zorlukların üstesinden gelmek için bu performans kriterlerinin bilinçli ve kapsamlı şekilde değerlendirilmesi gereklidir. Katmanlı yapıların tasarımında ve üretiminde bu yaklaşımlar benimsenerek, dayanıklı, güvenilir ve uzun ömürlü kaplamalar elde edilir ve böylece hem teknolojik hem de ekonomik açıdan sürdürülebilir çözümler sağlanır.





5. LİTERATÜRDEKİ ÖNEMLİ ÇALIŞMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1. Katmanlı Kaplamalar Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Katmanlı kaplamalar, son yıllarda hem koruyucu hem de işlevsel yüzey mühendisliği uygulamalarında önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Literatürde, çok katmanlı yapıların malzeme bileşimi, kaplama yöntemi ve mikroyapısal özelliklerinin nihai performans üzerindeki etkilerini inceleyen çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu bölümde, farklı araştırmacılar tarafından yürütülen çalışmalara kronolojik ve tematik bir biçimde yer verilmiştir.

Jo, H. M., ve ark. (2022), nano lifli selüloz ve hidrofobik kaplama ajanlarının birlikte kullanıldığı çok katmanlı bariyer kaplama teknolojisini incelemiştir. Bu çalışmada, selüloz ve hidrofobik ajanların entegrasyonu ile geliştirilen çok katmanlı yapıların bariyer özelliklerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

Catania, G., ve Strozzi, M. (2018), çok katmanlı kaplama teknolojisini kullanarak ince duvarlı mekanik bileşenlerde titreşim sönümleme özelliklerini optimize etmeye yönelik bir araştırma yürütmüştür. Çalışmada, çok katmanlı tasarımın mekanik titreşimlerin bastırılmasında etkili bir yaklaşım olduğu vurgulanmıştır.

Borawski, B., ve ark. (2011), "optimum partikül erozyon direncine yönelik çok katmanlı kaplama tasarım mimarisi" üzerine bir araştırma gerçekleştirmiştir. Bu çalışma, partikül erozyonuna karşı yüksek direnç sağlamak için çok katmanlı kaplamaların mimarisini ve tasarım prensiplerini detaylandırmaktadır.

Barletta, M., ve ark. (2013), "pigmentli çok katmanlı koruyucu kaplamaların üretimi için yeni yollar" geliştirmiştir. Bu çalışma, koruyucu özelliklere sahip pigmentli çok katmanlı kaplamaların yenilikçi üretim yöntemlerini keşfetmektedir.

Tseluikin, V. N. (2009), "kompozit elektrokimyasal kaplamaların hazırlanması, yapısı ve özellikleri" üzerine bir çalışma yapmıştır. Bu çalışma, kompozit elektrokimyasal kaplamaların üretim süreçleri, iç yapıları ve çeşitli karakteristiklerini incelemektedir.

Dilek, S. (2021), "darbeli elektro-biriktirme yöntemi ile üretilen mikron altı boyutlu TiC seramik partikül takviyeli Ni-W-TiC kompozit kaplamalar: tribolojik ve korozyon

özellikleri" üzerine bir yüksek lisans tezi sunmuştur. Bu tez, Ni-W-TiC kompozit kaplamaların tribolojik ve korozyon performanslarını, TiC partiküllerinin etkisi altında araştırmaktadır.

Özkan, S. (2011), "elektrokimyasal yöntemle nikel-SiC kompozit kaplamaların üretimi ve karakterizasyonu" üzerine bir yüksek lisans tezi sunmuştur. Bu çalışma, nikel-SiC kompozit kaplamaların elektrokimyasal yolla sentezlenmesini ve elde edilen malzemelerin özelliklerini incelemektedir.

Tseluikin, V. N. (2016), "kompozit elektrokimyasal kaplamaların yapısı ve özellikleri" üzerine bir inceleme sunmuştur. Bu makale, kompozit elektrokimyasal kaplamaların yapısal özelliklerini ve bunların performans üzerindeki etkilerini gözden geçirmektedir.

Iroh, J. O., ve ark. (2003), "çok fonksiyonlu kaplamaların işlenmesi için yeni bir teknik olarak elektrokimyasal sentez" üzerine bir çalışma yapmıştır. Bu araştırma, birden fazla işlevi olan kaplamaların üretimi için elektrokimyasal sentez yönteminin potansiyelini ele almaktadır.

Gül, H., ve ark. (2021), "kesikli akım elektrobiriktirme yöntemiyle üretilen Ni-W/Si₃N₄ kompozitlerinin mikroyapı ve aşınma özelliklerine Si₃N₄ Konsantrasyonunun Etkisi" üzerine bir çalışma yapmıştır. Bu çalışma, Ni/W-Si₃N₄ kompozit kaplamaların mikroyapı ve aşınma davranışlarını Si₃N₄ konsantrasyonunun etkisi bağlamında araştırmaktadır.

Yari, S., ve Dehghanian, C. (2013), "gömülü alümina nanopartikülleri içeren nanokristal ve amorf Ni-W kaplamaların biriktirilmesi ve karakterizasyonu" üzerine bir çalışma sunmuştur. Bu araştırma, alümina nanopartiküllerinin Ni-W kaplamalarındaki dağılımını ve kaplamaların morfolojik özelliklerini incelemektedir.

Tan, S. (2022), "ultrasonik destekli akımlı kaplama tekniği ile üretilen Ni-W-TiO₂ kaplamaların tribolojik davranışlarının incelenmesi" üzerine bir yüksek lisans tezi sunmuştur. Bu tez, Ni-W-TiO₂ kaplamaların aşınma özelliklerini ve ultrasonik destekli biriktirmenin bu özelliklere etkisini analiz etmektedir.

Ünal, E., ve ark. (2020), akımlı kaplama yöntemiyle nanokompozit kaplamalarda elektrolit bileşenlerinin etkisi üzerine bir çalışma yapmıştır. Bu çalışma, nanokompozit kaplamaların özelliklerini belirleyen elektrolit içeriklerinin önemini vurgulamaktadır.

Allahyarzadeh, M. H., ve ark. (2016), akımlı kaplama yöntemiyle Ni-W kaplamaların karakterizasyonu, özellikleri ve uygulamaları üzerine bir inceleme sunmuştur. Bu kapsamlı inceleme, Ni-W kaplamaların üretim, karakterizasyon ve çeşitli endüstriyel kullanım alanlarını detaylandırmaktadır.

Kabi, S., ve ark. (2009), Ni-W nanokristalin kaplamaların özellikleri üzerinde polarizasyon tipinin etkisi üzerine bir çalışma yapmıştır. Bu araştırma, elektriksel polarizasyon türünün Ni-W nanokristalin kaplamaların fiziksel ve kimyasal özelliklerini nasıl etkilediğini analiz etmektedir.

Sriraman, K. R., ve ark. (2007), akımlı kaplama yöntemiyle nanokristalin Ni-W ve Ni-Fe-W alaşımlarının korozyon davranışları üzerine bir araştırma yapmıştır. Bu çalışma, nano kristal yapıya sahip Ni-W ve Ni-Fe-W alaşımlarının korozyona karşı dirençlerini karşılaştırmalı olarak incelemektedir.

Ghaferi, Z., ve ark. (2010), Ni-W ve Co-W alaşım kaplamaların özellikleri ve karakteristiği karşılaştırması üzerine bir çalışma yapmıştır. Bu araştırma, Ni-W ve Co-W nanokristalin alaşım kaplamaların birikme süreçlerini ve sonuçta elde edilen özelliklerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmektedir.

Kumar, U. P., ve ark. (2015), salisilaldehit katkısının elektrokimyasal olarak biriktirilmiş nanokristal Ni-W alaşım kaplamaların mikroyapısı ve korozyon direnci üzerindeki etkisini incelemiştir. Bu çalışma, salisilaldehitin Ni-W alaşım kaplamalarının mikroyapısını ve korozyon direncini nasıl iyileştirebileceğini incelemektedir.

Ozan, Ş. (2023), "kesikli (darbeli) akım kaplama yöntemiyle üretilen Ni-W kaplamalarının özelliklerinin incelenmesi" üzerine bir yüksek lisans tezi sunmuştur. Bu tez, darbeli akım kullanılarak üretilen Ni-W kaplamaların fiziksel ve kimyasal özelliklerini detaylı bir şekilde analiz etmektedir.

Lagarde, M., ve ark. (2018), "magnetron püskürtme ile elde edilen NiW alaşımlarının elektrokimyasal davranışları" üzerine bir çalışma yapmıştır. Bu araştırma, magnetron püskürtme yöntemiyle hazırlanan Ni-W alaşımlarının elektrokimyasal özelliklerini ve reaksiyonlarını incelemektedir.

Hu, Y., ve ark. (2019), "indüklenmiş ortak biriktirme ile hazırlanan NiW alaşım kaplamalarının mekanik ve antikorozyon performansları" üzerine bir çalışma yapmıştır. Bu çalışma, indüklenmiş ortak biriktirme tekniğiyle üretilen Ni-W alaşım

kaplamalarının mekanik dayanıklılık ve korozyon önleyici performanslarını araştırmaktadır.

Adıgüzel, Z. (2015), "nanokristalin Ni-W kaplamaların korozyon karakteristikleri üzerine bir yüksek lisans tezi sunmuştur. Bu tez, nanokristalin yapıdaki Ni-W kaplamaların korozyon süreçlerini ve dirençlerini değerlendirmektedir.

Liu, X., ve ark. (2015), "amorf, nanokristalin ve kristalin Ni-W alaşım kaplamanın korozyon davranışları" üzerine bir çalışma yapmıştır. Bu araştırma, farklı mikroyapılara sahip (amorf, nanokristal, kristalin) Ni-W alaşım kaplamaların korozyon performanslarını karşılaştırmalı olarak incelemektedir.

5.2. Literatürdeki Eksikler ve İhtiyaçlar

Elektrokimyasal ve çok katmanlı kaplama sistemleri üzerine yapılan çalışmalar, özellikle Ni esaslı yapılar üzerinde yoğunlaşmakla birlikte, mevcut literatürde belirli boşlukların devam ettiği görülmektedir. Güncel derlemelerde, çok katmanlı yapıların mikroyapısal özellikleri iyileştirdiği, mikro ve makro porozite kontrolü sağladığı, korozyon ve aşınma direncini artırdığı yönünde güçlü kanıtlar sunulmaktadır. Buna karşın, bu sistemlerin kapsamlı biçimde optimize edilmesi, mekanizma temelli ilişkilerin netleştirilmesi ve farklı uygulama alanlarında doğrulanması hâlen önemli bir araştırma gereksinimidir.

Öncelikle, katman sayısı, kalınlık, alan kullanım oranı ve ara yüz mikroyapısını belirleyen parametreler üzerine yürütülmüş sistematik çalışmaların sayısı oldukça azdır. PVD, PEO veya termal plazma gibi farklı biriktirme tekniklerinde her katman hem homojenlik hem de diferansiyel gerilim üretme potansiyeline sahiptir. Ancak literatürde laminer Ni-W sistemlerinde katman sayısı ile performans arasındaki ilişkiyi doğrudan ortaya koyan deneysel veriler yetersizdir. Katman sayısının artmasıyla birlikte difüzyona bağlı yapısal bozulma riskine dair ön bulgular bulunmakta, ancak nicel veriler sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle, katman kalınlığı, akım dalga formu ve modül sayısı gibi parametrelerin hem bağımsız hem de etkileşimli olarak incelendiği çok değişkenli optimizasyon çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Elektriksel parametreler açısından, farklı akım tiplerinin çeşitli kaplama sistemlerindeki korozyon, mekanik ve mikroyapısal etkileri incelenmiş olsa da çok katmanlı yapılarda bu etkileşimlerin nasıl geliştiğini açıklayan kapsamlı mekanik

modelleme ve karakterizasyon çalışmaları henüz yetersizdir. Örneğin, farklı dalga şekillerine sahip akımların difüzyon tabakası kalınlığı, tane yönelimi ve ara yüz geçirgenliği üzerindeki etkileri henüz nicel olarak modellenmemiştir. Bu eksiklik hem akademik araştırmalarda hem de endüstriyel uygulamalarda önemli bir belirsizlik alanı oluşturmaktadır.

Kaplama malzemesi çeşitliliği açısından da bazı eksiklikler bulunmaktadır. Ni–W, Ni–B ve Ni–W kompozit sistemleri geniş ölçüde araştırılmış olsa da nano seramik partiküller ve grafen gibi katı yağlayıcı karakterdeki katkı fazlarını içeren fonksiyonel sistemler yalnızca sınırlı sayıda çalışmada incelenmiştir. Bu durum, geleceğin yüzey mühendisliği gereksinimlerine uygun çok işlevli kaplama çözümlerinin geliştirilmesini yavaşlatmaktadır.

Karakterizasyon yöntemleri açısından da belirgin eksiklikler bulunmaktadır. Literatürdeki çalışmalar genellikle yalnızca temel elektrokimyasal testlerle (örneğin potansiyodinamik polarizasyon veya Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi, EIS) sınırlı kalmakta; bu verilerin in-situ izleme teknikleriyle karşılaştırılması nadiren yapılmaktadır. Oysa çok katmanlı kaplamaların performansını anlamak için yalnızca elektrokimyasal davranış değil, aynı zamanda mekanik dayanım ve yüzey bütünlüğü de kapsamlı biçimde değerlendirilmelidir. Mevcut çalışmalarda nanoindentasyon testleri ile sertlik ve elastik modül tayini, Rockwell Daimler-Benz yapışma testleri ile katmanlar arası bağ dayanımı ölçümleri ve ayrıntılı tribolojik analizler (örneğin aşınma izi morfolojisi, sürtünme katsayısı kararlılığı, aşınma mekanizması belirleme) yeterince raporlanmamıştır. Ayrıca katmanlar arası difüzyon, mekanik gerilim dağılımı ve çatlak ilerlemesi gibi kritik parametreler deneysel olarak doğrulanmadığından, bu eksiklikler kaplama sistemlerinin gerçek servis koşullarındaki davranışını öngörmeyi zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, in-service yani gerçek kullanım koşullarını simüle eden test ortamlarının standartlaştırılması ve çok katmanlı sistemlere uyarlanması büyük önem taşımaktadır.

Ayrıca, ileri mühendislik uygulamalarında (örneğin biyomedikal, havacılık, otomotiv) kullanılan yüzeylerin uzun dönem dayanımı, sıcaklık değişimine bağlı gerilim davranışları, çökme ve kabarcık oluşumu altındaki performansları da literatürde yeterince incelenmemiştir. Silan tabanlı VTMS, Ni–W kompozit veya mikron-altı TiC takviyeli Ni-W sistemleri gibi fonksiyonel kaplamalar çoğunlukla temel korozyon dirençleri açısından değerlendirilmiş; ancak yüksek sıcaklık, mekanik stres ve

biyolojik aktif ortamlardaki davranışlarına ilişkin veriler son derece sınırlıdır. Bu eksiklikler, disiplinler arası araştırmalar için önemli bir fırsat alanı oluşturmaktadır.

Diğer yandan, ekonomik ve çevresel boyutlar da literatürde yeterince ele alınmamıştır. Çok katmanlı kaplamalar genellikle maliyetli bileşenler (örneğin tungsten, alümina, h-BN) içerdiğinden, endüstriyel ölçekte sürdürülebilirlik, çevresel ayak izi ve proses verimliliği üzerine yapılan sistematik analizler oldukça kısıtlıdır. Bu durum, Ar-Ge projelerinde risk algısını ve yatırım kararlarını doğrudan etkileyen ekolojik ayak izi verilerinin eksikliğine işaret etmektedir.

Sonuç olarak, literatürdeki eksiklikler şu başlıklar altında özetlenebilir: Katman sayısı, akım tipi, süre ve katkı malzemesi konsantrasyonu gibi parametrelerin çok değişkenli analizlerini içeren deneysel çalışmalar sınırlıdır. Yeni nesil katkı malzemeleriyle geliştirilen fonksiyonel sistemler genellikle laboratuvar ölçeğinde kalmakta, uygulama düzeyine taşınamamaktadır.

- Yüksek sıcaklık, mekanik stres ve biyolojik ortam gibi servis koşullarında sistematik veri toplanması yetersizdir.
- Çok katmanlı kaplama teknolojilerinin sürdürülebilirliği, endüstriyel uygulanabilirliği ve maliyet etkinliği net biçimde tanımlanmamıştır.
- In-situ izleme, difüzyon ve ara yüz mekaniklerine ilişkin detaylı analizler hem deneysel hem de modelleme düzeyinde eksiktir.

Bu eksikliklerin giderilmesi, disiplinler arası araştırma yaklaşımlarının benimsenmesini zorunlu kılmaktadır. Özellikle çok katmanlı Ni-W sistemlerinde nanokompozit katkıların, pulslu akım tekniklerinin ve in-service simülasyonların bir arada değerlendirildiği kapsamlı çalışmalar, hem akademik literatüre önemli katkılar sağlayacak hem de sanayiye geçişi hızlandıracaktır. Ayrıca, yüksek katmanlı sistemlerin çevresel ve ekonomik etkilerinin analiz edilmesi, sürdürülebilir mühendislik açısından giderek daha kritik bir değerlendirme ölçütü haline gelecektir. Bu doğrultuda, literatürdeki açıkları hedefleyen çalışmaların gerçekleştirilmesi, “Çok Katmanlı Fonksiyonel Ni-W Kompozit Kaplamalar” projesinin teorik ve uygulamalı altyapısını daha da güçlendirecektir.

5.3. Bu Tezin Literatüre Katkı Potansiyeli

Mevcut literatürde Ni-W sistemleri üzerine çok sayıda araştırma yapılmış olsa da bu alaşımın katmanlı yapı formunda üretilmesi ve sistematik olarak incelenmesi bugüne

kadar gerçekleştirilmemiştir. Literatürdeki çalışmaların büyük bölümü tek katmanlı veya homojen Ni–W kaplamalarla sınırlı kalmış; katman sayısı, kalınlık geçişleri, akım rejimleri ve ara yüz etkileşimlerinin kaplama performansına etkileri derinlemesine araştırılmamıştır. Dolayısıyla, Ni–W alaşımının çok katmanlı bir sistem olarak ele alınması ve performans parametrelerinin bilimsel temelde ilişkilendirilmesi, bu tez çalışmasının literatüre kazandırdığı en temel yeniliklerden biridir.

Bu tez, Ni–W kaplama teknolojisini aşamalı, sistematik ve bütüncül bir yaklaşımla ele alarak literatürdeki önemli boşlukları gidermeyi hedeflemektedir. Çalışma üç temel aşamada yürütülmüştür:

Birinci aşamada, Ni–W kaplama banyosu Taguchi optimizasyon yöntemi kullanılarak sistematik biçimde optimize edilmiştir. Bu optimizasyon sürecinde akım yoğunluğu, sıcaklık, pH ve banyo bileşimi gibi temel parametreler istatistiksel olarak analiz edilerek en uygun kaplama koşulları belirlenmiştir. Böylece Ni–W kaplamanın mikroyapısal, korozyon ve mekanik özelliklerinin en yüksek düzeyde elde edilmesi sağlanmış ve daha sonraki çalışmalar için güvenilir bir referans oluşturulmuştur.

İkinci aşamada, optimize edilmiş Ni–W kaplama sistemi esas alınarak kompozit kaplamalar geliştirilmiştir. Bu kapsamda Al_2O_3 ve grafen gibi farklı katkı fazları kullanılmış; bu katkıların kaplama mikroyapısı ve sertlik davranışları üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu çalışmalar sonucunda, Ni–W kompozit sistemlerinde katkı fazı türü, dağılımı ve ara yüz etkileşimlerinin performansa etkisine ilişkin özgün veriler elde edilmiştir.

Üçüncü aşamada, hem saf Ni–W hem de kompozit kaplama çalışmalarından elde edilen bilgiler birleştirilerek katmanlı Ni–W kompozit kaplamalar üretilmiştir. Bu yaklaşım, farklı faz içeriğine, sertliğe veya iletkenliğe sahip tabakaların ardışık olarak biriktirilmesiyle elde edilmiş; katman kalınlığı, sayısı ve geçiş bölgeleri optimize edilerek mikroyapı bütünlüğü, aşınma dayanımı ve korozyon direnci çok katmanlı etkiyle iyileştirilmiştir. Literatürde Ni–W esaslı kaplamaların ilk kez bu kapsamda katmanlı olarak tasarlanması, çalışmanın özgün değerini belirleyen temel unsurdur.

Buna ek olarak, literatürde hâlen ideal katman sayısı, kalınlık oranı ve katmanlar arası etkileşimin nicel olarak incelendiği kapsamlı parametrik çalışmalar bulunmamaktadır. Bu tez, farklı katman kombinasyonlarını sistematik biçimde değerlendirerek mikroyapı–özellik ilişkilerini tanımlamayı ve bu eksikliği gidermeyi amaçlamaktadır.

Korozyon davranışı açısından, literatürdeki çalışmaların çoğu sınırlı sayıda elektrokimyasal testle değerlendirilmiştir. Bu tezde ise korozyon performansı, yalnızca temel polarizasyon analizleriyle değil, Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) verilerinin ayrıntılı incelenmesiyle ele alınmıştır. Özellikle Nyquist, Bode ve Tafel eğrilerinden elde edilen sonuçlar üzerinden kaplamaların korozyon mekanizması, yük transfer direnci, kapasitif davranışı ve ara yüz özellikleri ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir. Böylece, Ni–W tabanlı kaplamaların korozyon davranışı literatürdeki benzer çalışmalardan daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar mikroyapısal bulgularla ilişkilendirilmiştir.

Bu çalışmanın bir diğer katkı alanı, literatürde sıklıkla göz ardı edilen karakterizasyon çeşitliliği üzerinedir. Daha önceki çalışmalar çoğunlukla temel elektrokimyasal testlerle sınırlı kalmışken, bu tezde kapsamlı bir karakterizasyon yaklaşımı benimsenmiştir. Bu kapsamda, nanoindentasyon testleri ile sertlik ve elastik modül tayini, Rockwell Daimler-Benz yapışma testleri ile katmanlar arası bağ dayanımı ölçümleri ve ayrıntılı tribolojik testler ile aşınma mekanizmalarının belirlenmesi planlanmıştır. Böylece, çok katmanlı Ni–W sistemlerinin mekanik, tribolojik ve elektrokimyasal davranışları arasındaki ilişki bütüncül olarak ortaya konacaktır.

Son olarak, bu tez çalışması literatürde genellikle ihmal edilen sürdürülebilirlik perspektifini de yüzey mühendisliği alanına entegre etmektedir. Çok katmanlı nano-kompozit sistemlerin endüstriyel ölçeğe taşınabilmesi için üretim verimliliği, enerji tüketimi, banyo yeniden kullanım oranı ve çevresel ayak izi gibi unsurların değerlendirilmesi gereklidir. Bu çalışma, çevre dostu akım rejimlerinin ve enerji-verimlilik parametrelerinin etkilerini analiz ederek, sürdürülebilir kaplama teknolojilerine yönelik uygulanabilir bir model sunmayı amaçlamaktadır.

Sonuç olarak, bu tez çalışması Ni–W kaplamaların katmanlı formda ilk kez üretilmesi ve kapsamlı şekilde karakterize edilmesiyle literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmaktadır. Ayrıca, Taguchi optimizasyonu, kompozit sistem tasarımı, katmanlı mimari geliştirme ve çok yönlü karakterizasyon aşamalarının ardışık biçimde bütünleştirilmesiyle, yüzey mühendisliği alanına deneysel ve teorik açıdan güçlü, özgün ve sürdürülebilir bir katkı sunmaktadır.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında, nikel-volfram (Ni-W), nikel-volfram/grafen (Ni-W/Grafen) ve nikel-volfram/alümina (Ni-W/Al₂O₃) alaşım ve kompozit kaplamaların, çelik altlık (St37) üzerinde katmanlı yapıda ve farklı kombinasyonlarda biriktirilmesi; elde edilen kaplamaların aşınma ve korozyon davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Kaplamalar, akımlı kaplama (elektrodepozisyon) yöntemiyle gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında, akımlı kaplama yöntemiyle yüksek sertliğe sahip Ni-W kaplamaların üretimi gerçekleştirilmiş ve bu kapsamda Ni-W kaplama banyosunun optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyon süreci, Taguchi deneysel tasarım yöntemi kullanılarak yürütülmüştür.

İkinci aşamada, optimize edilen Ni-W alaşım kaplamalarına farklı konsantrasyonda grafen ve alümina ilavesiyle Ni-W/Grafen ve Ni-W/Al₂O₃ kompozit kaplamalar elde edilmiştir.

Son aşamada ise, bu üç farklı (Ni-W, Ni-W/Grafen, Ni-W/Al₂O₃) kaplama türünün çeşitli kombinasyonlarda ardışık olarak biriktirilmesiyle çok katmanlı (multilayer) yapılar oluşturulmuş ve bu kaplamaların mekanik, tribolojik ve korozyon özellikleri detaylı şekilde değerlendirilmiştir.

6.1. Altlığın Hazırlanması

Bu çalışmada altlık malzemesi olarak St37 çeliği kullanılmıştır. Altlıkların boyutları 25 × 30 × 5 mm şeklindedir. Kaplama öncesinde altlıklar birkaç yüzey hazırlama aşamasından geçirilmiştir. İlk olarak yüzeyler sırasıyla 240, 400, 800 ve 1200 numara SiC zımpara kâğıtları kullanılarak zımparalanmıştır. Ardından yüzeyler aseton ile temizlenmiş ve saf su ile durulanmıştır. Son aşamada, kaplama işleminden hemen önce, %10 hacimsel oranında nitrik asit içeren dağlayıcı çözelti (10 ml HNO₃ ve 90 ml saf su) içerisinde 10 saniye süreyle dağlama işlemi uygulanmıştır. Bu işlem, yüzeydeki oksit tabakalarının giderilmesi ve yüzeyin aktif hâle getirilmesi amacıyla yapılmıştır.

6.2. Kaplama Banyosu Şartları

Ni-W, Ni-W/Grafen ve Ni-W/Al₂O₃ kaplama banyolarında; akım yoğunluğu, iş çevrimi (duty cycle), sıcaklık, karıştırma hızı ve pH değeri sabit tutulmuştur. Bu sabit parametreler Tablo 6.1’de verilmiştir. Kaplamalar, akımlı kaplama (elektrodepozisyon) yönteminin bir türü olan darbeli akım (pulsed current) yöntemi ile üretilmiştir.

Tablo 6.1. Uygulanan sabit kaplama banyosu parametreleri.

Parametre	Değer
Sıcaklık (°C)	70
Karıştırma Hızı (rpm)	200
pH	7
Süre (dakika)	45
Akım Yoğunluğu (A/dm ²)	13
İş Çevrimi	50ms-50ms
Frekans (Hz)	10

6.3. Taguchi Optimizasyon Yöntemiyle Ni-W Kaplama Banyosunun Optimizasyonu

Ni-W kaplama banyosunun temel bileşenleri; nikel sülfat (NiSO₄·6H₂O) ve sodyum volfram (Na₂WO₄·2H₂O) bileşikleridir. Nikel sülfat, kaplama sırasında matrisi oluşturan nikel metalinin ana iyon kaynağıdır. Sodyum volfram ise volfram iyonlarını sağlayarak, kaplama yapısına volframın entegre edilmesini sağlar ve bu sayede kaplamanın sertliğini, aşınma direncini ve yüksek sıcaklık stabilitesini artırır.

Buna ek olarak, banyoya çeşitli yardımcı kimyasallar da ilave edilmiştir. Sodyum bromür (NaBr), genellikle çözelti içindeki elektriksel iletkenliği artırmak ve kaplama yüzeyinde düzgün bir iyon dağılımı sağlamak amacıyla kullanılır. Ayrıca, bromür iyonları, kaplama yüzeyinde oluşabilecek pasifleşme tabakasını bastırarak metal iyonlarının daha etkili indirgenmesine katkı sağlar. Bu durum, daha düzgün ve homojen kaplamaların elde edilmesini mümkün kılar.

Sodyum sitrat ($\text{Na}_3\text{C}_5\text{H}_5\text{O}_7$) ise bir şelatlayıcı (kompleks oluşturu) ajan olarak görev yapar. Metal iyonlarının çözeltide kontrol altında tutulmasını sağlar; özellikle nikel ve volfram iyonlarının kontrolsüz çökmesini önleyerek stabil bir kaplama banyosu oluşturur. Aynı zamanda pH dalgalanmalarını tamponlayıcı etkisi sayesinde çözeltinin kararlılığını artırır. Bu durum, kaplamanın tane boyutunu ve morfolojisini doğrudan etkileyerek, mikro yapının daha kontrollü gelişmesini sağlar.

Amonyum klorür (NH_4Cl), kaplama reaksiyonunu hızlandıran bir iletkenlik artırıcı ve tampon ajan olarak işlev görür. Aynı zamanda çözeltideki serbest H^+ iyonlarının konsantrasyonunu düzenleyerek pH dengesini sağlar ve yüzey aktif özellik göstererek kaplama yüzeyinin temiz ve homojen kalmasına yardımcı olur.

Bu bileşenlerin miktarları, kaplamanın sertlik, yapışma, yüzey pürüzlülüğü ve mikroyapı özellikleri üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Dolayısıyla, banyo formülasyonundaki her bir bileşenin konsantrasyonu dikkatle optimize edilmeli; istenen performans özelliklerine ulaşmak için etkileşimleri birlikte değerlendirilmelidir.

Kaplama banyosunun optimizasyonu amacıyla, her bir bileşene ait dört farklı konsantrasyon seviyesi belirlenmiştir. Tablo 6.2’de kullanılan kimyasallar ve bunlara ait konsantrasyon seviyeleri verilmiştir. Taguchi yöntemi, bu tablo temel alınarak uygulanmış olup, optimizasyon hedefi en yüksek sertlik değerine sahip kaplamayı elde etmektir.

Bu çalışmada, Ni-W kaplamaların sertlik değerlerinin optimize edilmesi amacıyla Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, ortogonal deney tasarımı aracılığıyla deney sayısını önemli ölçüde azaltmaktadır. Çalışmada, beş tasarım faktörünün her biri için dört farklı seviye belirlenmiş ve buna uygun olarak L16 ortogonal dizisi tercih edilmiştir. Faktörler ve seviyeleri Tablo 6.2’de verilmiştir. Serbestlik derecesi, denklem 6.1’de hesaplanmaktadır:

$$\text{Serbestlik derecesi} = \text{Tasarım faktörleri} \times (\text{Seviye sayısı}-1) \quad (6.1)$$

Denklem 6.1’e göre bu çalışmada serbestlik derecesi 15 olarak belirlenmiştir. Bu nedenle L16 ortogonal dizi tercih edilmiş, tam faktöriyel tasarımda gerekebilecek 1024 deney yerine yalnızca 16 deney gerçekleştirilmiştir.

Tablo 6.2. Ni-W kaplama banyosu bileşenleri ve konsantrasyon seviyeleri.

Seviye	A (Nikel Sülfat)	B (Sodyum Volfram)	C (Sodyum Bromür)	D (Sodyum Sitrat)	E (Amonyum Klorit)
1	9	20	9	100	15
2	12	30	12	125	20
3	15	40	15	150	25
4	18	50	18	175	30

Söz konusu 16 farklı kaplamaya ait banyo bileşenleri Tablo 6.3'te verilmiştir. Taguchi yönteminde deney tasarımını değerlendirmek amacıyla kullanılan en önemli istatistiksel parametrelerden biri ****sinyal-gürültü oranı (S/N oranı) ****dır. Bu oran, ölçüm sisteminde sinyalin (istenen yanıt) gürültüye (istenmeyen değişkenlik) göre baskınlığını ifade eder. Çalışmada hedef, daha yüksek performans değerleri elde etmek olduğundan, "daha büyük daha iyidir" (Larger-is-Better) kriteri esas alınmıştır. Bu duruma uygun olarak sinyal-gürültü oranı aşağıdaki Denklem 6.2 ile hesaplanmaktadır:

$$SNR_{LB} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (6.2)$$

Burada y_i her bir deneyden elde edilen performans değerini, n ise deney tekrar sayısını ifade etmektedir. Bu formül, düşük varyansla birlikte yüksek ortalama yanıt veren tasarımların tercih edilmesini sağlar. Böylece hem ortalama performansın yüksekliği hem de ölçüm istikrarı birlikte değerlendirilmiş olur.

Tablo 6.3. L16 dizisi ile belirlenen kaplama banyo kombinasyonları.

Test Sayısı (Kaplama)	(Nikel Sülfat)	(Sodyum Volfram)	(Sodyum Bromür)	(Sodyum Sitrat)	(Amonyum Klorit)
1	9	20	9	100	15
2	9	30	12	125	20
3	9	40	15	150	25
4	9	50	18	175	30

Tablo 6.3. (Devamı) L16 dizisi ile belirlenen kaplama banyo kombinasyonları.

Test Sayısı (Kaplama)	(Nikel Sülfat)	(Sodyum Volfram)	(Sodyum Bromür)	(Sodyum Sitrat)	(Amonyum Klorit)
5	12	20	12	150	30
6	12	30	9	175	25
7	12	40	18	100	20
8	12	50	15	125	15
9	15	20	15	175	20
10	15	30	18	150	15
11	15	40	9	125	30
12	15	50	12	100	25
13	18	20	18	125	25
14	18	30	15	100	30
15	18	40	12	175	15
16	18	50	9	150	20

Varyans analizi (ANOVA), deney verilerinin istatistiksel anlamlılığını değerlendirmek ve tasarım faktörlerinin sonuç üzerindeki etkilerini yüzdesel olarak belirlemek amacıyla kullanılan güçlü bir analiz yöntemidir. Bu çalışmada, tüm çıktı parametrelerine ilişkin varyans analizleri aşağıdaki denklemler temel alınarak gerçekleştirilmiştir:

$$SSX = N_X \sum (\bar{x}_{Xj} - \bar{x}_{ij})^2 \quad (6.3)$$

$$SST = N_X \sum (x_{ij} - \bar{x}_{ij})^2 \quad (6.4)$$

$$SSE = SST - \sum SSX \quad (6.5)$$

$$VX = \frac{SSX}{DFX} \quad (6.6)$$

$$CRX = \frac{SSX}{SST} \quad (6.7)$$

Burada:

SSX: X faktörüne ait kareler toplamı

SST: Toplam kareler toplamı (tüm varyasyon)

SSE: Hata kareler toplamı

VX: X faktörüne ait varyans

CRX: X faktörünün toplam varyans içindeki katkı oranı olarak tanımlanmaktadır.

6.4. Grafen ve Al₂O₃ Takviyeli Ni-W Kompozit Kaplamalar

Ni-W kaplama banyosunun optimum bileşim ve işlem parametreleri belirlendikten sonra, kaplama özelliklerini daha da geliştirmek amacıyla banyoya farklı oranlarda grafen ve alümina (Al₂O₃) takviyeleri ilave edilerek iki farklı türde kompozit kaplama üretilmiştir. Bu kapsamda, Ni-W/Grafen ve Ni-W/Al₂O₃ kompozit kaplamalar, Ni-W matris fazı içerisinde sırasıyla karbon temelli 2 boyutlu nano-yapılar ve seramik mikro partiküller içeren kompozit sistemler olarak tasarlanmıştır.

Bu çalışmada, takviye ilavesine rağmen banyo parametreleri değiştirilmemiştir; sıcaklık, karıştırma hızı, pH, akım yoğunluğu ve iş çevrimi (duty cycle) gibi koşullar sabit tutulmuştur (Tablo 6.1). Böylece katkı malzemelerinin etkisi yalnızca yapısal ve fonksiyonel özellikler üzerinden değerlendirilmeye çalışılmıştır.

Kompozit kaplamaların üretiminde en önemli problemlerden biri, katı partiküllerin banyo içerisinde homojen olarak süspanse hâde tutulabilmesidir. Bu amaçla, her bir kompozit banyo sistemine yüzey aktif madde (surfactant) olarak sodyum didodesil sülfat (SDS) eklenmiştir. SDS, partiküllerin aglomerasyon eğilimini azaltmakta ve kaplama süresi boyunca homojen bir dağılım elde edilmesini sağlamaktadır. Özellikle grafen gibi düşük yoğunluklu, geniş yüzey alanına sahip nano yapılar, çökelmeye ve kümelenmeye eğilimlidir. SDS varlığı, bu parçacıkların yüzey yükünü dengeleyerek kaplama banyosunda dağılmalarını kolaylaştırır.

Her bir takviye oranı için hazırlanan banyolarda, katkı malzemeleri ilave edilmeden önce çözeltiye ultrasonik karıştırma yöntemiyle 1 saat süreyle dispersiyon uygulanmıştır. Bu işlem, yüksek frekanslı ses dalgaları kullanılarak partiküllerin

homojen dağılımını sağlamakta ve özellikle nano yapıları katkıların yüzeyde kümelenmeden matris fazına entegre olmasına katkıda bulunmaktadır. Karıştırma süresi tüm deneylerde sabit tutularak karşılaştırmalı analizler için deneysel bütünlük sağlanmıştır.

Deneysel çalışmada kullanılan kompozit banyo içerikleri ve uygulanan hazırlık parametreleri Tablo 6.4'te sunulmuştur. Farklı katkı miktarları, kaplama yapısının mikroyapısal bütünlüğü, sertlik, aşınma direnci ve yüzey kalitesi üzerindeki etkilerini gözlemleyebilmek amacıyla belirlenmiştir.

Tablo 6.4. Ni-W/Grafen ve Ni-W/Al₂O₃ kompozit kaplama deney parametreleri.

Numune Kodu	Takviye Malzemesi	Konsantrasyon	SDS Miktarı (mg/L)
50 mg/L	Grafen	50 mg/L	100
100 mg/L	Grafen	100 mg/L	100
150 mg/L	Grafen	150 mg/L	100
200 mg/L	Grafen	200 mg/L	100
5 g/L	Al ₂ O ₃	5 g/L	100
50 mg/L	Grafen	50 mg/L	100
100 mg/L	Grafen	100 mg/L	100
150 mg/L	Grafen	150 mg/L	100

6.5. Kaplamaların Karakterizasyonu

Bu çalışmada üretilen Ni-W, Ni-W/Grafen ve Ni-W/Al₂O₃ alaşım ve kompozit kaplamaların yapısal, morfolojik, mekanik ve tribolojik özelliklerini belirlemek amacıyla kapsamlı karakterizasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Kaplamaların yüzey morfolojisi ve topografyası, JEOL JSM-6060LV model taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiş; yüzeydeki nodüler yapılar, partikül dağılımı ve yüzey bütünlüğü detaylı biçimde değerlendirilmiştir. Aynı cihaz üzerinde yer alan enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) ataçmanı ile kaplamaların kimyasal bileşimi analiz edilerek

matris elementleri ve takviye fazların dağılımları belirlenmiştir. Daha yüksek çözünürlüklü görüntüleme ve ince morfolojik detayların tespiti için ise FEI Quanta FEG 450 model alan emisyonlu SEM (FE-SEM) kullanılmıştır.

Kaplamaların kristal yapısını ve faz bileşenlerini belirlemek amacıyla X-ışını difraksiyonu (XRD) analizi yapılmıştır. Bu analiz, Cu-K α X-ışını kaynağı ($\lambda = 1.5406$ Å) içeren Rigaku D/MAX 2000 difraktometresi ile yapılmıştır. Taramalar, 10°–80° 2 θ aralığında, 2°/dk tarama hızı, 30 kV tüp gerilimi ve 30 mA tüp akımı altında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen kırınım desenleri kullanılarak faz tayini yapılmış, kristal yapı analizi gerçekleştirilmiş ve takviye malzemelerinin kristalin fazlara etkisi değerlendirilmiştir.

Grafen ve Al₂O₃ takviyelerinin çözelti içerisindeki dispersiyon kararlılığını belirlemek amacıyla zeta potansiyel ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler, Malvern Zetasizer Nano-SZ cihazı ile gerçekleştirilmiş ve partiküllerin elektrostatik stabiliteleri hakkında nicel veriler elde edilmiştir. Bu sayede, partiküllerin kaplama banyosu içindeki dağılılabirliği değerlendirilmiştir.

Kaplamaların mekanik davranışları, mikro ve nano düzeyde sertlik testleriyle karakterize edilmiştir. Mikrosertlik ölçümleri, Leica WHMT marka cihazda Vickers tipi elmas uç kullanılarak, her numune üzerinde 10 gram yük ve 15 saniye bekleme süresi ile gerçekleştirilmiştir. Beş farklı noktadan alınan ölçümlerle ortalama sertlik değeri ve standart sapma hesaplanmıştır. Yüzeye daha hassas nüfuz eden ve mekanik özellikleri mikroskobik ölçekte değerlendiren nanoindentasyon testleri ise Anton Paar NHT³ nanoindentasyon cihazı ile yapılmıştır. Bu testlerde, Berkovich tipi üçgen piramidal uç, 10 mN yük ve 15 saniyelik bekleme süresi ile kullanılmış; her numuneden beş ölçüm alınarak sonuçlar istatistiksel olarak değerlendirilmiştir.

Kaplama ve altlık arasındaki bağ dayanımını incelemek üzere Daimler-Benz Rockwell-C (HRC) yapışma testi uygulanmıştır. Bu yöntemde kaplamaların yüzeyinde konik elmas uç ile 10 kg ön yükleme, 150 kg toplam yük uygulanır ve oluşan izdeki çatlaklara ve kaplama soyulmalarına bakılır. Test sonucunda, kaplama yüzeyinde meydana gelen çatlaklar, soyulmalar ve deformasyonlar incelenerek yapışma performansı değerlendirilmiştir.

Kaplamaların tribolojik performansı, CSM Instruments TRB model tribometre cihazı ile, oda sıcaklığında ve Ball-on-Disc yöntemiyle incelenmiştir. Deneyler kuru

ortamda, 5 N uygulama yükü, 500 m kayma mesafesi, 10 cm/s karşı yüzey hızı ile lineer sürtünme modu kullanılarak yapılmıştır. Aşındırıcı yüzey olarak 10 mm çapında Al_2O_3 bilye kullanılmıştır. Her numune için üç tekrar yapılmış; test sırasında sürtünme katsayısı-zaman grafikleri kaydedilmiş ve aşınma hızı hesaplanmıştır. Aşınma sonrası oluşan yüzey morfolojisi tekrar SEM ile analiz edilmiştir. Ayrıca aşınma izlerinin hacimsel analizi KLA Tencor P6 marka profilometre cihazı ile yapılmıştır.

Son olarak, kaplamaların korozyon davranışları elektrokimyasal yöntemlerle incelenmiştir. Elektrokimyasal karakterizasyon öncesinde sistemin denge potansiyelini belirlemek amacıyla Açık Devre Potansiyeli (OCP) ölçümleri gerçekleştirilmiş ve bu ölçümler 600 saniye (10 dakika) süreyle izlenmiştir. Korozyon direnci, potansiyodinamik polarizasyon (Tafel) eğrileri ve Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) analizleri ile değerlendirilmiştir. Polarizasyon eğrilerinden korozyon potansiyeli (E_{corr}) ve korozyon akım yoğunluğu (I_{corr}) hesaplanmış, EIS ölçümleri ise OCP sonucunda elde edilen kararlı potansiyellerde gerçekleştirilmiştir.

Tüm elektrokimyasal testler, üç elektrotlu klasik hücre konfigürasyonunda yürütülmüştür. Referans elektrot olarak +0,242 V potansiyele sahip Doymuş Kalomel Elektrot (SCE) kullanılmış, bu elektrot Standart Hidrojen Elektrotu'na (SHE) göre kalibre edilmiştir. Karşı elektrot olarak platin tel tercih edilmiş, çalışma elektrodu ise 0,28 cm² aktif yüzey alanı açığa çıkarılan kaplama numunelerinden oluşturulmuştur. Polarizasyon testleri, 0,3 mV/s sabit tarama hızı ile bir GAMRY potansiyostat cihazında gerçekleştirilmiştir. EIS ölçümleri ise 1 mV genlikli küçük sinüzoidal AC pertürbasyon ile 100 kHz–1 Hz. aralığında, Gamry Reference 600 potansiyostat kullanılarak yapılmıştır. Her ölçümden önce OCP testleri tekrarlanmış, kararlı potansiyele ulaşıldıktan sonra empedans verileri kaydedilmiştir.

Elde edilen veriler, kaplamaların şarj transfer direnci (R_{ct}), korozyon mekanizmaları ve koruyuculuk performansı hakkında ayrıntılı bilgi sağlamış, böylece farklı kaplama sistemlerinin korozyon dayanımları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Kaplamalara uygulanan karakterizasyon analizleri, kullanılan cihazların marka/model bilgileri ve test amaçlarıyla birlikte Tablo 6.5'te sunulmuştur.

Tablo 6.5. Kullanılan cihazlar, marka/model bilgileri ve analiz amaçları.

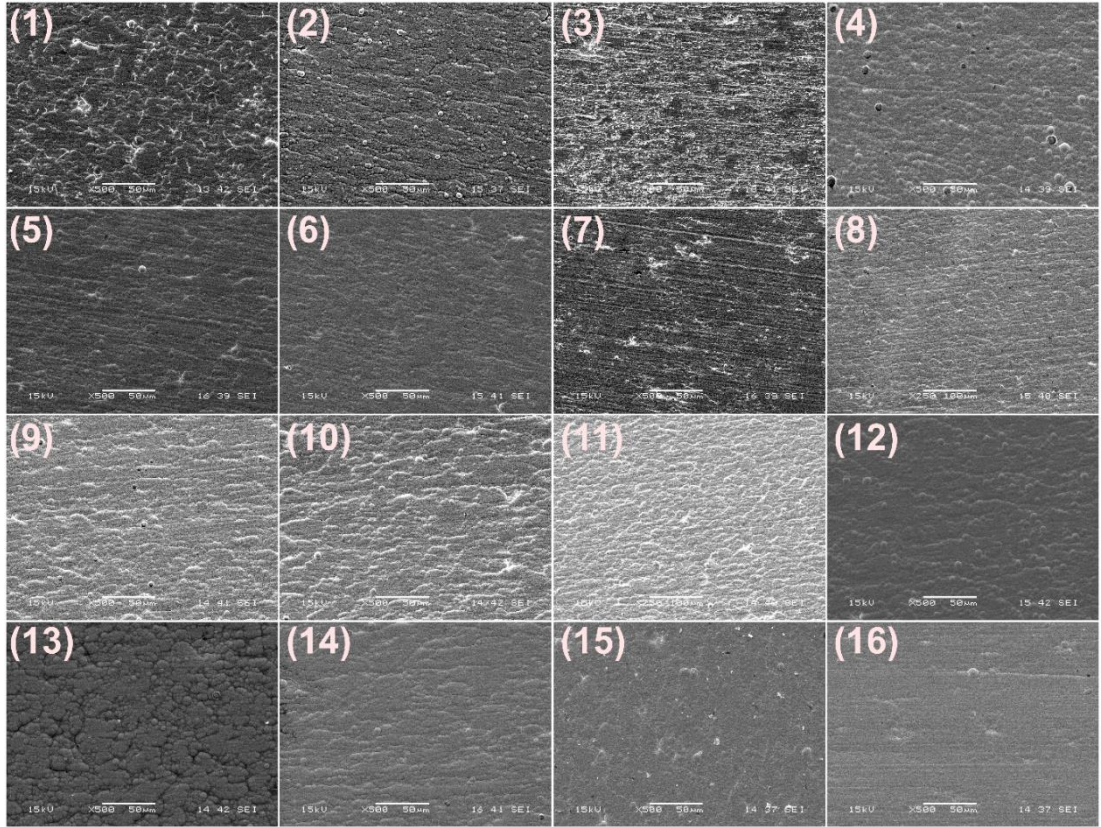
Test Türü	Cihaz ve Model	Kullanım amacı
SEM-EDS	JEOL JSM-6060LV + EDS ataçmanı	Yüzey morfolojisi ve elementel bileşen analizi
FESEM	FEI Quanta FEG 450	Yüksek çözünürlüklü morfolojik detayların incelenmesi
XRD	Rigaku D/MAX 2000 (Cu-K α , $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$)	Kristal yapı ve faz analizi
Zeta Potansiyel Ölçümü	Malvern Zetasizer (Nano-SZ)	Takviye partiküllerinin dispersiyon kararlılığının belirlenmesi
Mikrosertlik	Leica WHMT (Vickers uç)	Kaplamaların yüzey sertliğinin ölçülmesi
Nanosertlik	Anton Paar NHT ³ (Berkovich uç)	Hassas yüzey sertliği ve elastik modül tayini
Yapışma Testi	Daimler-Benz Rockwell-C	Kaplama ve altlık arasındaki yapışma dayanımının değerlendirilmesi
Tribolojik Test	CSM Instruments TRB	Sürtünme katsayısı ve aşınma davranışının belirlenmesi
Profilometre	KLA Tencor-P6 Profilometre	Aşınma izlerinin hacimsel ölçümü ve yüzey topografyasının belirlenmesi
Korozyon Testleri (OCP, Tafel, EIS)	Gamry Reference 600 Potansiyostat	Kaplamaların elektrokimyasal davranışının ve korozyon direncinin değerlendirilmesi

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

7.1. Taguchi Metodu Yöntemiyle Ni-W Kaplamaların Optimizasyonu

Bu bölümde, Taguchi yöntemi ile optimize edilen Ni-W kaplamaların mikroyapısal, kompozisyonel ve mekanik özellikleri kapsamlı bir şekilde analiz edilmiş; elde edilen veriler ilgili şekil ve tablolarla birlikte değerlendirilmiştir.

Şekil 7.1’de L16 ortogonal diziye göre hazırlanan 16 farklı Ni-W kaplamanın 500X büyütmeli yüzey SEM görüntüleri yer almaktadır.

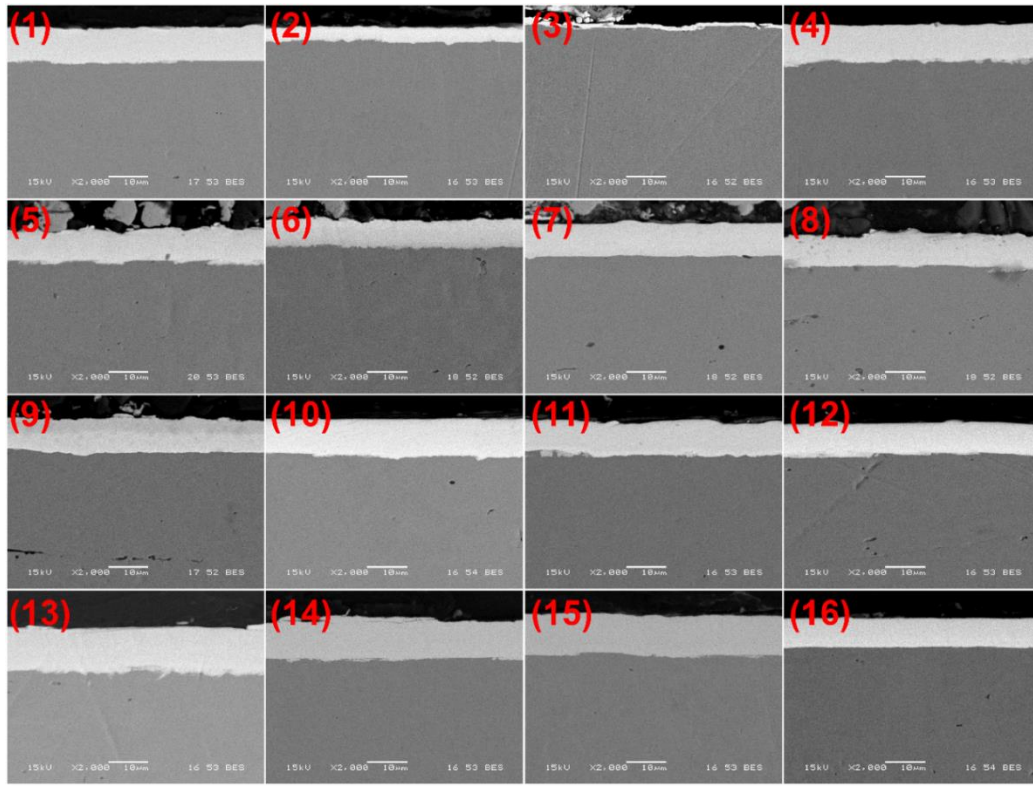


Şekil 7.1. L16 ortogonal diziye göre üretilen 16 adet kaplamanın 500X büyütmedeki yüzey SEM görüntüleri.

Görseller incelendiğinde, kaplamalar genel olarak nodüler bir morfoloji sergilemekte ve nodül yoğunluğu ile büyüklüğünün deney koşullarına bağlı olarak değiştiği gözlemlenmektedir. Kaplamaların morfolojileri, nodüler adaların büyüklükleri, nodül adaları içerisindeki nodüllerin büyüklükleri, nodül sınırlarındaki derinlikler ve genel

pürüzlülük değişkenlik göstermiştir. Örneğin, 1, 10 ve 11 numaralı numunelerde daha büyük ve geniş nodül adaları dikkat çekerken; 3, 7 ve 15 numaralı kaplamalarda yüzeyin daha dağınık, net olmayan nodüler vesınırlar gözlemlenmiştir. 2, 5, 8, 9 ve 14 numaralı numunelerde ise taneler belirli bir hat boyunca dizilmiştir. 6, ve 16 numaralı numunelerde diğer numunelere kıyasla daha pürürzsüz bir yüzeye sahiptir. 4 ve 12 nmralınumuner ise nodülerin daha ince taneli ve homojen olduğu görülmektedir. Tüm bu farklılar kaplama banyosu bileşenlerinden kaynaklanmaktadır.

Şekil 7.2’de L16 ortogonal diziye göre hazırlanan 16 farklı Ni-W kaplamanın 2000X büyütmeli kesit SEM görüntüleri verilmiştir.

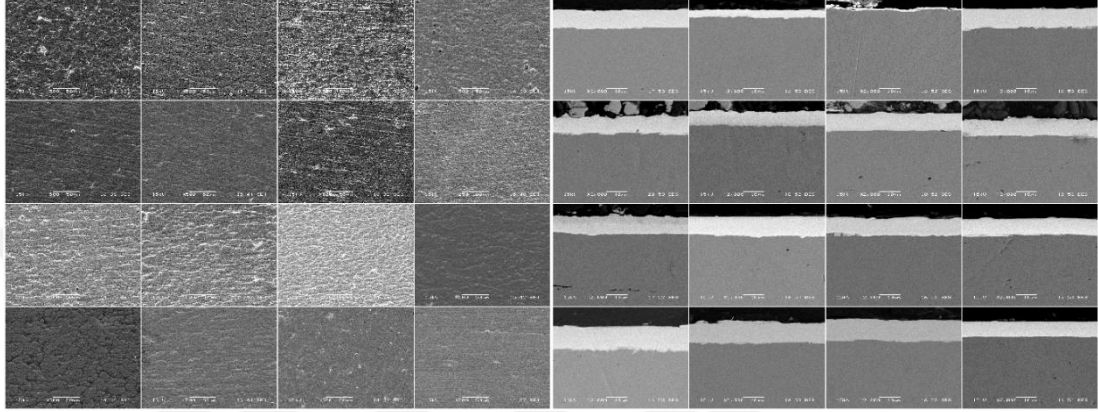


Şekil 7.2. L16 ortogonal diziye göre üretilen 16 adet kaplamanın 2000X büyütmedeki kesit SEM görüntüleri.

Kesit görüntüleri incelendiğinde; kaplamaların kalınlıklarının farklılaştığı görülmektedir. En düşük kaplama kalınlığı 2,1 μm ile 3 numaralı numunede görülürken en yüksek kaplama kalınlığı ise 10,1 μm 15 numaralı numunede görülmüştür. Genel olarak kaplama kalınlıkları 7-9 μm arasında değişkenlik göstermiştir. Kesit görüntülerinde altlık ile kaplama arayüzeyine bakıldığında kaplamaların altlığa tutunmalarında bir problem görülmemiştir. 3, 5, 6 ve 8 numaralı

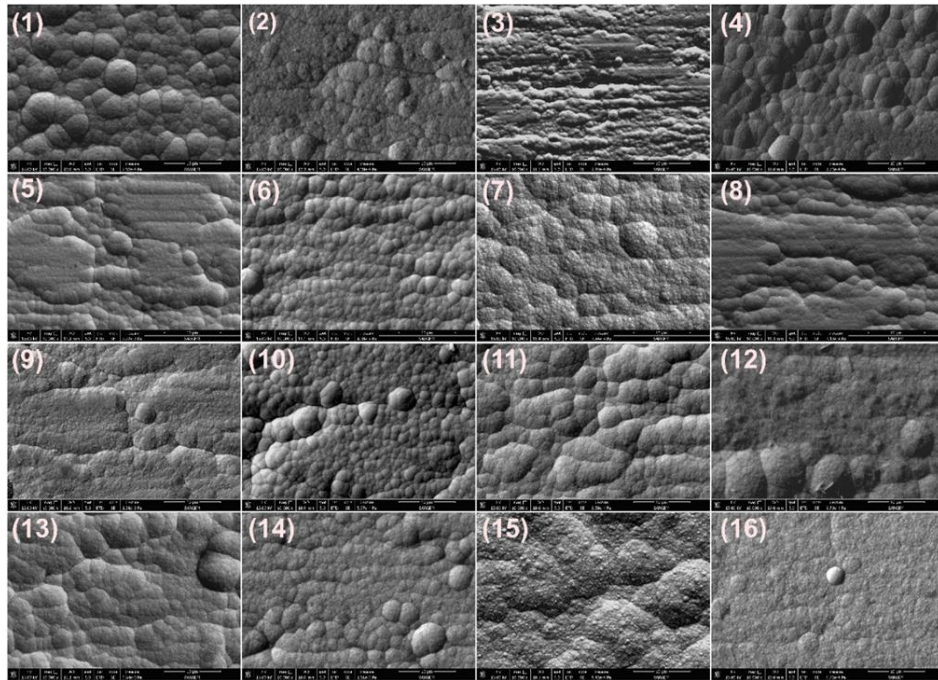
numunelerde kaplama kalınlığında sınırlı mikroyapısal süreksizlikler gözlenmiş olsa da diğer numunelerde homojen bir kaplama alınlığı görülmüştür.

Şekil 7.3'te ise 16 numunenin yüzey ve kesit görüntüleri karşılaştırılmalı bir şekilde verilmiştir. Yüzeyden ince taneli görülen numunelerin kalınlıkları homojen olduğu görülmektedir. Görece daha pürüzlü bir yüzeye sahip numunelerin kalınlığında ise mikroyapısal süreksizlikler açıkça görülmektedir.



Şekil 7.3. L16 ortogonal diziye göre üretilen 16 adet kaplamanın yüzey ve kesit SEM görüntüleri.

Şekil 7.4'te yer alan 16 kaplamaya ait 10000X büyütmeli FESEM görüntüleri, yüzey morfolojisini daha ayrıntılı göstermektedir.



Şekil 7.4. L16 ortogonal diziye göre üretilen 16 adet kaplamanın 10000X büyütmedeki yüzey FESEM görüntüleri.

Burada nano boyutlu tanelerin bir araya gelerek mikro boyutta nodüler yapılar oluşturduğu görülmektedir. Nodül adaları, nodül sınırları ve yüzey dalgalanmalarındaki farklılar daha da belirgin halde görülmektedir. Özellikle 15 numaralı kaplamada taneler arasında birleşmelerin adacıklar şeklinde değil de tek bir ada halinde olduğu görülmektedir. Genel olarak yüzeyin gözeneksiz olduğu ancak yer yer nodül ada sınırlarında lokal boşluklara denk gelinmiştir. Bu durum kaplama kalınlığının ve büyüme mekanizmasının ile iç yapıda oluşabilecek gerilimlerin bir sonucu olabilir.

Tablo 7.1’de L16 ortogonal diziye göre üretilmiş 16 adet kaplamanın EDS analizleri, kalınlıkları ve sertlikleri karşılaştırılmalı bir şekilde verilmiştir.

Tablo 7.1. L16 ortogonal diziye göre üretilen 16 adet kaplamanın EDS analizi, kalınlık ve sertlik ölçümleri sonuçları.

Numune	Ni Ağırlıkça %	W Ağırlıkça %	Kalınlık (μm)	Sertlik (HV)
1	66	34	8,6	704
2	60	40	3,9	824
3	60	40	2,1	703
4	70	30	8,9	628
5	65	35	7,0	594
6	60	40	7,2	698
7	64	36	8,1	701
8	65	35	8,6	656
9	73	27	8,4	671
10	76	24	9,2	688
11	73	27	8,7	811
12	69	31	7,8	677
13	71	29	7,3	613
14	74	26	9,2	666
15	84	16	10,1	687
16	64	36	7,3	735

EDS analizlerine göre, nikel ve volfram elementleri arasında belirgin kompozisyon farklılıkları gözlemlenmiştir. Kaplamalardaki nikel (Ni) oranı ağırlıkça %60-84 arasında değişkenlik gösterirken volfram (W) oranı ise ve %16-40 arasında tespit edilmiştir. En sert kaplamalar genellikle %35-40 volfram içeren örneklerde elde edilmiştir. Bununla birlikte W'un oranı arttıkça kaplama kalınlığında bir düşüş görülmüştür. Bu da W oranının sertlik ile doğru orantılı, kaplama kalınlığı ile ters orantılı olduğunu göstermiştir. Yine W oranının yüzey yapısı ve mikro/nano morfoloji ile ilişkisi kurulabilir. Yüksek volfram içerikli kaplamaların daha homojen yapı oluşturduğunu görülmektedir. Bu durum hem yüksek sertlik hem de yüksek kaplama kalınlığı için optimum bir W/Ni oranının gerektiğini göstermiştir.

7.1.1. Sinyal-Gürültü sonuçları

Bu deneysel çalışma, optimum kaplama kalınlığını ve sertliğini belirlemek için Taguchi yöntemini kullanmıştır. Çalışmada kullanılan L16 ortogonal dizi, deney sonuçları ve sırasıyla kalınlık ve sertlik için SNR (sinyal-gürültü oranı) değerleri Tablo 7.2'de gösterilmektedir.

Tablo 7.2. L16 ortogonal dizisinin özeti.

Deney Numarası	A (g/L)	B (g/L)	C (g/L)	D (g/L)	E (g/L)	Kalınlık (µm)	SNR Kalınlık	Sertlik (HV)	SNR Sertlik
1	9	20	9	100	15	8.6	18.69	704	56.95
2	9	30	12	125	20	3.9	11.82	824	58.32
3	9	40	15	150	25	2.1	6.44	703	56.94
4	9	50	18	175	30	8.9	18.99	628	55.96
5	12	20	12	150	30	7	16.90	594	55.48
6	12	30	9	175	25	7.2	17.15	698	56.88
7	12	40	18	100	20	8.1	18.17	701	56.91
8	12	50	15	125	15	8.6	18.69	656	56.34
9	15	20	15	175	20	8.4	18.49	671	56.53
10	15	30	18	150	15	9.2	19.28	688	56.75
11	15	40	9	125	30	8.7	18.80	811	58.18
12	15	50	12	100	25	7.8	17.84	677	56.61

Tablo 7.2. (Devamı) L16 ortogonal dizisinin özeti.

Deney Numarası	A (g/L)	B (g/L)	C (g/L)	D (g/L)	E (g/L)	Kalınlık (μm)	SNR Kalınlık	Sertlik (HV)	SNR Sertlik
13	18	20	18	125	25	7.3	17.27	613	55.75
14	18	30	15	100	30	9.2	19.28	666	56.47
15	18	40	12	175	15	10.1	20.08	687	56.74
16	18	50	9	150	20	7.3	17.27	735	57.32

Bu çalışmada hem kalınlık hem de sertlik için yüksek değerler hedeflendiğinden, analiz en büyük-en iyi varsayımına göre gerçekleştirilmiştir. Her bir seviyede tasarım faktörlerinin sinyal-gürültü oranı ortalama değerleri Tablo 7.3 ve Tablo 7.4'te listelenmiştir. Bu tablolarda her bir faktör için delta değeri, sinyal-gürültü oranının maksimum ve minimum değerleri arasındaki farktır.

Tablo 7.3. Her seviyede kalınlık için sinyal-gürültü oranı ortalamaları.

Seviye	(A) Nikel Sülfat	(B) Sodyum Volfram	(C) Sodyum Bromür	(D) Sodyum Sitrat	(E) Amonyum Klorit
1	13.99	17.84	17.97	18.49	19.19
2	17.73	16.88	16.66	16.64	16.44
3	18.60	15.87	15.72	14.97	14.67
4	18.47	18.20	18.42	18.68	18.49
Delta	4.61	2.32	2.70	3.70	4.51
Sıralama	1	5	4	3	2

Sinyal-gürültü oranı analizlerine göre (Tablo 7.3), kaplama kalınlığı üzerinde en belirgin etkiye sahip parametrenin nikel sülfat (A) olduğu saptanmıştır. Bunu amonyum klorür (E) parametresi takip etmektedir. Özellikle A3 seviyesi (15 g/L $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) kullanıldığında, kaplama kalınlığı anlamlı şekilde artmıştır. Bu bulgu, Ni^{2+} iyonlarının hem çözelti içi aktivitesini hem de katot yüzeyinde oluşan indirgeme hızını doğrudan etkileyen en temel iyonik tür olduğunu göstermektedir. Nikel sülfat, kaplama banyosunda yalnızca nikel kaynağı olarak değil, aynı zamanda çözeltinin genel iletkenliğini sağlayan ana tuzdur. Konsantrasyonunun artırılması, katodik

reaksiyon kinetiğini hızlandırır, böylece nikel iyonları daha hızlı indirgenir ve daha kalın kaplamalar oluşur. Ayrıca, yüksek Ni^{2+} seviyeleri Ni-W alaşımında Ni matrisinin baskınlığını artırarak volframın birlikte çökme eğilimini de olumlu yönde etkileyebilir.

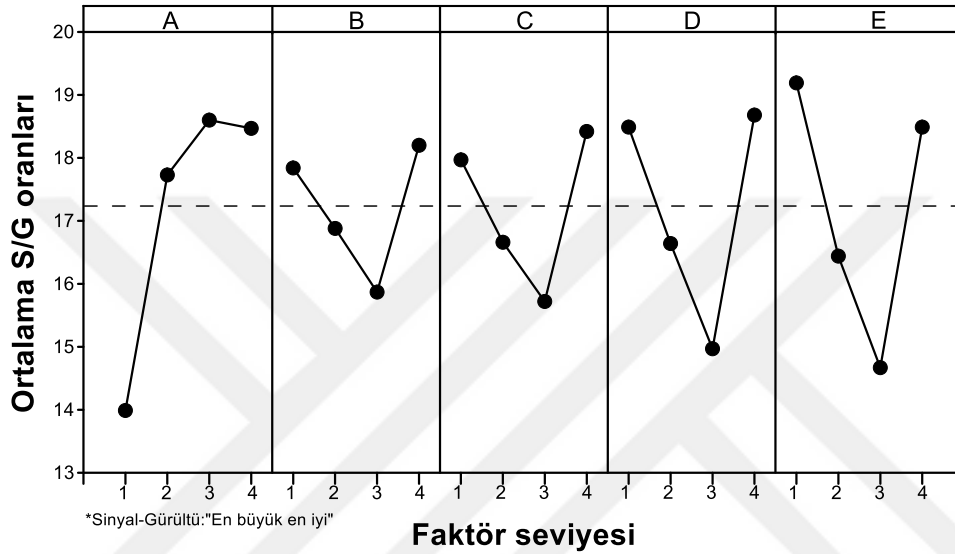
Tablo 7.4. Her seviyede sertlik için sinyal-gürültü oranı ortalamaları.

Seviye	(A) Nikel Sülfat	(B) Sodyum Volfram	(C) Sodyum Bromür	(D) Sodyum Sitrat	(E) Amonyum Klorit
1	57.04	56.18	57.33	56.74	56.70
2	56.40	57.10	56.79	57.15	57.27
3	57.02	57.19	56.57	56.62	56.54
4	56.57	56.56	56.34	56.53	56.52
Delta	0.64	1.02	0.99	0.62	0.75
Sıralama	4	1	2	5	3

Sertlik açısından yapılan analizlerde (Tablo 7.4), sodyum volfram (B) en baskın etkiyi gösteren parametre olmuştur. Sodyum volfram ($Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$), banyoda volfram iyonlarının (W^{6+}) kaynağıdır ve bu iyonlar, kaplama sırasında kısmen indirgenerek Ni matrisi içerisine çökeltir. Volfram, atomik hacim ve elektronegatiflik bakımından nikelden farklılık gösterdiği için matrise girişiyle birlikte kristal örgüde gerilim alanları oluşur. Bu bozulma, dislokasyon hareketini zorlaştırarak çökme sertleşmesi mekanizmasını devreye sokar. Ayrıca volfram atomları, kristal tanelerin büyümesini engelleyerek tane küçültme etkisi yaratır. Bu iki mekanizma birlikte çalışarak kaplamanın sertliğini artırır.

Daha büyük delta değeri, ilgili tasarım faktörünün katkısının daha yüksek olduğunu gösterir. Bu tablolardan yararlanılarak, ortalama sinyal-gürültü oranı grafikleri Şekil 7.5 sunulmuştur. Amonyum klorür (E), kaplama banyosunda çok yönlü görev üstlenen bir katkı maddesidir. Öncelikle çözeltinin pH dengesini tamponlamakta görev alır. NH_4^+ iyonları, indirgeme sırasında oluşabilecek OH^- iyonlarını dengeleyerek ortamın bazikleşmesini önler ve kaplama yüzeyinde istenmeyen hidrojen gelişimini sınırlandırır. Bu, kaplamanın pürüzsüzlüğünü ve sürekliliğini iyileştirir. Ayrıca Cl^- iyonları, metal iyonlarıyla zayıf kompleksler oluşturarak çözeltideki iyon taşınımını

kolaylaştırır. Bu etki özellikle yüksek iyonik akışkanlık gerektiren sistemlerde çökelme kinetiğini optimize eder, dolayısıyla daha kalın ve homojen kaplamalar elde edilmesine katkı sağlar. Kalınlık açısından bu iki bileşenin sinerjik etkisiyle, optimum parametre kombinasyonu A3B4C4D4E1 olarak belirlenmiştir. Bu kombinasyon, özellikle nikel sülfatın ve amonyum klorürün yüksek seviyede tutulduğu koşulları temsil etmekte olup, Şekil 7.5'te görüldüğü üzere maksimum kalınlık bu koşullarda elde edilmiştir.



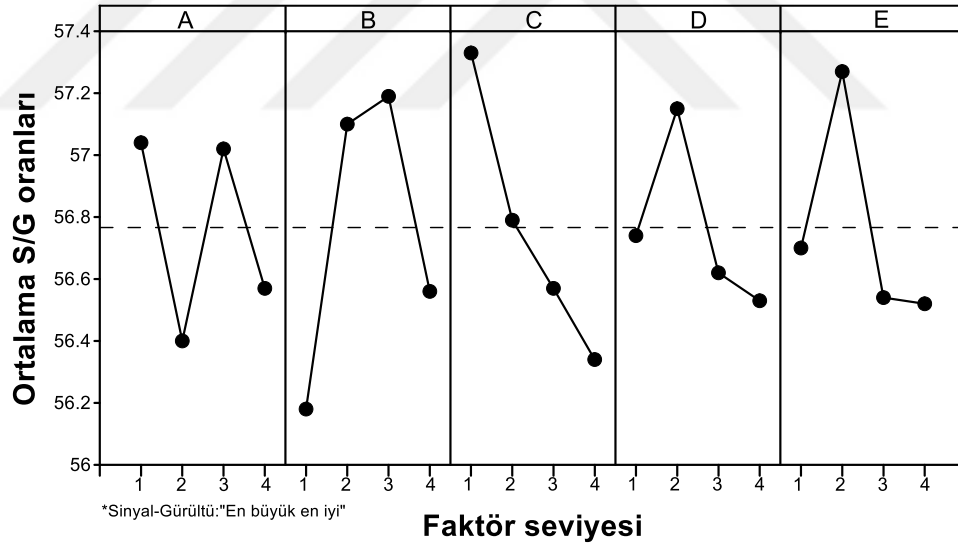
Şekil 7.5. Kalınlık için ortalama sinyal-gürültü oranı grafikleri.

Sertlik açısından yapılan analizlerde (Tablo 7.4), sodyum volfram (B) en baskın etkiyi gösteren parametre olmuştur. Sodyum volfram ($\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), banyoda volfram iyonlarının (W^{6+}) kaynağıdır ve bu iyonlar kaplama sırasında kısmen indirgenerek Ni matrisi içerisine çöktürülür. Volfram, atomik hacim ve elektronegatiflik bakımından nikelden farklılık gösterdiği için matrise girişiyle birlikte kristal örgüde içsel gerilimler oluşturur. Bu bozulmalar, dislokasyon hareketini zorlaştırarak çökelme sertleşmesi mekanizmasını tetikler. Ayrıca volfram atomlarının tane sınırlarında ve matris içerisinde dağılımı, tane inceltme etkisiyle birlikte sertliğe önemli katkı sağlar.

Sodyum bromür (C), sertlik üzerine ikinci en yüksek katkıyı sağlayan parametre olarak belirlenmiştir. Br^- iyonları, çözeltinin elektriksel iletkenliğini artırarak kaplama sırasında oluşan akım dağılımının daha düzgün olmasına katkıda bulunur. Bu durum teorik olarak daha homojen ve yoğun yapılarla ilişkilendirilebilir. Ancak deneysel veriler, özellikle C1 seviyesinde (9 g/L NaBr) elde edilen kaplamalarda sertlik değerlerinin daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum ilk bakışta çelişkili

gibi görünse de düşük Br^- konsantrasyonlarının daha kontrollü bir çökeltme ortamı sağlayarak çekirdeklenme yoğunluğunu artırdığı, buna bağlı olarak da daha ince taneli ve yoğun bir mikroyapının geliştiği anlaşılmaktadır. İnce taneli yapılar, Hall-Petch etkisiyle dislokasyon hareketini sınırlayarak sertliği artırır. Buna karşılık, daha yüksek Br^- seviyelerinde (örneğin 18 g/L) iletkenlik artışı, aşırı iyon taşınımına ve kontrolsüz kristal büyümeye neden olabilir; bu da tane boyutunu artırarak sertlik üzerinde olumsuz etki oluşturabilir. Dolayısıyla, sodyum bromür konsantrasyonu ile sertlik arasındaki ilişki doğrusal olmayıp, optimum sertlik için Br^- iyonlarının dikkatli bir denge içinde tutulması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Bu bağlamda, kaplama sertliği için en uygun parametre kombinasyonu A1B3C1D2E2 olarak belirlenmiştir. Bu yapılandırma, düşük nikel sülfat ve sodyum bromür seviyeleri ile, volframın optimal çökmesini sağlayan orta seviye sodyum volfram konsantrasyonunu içermektedir. Bu kombinasyon, Şekil 7.6'da da görülebileceği üzere en yüksek sinyal-gürültü oranına ve dolayısıyla maksimum sertlik değerlerine karşılık gelmektedir.



Şekil 7.6. Sertlik için ortalama sinyal-gürültü oranı grafikleri.

7.1.2. Varyans analizi (ANOVA) sonuçları

Kaplama performansını etkileyen kontrol faktörlerinin istatistiksel önemi, %95 güven seviyesinde varyans analizi (ANOVA) kullanılarak değerlendirilmiştir ve sonuçlar Tablo 7.5'te sunulmuştur. Tablo 7.5, kaplama kalınlığı için en yüksek etkinin %37,18 ile amonyum klorür tarafından sağlandığını; nikel sülfat ve sodyum sitratın sırasıyla %29,79 ve %22,26 katkı yaptığını göstermektedir.

Tablo 7.5. Kalınlık ve sertlik için ANOVA sonuçları.

Kontrol Faktörü	DF	Kalınlık			Sertlik		
		Karelerin Toplamı (SS)	Varyans (V)	Katkı %	Karelerin Toplamı (SS)	Varyans (V)	Katkı %
Nikel sülfat	3	18.41	61.37	29.79	3	8277	2759
Sodyum volfram	3	2.07	0.69	3.34	3	17334	5778
Sodyum bromür	3	4.60	15.32	7.43	3	14190	4730
Sodyum sitrat	3	13.75	45.85	22.26	3	7048	2349
Amonyum klorit	3	22.97	76.58	37.18	3	9571	3190
Hata	0				0		
Toplam	15	61.80		100	15	56420	
Sodyum volfram	3	2.07	0.69	3.34	3	8277	2759

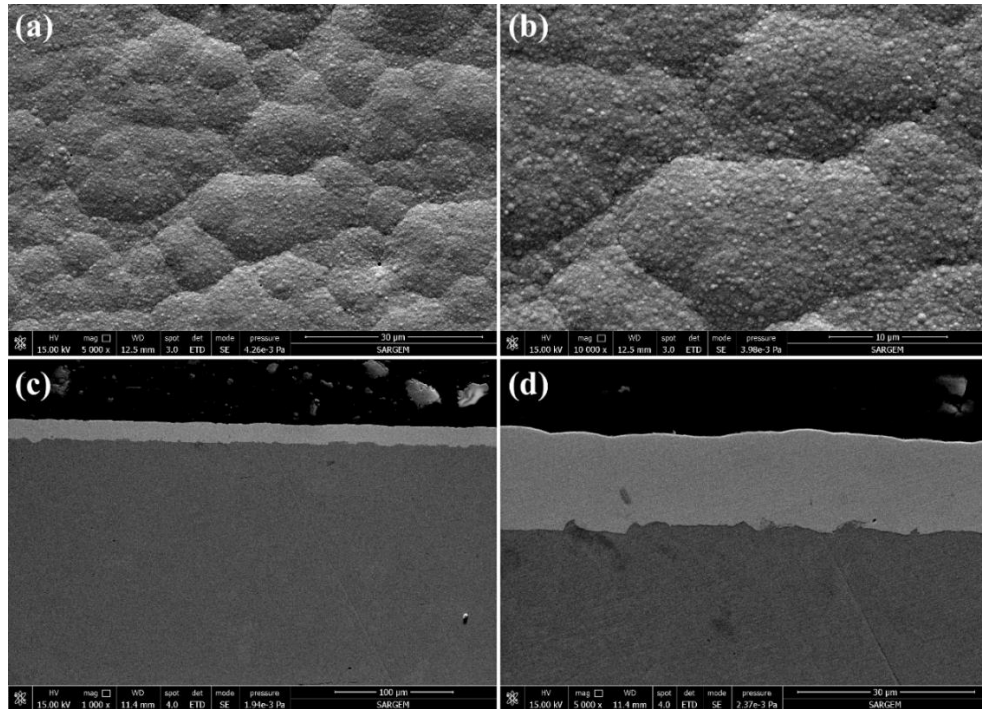
Sodyum volfram ve sodyum bromürün kalınlık üzerindeki katkıları, bu üç faktöre kıyasla çok daha düşüktür. Kaplama sertliği söz konusu olduğunda, %30,72’lik katkı ile sodyum volfram en etkili faktör olurken, %25,15 ile sodyum bromür ikinci sırada yer almıştır. Amonyum klorür, nikel sülfat ve sodyum sitrat ise sırasıyla %16,96, %14,67 ve %12,49 oranında katkı sağlamıştır.

Tablo 7.6, Taguchi optimizasyonu sonucunda belirlenen iki özel kaplama reçetesinin kimyasal bileşenlerini sunmaktadır. 17 numaralı reçete (A3B4C4D4E1), maksimum kaplama kalınlığını sağlayacak şekilde optimize edilmiş; 18 numaralı reçete (A1B3C1D2E2) ise maksimum sertliği elde etmeye yönelik hazırlanmıştır. Bu iki reçete, kaplama banyosundaki beş parametrenin (NiSO_4 , Na_2WO_4 , NaBr , $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$, NH_4Cl) özgün kombinasyonlarıyla şekillenmiştir. Kalınlık odaklı reçetede nikel sülfat (15 g/L) ve sodyum volfram (50 g/L) yüksek seviyede yer alırken, sertlik odaklı reçetede bu bileşenlerin daha düşük seviyelerde olduğu görülmektedir.

Tablo 7.6. Taguchi sonucu oluşturulan en yüksek kalınlık ve en yüksek sertlik banyolarının kimyasal bileşimleri.

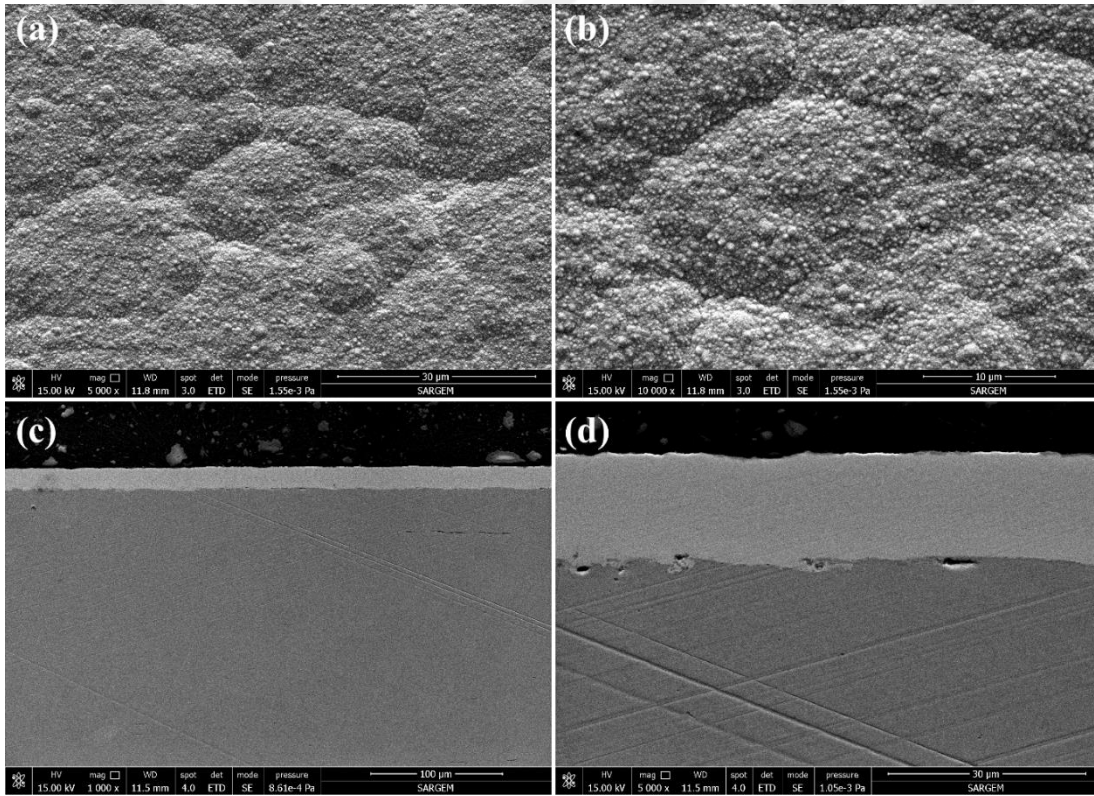
Deney Numarası	Deney Reçetesi	(A) Nikel Sülfat	(B) Sodyum Volfram	(C) Sodyum Bromür	(D) Sodyum Sitrat	(E) Amonyum Klorit
17	A3B4C4D4E1	15	50	18	175	15
18	A1B3C1D2E2	9	40	9	125	20

Şekil 7.7, A3B4C4D4E1 parametreleriyle üretilmiş 17 numaralı kaplamaya ait yüzey ve kesit FESEM görüntülerini içermektedir. Yaklaşık 15 μm kalınlığındaki bu kaplamada, yüzeyde iri taneli, nodüler morfoloji hâkimdir. Nodüller, özellikle yüksek nikel sülfat ve sodyum volfram konsantrasyonlarının çökeltme hızını artırmasıyla belirginleşmiştir. Bu durum, hızlı kristalleşme sonucu tane sınırlarında gözlenen belirgin düzensizliklere neden olmuştur. Ayrıca, yüksek sodyum bromür miktarı (18 g/L), çözeltinin iletkenliğini artırarak çökeltme hızını desteklemiş, fakat mikro boşluk ve heterojenlik oluşumunu da beraberinde getirmiştir. Kesit görüntüsünde, altlık-kaplama arayüzeyi düzgün olup, mekanik bağlanmanın başarılı olduğu izlenmiştir. Ancak yapıda yer yer içsel boşluklar ve mikro gözenekler gözlenmiş; bu da hızlı çökeltmenin beraberinde getirdiği kristal kusurlarına bağlanabilir.



Şekil 7.7. Taguchi deney tasarımının en yüksek kalınlık için oluşturduğu A3B4C4D4E1 kaplamayı farklı büyütme ölçeklerindeki yüzey ve kesit FESEM görüntüleri.

Şekil 7.8, A1B3C1D2E2 parametreleriyle elde edilen 18 numaralı kaplamanın FESEM yüzey ve kesit görüntülerini göstermektedir. Bu kaplama, daha kompakt, ince taneli ve homojen bir yapı sergilemektedir. Nikel sülfat (9 g/L) ve sodyum bromür (9 g/L) seviyelerinin düşük tutulması, çekirdeklenme hızının tane büyümesinden daha yüksek olmasını sağlamış; bu da yüzey yoğunluğunu ve sertliği artırmıştır. Ayrıca volfram kaynağı olan sodyum volfram 40 g/L gibi orta düzeyde tutulması, W iyonlarının homojen dağılmasını kolaylaştırmış ve Ni matrisi içinde kontrollü çökeltme ile dislokasyon bariyerleri oluşturmuştur. Bu mekanizma, çözeltideki diğer parametrelerin sinerjik etkisiyle birleşerek sertliği maksimuma taşımıştır. Kesit görüntüsü, tüm kalınlık boyunca düzgün çökeltme ve altlıkla iyi bağlanma gösteren homojen bir yapıyı ortaya koymuştur.

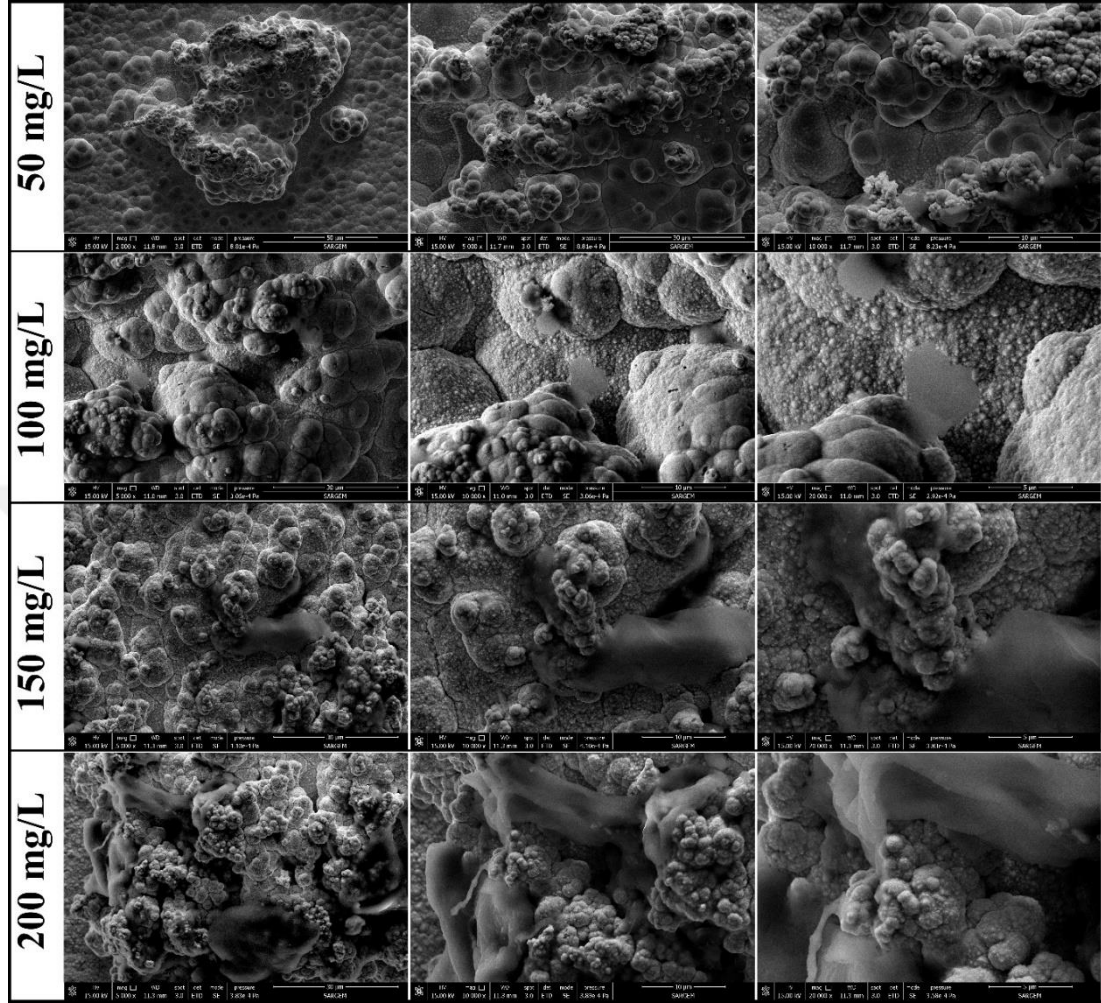


Şekil 7.8. Taguchi deney tasarımının en yüksek sertlik için oluşturduğu A1B3C1D2E2 kaplamayı farklı büyütme ölçeklerindeki yüzey ve kesit FESEM görüntüleri.

7.2. Farklı Konsantrasyonlarda Grafen Takviyeli Ni-W/Grafen Kompozit Kaplamalar

Şekil 7.9’da farklı grafen konsantrasyonlarında üretilen Ni-W/grafen kompozit kaplamaların farklı büyütme ölçeklerindeki yüzey FESEM görüntüleri gösterilmektedir.

Görüntüler, grafen takviyesi miktarına bağlı olarak kaplamanın yüzey morfolojisinde ciddi değişimlerin meydana geldiğini göstermiştir.



Şekil 7.9. Farklı grafen konsantrasyonlarında üretilen Ni-W/Grafen kompozit kaplamaların farklı büyütmelerdeki yüzey FESEM görüntüleri.

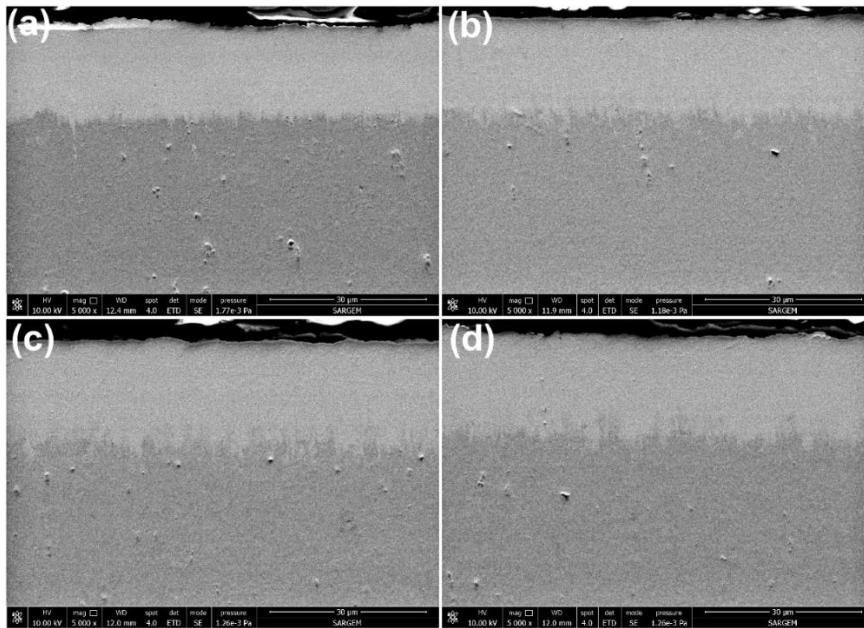
Düşük grafen içeriğine sahip kaplamalarda (50 ve 100 mg/L konsantrasyonları), yüzey genel olarak Ni-W alaşımının tipik nodüler (karnabahar benzeri) yapısını korumaktadır. Ancak grafen konsantrasyonu arttıkça, nodüllerin boyutlarında belirgin bir küçülme ve yüzey topografyasında daha homojen bir yapı oluşmuştur. Orta düzeyde grafen ilavesi (150 mg/L), nano boyutlu grafen yapraklarının çökeltme sırasında ilave çekirdeklenme merkezleri oluşturarak kristal büyümesini engellemesi sonucunda daha ince taneli ve yoğun bir yapı ortaya çıkarmıştır. Buna karşın, 200 mg/L grafen konsantrasyonunda yüzey morfolojisinde yeniden bir düzensizlik gözlenmiştir. Aşırı grafen varlığı, çözeltide grafenin homojen dağılmasına engelleyerek topaklanmalara yol açmıştır. Aglomere olan grafen tozları kaplamada

lokal yığılmalara yol açarak yüzey pürüzlülüğünü artırmıştır. Bu durum, kaplama bünyesinde yer yer daha kaba yapılı ve poroziteli bölgelerin oluşmasına yol açmıştır.

Literatürde de benzer eğilimler rapor edilmiştir. Kumar ve arkadaşları (2020) Zn–Ni–Fe/grafen kompozit kaplamalar üzerine yaptıkları çalışmada, orta düzeyde grafen ilavesinin kaplamayı daha kompakt ve düzgün hale getirdiğini; ancak yüksek grafen içeriğinde aglomerasyonun artmasıyla yüzeyde düzensizliklerin ve gözenekliliğin belirginleştiğini bildirmiştir (Kumar ve ark., 2020). Aynı şekilde, Li ve arkadaşları (2021) Zn–Ni/grafen kaplamalarda grafen katkısının kristal büyümesini baskılayarak daha ince taneli bir yapı oluşturduğunu, ancak yüksek konsantrasyonlarda dağılımın bozulması nedeniyle yüzey homojenliğinin azaldığını raporlamışlardır (Li ve ark., 2021).

Bu bulgular, mevcut çalışmada 150 mg/L grafen konsantrasyonunda en düzgün ve ince taneli yüzeyin elde edilmesi, daha yüksek konsantrasyonlarda ise grafen aglomerasyonuna bağlı olarak yüzey homojenliğinde bozulmalar ve porozite oluşumlarının gözlenmesiyle oldukça uyumludur.

Şekil 7.10’da ise aynı kaplamaların kesit FESEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntüler, grafen takviyesinin kaplama kalınlığı, iç yapı homojenliği, yapısal bütünlük ve altlıkla olan arayüz ilişkisindeki etkilerini değerlendirme açısından önem taşımaktadır.



Şekil 7.10. Farklı grafen konsantrasyonlarında üretilen Ni-W/Grafen kompozit kaplamaların kesit FESEM görüntüleri.

Kaplama kalınlıkları sırasıyla yaklaşık 16, 17, 18.6 ve 18 μm olarak ölçülmüştür. Görüldüğü üzere, grafen konsantrasyonunun 50 mg/L'den 150 mg/L'ye çıkarılması kaplama kalınlığında hafif bir artışa neden olmuştur. Ancak konsantrasyonun 200 mg/L'ye yükseltilmesiyle birlikte kaplama kalınlığında düşüş gözlemlenmiştir. Bu sonuç, düşük ve orta seviye grafen takviyesinin çökelme kinetiğini destekleyerek kristalleşmeyi teşvik ettiğini, ancak aşırı grafen miktarının metal iyonlarının katot yüzeyine erişimini kısıtlayarak efektif kaplama hızını düşürdüğünü göstermektedir. Aşırı grafen parçacıkları, çözeltide homojen dağılmadığında topaklanma eğilimi göstermekte ve bu durum çökelme sürecinde düzensiz büyümelere, yüzeye yakın boşluklara ve yer yer ince tabaka oluşumuna neden olabilmektedir.

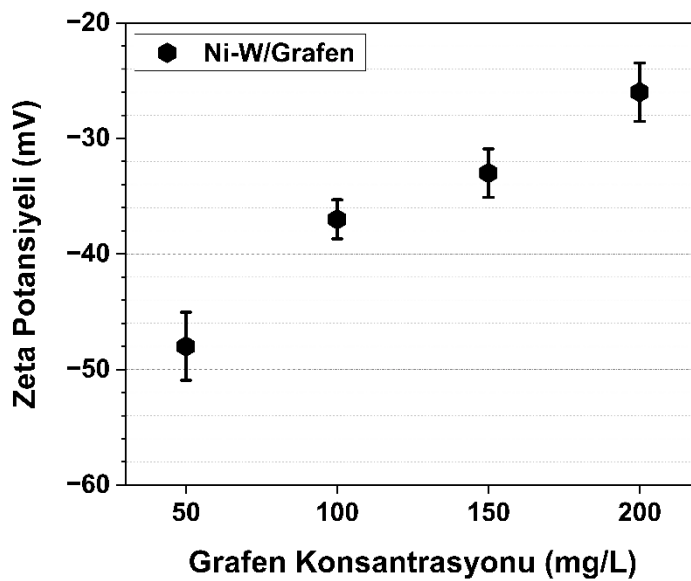
Kesit görüntüleri ayrıca kaplama-altlık arayüzüne dair önemli bilgiler sunmaktadır. Tüm kaplamalarda tabaka ile altlık arasında güçlü bir yapışma sağlanmış; hiçbir numunede soyulma, çatlak ya da ayrılma izine rastlanmamıştır. Bu durum, yüzey hazırlığı ve elektro kaplama parametrelerinin uygunluğu kadar, grafen takviyesinin belirli bir konsantrasyona kadar aderans üzerinde olumsuz bir etkisinin olmadığını da göstermektedir. 150 mg/L grafen içeren kaplamada gözlenen kompakt ve homojen yapı, çökelme sürecinde artan çekirdeklenme oranı ile ilişkilidir. Grafen parçacıkları, metal iyonlarının çökmesini yönlendirerek daha sıkı taneli bir yapının oluşmasına katkıda bulunmuştur.

Buna karşın, 200 mg/L grafen içeren kaplamada yüzeye yakın bölgelerde mikro gözenekler ve porozite benzeri yapısal düzensizlikler dikkat çekmektedir. Bu bozulmalar, çözeltideki yüksek grafen miktarının aglomerasyon eğilimi göstermesi ve kaplama içinde lokal dengesizlikler oluşturmamasından kaynaklanmaktadır. Literatürde de benzer şekilde, optimumun üzerindeki karbon bazlı katkıların (grafen, CNT vb.) dispersiyon problemleri nedeniyle yapısal bütünlüğü bozarak mekanik ve koruyucu özellikleri zayıflattığı bildirilmektedir. Dolayısıyla, bu çalışmada da en uygun morfolojik bütünlük ve kalınlık performansı 150 mg/L grafen konsantrasyonunda elde edilmiştir.

Sonuç olarak, grafen takviyesiyle hazırlanan tüm kaplamalarda altlıkla güçlü bir bağlanma sağlandığı, kesit görüntülerinde soyulma veya çatlak benzeri süreksizliklerin en yüksek grafen yüklemesinde dahi oluşmadığı görülmüştür. Bu bulgular, grafenin uygun konsantrasyonlarda kullanıldığında kaplamanın fiziksel ve

mekanik özelliklerine olumlu katkı sunduğunu ve yapışma performansını koruyabildiğini göstermektedir.

Şekil 7.11, farklı grafen konsantrasyonlarında (50, 100, 150 ve 200 mg/L) hazırlanan Ni-W/grafen kompozit kaplama banyolarının zeta potansiyeli değerlerini göstermektedir. Elde edilen zeta potansiyeli değerleri sırasıyla -48 mV (50 mg/L), -37 mV (100 mg/L), -33 mV (150 mg/L) ve -26 mV (200 mg/L) olarak belirlenmiştir. Tüm değerlerin negatif olması, kullanılan yüzey aktif maddenin (SDS) anyonik karakterde olmasından kaynaklanmaktadır. SDS (sodyum dodesil sülfat), grafen yüzeyine adsorbe olarak negatif yüzey yükü kazandırır. Bu yüklenme, çözelti ortamındaki grafen parçacıkları arasında elektrostatik itme kuvvetleri oluşturarak, sistemin kolloidal kararlılığını artırır. Ancak konsantrasyon arttıkça, zeta potansiyelinin mutlak değeri azalmıştır. Bu azalma, sabit tutulan SDS miktarının yüksek miktarda grafeni yüzeysel olarak yeterince stabilize edememesiyle ilişkilidir. 50 mg/L grafen içeriğinde sistem oldukça stabil bir dispersiyon davranışı sergilemiş ve -48 mV gibi yüksek mutlak değerde zeta potansiyeliyle güçlü elektrostatik itme kuvvetlerine sahip olmuştur. Ancak grafen miktarı arttıkça SDS'nin yüzeyi tam kaplayamaması, parçacıklar arası elektrostatik itmenin zayıflamasına ve parçacıkların birbirine yaklaşarak aglomere olmasına yol açmıştır. Bu durum özellikle 200 mg/L grafen konsantrasyonunda -26 mV gibi kritik kararlılık eşiğine yaklaşan bir zeta potansiyeli ile belirginleşmiştir.



Şekil 7.11. Farklı grafen konsantrasyonlarında üretilen Ni-W/Grafen kompozit kaplamaların zeta potansiyeli ölçüm sonuçları.

Zeta potansiyelindeki bu değişim, kaplama mikroyapısı, yüzey morfolojisi ve mekanik özellikleri üzerinde doğrudan etkili olmuştur. Yüzey görüntüleri ve kesit FESEM analizleri, -33 mV zeta potansiyeline sahip 150 mg/L grafen takviyeli kaplamada en homojen dağılımın ve en kompakt mikro yapının elde edildiğini göstermektedir. Bu örnekte zeta potansiyeli, hem yeterli kararlılığı sağlayacak düzeyde yüksek, hem de aşırı itme kuvvetlerinin çökelme sürecini yavaşlatmasına neden olmayacak şekilde dengelidir. Bu konsantrasyonda partiküller çözelti içinde iyi dağılmış, çökelme sırasında çekirdeklenme merkezleri olarak görev yapmış ve bu da kristal büyümesinin kontrol altına alınarak daha ince taneli, yoğun ve düzgün bir yapının oluşmasına katkı sağlamıştır.

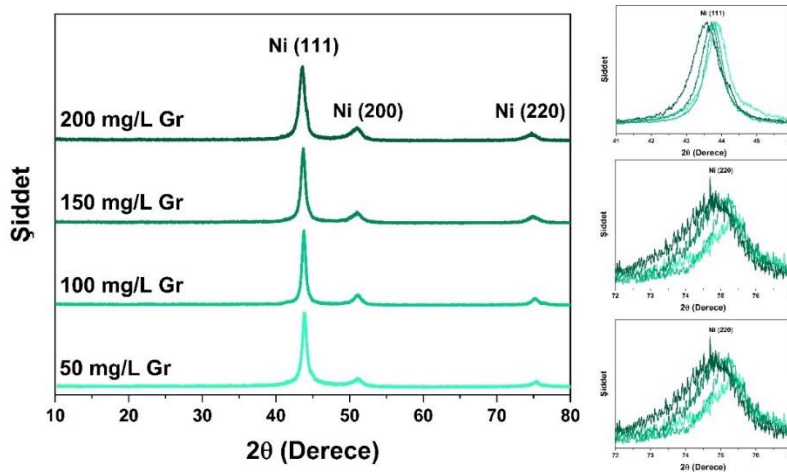
Buna karşılık, 50 mg/L gibi çok düşük konsantrasyonlarda, dispersiyon kararlılığı yüksek olsa da grafen miktarının azlığı nedeniyle bu katkının mekanik ve yapısal iyileştirici etkisi sınırlı kalmıştır. Öte yandan 200 mg/L’de zeta potansiyelindeki ciddi düşüş, sistemin kararlılığını bozmuş ve çökelme sürecinde aglomerasyonlara neden olmuştur. Bu durum, kaplamada porozite, kalınlıkta dalgalanma ve yüzeyde morfolojik bozukluklar olarak yansımıştır.

Sonuç olarak, zeta potansiyeli ölçümleri, grafen katkısının sadece miktarına değil, aynı zamanda çözeltideki dispersiyon kararlılığına da bağlı olduğunu göstermektedir. 150 mg/L grafen içeriği, bu çalışmada hem yeterli katkı etkisini sağlayan hem de dispersiyon açısından optimal kararlılığı sunan en uygun konsantrasyon olarak belirlenmiştir. Bu değer, kaplamanın mekanik dayanımı, yüzey düzgünlüğü ve yapısal bütünlüğü açısından da en dengeli sonucu vermiştir.

Şekil 7.12, farklı grafen konsantrasyonlarında üretilen Ni-W/grafen kompozit kaplamaların XRD desenlerini göstermektedir. Tüm numunelerde yaklaşık $2\theta \approx 44^\circ$, 52° ve 76° civarında gözlemlenen belirgin pikler, nikelin sırasıyla (111), (200) ve (220) düzlemlerine karşılık gelmektedir. Bu pikler, kaplamalarda nikel fazının kristalografik varlığını ve yönlenmesini doğrulamaktadır.

Grafen konsantrasyonu arttıkça özellikle (200) ve (220) düzlemlerine karşılık gelen piklerin şiddetlerinde artış gözlemlenmiştir. Bu durum, grafen takviyesinin nikel kristallerinin belirli düzlemlerde yönlenmesini teşvik ettiğini ve kristalin hacimce artışına neden olduğunu göstermektedir. Yönlenme artışı, grafen yapraklarının çökelme sürecinde nikel atomlarının belirli kristal yüzeylerine yönlenmesini teşvik

ettiğini göstermektedir. Aynı zamanda bu piklerdeki belirginleşme, kristalitenin iyileştiğine dair bir göstergedir. Grafen konsantrasyonu arttıkça özellikle (200) ve (220) düzlemlerine karşılık gelen piklerin şiddetlerinde artış gözlemlenmiştir. Bu durum, grafen takviyesinin nikel kristallerinin belirli düzlemlerde yönelmesini teşvik ettiğini ve kristalin hacimce artışına neden olduğunu göstermektedir. Yönlendirme artışı, grafen yapraklarının çökeltme sürecinde nikel atomlarının belirli kristal yüzeylerine yönelmesini teşvik ettiğini göstermektedir. Aynı zamanda bu piklerdeki belirginleşme, kristalitenin iyileştiğine dair bir göstergedir. Benzer şekilde, Sarangi ve arkadaşları (2020), Ni–W/grafen oksit kompozit kaplamalarda grafen oksit ilavesinin tane boyutunu küçülttüğünü, mikrogerinimi artırdığını ve nikel fazının (111) düzleminde yönelmeyi teşvik ettiğini rapor etmişlerdir. Bu bulgular, mevcut çalışmada grafen katkısının XRD pik şiddeti, konumu ve genişliği üzerindeki etkileriyle büyük ölçüde paralellik göstermektedir (Sarangi ve ark., 2020).



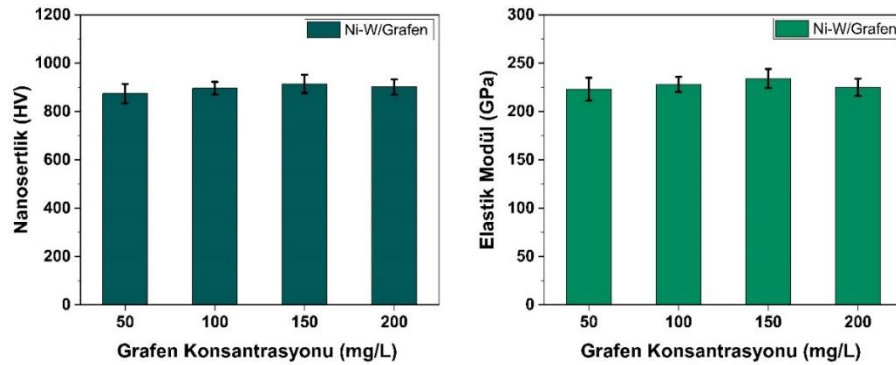
Şekil 7.12. Farklı grafen konsantrasyonlarında üretilen Ni-W/Grafen kompozit kaplamaların XRD analiz sonuçları.

Dikkat çeken bir diğer özellik ise (111), (200) ve (220) piklerinin grafen miktarının artmasıyla birlikte hafif sola kayma eğilimi göstermesidir. Bu pik kaymaları, kristal yapıda meydana gelen küçük genişlemelerle ilişkilidir. Piklerin sola kayması (yani daha düşük açılarda görünmesi), nikel kristal örgüsünün içerisine volfram atomlarının ve/veya karbon temelli türlerin yerleşmesiyle örgü aralıklarının genişlemesi sonucunda ortaya çıkmaktadır. Özellikle çökeltme sırasında, grafen yüzeyinin nikel ve volfram iyonlarını üzerinde tutması, bu atomların kristal içine nasıl dizileceğini etkileyebilir ve kristal yapıda iç gerilmelerin oluşmasına neden olabilir. Bu durum hem

çökeltme sertleşmesine katkı sağlar hem de yapıda kalıcı (artık) gerilmelerin oluşmasına yol açabilir.

XRD desenlerinde grafene ait belirgin bir pikin gözlemlenmemesi, birkaç nedene bağlanabilir: İlk olarak, kullanılan grafenin çok düşük miktarlarda olması XRD analizinde algılanmasını zorlaştırır. Ayrıca grafen yapraklarının kaplama matrisi içerisinde rastgele yönelmesi ve nikel kristal fazı tarafından örtülmesi, grafene ait tipik (002) düzlemi ($2\theta \approx 26^\circ$) piki gibi karakteristik sinyallerin belirginleşmesini engellemiş olabilir. Literatürde de benzer şekilde, kaplama matrisine homojen dağılmış, düşük miktardaki grafen katkılarının XRD deseninde doğrudan tespit edilemediği, ancak etkilerinin pik şiddeti, genişliği ve konumundaki değişimlerle dolaylı olarak izlenebildiği belirtilmektedir.

Sonuç olarak, Şekil 7.13'teki XRD bulguları, grafen takviyesinin kaplamaların kristal yapısını hem yönelme hem de artık gerilme açısından etkilediğini ortaya koymaktadır. Pik şiddetlerindeki artış kristal yapının yoğunlaştığını gösterirken, hafif sola kaymalar mikro gerilmelerin ve çökeltme sonrası atomik düzeydeki değişimlerin bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Grafenin XRD'de doğrudan tespit edilememesi ise, katkı miktarı gömülme gibi faktörlerin bir sonucudur.



Şekil 7.13. Farklı grafen konsantrasyonlarında üretilen Ni-W/Grafen kompozit kaplamaların sertlik ve elastik modül değerleri.

Farklı grafen konsantrasyonlarında (50, 100, 150 ve 200 mg/L) üretilen Ni-W/grafen kompozit kaplamaların nano sertlik ve elastik modül değerleri Şekil 7.13.'de verilmiştir. Kaplamaların sırasıyla sertlik değerleri 874, 896, 914 ve 902 HV, elastik modül değerleri ise 223, 228, 234 ve 225 GPa değerindedir. 150 mg/L konsantrasyonlu numunede hem en yüksek sertlik hem de en yüksek elastik modül değerine sahiptir. Bu sonuç, 150 mg/L grafen katkısının kaplama yapısında mekanik mukavemeti en

fazla artıran katkı seviyesi olduğunu göstermektedir. Düşük konsantrasyonlardaki grafen katkıları (50 ve 100 mg/L) daha sınırlı bir sertlik artışı sağlarken, 200 mg/L grafen içeren kaplamada hem sertlik hem de elastik modül değerlerinde 150 mg/L konsantrasyonlu kaplamaya göre düşüş gözlemlenmiştir. Bu değişimin temel nedeni, grafenin dispersiyon durumu ve mikro yapısal etkileridir. 150 mg/L grafen katkısı, kaplama içinde iyi dağılmış grafen yaprakları sayesinde çökeltme sırasında yeni çekirdeklenme merkezleri oluşturarak tane boyutunun küçülmesine ve daha kompakt bir yapıya ulaşılmasına yol açmıştır. Tane küçülmesi, Hall–Petch ilişkisi gereği, sertlik artışı ile doğrudan ilişkilidir. Ayrıca düzgün dağılmış grafen, yük transferinde etkili rol oynayarak elastik deformasyon sırasında yapının rijitliğini artırmıştır.

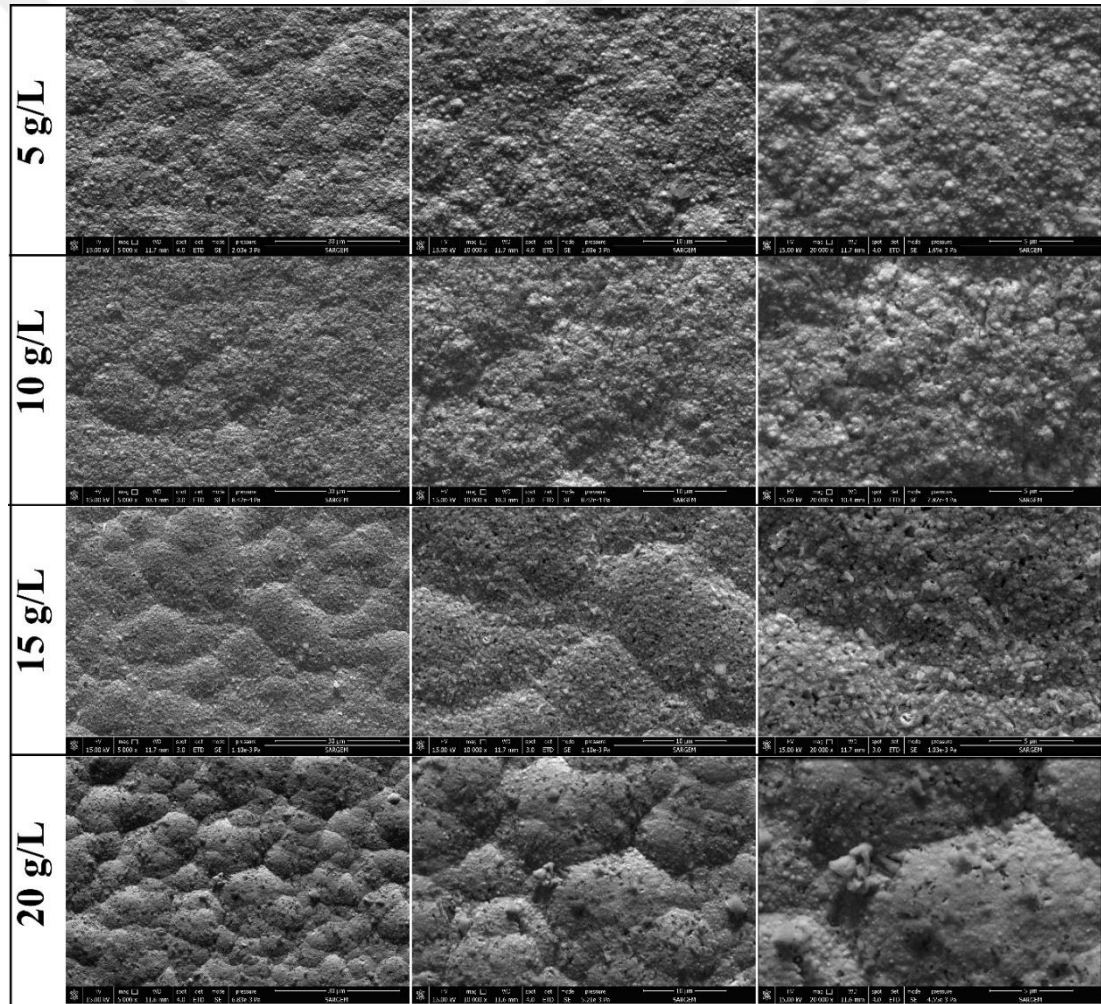
Benzer şekilde, Sarangi ve arkadaşları (2020) da GO takviyeli Ni–W kompozit kaplamalarda grafen oksit içeriğinin artmasıyla sertlik ve elastik modül değerlerinde anlamlı yükselme gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar, GO'nun yüzeyinde bulunan oksijenli fonksiyonel grupların nikel ve volfram atomlarıyla güçlü ara yüzey bağları oluşturarak yük transferini kolaylaştırdığını ve bu sayede hem sertlik hem de elastik modülün yükseldiğini rapor etmişlerdir. Ancak, aşırı GO ilavesi sistemde aglomerasyona neden olmuş ve mekanik özelliklerde düşüşe yol açmıştır. Bu bulgular, mevcut çalışmada 150 mg/L grafen katkısında elde edilen optimum sertlik ve elastik modül değerleriyle yüksek düzeyde uyumludur (Sarangi ve ark., 2020).

Buna karşılık, 200 mg/L grafen içeriğinde, SDS miktarının sabit kalmasına rağmen grafen miktarının artması nedeniyle yeterli dispersiyon sağlanamamış; bu durum aglomerasyonlara yol açarak kaplama yapısında zayıf bölgelerin oluşmasına neden olmuştur. Aglomere olmuş grafen parçacıkları, yük altındaki yapısal dayanımı düşürmüş ve mekanik özelliklerde gerilemeye yol açmıştır. Bu gözlemler, zeta potansiyeli ve yüzey/kesit görüntüleriyle de uyum göstermektedir.

Sonuç olarak, 150 mg/L grafen katkısı, sertlik ve elastik modül açısından optimum katkı seviyesi olarak belirlenmiştir. Bu konsantrasyonda grafen hem homojen dağılmış hem de mikro yapısal iyileşme sağlayarak mekanik özellikleri en yüksek seviyeye çıkarmıştır. Aşırı grafen katkısında ise dispersiyon problemleri mekanik performansı olumsuz yönde etkilemiştir.

7.3. Farklı Konsantrasyonlarda Al_2O_3 Takviyeli Ni-W/ Al_2O_3 Kompozit Kaplamalar

Şekil 7.14, farklı Al_2O_3 konsantrasyonlarında (5, 10, 15 ve 20 g/L) üretilen Ni-W/ Al_2O_3 kompozit kaplamaların, farklı büyütmelerde elde edilen yüzey FESEM görüntülerini sunmaktadır. 5 g/L Al_2O_3 içeren numunede, yüzey genel olarak katkısız Ni-W kaplamanın tipik nodüler (karnabahar benzeri) yapısını korumaktadır. Ancak nodüllerin boyutlarında hafif bir küçülme eğilimi göze çarpmaktadır. Bu yapı, Al_2O_3 parçacıklarının çökeltme sırasında bazı nodüllerin merkezinde heterojen çekirdeklenme noktaları oluşturarak kristal büyümesini sınırlandırmasından kaynaklanabilir. Al_2O_3 parçacıkları bu durumda çökelmeye katkı sağlar ancak henüz belirgin bir morfolojik dönüşüm oluşturmaz.



Şekil 7.14. Farklı Al_2O_3 konsantrasyonlarında üretilen Ni-W/ Al_2O_3 kompozit kaplamaların farklı büyütmelerdeki yüzey FESEM görüntüleri.

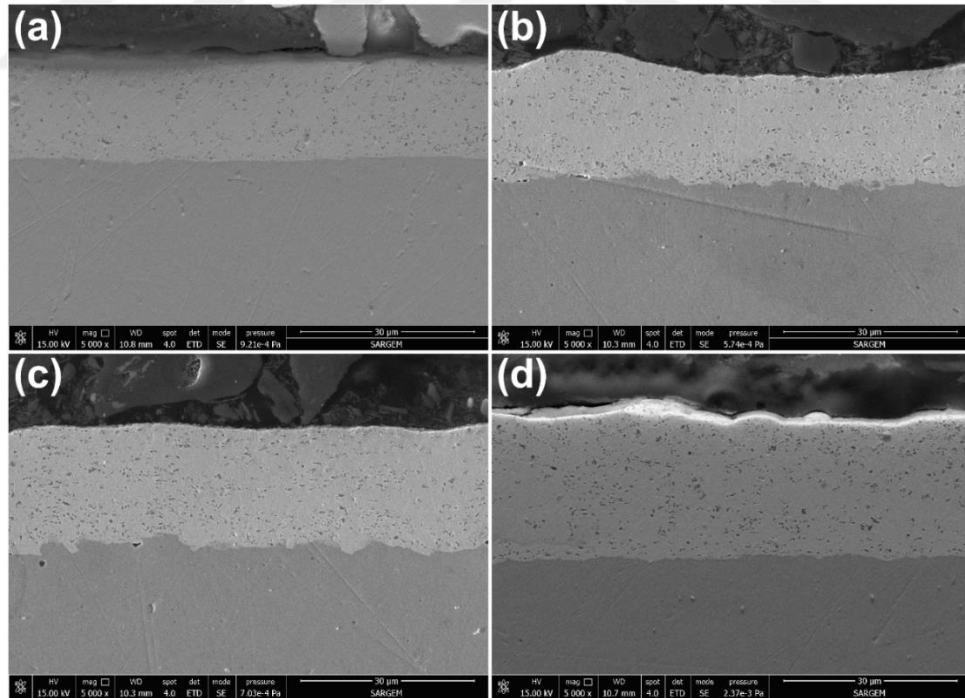
10 g/L Al_2O_3 katkısında, yüzeyde daha belirgin bir tane küçülmesi ve düzensizliğin azaldığı bir yapı görülmektedir. Nodüller daha küçük boyutlara inmiş ve yüzeyde daha yoğun bir yapı oluşmuştur. Bu, Al_2O_3 parçacıklarının çözeltide daha iyi dağılması ve çok sayıda çekirdeklenme merkezi oluşturmasıyla açıklanabilir.

15 g/L Al_2O_3 içeren numune, yüzey homojenliği, ince taneli yapı ve nodüler adacıkların düzenli dağılımı açısından en iyi sonucu vermiştir. Bu numunede, Al_2O_3 parçacıkları matrise çok iyi dağılmış ve çökelme sırasında birden fazla noktada nikel ve volfram iyonlarının kristalleşmesini yönlendirmiştir. Bunun sonucunda yüzey pürüzlülüğü azalmış, kristal yapı daha kompakt ve düzenli hale gelmiştir. Bu morfolojik gelişim, daha sonraki sertlik ve tribolojik testlerde gözlenen performans artışlarını da destekler niteliktedir.

Buna karşılık, 20 g/L Al_2O_3 içeren kaplamada, yüzeyde tekrar bir pürüzlülük artışı, yer yer porozite ve düzensizlikler gözlemlenmiştir. Bu durum, yüksek partikül konsantrasyonuna rağmen SDS miktarının sabit tutulması nedeniyle Al_2O_3 'ün çözeltide yeterince dağılmamasıyla açıklanabilir. Aşırı Al_2O_3 miktarı, çözeltide aglomerasyonlara yol açmış; bu topaklanmalar kaplama sırasında yüzeyde lokal yığılmalar ve kalınlık düzensizlikleri oluşturmuştur. Böylece nodüller arası boşluk artmış ve yüzey topografyasında tekdüzellik kaybolmuştur. Bu bulgu, benzer kaplama sistemlerinde yapılan çalışmalarla da uyumludur. Nitekim Gül ve Usta (2023), farklı Al_2O_3 konsantrasyonlarında üretilen Ni-W-P/ Al_2O_3 kompozit kaplamalarda, partikül miktarının belirli bir eşiğin üzerine çıkmasıyla birlikte çözeltide doygunluk ve aglomerasyon eğiliminin arttığını, bunun da yüzeyde morfolojik düzensizlikler, pürüzlülük artışı ve lokal kalınlık farkları oluşturduğunu bildirmiştir. Bu sonuçlar, yüksek partikül konsantrasyonlarının kaplama bütünlüğünü olumsuz etkilediğini gösteren mevcut bulgularla tam bir paralellik göstermektedir (Gül ve Usta, 2023).

Sonuç olarak, Al_2O_3 katkısının Ni-W kaplamalar üzerindeki morfolojik etkisi katkı miktarına bağlı olarak belirgin şekilde değişmektedir. 15 g/L Al_2O_3 konsantrasyonu, en iyi yüzey homojenliği ve ince kristalli yapı özelliklerini sunarken; 20 g/L seviyesindeki katkı, dispersiyon problemleri nedeniyle yapısal bütünlüğü olumsuz etkilemiştir. Bu bulgular, uygun katkı seviyesinin belirlenmesinin kaplama kalitesi açısından kritik olduğunu ve fazlalığın sistemde bozulmalara yol açabileceğini açıkça göstermektedir.

Şekil 7.15, farklı Al_2O_3 konsantrasyonlarında üretilen Ni-W/ Al_2O_3 kompozit kaplamalara ait kesit FESEM görüntülerini sunmaktadır. Yapılan ölçümlere göre kaplama kalınlıkları sırasıyla 17,1, 18,2, 20,4 ve 22,8 μm olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, Al_2O_3 konsantrasyonundaki artışın kaplama kalınlığı üzerinde doğrudan etkili olduğunu ve çökelme sürecini hızlandırdığını göstermektedir. Konsantrasyon arttıkça kaplama içine entegre olan Al_2O_3 parçacıklarının miktarında da artış gözlemlenmiştir. Özellikle 15 g/L Al_2O_3 içeren kaplamada, tozların hem sayıca arttığı hem de matrise daha homojen şekilde dağıldığı dikkat çekmektedir. Bu durum, parçacıkların çökelme sürecinde etkili çekirdeklenme merkezleri oluşturarak daha kalın ve yoğun bir tabaka gelişimine katkı sağladığını göstermektedir. Ancak 20 g/L Al_2O_3 içeren banyoda bu olumlu eğilim devam etmemiştir. Yüksek partikül konsantrasyonu, çözelti içinde yeterince dağılmadığından aglomerasyon eğilimi göstermiş ve bu parçacıklar kaplama içerisinde topaklanmalar hâlinde gözlemlenmiştir. Oluşan topaklanmalar mikroyapısal homojenliği bozmakla kalmamış, aynı zamanda bazı bölgelerde düzensiz çökelme gibi istenmeyen yapısal kusurların oluşmasına neden olmuştur.



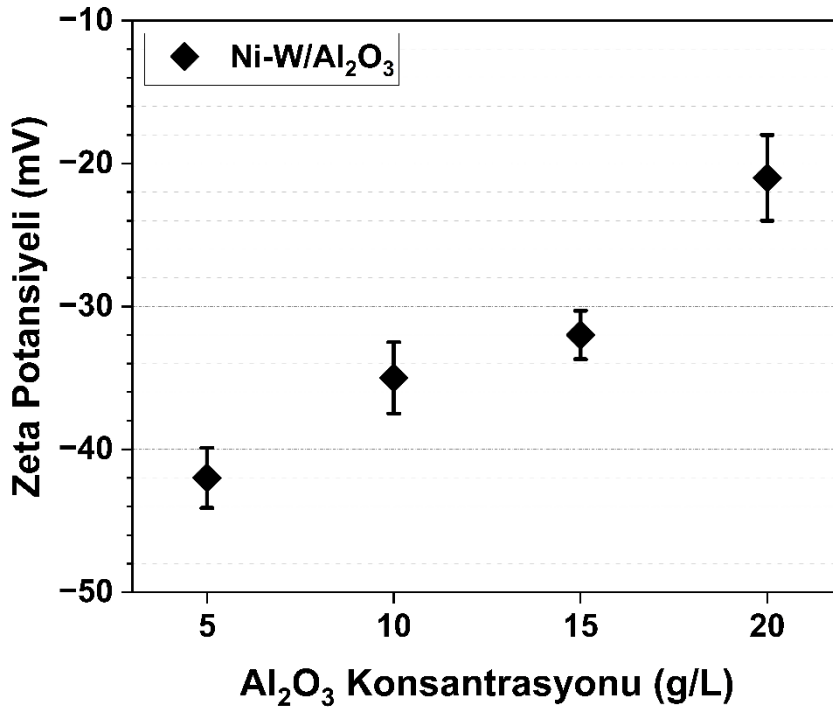
Şekil 7.15. Farklı Al_2O_3 konsantrasyonlarında üretilen Ni-W/ Al_2O_3 kompozit kaplamaların kesit FESEM görüntüleri.

Benzer şekilde, Gül ve Usta (2023) da farklı Al_2O_3 konsantrasyonlarında üretilen Ni-W-P/ Al_2O_3 kompozit kaplamalarda, partikül miktarındaki artışın kaplama kalınlığını

önemli ölçüde artırdığını; ancak yüksek Al_2O_3 oranlarında parçacıkların çözeltide aglomerasyon eğilimi göstermesiyle mikroyapısal homojenliğin bozulduğunu rapor etmişlerdir. Araştırmacılar, optimum partikül konsantrasyonunun hem kaplama kalınlığı hem de yüzey bütünlüğü açısından kritik bir rol oynadığını ve bu dengenin aşılması durumunda yapısal kusurların ortaya çıktığını belirtmiştir (Gül ve Usta, 2023).

Sonuç olarak, Al_2O_3 katkısı belirli bir konsantrasyona kadar kaplamada partikül miktarını arttırmakta ve yapısal kaliteyi iyileştirmektedir. Ancak 15 g/L üzerindeki ilaveler, çözeltideki dağılım dengesini bozarak aglomerasyon kaynaklı yapısal dezavantajlara yol açabilmektedir. Bu bulgular, kaplama performansı açısından optimal toz miktarının kritik bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır.

5, 10, 15 ve 20 g/L Al_2O_3 konsantrasyonlarında hazırlanmış kaplama banyolarının zeta potansiyel ölçüm sonuçları Şekil 7.16'da verilmiştir. Bu ölçümler, dispersiyon ortamındaki Al_2O_3 partiküllerinin yüzey yüklerini ve buna bağlı olarak stabilite durumlarını değerlendirmek amacıyla yapılmıştır. Kullanılan yüzey aktif madde (SDS- Sodyum Dodesil Sülfat), anyonik karakterde olup, partikül yüzeyinde negatif yük oluşturarak zeta potansiyel değerlerinin negatif çıkmasına neden olmuştur.



Şekil 7.16. Farklı Al_2O_3 konsantrasyonlarında üretilen Ni-W/ Al_2O_3 kompozit kaplamaların zeta potansiyeli ölçümleri.

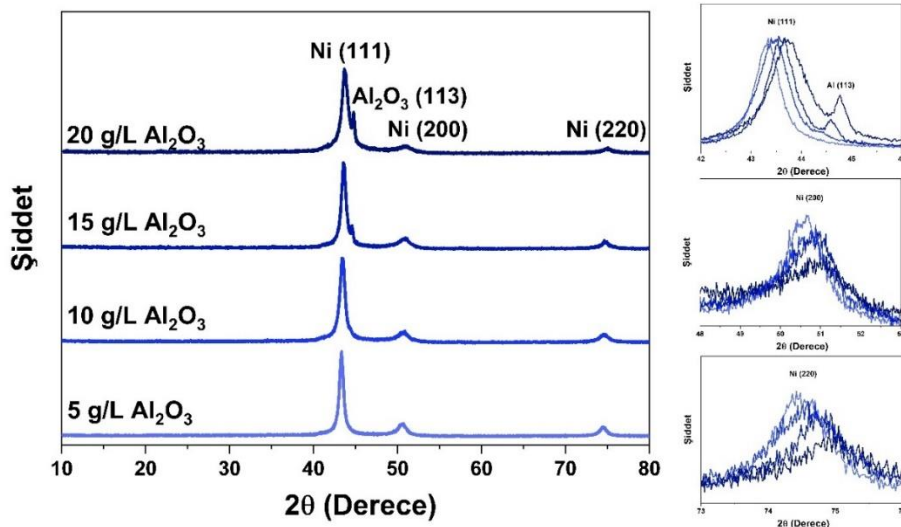
Zeta potansiyeli değerleri sırasıyla -42, -35, -32 ve -21 mV olarak ölçölmüştür. Bu sonuçlar, Al₂O₃ konsantrasyonu arttıkça zeta potansiyelinin mutlak değerinin azaldığını ve buna paralel olarak sistemin elektrostatik stabilitesinin zayıfladığını göstermektedir. Literatürde -30 mV ve altı değerler, koloidal sistemlerin kararlı olarak sınıflandırılmasını mümkün kılarken, bu sınırın üzerinde kalan zeta potansiyelleri partiköller arası elektrostatik itmenin yetersiz olduğu ve aglomerasyon riskinin arttığı durumlara işaret etmektedir.

Bu bağlamda, 5 ve 10 g/L Al₂O₃ konsantrasyonlarında ölçölen yüksek negatif zeta potansiyel değerleri, partiköller arası kuvvetli elektrostatik itmeleri temsil etmekte ve bu durum, kaplama sırasında tozların daha seyrek ve homojen dağılmasına neden olmaktadır. Ancak bu yoğun itme kuvveti, partiköllerin kaplama yapısına etkin şekilde entegre edilmesini de sınırlayabilmektedir. Buna karşılık, 20 g/L Al₂O₃ içeren banyoda ölçölen -21 mV’lik zeta potansiyeli, dispersiyon stabilitesinin önemli ölçüde azaldığını göstermektedir. Bu düşüş, SDS’nin yüzey yükünü dengeleyememesi nedeniyle parçacıklar arası çekim kuvvetlerinin artmasına ve sistemde aglomerasyonun kaçınılmaz hale gelmesine yol açmıştır. Nitekim bu durum, kaplama içerisinde gözlemlenen parçacık kümelenmeleri ve yapısal bozulmalarla da örtüşmektedir.

Sonuç olarak, 15 g/L Al₂O₃ katkısı, zeta potansiyel açısından optimum kararlılığa sahip bir sistem sunmuş ve bu durum yüzey morfolojisi ile kesit görüntüleriyle de desteklenmiştir.

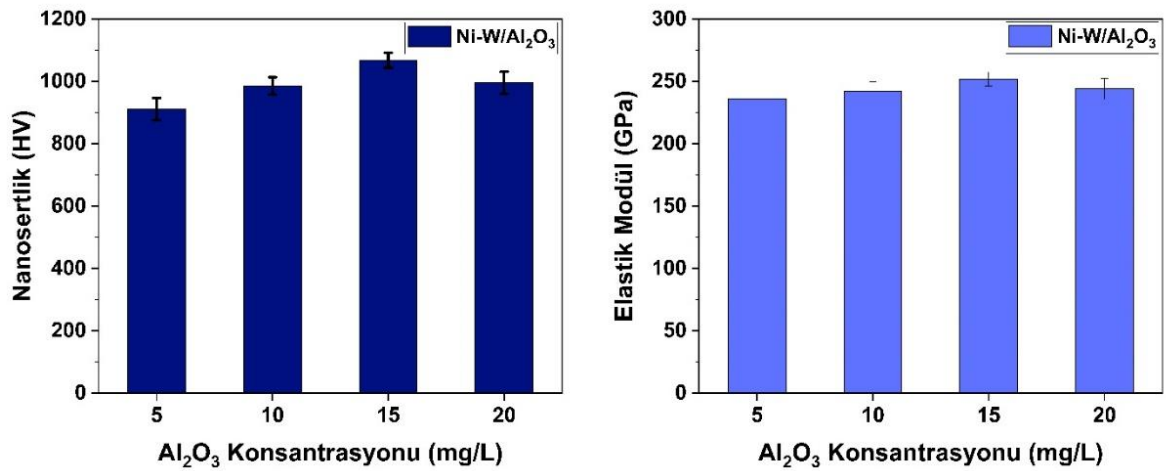
Şekil 7.17, farklı Al₂O₃ konsantrasyonlarında (5, 10, 15 ve 20 g/L) üretilen Ni-W/ Al₂O₃ kompozit kaplamaların XRD analiz sonuçlarını göstermektedir. XRD desenlerinde yaklaşık 44°, 52° ve 76° 2θ değerlerinde sırasıyla Ni (111), Ni (200) ve Ni (220) kristal düzlemlerine karşılık gelen karakteristik pikler açıkça görölmektedir. Ayrıca, 15 ve 20 g/L Al₂O₃ içeren kaplamalarda 44° civarında Al₂O₃ (113) düzlemine ait pik görölmüştür. Piklerin konumları incelendiğinde, özellikle (111) düzlemine ait nikel pikinde Al₂O₃ konsantrasyonunun artışıyla birlikte sağa kayma (yüksek 2θ yönünde) gözlenmektedir. Bu durum, kristal yapıdaki atomlar arası düzlemler arasındaki mesafenin azaldığını, yani kafes parametresinde bir daralma meydana geldiğini göstermektedir. Bu durum genellikle kompozit yapıdaki sert seramik fazların (Al₂O₃ gibi) metal matris içinde neden olduğu iç gerilmelerle açıklanmıştır.

Bununla birlikte, Al_2O_3 konsantrasyonunun artmasıyla birlikte özellikle (200) ve (220) düzlemlerine karşılık gelen nikel piklerinin şiddetinde belirgin bir azalma dikkat çekmektedir. Bu azalma, kaplama yapısında kristalitenin düşmesine veya kristallerin boyutunun küçülmesine işaret etmektedir. Yüksek miktarda Al_2O_3 katkısı, kristal büyümesini baskılayarak daha amorf yapılı veya ince taneli bir yapı oluşumuna neden olmuş olabilir. Ayrıca bu seramik fazların matriste homojen dağılmaması, XRD deseninde net kristal yönelimlerin zayıflamasına da katkı sağlamıştır.



Şekil 7.17. Farklı Al_2O_3 konsantrasyonlarında üretilen Ni-W/ Al_2O_3 kompozit kaplamaların XRD analizleri.

Şekil 7.18’de, farklı Al_2O_3 konsantrasyonlarında üretilen Ni-W/ Al_2O_3 kompozit kaplamaların nanosertlik (HV) ve elastik modül (GPa) değerleri verilmiştir.



Şekil 7.18. Farklı Al_2O_3 konsantrasyonlarında üretilen Ni-W/ Al_2O_3 kompozit kaplamaların sertlik ve elastik modül değerleri.

Al_2O_3 konsantrasyonu 5 g/L'den 15 g/L'ye kadar arttıkça hem sertlik hem de elastik modül değerlerinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Sertlik değerleri sırasıyla 911, 985, 1068 ve 996 HV; elastik modül değerleri ise 236, 242, 252 ve 244 GPa olarak ölçülmüştür. Bu artış, Al_2O_3 partiküllerinin sert ve amorf seramik fazlar olarak Ni-W matrisine dağılmasıyla açıklanabilir. Özellikle 15 g/L Al_2O_3 konsantrasyonunda gözlenen maksimum sertlik değeri, toz partiküllerinin kaplama içinde homojen dağılım gösterdiği, çökelme sırasında çekirdeklenme yoğunluğunu artırarak daha ince taneli ve yoğun bir mikroyapı oluşmasına katkı sağladığını göstermektedir. Bu morfoloji yük altında deformasyonu sınırlayarak daha yüksek sertlik değerlerine ulaşılmasını sağlamıştır.

Elastik modül değerlerindeki artış da benzer şekilde, matrise dağılan Al_2O_3 partiküllerinin, yük transferini daha etkili biçimde sağlamasıyla ilişkilendirilmektedir. Özellikle 15 g/L konsantrasyonlu kaplamada hem sertlik hem elastik modül en yüksek değerlere ulaşmıştır; bu da bu konsantrasyonun hem dayanım hem de elastik rijitlik bakımından optimum katkı miktarı olduğunu göstermektedir.

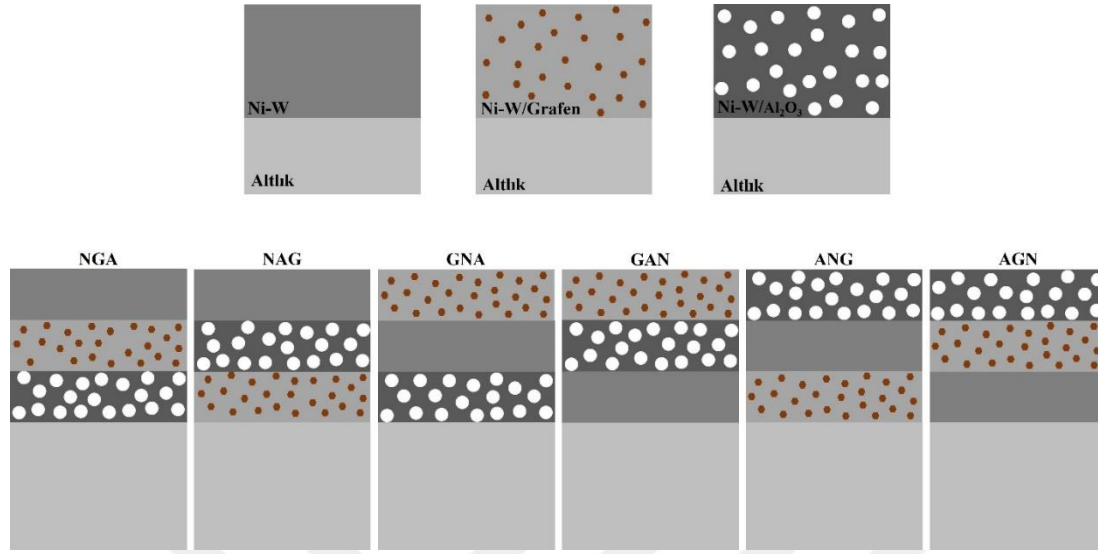
Ancak 20 g/L Al_2O_3 konsantrasyonuna ulaşıldığında, her iki mekanik parametrede de azalma eğilimi görülmektedir. Bu durum, önceki FESEM kesit görüntülerinde de ortaya konduğu üzere, aşırı partikül miktarının kaplama içinde aglomerasyonlara yol açarak yapısal sürekliliği bozması, yerel poroziteler ve mikroskobik düzensizlikler oluşturmasıyla açıklanabilir. Ayrıca, yüksek partikül yoğunluğunun kaplama sırasında iyon hareketini engellemesi, kaplama yapısında yeterli metal matris sürekliliğinin sağlanamamasına ve bu nedenle mekanik performansın düşmesine neden olmuş olabilir.

Sonuç olarak, bu bulgular, Al_2O_3 katkı oranı arttıkça sertlik ve elastik modül değerlerinin arttığını, ancak 20 g/L konsantrasyonun optimum sınırı aşarak mikroyapısal ve mekanik olarak olumsuz etkiler yarattığını ortaya koymaktadır. Bu yönüyle 15 g/L Al_2O_3 konsantrasyonlu kaplama hem sertlik hem de elastikiyet açısından en başarılı sonuçları vermiştir.

7.4. Çok Katmanlı Kaplamalar

Şekil 7.19, katmansız (tek tabakalı) ve çok katmanlı (çok tabakalı) kaplamaların şematik bir karşılaştırmasını göstermektedir. Bu şemada, üst tarafta tek katmanlı (Ni-W, Ni-W/Grafen ve Ni-W/ Al_2O_3) kaplama yapısı, sağ tarafta ise aynı toplam kalınlıkta

ancak farklı malzeme içerikli üç tabakanın ardışık olarak biriktirilmesiyle oluşturulan çok katmanlı yapı çizilmektedir.



Şekil 7.19. Katmansız ve çok katmanlı kaplamaların şematik gösterimi.

Çok katmanlı kaplamalarda, bu çalışmada kullanılan üç temel katman tipi bulunmaktadır: saf Ni-W alaşım katmanı (şemada N ile gösterilmiş), grafen takviyeli Ni-W kompozit katmanı (G) ve Al_2O_3 takviyeli Ni-W kompozit katmanı (A). Şekilde de örnek olarak N–G–A dizilimiyle adlandırılan üç katmanlı bir kaplamanın yüzeyden altlık malzemeye doğru sırasıyla Ni-W, Ni-W/Grafen ve Ni-W/ Al_2O_3 tabakalarından oluştuğu gösterilmiştir. Bu kodlama üst katmandan alt katmanlara doğru katmanların sırasını temsil etmektedir; örneğin NAG kodlu bir kaplama Ni-W üst katman, Al_2O_3 takviyeli orta katman ve grafen takviyeli alt katman şeklinde yapılandırılmıştır.

Şematikte görüldüğü gibi çok katmanlı kaplamalar şu kombinasyonlarda hazırlanmıştır:

- NGA: Alt katman Ni-W, orta katman Al_2O_3 takviyeli, üst katman Grafen takviyeli,
- NAG: Alt katman Ni-W, orta katman Grafen takviyeli, üst katman Al_2O_3 takviyeli,
- GNA: Alt katman Grafen takviyeli, orta katman Ni-W, üst katman Al_2O_3 takviyeli,
- GAN: Alt katman Grafen takviyeli, orta katman Al_2O_3 takviyeli, üst katman Ni-W,

- ANG: Alt katman Al_2O_3 takviyeli, orta katman Ni-W, üst katman Grafen takviyeli,
- AGN: Alt katman Al_2O_3 takviyeli, orta katman Grafen takviyeli, üst katman Ni-W.

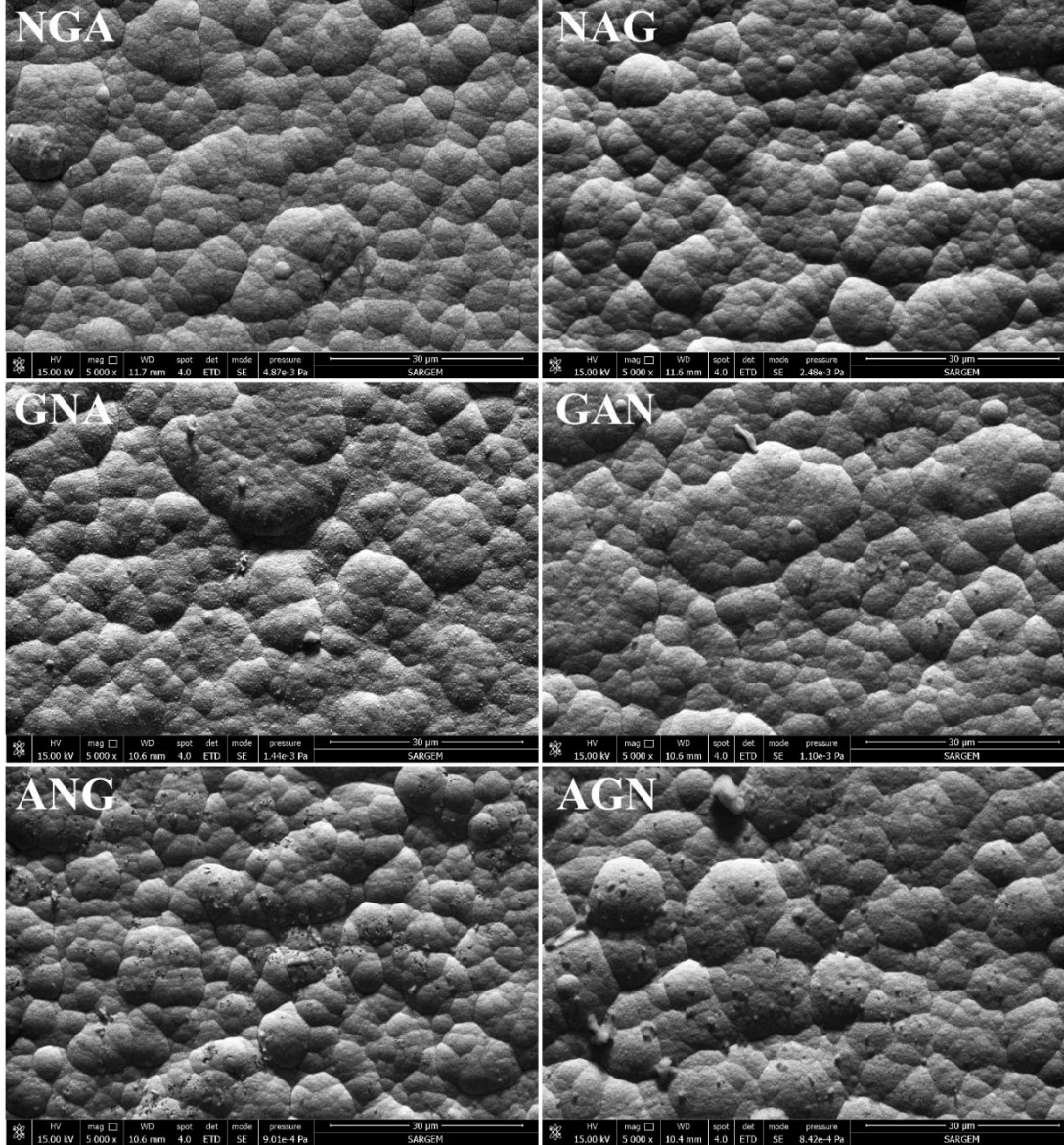
Çok katmanlı kaplama tasarımının amacı, farklı katmanların ayrı ayrı sağladığı avantajları tek bir kaplama sisteminde birleştirmektir. Örneğin alt katman malzemesi tipik olarak altlık ile iyi bir yapışma ve gerektiğinde tok bir taşıyıcı tabaka sağlarken, orta katman farklı bir özellik (örneğin yüksek sertlik veya yağlayıcılık) katar, üst katman ise doğrudan yüzeye etkileşeceğinden sürtünme, oksidasyon direnci vb. kritik yüzey özelliklerini iyileştirir. Bu sayede, tek bir malzemeyle elde edilemeyecek çok yönlü bir performans artışı hedeflenir.

Kombinasyonlar, takviye sırasının kaplama performansına olan etkisini değerlendirmeye yönelik planlanmıştır. Böylece katmanların konumlandırılmasına bağlı olarak ortaya çıkabilecek mikrosertlik, aşınma dayanımı, yüzey özellikleri ve yapışma mukavemeti gibi parametrelerdeki farklılıklar detaylı olarak analiz edilmiştir. Çok katmanlı kaplama yaklaşımı, kompleks servis koşullarına sahip uygulamalar için daha dengeli ve çok yönlü performans sağlayan kaplama sistemleri geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

Şekil 7.20’de üç katmandan oluşan farklı kombinasyonlardaki kaplamaların yüzey morfolojilerini gösteren FESEM görüntüleri sunulmuştur. Bu görüntüler, farklı katman sıralamalarının kaplamanın son yüzey yapısını nasıl etkilediğini anlamamıza yardımcı olmaktadır. Her kaplamanın üst yüzeyi, en son kaplanan katman olduğu için mikroyapı analizi açısından özellikle önemlidir.

NGA ve NAG numuneleri ele alındığında, bu iki kaplamada üst katmanın Ni-W alaşımı olduğu görülmektedir. NGA numunesinde alt katmanda Ni-W/ Al_2O_3 , orta katmanda ise Ni-W/Grafen yer alırken; NAG numunesinde sırasıyla grafen ve Al_2O_3 takviyeli katmanlarının sıralaması tersine çevrilmiştir. Her iki kaplamada da Ni-W yüzeyi, tipik nodüler morfolojisini korumakla birlikte, katmansız Ni-W kaplamaya göre daha küçük boyutlu nodül adaları görülmüştür. Bu durum, alt katmanda yer alan grafen veya Al_2O_3 takviyeli kaplamaların altlığa göre daha farklı bir yüzeye sahip olmasından kaynaklanmamaktadır. Yüzey pürüzlülüğü ve yüzeyin kimyasal farklılığı, birikme sırasında heterojen çekirdeklenme alanlarının artırarak üst katmanda daha ince

taneli bir yapıya sebep olacak şekilde büyümeye yol açmıştır. Alt katmandaki takviye fazları, çökelme kinetiğini dolaylı olarak etkileyerek Ni^{2+} iyonlarının daha homojen dağılmasını ve daha sık çekirdeklenme noktaları oluşmasını sağlamış olabilir. Bu da nodül boyutlarını küçültürken daha kompakt bir Ni-W yüzeyi elde edilmesine neden olmuştur.



Şekil 7.20. Çok katmanlı kaplamaların yüzey FESEM görüntüleri.

GNA ve GAN numuneleri incelendiğinde, bu iki kaplamada grafen takviyeli Ni-W katmanının üst yüzeyde yer aldığı görülmektedir. GNA’da alt katman Al_2O_3 takviyeli, orta katman saf Ni-W iken; GAN numunesinde bu sıralama tersidir. GNA ve GAN numunelerinin yüzeyleri katmansız Ni-W/grafen kaplamayla kıyaslandığında, daha pürüzsüz ve grafenin daha homojen dağıldığı görülmüştür. Katmansız Ni-W/grafen

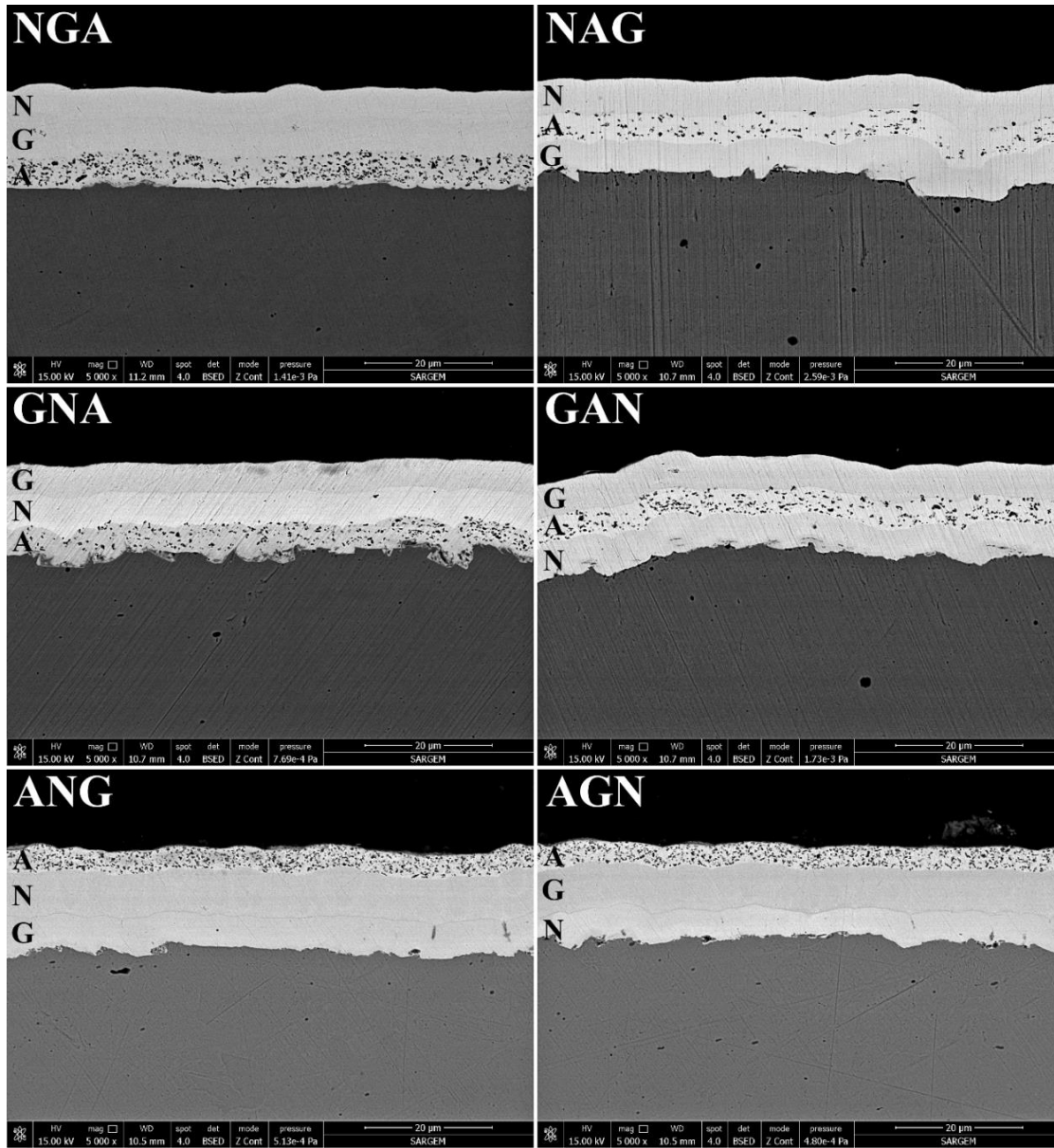
kaplamaya kıyasla, burada grafen yüzeye çıkmamış; ada benzeri tepecikler yerine daha homojen bir yüzey yapısı elde edilmiştir. Bu iyileşmiş morfoloji, alt katmanların çekirdeklenme davranışına etkisiyle açıklanabilir. Önceden oluşmuş düzgün alt katmanlar, grafenin düzensiz bir şekilde yüzeye çıkmasını engelleyerek daha kompakt bir yapı oluşumuna olanak tanımıştır.

ANG ve AGN numunelerinde üst katmanda olarak Al_2O_3 takviyeli Ni-W kaplamanın olduğu çok katmanlı kaplamalardır. ANG numunesinde orta katmanda Ni-W, alt katmanda grafen takviyeli kaplama bulunurken AGN numunesinde bu sıralama yer değiştirmiştir. Bu iki kaplama, yüzeydeki nodül büyüklüğü ve dağılımı açısından birbirine benzemekte, ancak katmansız Al_2O_3 takviyeli Ni-W kaplamaya göre daha homojen ve daha düzgün bir yüzey yapısı sergilemektedir. Her iki kaplamada da yüzeyde takviye elamanı olan Al_2O_3 tozlarının homojen dağıldığı görülmektedir. Burada da yüzeyin mikroyapısının alt katmanların çökeltme kinetiği ve yüzey enerjisi koşullarından etkilendiği söylenebilir.

Genel olarak, elde edilen bulgular, üst yüzey morfolojisinin sadece o katmanda kullanılan takviye ile değil; alttaki katmanların sunduğu yapısal destek, çökeltme morfolojisi ve iyonik dağılımla da doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Tüm katmanlı kaplamalarda, yüzey sürekliliği korunmuş, alt katmanlara ait herhangi bir ayrışma veya yüzey bozukluğu gözlemlenmemiştir. Bu durum, katmanlar arası iyi bir aderans sağlandığını ve kaplamanın genel bütünlüğünün korunduğunu göstermektedir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirildiğinde, çok katmanlı kaplamaların yüzeyleri tek katmanlı muadilleriyle benzer ya da daha düşük pürüzlülük değerlerine sahip olmuştur. Örneğin, üst katmanında grafen, orta katmanında saf Ni-W, alt katmanında Al_2O_3 içeren bir kaplama, katmansız Ni-W/grafen kaplamaya kıyasla daha düşük yüzey pürüzlülüğü sergilemiştir. Bu da çok katmanlı mimarinin yüzey kalitesine olumsuz bir etkisi olmadığını, aksine kontrol edilebilir bir yapı sunduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, Şekil 7.20 çok katmanlı kaplamalarda üst yüzey morfolojisinin yalnızca üst katmandaki bileşenle değil, alt katmanların yapısal etkileriyle birlikte şekillendiğini ve bu yapısal kombinasyonun istenen yüzey özelliklerini optimize etmek için etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Şekil 7.21, üç farklı takviye malzemesinin (Ni-W, Ni-W/Grafen ve Ni-W/Al₂O₃) farklı sıralamalarla uygulanmasıyla elde edilen çok katmanlı kaplamaların kesit görüntülerini sunmaktadır. Bu görüntüler, katman geçişleri, tabaka homojenliği ve takviye fazlarının dağılımı gibi yapısal özelliklerin analiz edilmesine olanak sağlar. Kesitler incelendiğinde, üç tabakalı olarak tasarlanmış kaplamalarda farklı kontrastlara sahip ayrı katmanlar ayırt edilebilir. Örneğin, grafen takviyeli Ni-W katmanı, matristeki karbon nedeniyle görüntüde hafif daha koyu veya farklı bir doku halinde görünebilirken, Al₂O₃ takviyeli Ni-W katmanı görece daha parlak veya noktasal desenli bir yapı sergileyebilir. Saf Ni-W katmanı ise üniform bir kontrasta sahip homojen bir tabaka olarak seçilecektir.



Şekil 7.21. Çok katmanlı kaplamaların kesit FESEM görüntüleri.

NGA ve NAG numunelerinde üst katman Ni-W alaşımıdır. Bu iki numunenin kesitlerinde Ni-W üst tabakasının diğer katmanların üzerinde düzgün bir şekilde biriktiği ve herhangi bir ayrışma göstermediği görülmektedir. Bu durum, Şekil 20'deki yüzey görüntülerini de desteklemektedir.

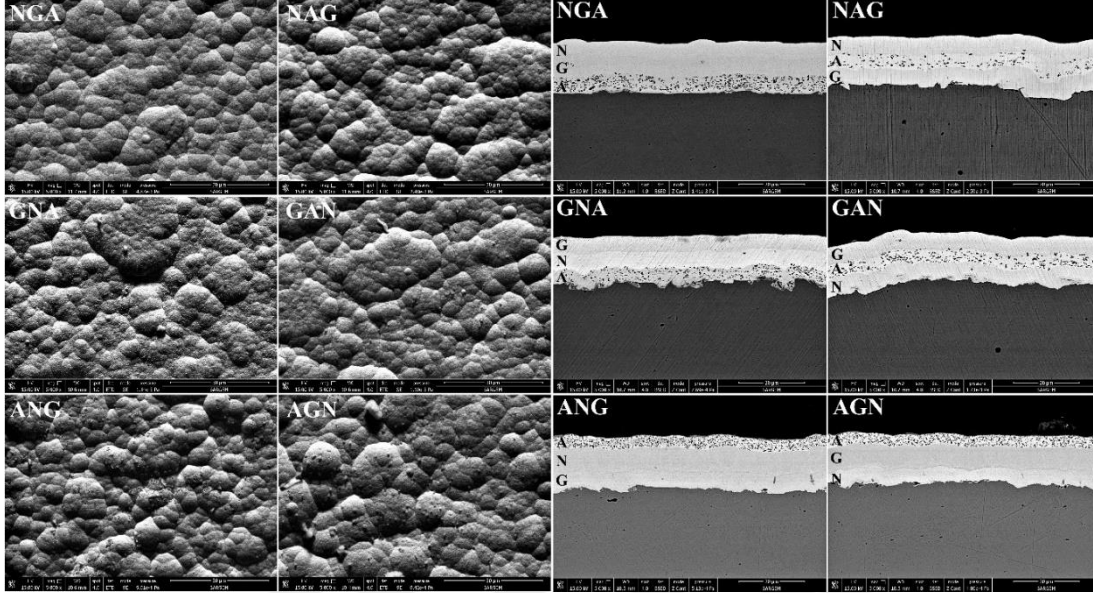
GNA ve GAN numunelerinde üst katmanda grafen takviyeli Ni-W kaplama yer almaktadır. Her iki numunede de altlık yüzeyinin dalgalı olmasına rağmen üst katmanda daha pürüzsüz bir yüzey ortaya çıkmıştır bu durum ara ve alt katmanların çökeltme kinetiğini modifiye ederek daha düzgün bir üst katman oluşumuna katkı sağladığı anlaşılmaktadır.

ANG ve AGN numunelerinde ise en üstte Al_2O_3 takviyeli katman yer almaktadır. Bu iki kaplamada da Al_2O_3 partikülleri üst katmanda daha belirgin şekilde tespit edilmiştir. Kesit görüntülerinde Al_2O_3 taneciklerinin tabaka boyunca homojen dağılım gösterdiği ve kaplama bütünlüğünü bozmadığı anlaşılmaktadır. Katmansız Ni-W/ Al_2O_3 kaplamaya göre, çok katmanlı yapı içerisinde Al_2O_3 partiküllerinin daha kontrollü çökeltme davranışı gösterdiği söylenebilir.

Genel olarak tüm katmanlı kaplamaların kesit görüntülerinde katman geçişleri net, yüzey-altyapı birleşimi güçlü ve mikroyapı sürekliliği yüksek seviyededir. Bu durum, çok katmanlı kaplama sürecinin başarılı bir şekilde yürütüldüğünü ve her katmanın birbirine sıkı bir şekilde bağlandığını göstermektedir. Bu da ardışık katmanların birikme sırasında, alttaki katmanın yüzeyinin yeterince aktif kalması ve üstteki katmanın onunla metalürjik olarak kaynaşması sayesinde güçlü bir katmanlar arası bağ oluştuğunu gösterir. Hiçbir arayüzde çatlak veya delaminasyon emaresinin olmaması, kaplamanın dış yükler altında da katmanlar boyunca beraber çalışacağını bir göstergesidir. Kaplama kalınlıkları benzer seviyelerde olup ($\sim 5 \mu m$), tüm numunelerde homojen kaplamalar elde edilmiştir.

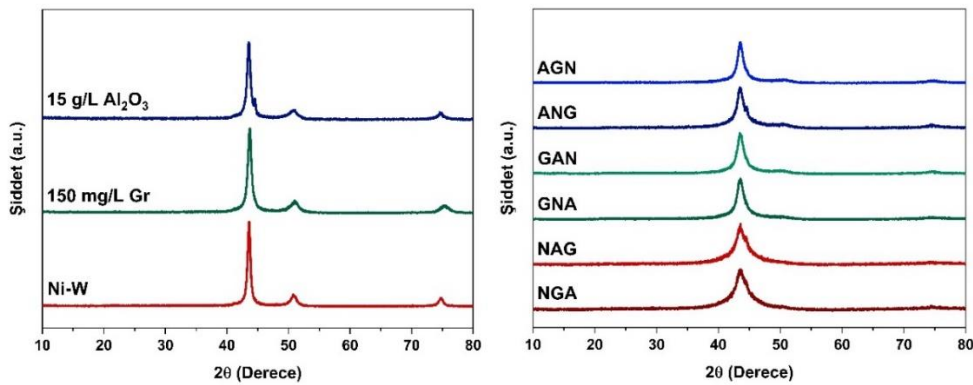
Sonuç olarak, kesit görüntüleri çok katmanlı tasarımın sadece yüzey morfolojisi değil, aynı zamanda iç yapı ve katman geçişleri açısından da önemli avantajlar sağladığını ortaya koymaktadır. Bu yapı sayesinde, takviye fazlarının daha etkili kullanılabildiği, çökeltme davranışının daha dengeli hale geldiği ve kaplamaların genel bütünlüğünün artırıldığı görülmektedir.

Şekil 7.22’de çok katmanlı kaplamalara ait yüzey ve kesit FESEM görüntüleri birlikte sunulmuştur. Bu sayede, kaplamaların dış yüzey yapıları ile iç yapılarındaki katman dizilimleri aynı anda gözlemlenebilmektedir.



Şekil 7.22. Katmansız ve çok katmanlı kaplamaların yüzey ve kesit FESEM görüntülerinin karşılaştırılması.

Şekil 7.23’te katmansız (solda) ve çok katmanlı (sağda) kaplamalara ait XRD desenleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Katmansız kaplamalar üç farklı takviye koşulunu temsil etmektedir: saf Ni-W, 150 mg/L grafen takviyeli ve 15 g/L Al_2O_3 takviyeli kaplamalar. Bu kaplamalarda yaklaşık 44° , 52° ve 76° 2θ açılarında sırasıyla Ni’nin (111), (200) ve (220) düzlemlerine ait karakteristik pikler net biçimde gözlemlenmektedir. Katmansız kaplamaların XRD analizleri önceki bölümlerde de ayrıntılı biçimde açıklanmıştır.



Şekil 7.23. Katmansız ve çok katmanlı kaplamaların XRD grafiklerinin karşılaştırılması.

Çok katmanlı kaplamaların XRD desenleri katmansız kaplamalarla karşılaştırıldığında belirgin farklar görülmüştür. Tüm katmanlı kaplamalarda, sadece Ni (111) düzlemine ait $\sim 44^\circ$ 'lik pik yüksek şiddette belirgin şekilde gözlemlenirken; Ni (200) ve Ni (220) düzlemlerine karşılık gelen pikler çok zayıf ya da neredeyse belirlenemez düzeyde kalmıştır. Bu durum, kaplamalarda güçlü bir (111) yönelimine işaret etmektedir. Farklı alt ve orta katman dizilimleri, üst yüzeyin kristal büyüme yönünü etkileyerek özellikle (111) düzleminde yönelimi teşvik etmiştir. Böylece, diğer yönlerde kristal gelişimi bastırılmış ve daha belirgin bir yönlenme meydana gelmiştir.

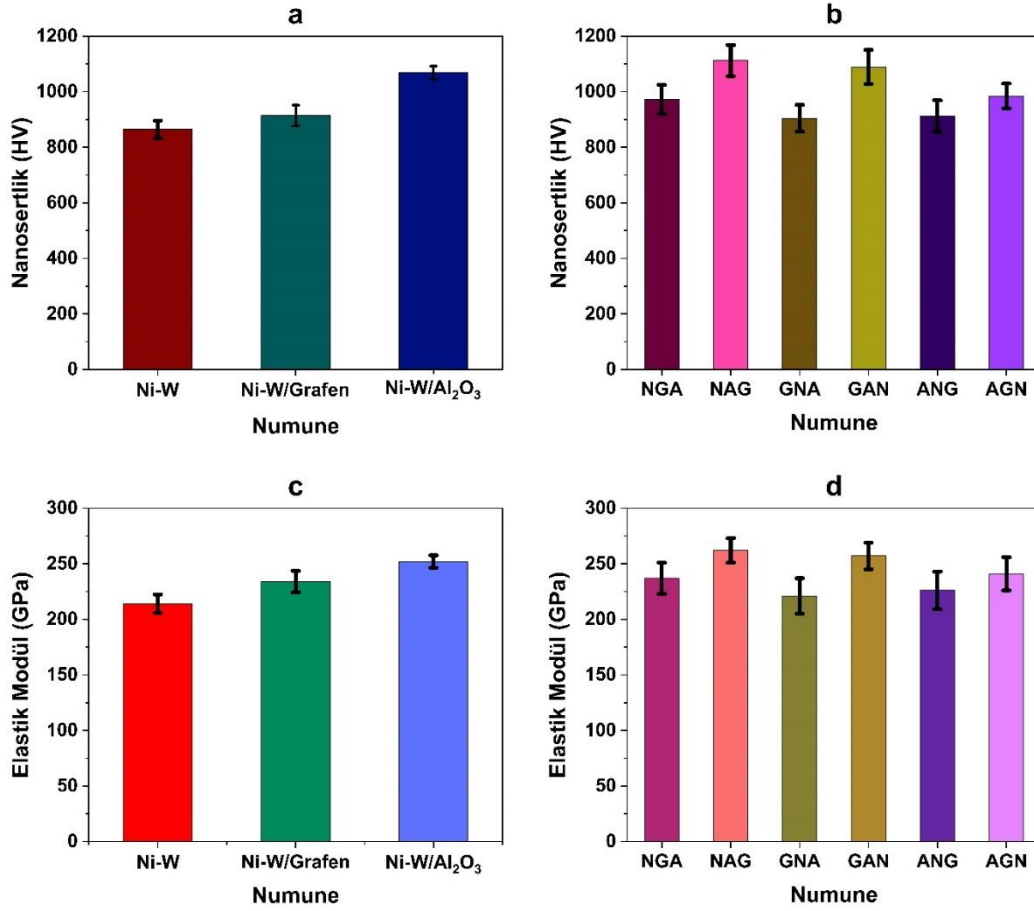
Bununla birlikte, çok katmanlı kaplamalarda gözlenen Ni (111) pikinin genişliği, katmansız kaplamalara göre belirgin şekilde artmıştır. Pik genişlemesi, özellikle kristal boyutundaki küçülmeye ve mikro gerilimlerin artmasına işaret eder. Alt katmanların çökeltme süreci üzerinde oluşturduğu etkiler, üst katmanda daha fazla heterojen çekirdeklenme merkezine yol açarak daha ince kristallerin oluşmasına neden olmuştur. Ayrıca farklı termal ve mekanik özelliklere sahip katmanlar arası sınırlar, mikro gerilimlerin birikmesine ve kristal yapının düzenli büyümesini engelleyerek pik genişliğinin artmasına katkı sağlamıştır.

Bir diğer husus ise çok katmanlı kaplamaların XRD desenlerinde, yalnızca üst katmanda Al_2O_3 bulunmayan kaplamalarda dahi yaklaşık $44,5^\circ$ civarında Al_2O_3 (113) düzlemine ait zayıf bir pik gözlenmiş olmasıdır. Bu durum, XRD tekniğinin penetrasyon derinliği sayesinde alt katmanlardan da veri alınabildiğini göstermektedir. Üst katmanların nispeten ince olması, alttaki Al_2O_3 katkılı tabakalardan yansıyan X-ışınlarının dedektöre ulaşmasını mümkün kılmıştır. Dolayısıyla, XRD deseninde bu zayıf Al_2O_3 piki, yalnızca üst yüzeydeki yapıyı değil; altta yer alan katkılı tabakaların etkisini de yansıtabilmektedir.

Sonuç olarak, çok katmanlı yapının kristal yönelimi üzerinde ciddi bir etki oluşturduğunu, özellikle (111) düzleminde yoğunlaşan yönlenmiş kristal yapılar elde edilmesini sağladığını ortaya koymaktadır. XRD analizi sonuçları, çok katmanlı kaplama tasarımının yalnızca yüzey özelliklerini değil, aynı zamanda kristal yapının gelişimini de doğrudan etkilediğini göstermiştir.

Katmansız ve çok katmanlı kaplamaların sertlik ve elastik modül değerlerini kıyaslayan grafikler Şekil 7.24'te verilmiştir. Katmansız kaplamalara ait değerler Şekil

7.24.(a) ve Şekil 7.24.(c) grafiklerinde, çok katmanlı kaplamalara ait değerler ise Şekil 7.24.(b) ve Şekil 7.24.(d) grafiklerinde gösterilmiştir.



Şekil 7.24. Katmansız ve çok katmanlı kaplamaların sertlik ve elastik modül değerleri: a) katmansız kaplamaların sertlik değerleri, b) çok katmanlı kaplamaların sertlik değerleri, c) katmansız kaplamaların elastik modül değerleri ve d) çok katmanlı kaplamaların elastik modül değerleri.

Şekil 7.24.(a)'da görüldüğü üzere, katmansız kaplamalarda sertlik değeri Ni-W kaplama için 864 HV, grafen takviyeli Ni-W kaplama için 914 HV ve Al₂O₃ takviyeli Ni-W kaplama için 1068 HV olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, sertlik artışı konusunda Al₂O₃ katkısının grafen katkısından daha etkili olduğunu göstermektedir. Yaklaşık %22'lik bir artış sağlayan Al₂O₃ takviyesi, matrisin deformasyona karşı direncini belirgin şekilde yükseltmiştir. Bunun başlıca nedeni, Al₂O₃'nin seramik doğası gereği yüksek sertlikte olması ve partiküllerin matrise homojen olarak dağılmasıyla dislokasyon hareketini engellemesidir. Grafen takviyesi de heterojen çekirdeklenmeyi teşvik ederek tane boyutunu küçültmüş ve böylece sertlikte bir artış sağlamış, ancak bu etki Al₂O₃'ye kıyasla daha sınırlı kalmıştır.

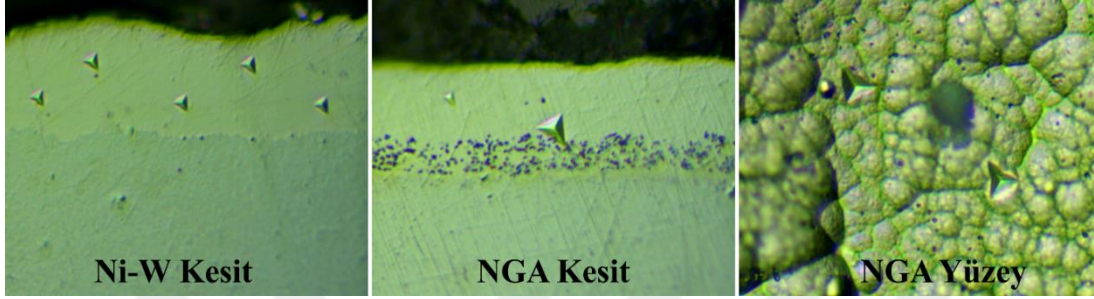
Şekil 7.24.(c)'deki elastik modül değerleri sırasıyla Ni-W için 214 GPa, Ni-W/grafen için 234 GPa ve Ni-W/ Al_2O_3 için 252 GPa'dır. Bu sonuçlar, elastik deformasyon direncinin özellikle Al_2O_3 katkısıyla en yüksek seviyeye ulaştığını göstermektedir. Sertlik ile elastik modül arasındaki bu paralel eğilim, rijitlik artışının da katkı fazlarının türüyle doğrudan ilişkili olduğunu doğrulamaktadır.

Çok katmanlı kaplamalara ait sonuçlar ise Şekil 7.24.(b) ve Şekil 7.24.(d)'de sunulmuştur. Burada özellikle belirtmelidir ki, çok katmanlı kaplamaların nanosertlik ölçümleri her numunenin orta katmanını hedef alınarak gerçekleştirilmiştir. Sertlik değerleri NGA: 972 HV, NAG: 1112 HV, GNA: 904 HV, GAN: 1089 HV, ANG: 912 HV ve AGN: 984 HV şeklindedir. Bu verilere göre, orta katmanında Al_2O_3 takviyesi bulunan NAG ve GAN numuneleri en yüksek sertlik değerlerine ulaşmıştır. Orta katmanda grafen takviyesi bulunan NGA ve AGN numuneleri ise bir alt grubu oluşturmakta, orta katmanı saf Ni-W olan GNA ve ANG numuneleri en düşük sertlik değerlerini vermektedir. Katmanlı kaplamaların sertlik değerlerinin, aynı malzeme sisteminin katmansız hâllerine kıyasla daha yüksek çıkması, alt katmanların çökme davranışını ve kristal büyümesini etkileyerek üst katmanda daha yoğun ve ince taneli bir yapı oluşmasına neden olmasıyla açıklanabilir. Özellikle alt katmanlardaki heterojen çekirdeklenme etkisi, orta katmanda kristal büyümesini sınırlayıp sertliği artıran bir rol üstlenmiştir.

Çok katmanlı kaplamaların elastik modül değerleri ise NGA: 237 GPa, NAG: 262 GPa, GNA: 221 GPa, GAN: 257 GPa, ANG: 226 GPa ve AGN: 241 GPa olarak belirlenmiştir (Şekil 7.24.(d)). NAG ve GAN gibi orta katmanında Al_2O_3 takviye içeren numuneler, daha yüksek elastik modül değerleri ile öne çıkmaktadır. Bu durum, orta katmanda yer alan takviye fazlarının yapısal sertliği artırarak elastik davranışı da güçlendirdiğini göstermektedir.

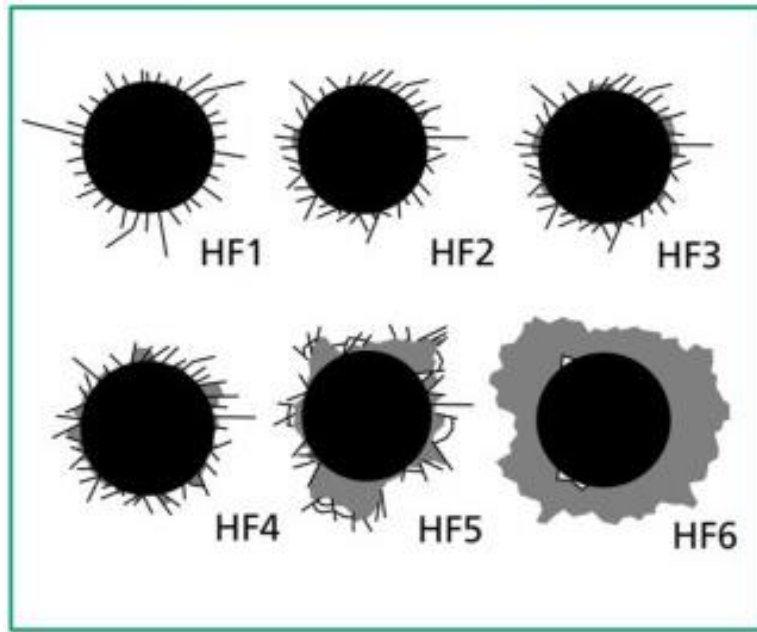
Genel olarak değerlendirildiğinde, çok katmanlı kaplamaların mekanik performansında orta katmanda yer alan malzemenin türü belirleyici rol oynamaktadır. Sertlik ve elastik modül bakımından tüm katmanlı kombinasyonlar, saf Ni-W kaplamaya kıyasla üstün sonuçlar vermiş; hatta bazı kombinasyonlar, en iyi katmansız kaplama olan Ni-W/ Al_2O_3 seviyelerine oldukça yaklaşmıştır. Bu sonuçlar, çok katmanlı tasarım yaklaşımının; yüksek sertlik, iyi yapışma, dengeli elastikiyet ve gelişmiş tribolojik performans gibi özellikleri bir arada sunarak, tek katmanlı sistemlerin ötesine geçebileceğini ortaya koymaktadır.

Şekil 7.25, katmansız (Ni-W) ve çok katmanlı (NGA) kaplamalara ait kesit ve yüzeyden alınan sertlik ölçümlerinin mikroskop görüntülerini göstermektedir. Görsellerde, sertlik testi sırasında oluşan izler açıkça seçilmekte olup, özellikle katman geçişlerinde ve yüzeyde yapılan sertlik ölçümlerinin konumları hakkında bilgi vermektedir. Bu görüntüler, hem ölçüm yapılan alanların doğruluğunu göstermek hem de kaplama yapısının sertlik testine tepkisini gözlemlemek açısından önemlidir.



Şekil 7.25. Katmansız ve çok katmanlı kaplamaların kesit ve yüzeyden alınan sertlik ölçümlerinin görüntüleri.

Şekil 7.26’da Daimler-Benz Rockwell-C yapışma testine ait HF1’den HF6’ya kadar sınıflandırılmış izlerin şematik temsilleri görülmektedir.

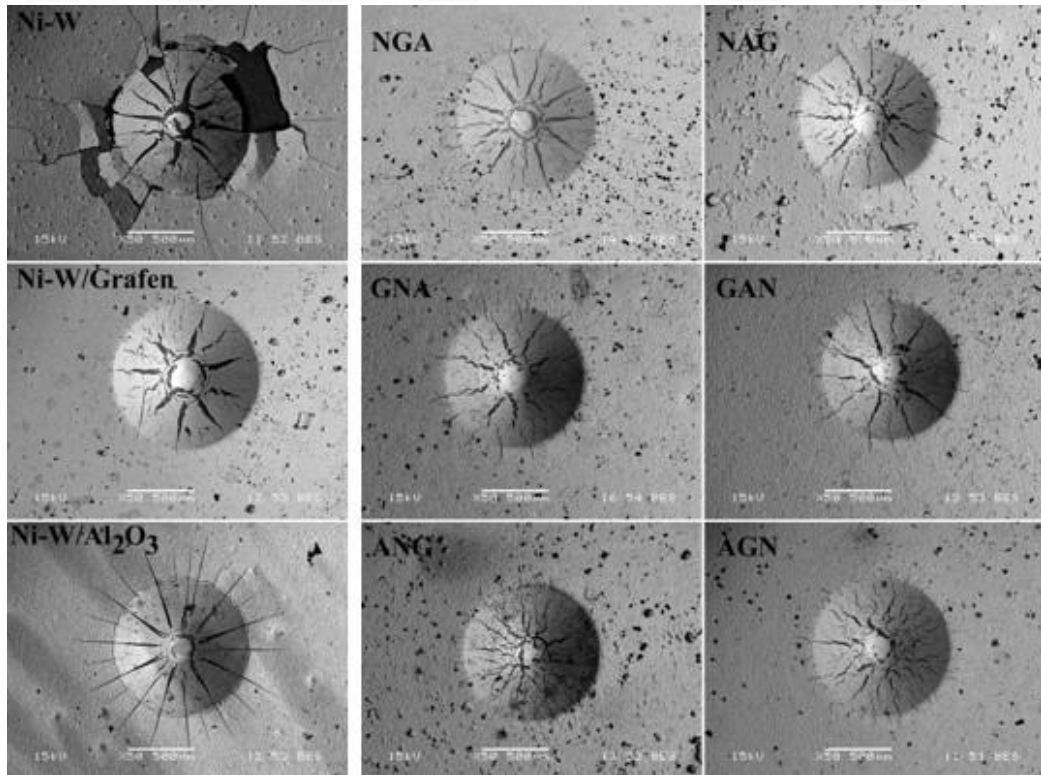


Şekil 7.26. Daimler-Benz Rockwell-C yapışma testi iz görüntülerinin şematik gösterimi.

Bu test, kaplamaların altlık malzemeye olan aderansını (yapışma gücünü) değerlendirmek için kullanılan standart bir yöntemdir. Şekilde, Rockwell-C sertlik

cihazının elmas konik baskı ucunun kaplama yüzeyine belirli bir yük (150 kgf) ile uygulanması sonucunda kaplamada oluşan dairesel iz ve çevresindeki hasar desenleri tasvir edilmiştir. Bu testte, Rockwell-C sertlik ucunun baskı sonucunda oluşan çatlaklar ile kaplama-altlık arayüzünde meydana gelen soyulmalar gözlemlenmektedir. HF1 ile HF4 arasında yer alan izler, yüksek yapışma kalitesine işaret ederken, bu aralıkta genellikle çatlaklar oldukça sınırlı ve kaplamadan soyulma neredeyse gözlenmemektedir. HF5 seviyesinde ise çatlaklara ek olarak kısmi soyulmalar başlamış olup, yapışma kalitesi orta düzeye gerilemiştir. HF6 ise kaplamanın belirgin şekilde altlıktan ayrıldığı, ciddi soyulmaların görüldüğü zayıf yapışma durumunu temsil etmektedir. Bu değerlendirme yöntemi, kaplama performansının yüzeye tutunma açısından görsel ve yarı kantitatif bir şekilde sınıflandırılmasına olanak sağlar.

Şekil 7.27’de, farklı kaplama türlerine ait Daimler-Benz Rockwell-C yapışma testi sonuçları sunulmuştur. Görsellerde, Rockwell-C batıcı ucuyla uygulanan yük sonrasında kaplamalar üzerinde oluşan izler gözlemlenmektedir. Soldaki sütunda yer alan Ni-W, Ni-W/Grafen ve Ni-W/Al₂O₃ katmansız kaplamalara; diğer görseller ise çok katmanlı kaplamalara aittir.



Şekil 7.27. Daimler-Benz Rockwell-C yapışma test sonuçları, Rockwell-C batıcı ucunun iz görüntüleri.

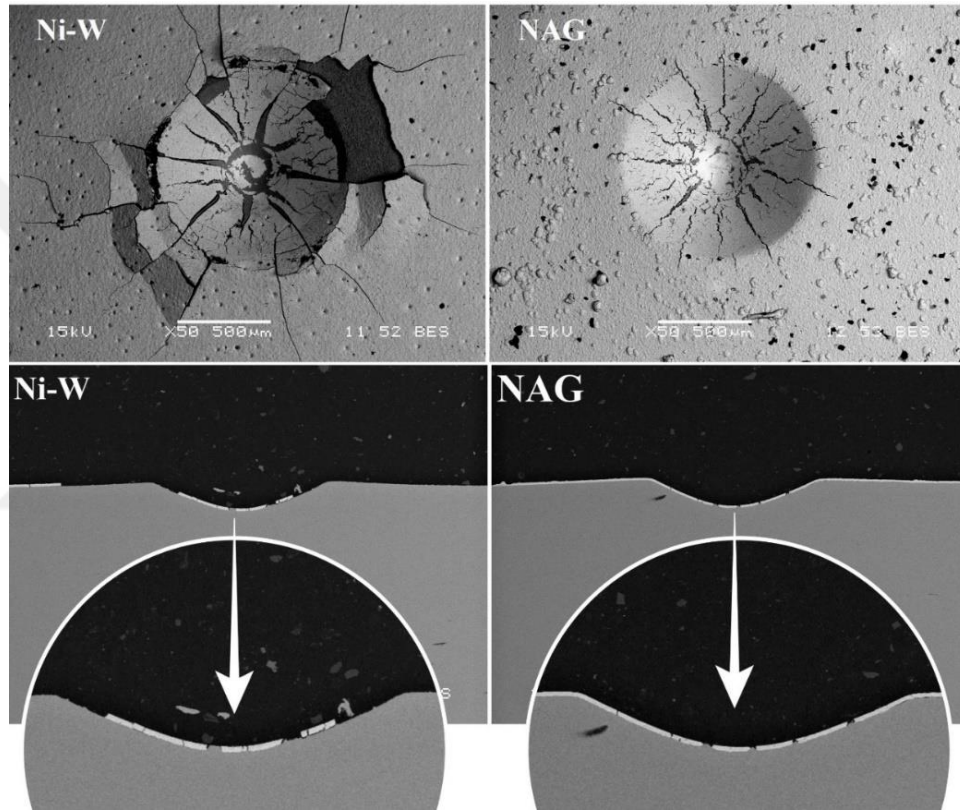
Katmansız kaplamalar değerlendirildiğinde, Ni-W kaplamada oldukça geniş çatlak ağları ve ciddi düzeyde soyulma gözlenmiştir; bu durum HF5 sınıfı ile örtüşmektedir. Ni-W/Grafen kaplamada ise çatlaklar belirginliğini korumakla birlikte, herhangi bir soyulma izine rastlanmamıştır. Grafen takviyesi, kaplamaya bir miktar tokluk kazandırarak çatlakların daha kısa ve yüzeysel kalmasını sağlamıştır; bu yapı HF2 sınıfında değerlendirilebilir. Ni-W/Al₂O₃ kaplamada ise çatlak çizgilerinin kalınlıkları düşmüşse de çatlak sayısı ve çatlakların boyu artmış, ancak yine de soyulma gözlenmemiştir. Al₂O₃ takviyeli Ni-W kaplamada yüksek sertlik nedeniyle bu kaplamalar daha kırılgan bir yapıda olup çatlak boyunun ve sayısının artması sebep olmuştur. Bu kaplama HF3 seviyesinde değerlendirilebilir. Bu durum, Al₂O₃ takviyesine rağmen kaplama-altlık aderansının kabul edilebilir düzeyde olduğunu ve sadece artan sertliğin getirdiği lokal kırılganlık sonucu çatlak yoğunluğunun yükseldiğini gösterir. Bu sonuçlar katmansız kaplamalar arasında grafen ve Al₂O₃ takviyesinin yapışma dayanımını artırdığını göstermektedir.

Çok katmanlı kaplamalar incelendiğinde ise, genel olarak yüzeydeki çatlakların daha kısa, seyrek ve düzenli olduğu görülmektedir. NGA ve NAG numunelerinde iz etrafındaki çatlak yapısı sınırlı olup, soyulma izine rastlanmamıştır; bu numuneler HF1-HF2 aralığında değerlendirilebilir. GNA ve GAN kaplamalarında çatlaklar daha da seyrekleşmiş ve çevredeki soyulmalar gözlenmemiştir; bu yapı da HF1 sınıfına daha yakın durmaktadır. ANG ve AGN kaplamaları da oldukça düzgün test izleri göstermekte olup HF1-HF2 seviyesinde yer almaktadır.

Sonuç olarak, tüm katmanlı kaplamalar yapışma açısından HF1-HF2 seviyelerinde yüksek performans göstermiştir. Özellikle alt ve orta katmandaki yapının üst katmanın çökelme yapısını olumlu yönde etkileyerek gerilmeleri daha dengeli dağıttığı düşünülmektedir. Bu sayede batıcı uç ile yapılan testte oluşan gerilimler daha homojen dağılmış ve kaplamada çatlak ilerlemesi ya da soyulma gibi olumsuz etkiler minimum düzeyde kalmıştır. Çok katmanlı tasarımın yapışma direncini artırdığı bu test ile de net olarak ortaya konmuştur.

Şekil 7.28’de, Daimler-Benz Rockwell-C yapışma testi sonrası elde edilen Ni-W (katmansız) ve NAG (çok katmanlı) kaplamalara ait yüzey ve kesit görüntüleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Görsellerin üst kısmında batıcı uç sonrası yüzeyde oluşan hasar alanları, alt kısmında ise bu bölgelere ait kesit görüntüleri yer almaktadır.

Katmansız Ni-W kaplamaya ait kesit görüntüsünde, kaplama tabakasının altlıktan bölgesel olarak sıyrıldığı ve yapışma ara yüzeyinde kopmalar olduğu açıkça görülmektedir. Bu durum, yapışmanın zayıf olduğunu göstermekte olup yüzeydeki çatlak ağları ile değerlendirildiğinde, Ni-W kaplamanın yüksek kırılgenlık sergilediği söylenebilir. Bununla birlikte, örnek hazırlama sırasında meydana gelebilecek bazı mekanik etkilerin de bu soyulmayı kısmen artırmış olabileceği göz ardı edilmemelidir. Ancak genel olarak, katmansız yapının deformasyon altında dayanımının sınırlı olduğu anlaşılmaktadır.



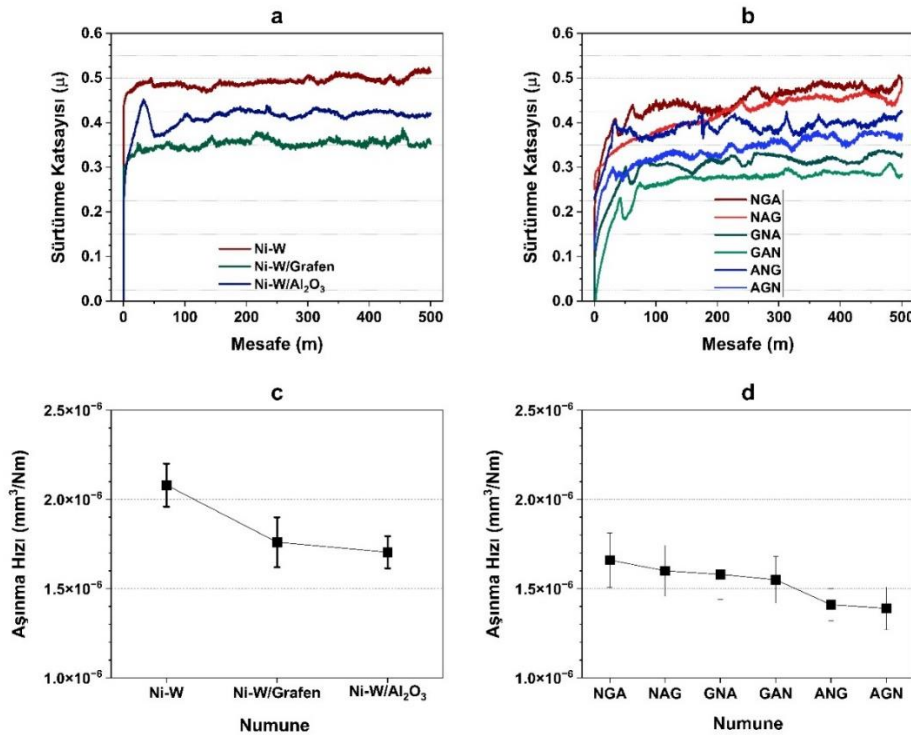
Şekil 7.28. Daimler-Benz Rockwell-C yapışma testi sonrası Ni-W ve NAG kaplamalarının yüzey ve kesit görüntülerinin karşılaştırılması.

NAG numunesine ait kesit görüntüsünde, çok katmanlı yapının deformasyona karşı yüksek direnç sergilediği, kaplamanın altlıktan ayrılmadığı ve tabakalar arasında herhangi bir katman ayrılması veya delaminasyon oluşmadığı net şekilde gözlemlenmektedir. Batıcı uç tarafından uygulanan yüksek lokal gerilime rağmen, kaplama bütünlüğünü korumuş ve yalnızca sınırlı çatlak oluşumları meydana gelmiştir. Bu yapı, NAG kaplamanın mükemmel aderans özelliklerine ve mekanik bütünlüğe sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Katmanlar arasında herhangi bir sınır

izine rastlanmaması, çok katmanlı yapının tek bir homojen sistem gibi davrandığını ve yük transferinin başarılı bir şekilde sağlandığını göstermektedir.

Sonuç olarak, Şekil 7.28 hem yüzey hem de kesit görüntüleri ile katmanlı kaplama tasarımının yapışma direncini ve mekanik stabilitesini önemli ölçüde artırdığını ortaya koymaktadır. Özellikle katman sınırlarının, çatlak ilerlemesini durdurucu bir bariyer görevi görmesi sayesinde alt katmanlar işlevlerini sürdürmüş ve kaplamanın tamamen başarısız olmasının önüne geçilmiştir. Bu bulgular, çok katmanlı yapıların yalnızca mekanik ve tribolojik açıdan değil, aynı zamanda aderans yönünden de üstün performans sunduğunu net biçimde göstermektedir.

Şekil 7.29, katmansız ve çok katmanlı kaplamaların tribolojik performanslarını değerlendirmek amacıyla yapılan kuru kayma testlerine ait sürtünme katsayısı (μ) ve aşınma hızı sonuçlarını göstermektedir. Üstteki a ve b grafiklerinde sırasıyla katmansız ve katmanlı kaplamalara ait sürtünme katsayısı değerlerinin mesafe ile değişimi verilmiştir. Alt kısımdaki c ve d grafiklerinde ise yine sırasıyla katmansız ve katmanlı kaplamalara ait ortalama aşınma hızları (mm^3/Nm) sunulmuştur.



Şekil 7.29. Katmansız ve çok katmanlı kaplamaların sürtünme katsayısı ve aşınma hızı grafikleri: a) katmansız kaplamaların sürtünme katsayısı değerleri, b) çok katmanlı kaplamaların sürtünme katsayısı değerleri, c) katmansız kaplamaların aşınma hızı değerleri ve d) çok katmanlı kaplamaların aşınma hızı değerleri.

Şekil 7.29.(a)'da katmansız kaplamaların kararlı bölgedeki sürtünme katsayısı değerleri Ni-W için yaklaşık 0.49, Ni-W/grafen için 0.35, Ni-W/Al₂O₃ için ise 0.41 civarındadır. Ni-W kaplama en yüksek sürtünme katsayısıyla çalışmaktadır. Testin başlangıcında ~0,5 civarında olan sürtünme katsayısı, sürtünme boyunca bu değeri korumakta veya hafifçe dalgalanmaktadır. Buna karşılık grafen takviyeli Ni-W kaplama, sürtünme katsayısını belirgin biçimde düşürmüştür. Bu büyük düşüş, grafen varlığının bir katı yağlayıcı etkisi göstermesinden kaynaklanır. Sürtünme sırasında grafen tabakaları temas yüzeyleri arasında kayarak bir arayüz filmi oluşturur ve kaplama ile aşındırıcı bilyenin doğrudan teması engeller. Nitekim grafenli kaplamanın sürtünme eğrisi daha düşük seviyede ve daha stabildir; sürtünme esnasında grafenin parçalanarak veya kayarak yüzeye sürekli yenilendiği ve düşük sürtünme rejimini koruduğu anlaşılmaktadır. Ni-W/Al₂O₃ kompozit kaplama ise sürtünme katsayısını saf Ni-W'ye kıyasla azaltmış ancak grafenli kaplama kadar düşürememiştir. Al₂O₃ parçacıkları, grafen gibi yağlayıcı olmasa da kaplamanın sertliğini artırarak mikroyapının aşınma sırasındaki bütünlüğünü korur ve yüzeyin hasara uğramasını önler. Sonuçta Al₂O₃ takviyesi, sürtünme katsayısında yaklaşık %16'lık bir azalma sağlamıştır ki bu da hatırı sayılır bir iyileşmedir. Al₂O₃ takviyesi daha çok sertlik artışı ve aşınma direnciyle katkı sağlamaktadır; bu da yüzey temasında daha stabil ancak daha biraz daha yüksek bir sürtünme değerine neden olabilir.

Şekil 7.29.(b)'de çok katmanlı kaplamaların sürtünme katsayısı değerleri karşılaştırılmıştır. Sürtünme katsayıları kararlı bölgede sırasıyla; NGA için 0.44, NAG için 0.42, GNA için 0.31, GAN için 0.27, ANG için 0.39 ve AGN için 0.34 değerleri elde edilmiştir. GNA ve GAN gibi üst katmanında grafen bulunan veya grafen etkisinin güçlü hissedildiği numunelerde sürtünme katsayısı daha düşük düzeyde seyretmiştir. ANG ve AGN gibi Al₂O₃ etkisinin üst katmanda belirgin olduğu örneklerde ise sürtünme katsayısı, grafenli kaplamalara göre daha yüksek, ancak saf Ni-W'ye göre daha düşüktür. Genel olarak, tüm çok katmanlı kaplamalar, katmansız Ni-W kaplamaya kıyasla daha düşük sürtünme katsayısı sunmuş ve yüzeydeki kompozit yapının sürtünme karakterini iyileştirdiği görülmüştür.

Şekil 7.29.(c) ve Şekil 7.29.(d), sırasıyla katmansız ve çok katmanlı kaplamaların aşınma hızlarını (mm³/Nm) göstermektedir. Ni-W kaplama, sürtünme testinde en yüksek aşınma hızına sahip olmuştur (2,08×10⁻⁶ mm³/Nm). Bu yüksek aşınma, Ni-W'nin görece düşük sertliği ve yüksek sürtünmesi sonucu ciddi malzeme kaybına

uğradığını gösterir. Grafen takviyeli kaplama ise aşınma hızını $1,76 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ seviyesine düşürmüştür. Bu yaklaşık %15'lik iyileşme, grafenin sürtünmeyi azaltarak yüzeydeki kesme kuvvetlerini düşürmesine bağlanabilir. Daha düşük sürtünme, daha az ısı ve aşındırıcı etki demektir; ayrıca grafen tabakaları, karşı yüzey ile kaplama arasında koruyucu bir film oluşturup aşınmayı hafifletebilir. Ni-W/ Al_2O_3 kaplama da benzer bir iyileşme göstermiş, aşınma hızı $1,71 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ olarak ölçülmüştür (~%18 iyileşme). Al_2O_3 parçacıkları, kaplamanın daha sert olmasını sağlayarak aşınma esnasında mikro kesici/parçacıkların malzemeyi kaldırmasını zorlaştırır; bu sayede malzeme kaybı azalır. Sonuç itibarıyla tek tabakalı takviyeli kaplamaların her ikisi de Ni-W kaplamaya göre daha düşük aşınma hızları sergilemiş, Ni-W/ Al_2O_3 bu konuda bir nebze daha iyi performans göstermiştir.

Çok katmanlı kaplamaların aşınma hızları ise Şekil 7.29.(d)'de sunulmuştur. Tüm katmanlı kombinasyonlar, tek katmanlı Ni-W kaplamaya göre belirgin ölçüde daha düşük aşınma hızlarına ulaşmıştır. Hatta birçoğu, tek katmanlı takviyeli kaplamalardan da daha iyi sonuç vermiştir. Özellikle AGN ve ANG kodlu kombinasyonlar $\sim 1,4 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ seviyelerinde en düşük aşınma hızlarına sahiptir. Bu değer, saf Ni-W'nin aşınma hızının yaklaşık üçte ikisine tekabül eder (yaklaşık %33 iyileşme). Diğer kombinasyonlar da sırasıyla: GAN $\approx 1,55 \times 10^{-6}$, GNA $\approx 1,58 \times 10^{-6}$, NAG $\approx 1,60 \times 10^{-6}$, NGA $\approx 1,66 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ aşınma hızları göstermiştir. Bu sonuçlar, katmanlı kaplamaların hepsinin tek tabakalı takviyeli kaplamaların aşınma direncini yakaladığını ve bir kısmının daha da ileri taşıdığını göstermektedir. Bu, çok katmanlı yapının sadece üst katmandan ibaret olmayan, alt ve orta katmanların da yük taşımaya ve yüzey stabilitesine katkı sağladığı bir sistem olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak hem sürtünme katsayısı hem de aşınma hızı açısından çok katmanlı kaplamalar, tek katmanlı yapılarına kıyasla daha dengeli ve üstün performans sergilemiştir. Sürtünmenin düşürülmesinde özellikle grafen takviyesi öne çıkarken, aşınma direncinin artırılmasında Al_2O_3 katkısı daha etkili olmuştur. Katmanlı kaplamalarda ise bu iki takviyenin birlikte veya ardışık kullanımı sayesinde istenen tribolojik özellikler daha kontrollü ve verimli bir şekilde elde edilebilmiştir.

Tablo 7.7, bu tez çalışmasında incelenen katmansız ve çok katmanlı Ni-W esaslı kaplamaların sertlik, elastik modül, sürtünme katsayısı, aşınma hızı ve aşınma hacmi gibi kritik özelliklerinin sayısal karşılaştırmasını sunmaktadır. Her bir kaplama için, yüzeyden ölçülen nanosertlik (HV), enine kesitten ölçülen nanosertlik (HV), elastik

modül (GPa), ortalama sürtünme katsayısı, aşınma hızı (mm^3/Nm) ve aşınma hacmi (mm^3) değerleri listelenmiştir.

Tablo 7.7. Katmansız ve çok katmanlı kaplamaların sertlik, elastik modül, sürtünme katsayısı, aşınma hızı ve aşınma hacmi değerlerinin karşılaştırılması.

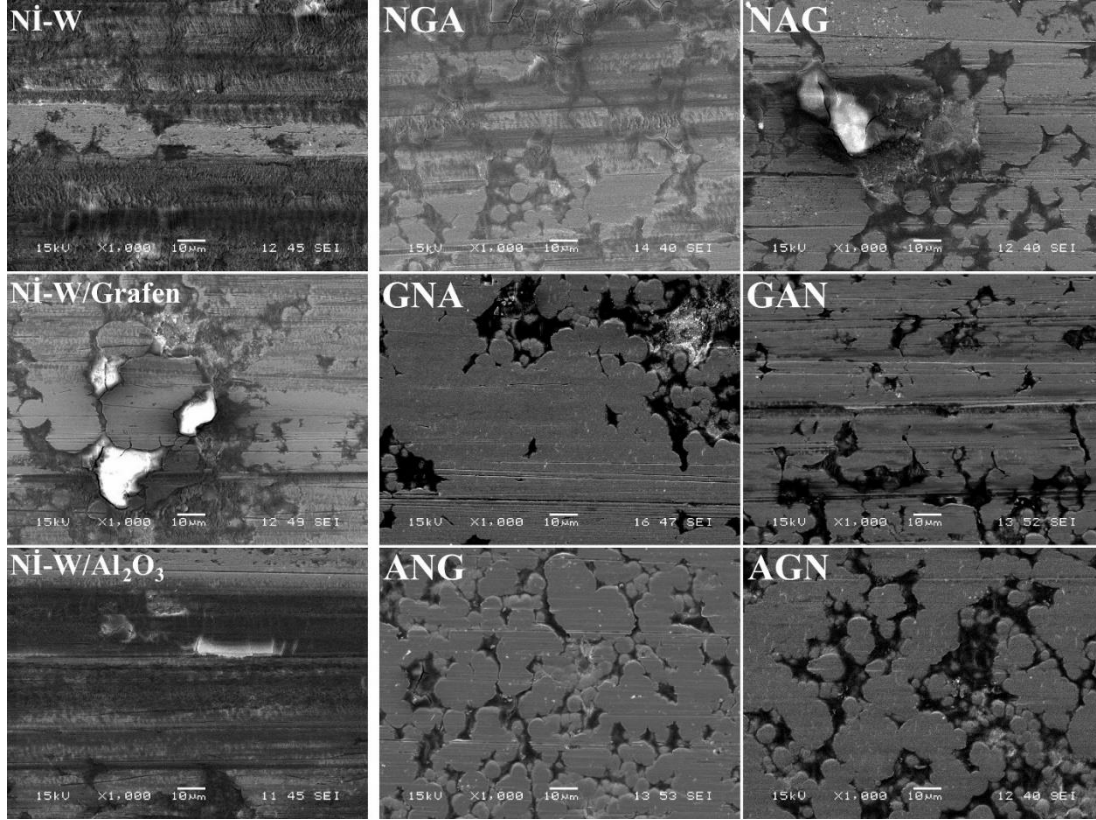
Numune	Yüzeyden Sertlik (HV)	Kesitten Sertlik (HV)	Elastik Modül (GPa)	Sürtünme Katsayısı (μ)	Aşınma Hızı (mm^3/Nm)	Aşınma Hacmi (mm^3)
Ni-W	796	864	214	0,49	2,08E-06	5,20E-03
Ni-W/Grafen	854	914	234	0,35	1,76E-06	4,40E-03
Ni-W/ Al_2O_3	897	1068	252	0,41	1,71E-06	4,28E-03
NGA	858	972	237	0,44	1,66E-06	4,15E-03
NAG	869	1112	262	0,42	1,60E-06	4,00E-03
GNA	864	904	221	0,31	1,58E-06	3,95E-03
GAN	877	1089	257	0,27	1,55E-06	3,88E-03
ANG	872	912	226	0,39	1,41E-06	3,53E-03
AGN	881	984	241	0,34	1,39E-06	3,48E-03

Veriler incelendiğinde, tüm kaplamalarda yüzeyden alınan sertlik değerlerinin, kesitten alınan değerlere göre sistematik olarak daha düşük olduğu görülmektedir. Bu fark, ölçüm yapılan bölgedeki mikroyapı farklılıkları, yüzey pürüzlülüğü, gevşek parçacıkların varlığı, olası oksitlenmeler ve yüzeydeki mekanik bütünlüğün zayıflığı gibi nedenlerden kaynaklanmaktadır. Ayrıca bu farkın oluşmasında sertlik ölçümünde kullanılan batıcı ucun oluşturduğu deformasyon derinliği de önemli rol oynamaktadır. Bu durumda, ölçülen değer yalnızca kaplamaya değil, altlıkla birlikte bir kompozit yapıya ait olur ve bu da sertlik değerinin düşük çıkmasına neden olur.

Kesitten alınan sertlik ölçümleri ise daha homojen yapıya sahip bölgelerden ve altlıktan uzakta kalan orta derinliklerden yapıldığı için, kaplamanın gerçek mikroyapısal direncini daha doğru şekilde yansıtmaktadır. Bu nedenle, kesit sertlik değerleri çoğunlukla daha yüksek çıkmakta ve kaplamanın mekanik bütünlüğü hakkında daha güvenilir bilgi sunmaktadır.

Sonuç olarak, yüzey ve kesit sertlikleri arasındaki bu fark hem mikroyapısal hem de deneysel koşullardan kaynaklanmakta olup, kaplama performansının değerlendirilmesinde her iki verinin birlikte yorumlanması gerekmektedir.

Şekil 7.30’da katmansız ve çok katmanlı Ni-W esaslı kaplamaların, oda sıcaklığında ve 5 N yük altında gerçekleştirilen aşınma testleri sonrasında oluşan yüzey morfolojileri SEM görüntüleri ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 7.30. Katmansız ve çok katmanlı kaplamaların aşınma bölgelerinin SEM görüntüleri.

Ni-W alaşım kaplamasının aşınmış yüzeyinin SEM mikroyapısı incelendiğinde, aşınma yönüne paralel gelişen deformasyon izlerini dik kesen düzensiz bir yapı ve oldukça pürüzlü bir yüzey morfolojisi dikkat çekmektedir. Bu yapı, kaplamanın aşırı düzeyde plastik deformasyona maruz kaldığını ve mekanik yük altında şekil değiştirme kabiliyetinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, yüzeyde bazı bölgelerde oksitlenmiş debrislerin yapıştığı ve mikro çatlak oluşumlarının gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Yüzeyde oluşan mikro çatlaklar, her ne kadar tüm aşınma yüzeyinde olmasa da olsa da bazı lokal bölgelerde yüzey deformasyonuna bağlı çatlak oluşumlarının meydana geldiği görülmektedir. Bu yapı, kaplamanın yüksek sürtünme katsayısı ($\mu \approx 0.49$) ve düşük elastik modül (214 GPa) nedeniyle deformasyona karşı sınırlı direnç gösterdiğini göstermektedir. Sertlik değeri de (796 HV yüzeyden, 864 HV kesitten) nispeten düşük olduğundan, yüzey mekanik yük altında daha kolay şekil değiştirmiştir. Ayrıca Ni-W kaplamanın $2,08 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$

gibi yüksek aşınma hızı ve $5,20 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ aşınma hacmi, SEM görüntüsündeki bu yoğun hasarı açıklamaktadır.

Grafen takviyeli Ni-W kaplamada, plastik deformasyon izleri hâlâ gözlenmekle birlikte, Ni-W alaşım kaplamaya kıyasla belirgin şekilde azalmıştır. Aşınma yüzeyinde yer yer yiv oluşumları görülmekte, ayrıca bazı bölgelerde mikro çatlaklar ve parça kopmaları da dikkat çekmektedir. Bu durum, grafen katkısının deformasyonu kısmen baskıladığını, ancak yüzeydeki gerilmelerin tam anlamıyla kontrol altına alınamadığını göstermektedir. Ayrıca yüzeyde triboksit tabakası oluşumuna rağmen, grafenin yüzeyde tam anlamıyla koruyucu bir katı yağlayıcı tabakası oluşumu için yeterli olmadığı yüzeyde yorulma aşınması sonucu mikro çatlakların oluştuğu görülmektedir. Matrise ilave edilen grafen, sürtünme katsayısını ($\mu \approx 0.35$) belirgin şekilde düşürmüştür; ancak elastik modül (234 GPa) ve orta düzeyde sertlik (914 HV) ile kaplama yüzeyini ani lokal gerilmelere karşı tam anlamıyla koruyamamıştır. Yine de aşınma hızı $1,76 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 'ye düşerek performansta belirli bir iyileşme sağlanmıştır.

Ni-W/ Al_2O_3 kompozit kaplamasının aşınma görüntüleri incelendiğinde, Ni-W-grafen kompozit kaplama ile benzer şekilde abrazif yivlerin kayma yönünde hizalandığı fakat Ni-W-grafen kompozit kaplamaya göre ve yüzeylerin daha fazla oranla mikro çatlak ve derin yivlerin içerdiği görülmüştür. Ni-W/ Al_2O_3 kaplamada ise yüzey çizilmeleri daha düzenlidir, yüzey deformasyonu görece azdır. Sertlikteki artış (1068 HV kesitten), elastik modüldeki iyileşme (252 GPa) ve düşük aşınma hızı ($1,71 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$) göz önüne alındığında, Al_2O_3 partiküllerinin matris içerisindeki dağılımının aşınma direncini önemli ölçüde artırdığı anlaşılmaktadır. Ayrıca Al_2O_3 katkısı, dislokasyon hareketlerini engelleyerek deformasyon sürecini baskılamış, sürtünme katsayısının da ($\mu \approx 0.41$) belirli düzeyde kalmasını sağlamıştır. Aşınma mekanizması ağırlıklı olarak hafif yivlenme (ploughing) ve mikro kesilme (micro-cutting) şeklinde gerçekleşmektedir.

Üst katmanı Ni-W olan çok katmanlı NGA kaplamada, katmansız kaplamaya kıyasla daha fazla mikro çatlak oluştuğu, plastik deformasyonun ise azalmış olduğu görülmektedir. Mikro çatlaklar kayma yönüne dik ve paralel olarak gelişmiştir. NAG numunesinde ise plastik deformasyon izleri neredeyse yok denecek düzeydedir. Ancak NGA ve katmansız Ni-W kaplamalarına kıyasla yüzeyde daha derin yivler oluşmuştur. Orta bölgede tribokorozyon ürünlerine rastlanmış, bu bölgede gevrekleşme sonucu yer yer delaminasyonlar oluşmuştur. Her iki numunenin sürtünme katsayısı benzer

olmakla birlikte, NAG kaplamada bu değer bir miktar daha düşüktür. Bu durum, alt katmandaki grafen ve Al_2O_3 katkısının üst katmandaki gerilim dağılımına katkıda bulunarak tokluğu artırdığını göstermektedir.

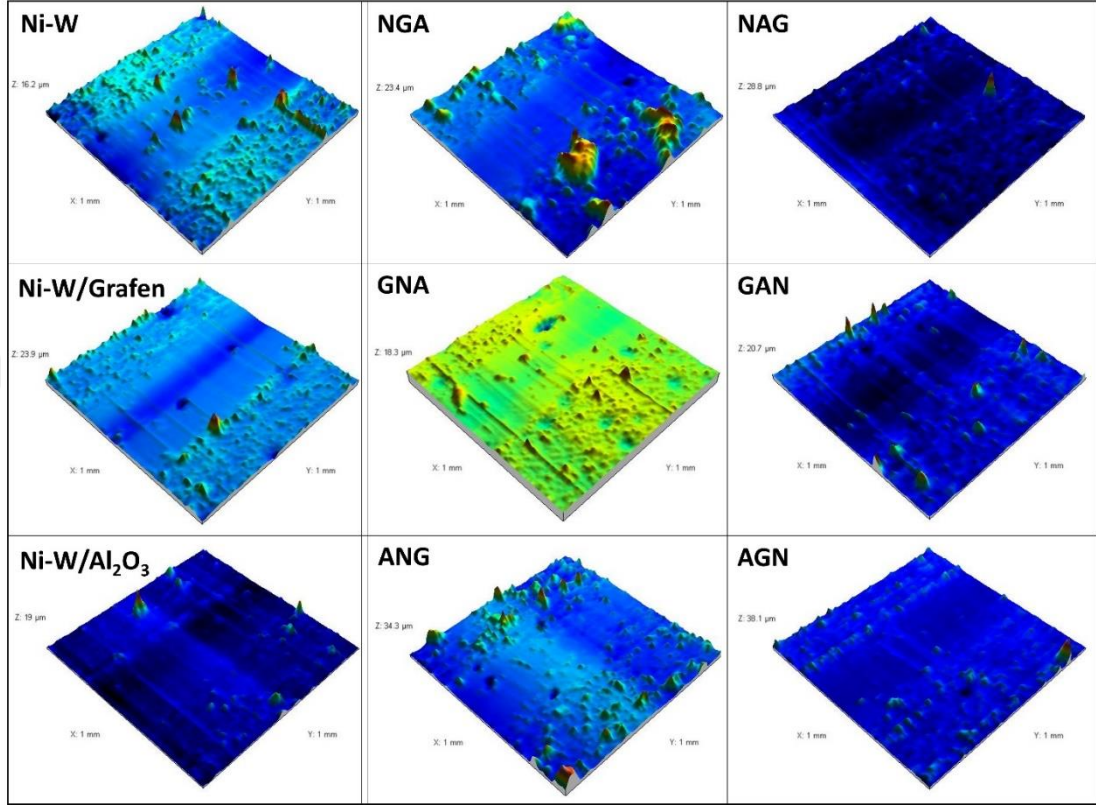
GNA ve GAN kaplamaları, diğer örneklerle göre daha düzgün ve yivlerin az olduğu yüzey morfolojisi sunmuştur. Üst katmandaki nodüler yapıların üst kısımları aşınmış, ancak aşınma derinleşmemiştir. GNA numunesi daha pürüzsüz bir yüzey sunarken, GAN kaplamada yivlerin sayısı ve genişliği daha fazladır; buna rağmen yüzey genel olarak yumuşak ve düzenli kalmıştır. Her iki numunede de bu pürüzsüz yapı, grafen katkısının yüzeyde koruyucu etkisini sürdürdüğünü göstermektedir. Katman diziliminin farklılığı, üst katmandaki mikroyapısal özellikleri doğrudan etkilemiş ve yüzey davranışına yansımıştır.

ANG ve AGN kaplamaları ise en düşük deformasyon ve en düzgün yüzey profiline sahip katmanlı kaplamalar olarak öne çıkmıştır. Oluşan yivler oldukça sınırlı ve incedir, yüzeyde plastik deformasyon izlerine rastlanmamaktadır. Özellikle AGN kaplamasında, triboslit tabakasının etkisiyle aşınma izlerinin yüzeysel kaldığı ve yapısal bütünlüğün korunduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, sert ve sünek fazların dengeli biçimde bir araya getirildiği çok katmanlı yapının, gelen yükleri katmanlar arasında absorbe etmesini sağlamasıyla açıklanabilir. Böylece hem sürtünme katsayısı düşmüş hem de aşınma hızı ve yüzey hasarı minimum seviyeye inmiştir.

Sonuç olarak, çok katmanlı kaplamalar yalnızca aşınma direncini artırmakla kalmamış; aynı zamanda yüzeyde oluşan gerilmelerin katmanlar arasında dengeli biçimde dağılmasını sağlamış, böylece çatlak ilerlemesi sınırlandırılmıştır. Bu sinerjik etki, aşınma izlerinin daha sık, yüzey deformasyonlarının daha hafif ve malzeme kaybının daha düşük olmasını sağlamıştır. Katmanlar arası arayüzey özelliklerinin bu başarımda belirleyici olduğu ve mekanik/tribolojik performansın bu yapı ile anlamlı şekilde iyileştirildiği açıkça görülmektedir. Sertlik ve elastik modül değerleriyle uyumlu olarak, bu kaplamalarda aşınma izleri daha sık, yüzey deformasyonları daha hafif ve malzeme kaybı daha düşüktür. Bu da çok katmanlı yapının tribolojik performansı önemli ölçüde iyileştirdiğini açıkça göstermektedir.

Şekil 7.31’de, katmansız ve çok katmanlı Ni-W esaslı kaplamalara ait aşınma bölgelerinin üç boyutlu profilometre görüntüleri sunulmuştur. Bu görüntüler, aşınma sonrası yüzey topografyasını yüksek hassasiyetle ortaya koymakta ve Şekil 7.30’da

elde edilen SEM verilerini yüzey pürüzlülüğü ve aşınma derinliği açısından desteklemektedir. Profilometre ile elde edilen üç boyutlu haritalar, aşınma izlerinin derinliğini, genişliğini ve hacmini renk kodları aracılığıyla net biçimde göstermektedir.



Şekil 7.31. Katmansız ve çok katmanlı kaplamaların aşınma bölgelerinin üç boyutlu profilometre görüntüleri.

Saf Ni-W kaplamanın profilometre haritasında, aşınma izinin oldukça derin ve geniş olduğu görülmektedir. İz bölgesinde, renk skalasına göre en alt seviyeleri gösteren koyu mavi/menekşe tonları bulunmakta olup bu durum, aşınma çukurunun derinliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. İz kenarlarında sarı/kırmızı alanlarla ifade edilen yükselti, aşınma sırasında uzaklaştırılan malzemenin iz çevresinde yığıldığını işaret etmektedir. Genel olarak Ni-W kaplamanın 3B profil haritası, derin ve hacimli bir aşınma çukuru ortaya koymaktadır. Bu yapı, Şekil 7.30'da gözlenen çizgisel aşınma izleri, lokal delaminasyonlar ve oksitlenmiş debris birikimiyle uyumludur; ayrıca yüksek sürtünme katsayısı ($\mu \approx 0.49$) ve yüksek aşınma hızı ($2.08 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$) gibi tribolojik verilerle de desteklenmektedir. Yüzeydeki tepe-çukur farkları, yoğun aşınma ve düzensiz deformasyonu ortaya koymaktadır.

Ni-W/Grafen kaplama, nispeten daha düzgün bir profil göstermektedir. Yüzeydeki aşınma derinliği ve tepe-çukur farkı, saf Ni-W kaplamaya göre belirgin biçimde azalmıştır. Bu durum, Şekil 7.30'daki SEM görüntülerinde gözlemlenen daha sık yiv oluşumu ve azalmış plastik deformasyonla uyumludur. Grafenin yağlayıcı etkisiyle sürtünme katsayısı ($\mu \approx 0.35$) düşerken, aşınma hızı da $1.76 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 'ye gerilemiştir. Yüzey topografyasındaki bu iyileşme, grafen katkısının yüzey bütünlüğünü kısmen koruduğunu göstermektedir.

Ni-W/ Al_2O_3 kaplaması ise katmansız sistemler arasında en düzgün yüzey profilini sergilemektedir. Profilometre görüntüsünde homojen yayılım, düşük yükseklik farkları ve sınırlı sayıda belirgin aşınma izi dikkat çekmektedir. Bu yapı, yüksek sertlik (1068 HV) ve elastik modül (252 GPa) gibi mekanik özelliklerin aşınma direncini artırıcı etkisini göstermektedir. Ayrıca aşınma hızı ($1.71 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$) da diğer katmansız örneklerle karşılaştırıldığında en düşük seviyededir.

Çok katmanlı kaplamalarda ise yüzey pürüzlülüğü ve deformasyon derinliği, katman dizilimi ve içerikte kullanılan takviye fazlara bağlı olarak değişiklik göstermektedir. NGA kaplamasında, katmansız Ni-W kaplamaya göre daha düşük pürüzlülük ve aşınma derinliği gözlemlenmiştir. NAG kaplamasında ise daha dengeli bir yüzey morfolojisi elde edilmiş, deformasyonun lokalize olduğu ve maksimum pürüzlülüğün daha düşük seviyelerde kaldığı görülmüştür.

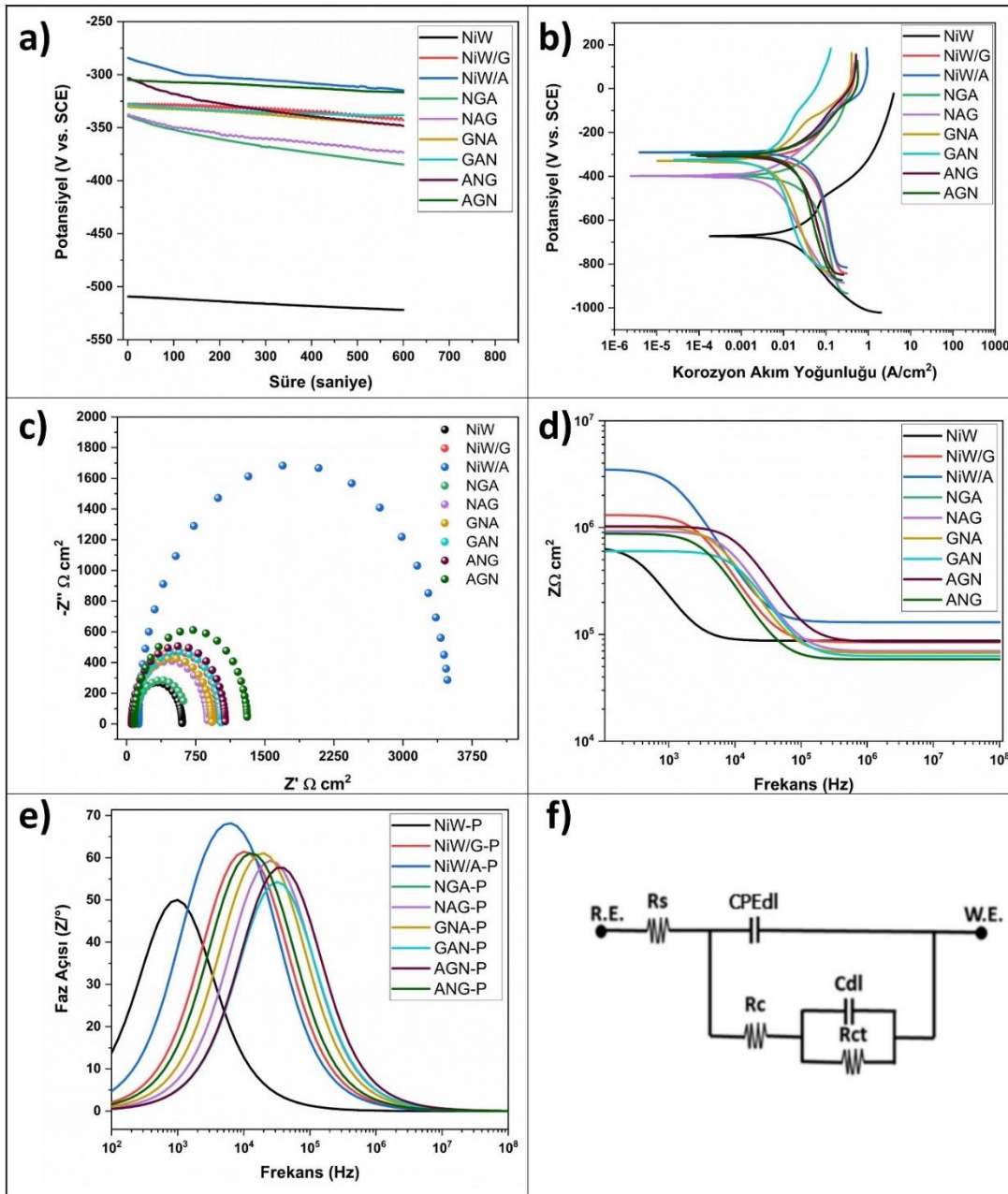
GNA ve GAN numuneleri, daha düzenli ve yatay bir yüzey morfolojisine sahiptir. GNA kaplamasında yüzeyde düşük yoğunluklu yiv izleri bulunmakla birlikte, aşınma yönü boyunca homojen bir topografya dikkat çekmektedir. GAN kaplaması ise hem daha düşük yüzey pürüzlülüğü hem de sınırlı deformasyon alanları ile öne çıkmakta; bu durum, grafenin yüzeyde sağladığı yağlayıcı etki ile alt katmanların taşıyıcı işlevinin birlikte oluşturduğu sinerjik etkiyle açıklanabilir. Özellikle GAN kaplaması, profilometrede en pürüzsüz ve en az bozulma gösteren yüzeylerden biri olarak dikkat çekmektedir. Bu sonuç, en düşük sürtünme katsayısı ($\mu \approx 0.27$) ve aşınma hızı ($1.55 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$) gibi tribolojik parametrelerle doğrudan ilişkilidir. Şekil 7.30'daki SEM görüntülerinde gözlemlenen hafif aşınma izleri, burada da düşük yüzey deformasyonu ile örtüşmektedir. Grafen takviyeli katmanların profilometre haritalarında dikkat çeken bir başka özellik ise iz tabanının nispeten düzgün olmasıdır. Bu, grafenin sürtünmeyi azaltıcı etkisiyle aşınmanın daha “yumuşak” gerçekleştiğini, malzeme kaybının ani değil, daha dengeli ilerlediğini düşündürmektedir.

ANG ve AGN kaplamaları, profilometre analizleri açısından en düzgün yüzeye sahip sistemlerdir. ANG numunesinde yükseklik farkları yer yer artmakla birlikte, yüzey genel olarak düzgün bir morfoloji sergilemekte ve yiv derinlikleri sınırlı kalmaktadır. AGN numunesi ise açık ara en düzgün yüzey profiline sahip kaplama olarak öne çıkmakta ve aşınma derinliği son derece sınırlı kalmaktadır. Al_2O_3 'nin üst katmanda yer aldığı bu yapılarda, sert ancak kırılğan lokal mikro yapılar oluşmuş olabilir. Buna rağmen AGN örneği, en düşük aşınma hızı (1.39×10^{-6} mm³/Nm) ve aşınma hacmi (3.48×10^{-3} mm³) ile dikkat çekmektedir. Al_2O_3 katkısının etkisi, profilometre verilerinde aşınma izinin derinliğinin sınırlı kalmasıyla açıkça görülmektedir. Sert katmanların aşınmaya direnç göstermesi, aşınma çukurunun büyük ölçüde alt katmana ilerlemesini engellemiştir.

Genel olarak profilometre verileri, katmanlı kaplamaların daha düşük yüzey bozulması ve aşınma derinliği sunduğunu açıkça göstermektedir. Alt katmanların yüzey morfolojisini yönlendirmesi, üst katmanın homojen çökmesini desteklemiş ve bu durum, mekanik yük altındaki deformasyonun daha dengeli dağılmasına katkı sağlamıştır. Özellikle GAN, AGN ve NAG gibi yapılar, yüksek sertlik ve düşük sürtünme katsayısı kombinasyonları sayesinde tribolojik açıdan en kararlı yüzeyleri oluşturmuştur.

Şekil 7.32'de, katmansız ve çok katmanlı Ni-W esaslı kaplamaların NaCl çözeltisinde gerçekleştirilen elektrokimyasal korozyon testlerine ait bulgulara yer verilmiştir. Bu kapsamda; açık devre potansiyeli (OCP), Tafel polarizasyon eğrileri, empedans, Bode ve faz açısı grafikleri ile eşdeğer devre modellemesi sunulmuştur. Elde edilen veriler, Tablo 7.8 ve Tablo 7.9'da nicel olarak verilmiştir.

Şekil 7.32.(a)'da katmansız ve katmanlı kaplamalara ait açık devre potansiyellerini (OCP) göstermektedir. Açık devre potansiyeli belirli bir süre içerisinde numunenin açık devre potansiyelini yani korozyon potansiyelini verir. En yüksek OCP değerine sahip olan NiW/A kaplaması, Al_2O_3 katkılı tek katmanlı bir yapıya sahiptir ve -290 mV civarında bir potansiyel göstererek pasif davranış sergilemiştir. Bu değer, kaplama yüzeyindeki Ni iyonlarının çözünme eğiliminin düşük olduğunu ve kaplamanın korozyona karşı yüksek direnç gösterdiğini göstermektedir. Al_2O_3 katkısı sayesinde yüzeyde daha az aktif bölge oluşmuş; böylece Cl^- iyonlarının yüzeye etkili bir şekilde saldırması zorlaşmıştır.



Şekil 7.32. Korozyon testinden sonra elde edilen grafikler: a) açık devre potansiyelleri, b) Tafel eğrileri, c) empedans eğrileri, d) Bode eğrisi, e) faz açıları eğrisi ve f) eşdeğer devre.

Şekil 7.32.(b)'de gösterilen Tafel eğrileri, numunelere ait korozyon akım yoğunluğu (I_{corr}) ve korozyon potansiyeli (E_{corr}) gibi temel elektrokimyasal parametrelerin belirlenmesini sağlamaktadır. Tafel ekstrapolasyonu ile elde edilen veriler Tablo 7.8'de özetlenmiştir. En düşük I_{corr} değerine sahip olan kaplamalar sırasıyla NiW/A ($7.34 \mu A$), AGN ($7.90 \mu A$) ve ANG ($8.12 \mu A$) olmuştur. Korozyon akım yoğunluklarına bakıldığında en düşük korozyon akım yoğunluğuna sahip numuneler üst katmanda Al_2O_3 takviyeli NiW kompozit kaplamalara aittir. Al_2O_3 seramik esaslı

korozyon direnci oldukça yüksek bir takviyedir. Oksitli takviye olması sebebiyle oksidasyon veya redüksiyon ihtimali oldukça düşüktür. Klor iyonunun agresif aşındırıcılığını engelleyerek aktif bölge sayısını azaltmaktadır. Bu durum, Al_2O_3 takviyeli kaplamaların Cl^- iyonlarının nüfuzunu engelleyerek korozyon hücrelerinin oluşumunu baskıladığını göstermektedir. AGN ve ANG gibi çok katmanlı sistemlerde Al_2O_3 'nin üst katmanda bulunması hem fiziksel engelleme hem de kimyasal kararlılık sağlayarak korozyon direncini önemli ölçüde artırmıştır. Üst katmanda GO takviyesi ilave edilen kompozit kaplamalar ise Al_2O_3 takviyeli üst katmanlı kaplamalardan hemen sonra gelmektedir. Bu kaplamalarda GO takviyesi yüzeyde boşlukları doldurmuş ve klor iyonunun nüfuz edeceği alanları azaltmıştır. Aynı zamanda GO ilave edildiğinde GO'nun yüzeyde Cl , O ve F gibi iyonlarla oluşturduğu fonksiyonel grupların korozyon açısından oluşturduğu dayanıklı yapı kaplamaların korozyon direncinin artmasında oldukça önemli rol oynamaktadır. GO katkılı numuneler (özellikle GAN, GNA) ise daha sonra gelmekte, bu da GO'nun yüzeydeki mikro boşlukları doldurarak iyonik geçişi sınırladığına işaret etmektedir.

Şekil 7.32.(c)'de sunulan empedans (Nyquist) diyagramları, numunelere ait toplam empedansın değerlendirilmesini sağlar. Empedans eğrilerinde eğri çapının büyüklüğü kaplamanın korozyon direncinin oldukça iyi olduğu anlamına gelir. En geniş yarıçapa sahip eğri NiW/A numunesine ait olup, bu durum Al_2O_3 partiküllerinin matriste homojen dağılımı sayesinde korozyon direncinin maksimum düzeye ulaştığını göstermektedir. Elektrokimyasal empedans eğrilerinden elde edilen çözelti direnci (R_s), şarj transfer direnci (R_{ct}) ve çift katmanlı kapasitans (C_{dl}) değerleri Tablo 7.9'da verilmiştir. Solüsyon direnci (R_s) değeri kaplama yüzeyi ile korozyon çözeltisi arasındaki ilk temasta kaplama yüzeyinin gösterdiği direnci temsil etmektedir. NiW/A numunesi en yüksek R_s değerine sahiptir. Bu yüksek değer sebebi temas anında yüzeyde oluşmuş olan NiO tabakasından ileri gelmektedir. Bu tabaka oluşarak yüzeyde klorun kaplama tabakasına inmesini yavaşlatarak korozyon direncini arttırmaktadır. En geniş yarıçapa sahip eğri NiW/A numunesine ait olup, bu durum Al_2O_3 partiküllerinin matriste homojen dağılımı sayesinde korozyon direncinin maksimum düzeye ulaştığını göstermektedir.

Şekil 7.32.(d)'de yer alan Bode faz grafikleri, frekansın empedans büyüklüğü üzerindeki etkisini gösterir. Yüksek empedans değerleri, koruyucu pasif tabakaların varlığına işaret etmektedir. Benzer şekilde, Şekil 7.32.(d)'de verilen faz açısı

grafikleri, kaplamaların elektro-kimyasal çift katman davranışlarını yansıtmaktadır. Faz açısının daha yüksek olduğu örnekler daha kararlı yüzeyler sunar. NiW/A, ANG ve AGN kaplamalarında bu açı daha yüksek olup, tek zaman sabitli sistemlere karşılık geldiği düşünülmektedir. Bu, kaplamaların kompakt ve tek tip pasif tabaka yapısına sahip olduğunu göstermektedir.

Şekil 7.32.(f), sistemlerin elektro-kimyasal tepkilerini temsil eden eşdeğer devre modelini göstermektedir. R_s , elektrolit çözeltisinin direncini; R_c , gözenekli pasif tabaka direncini; R_{ct} ise çift katman üzerindeki yük transfer direncini simgelerken, C_{dl} parametresi çift katman kapasitansını ifade etmektedir. CPE (constant phase element) ise homojen olmayan yüzeylerde daha doğru sonuçlar veren empedans elemanıdır.

Şekil 7.32’de sunulan elektro-kimyasal analizler, katmansız ve çok katmanlı Ni-W esaslı kaplamaların korozyon davranışları arasındaki farkı net biçimde ortaya koymaktadır. Katmansız sistemler arasında en yüksek korozyon potansiyeli ve en düşük korozyon akım yoğunluğu, Al_2O_3 takviyeli NiW/A kaplamasında gözlemlenmiştir. Bu performans, Al_2O_3 partiküllerinin yüzeyde pasif bölgeler oluşturarak Cl^- iyonlarının nüfuzunu sınırlamasına bağlanabilir. GO takviyeli NiW/G kaplaması da benzer şekilde korozyon direncini artırmıştır.

Çok katmanlı kaplamalarda ise özellikle üst katmanda Al_2O_3 içeren AGN ve ANG kaplamaları, düşük korozyon akım yoğunluğu (AGN: $7.90 \mu A$) ve yüksek şarj transfer direnci (AGN: 2960Ω) ile öne çıkmıştır. Katmanlı yapı, sert ve sünek fazlar arasında oluşturduğu bariyer etkisiyle korozyonun ilerlemesini yavaşlatmış, iyon geçişini sınırlandırmıştır. Elde edilen veriler, Tablo 7.8’de nicel olarak verilmiştir.

Tablo 7.8. Korozyon testinden elde edilen Ekor, Ikor ve korozyon hızı değerleri.

Numune	Ekor (mV)	Ikor (μA)	Korozyon Hızı (mpy)
NiW	-525.00	107.50	174.98
NiW/G	-323.00	26.60	43.35
NiW/A	-290.00	7.34	10.98
NGA	-333.00	88.00	123
NAG	-313.00	66.30	106.25
GNA	-330.00	54.70	89.25

Tablo 7.8. (Devamı) Korozyon testinden elde edilen Ekor,Ikor ve korozyon hızı değerleri.

Numune	Ekor (mV)	Icor (μ A)	Korozyon Hızı(mpy)
GAN	-306.00	30.00	48.89
ANG	-319.00	8.12	13.42
AGN	-302.00	7.90	11.62

Tablo 7.9. Empedans eğrilerine göre fitlenmiş elektrokimyasal performans değerleri.

NUMUNE	Rs(ohm)	Rct(ohm)	Cdl (F)
NiW	57.91	1.070×10^3	22.51×10^{-6}
NiW/G	90.73	1.310×10^3	43.37×10^{-6}
NiW/A	135.3	3.506×10^3	37.39×10^{-6}
NGA	62.67	879.6	50.26×10^{-6}
NAG	69.95	603.1	22.94×10^{-6}
GNA	72.10	1.012×10^3	29.83×10^{-6}
GAN	75.59	927.4	22.55×10^{-6}
ANG	93.40	1.027×10^3	13.73×10^{-6}
AGN	100.6	2.96×10^3	599.8×10^{-6}



8. SONUÇ VE ÖNERİ

8.1. Sonuçlar

Bu tez kapsamında St37 çelik üzerinde, akımlı kaplama yöntemiyle üretilen katmansız (tek tabakalı) ve çok katmanlı Ni-W esaslı kompozit kaplamaların mikroyapısal, mekanik, tribolojik ve korozyon davranışları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. İlk aşamada Taguchi deney tasarımıyla Ni-W kaplama banyosu optimize edilmiş, bu sayede deney sayısı düşürülerek yüksek sertlik ve homojen morfolojiye sahip kaplamalar elde edilmiştir. Takiben, grafen ve Al_2O_3 takviyeleri farklı derişimlerde ilave edilerek tek tabakalı kompozit kaplamalar değerlendirilmiş; son aşamada bu üç sistem (Ni-W, Ni-W/Grafen, Ni-W/ Al_2O_3) farklı sıralamalarla ardışık biriktirilerek çok katmanlı mimariler oluşturulmuştur (G, A ve N harfleri sırasıyla grafenli, alümina takviyeli ve yalnız Ni-W katmanlarını göstermektedir). Deneysel planlama ve numune hazırlama adımları süresince banyo koşulları sabit tutularak katkı fazlarının etkisi yalın biçimde ortaya konmuştur.

Tek tabakalı kaplamalarda en iyi grafen derişimi 150 mg/L olarak belirlenmiş; bu numunede nanosertlik ve elastik modül sırasıyla ~914 HV ve ~234 GPa'a ulaşmıştır. 200 mg/L'de ise dispersiyon bozulup aglomerasyon nedeniyle mekanik özelliklerde gerileme gözlenmiştir. Bu bulgular, grafenin iyi dağılmasıyla tane incilmesi (Hall-Petch etkisi) ve etkin yük transferi sayesinde rijitliğin arttığını göstermektedir. Tek tabakalı Al_2O_3 takviyesinde optimum derişim 15 g/L olup, bu koşulda sertlik ~1068 HV, elastik modül ~252 GPa değerlerine yükselmiştir; 20 g/L'de ise partikül aglomerasyonu ve süreksizlikler nedeniyle düşüşler ortaya çıkmıştır.

Tribolojik açıdan katmansız referans Ni-W kaplamanın sürtünme katsayısı 0,49 ve aşınma hızı $2,08 \times 10^{-6}$ mm³/Nm ile en olumsuz performansı gösterirken; tek tabakalı grafen ve Al_2O_3 takviyeleri sırasıyla $\mu \approx 0,35$ ve 0,41'e, aşınma hızını ise $1,76 \times 10^{-6}$ ve $1,71 \times 10^{-6}$ mm³/Nm seviyelerine düşürmüştür.

Çok katmanlı yapılarda mekanik, tribolojik ve elektrokimyasal özellikler birlikte değerlendirildiğinde belirgin bir sinerji sağlandığı görülmüştür. Sürtünme katsayısında en düşük değer, üst katmanı grafenli olan GAN diziliminde ($\mu \approx 0,27$) elde edilmiştir;

bu sonuç, grafenin üst yüzeyde katı yağlayıcı film oluşturarak kesme gerilmelerini azaltmasıyla tutarlıdır. Aşınma dayanımı (aşınma hızı) bakımından en iyi performans ise AGN diziliminde $1,39 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ile kaydedilmiştir. Böylece, düşük sürtünme için üstte grafen, en düşük hacimsel aşınma için ise üstte Al_2O_3 içeren kombinasyonların öne çıktığı doğrulanmıştır.

Çok katmanlı kaplamaların sunduğu bir diğer önemli avantaj, alt katmanların üst katmanların büyüme morfolojisini doğrudan etkilemesidir. Özellikle farklı takviyelerle oluşturulan ara katmanlar, üst tabakaların kristal çekirdeklenme davranışını değiştirerek daha ince taneli ve yoğun yapılar oluşmasına katkı sağlamıştır. Alt katmanlarda meydana gelen heterojen çekirdeklenme bölgeleri, üst katmanlarda yönelimli büyümeyi teşvik etmiş; bu durum hem mekanik özelliklerin hem de tribolojik performansın iyileşmesine yol açmıştır. Böylece çok katmanlı tasarımlar yalnızca farklı fazların birleşiminden ibaret olmayıp, aynı zamanda katmanlar arası etkileşimlerle yüzey morfolojisini yeniden şekillendiren dinamik bir yapı sergilemiştir.

Korozyon testlerinde (OCP, Tafel, EIS) tek tabakalı kaplamalar arasında Al_2O_3 takviyeli NiW/A, en düşük korozyon akım yoğunluğu ($I_{\text{corr}} \approx 7,34 \mu\text{A}$) ve daha asil korozyon potansiyeli ile en yüksek dayanımı göstermiştir. Çok katmanlı örneklerde ise üst katmanı Al_2O_3 olan sistemler (özellikle AGN ve ANG) öne çıkmıştır; AGN numunesi $I_{\text{corr}} \approx 7,90 \mu\text{A}$ ve $R_{\text{ct}} \approx 2960 \Omega$ ile en yüksek bariyer etkisini sergilemiştir. Bu bulgular, katmanlı mimarinin hem fazlar arası bariyer oluşturması hem de Al_2O_3 'ün kimyasal kararlılığı sayesinde iyon geçişini ve korozyon hücresi oluşumunu etkin biçimde sınırladığını ortaya koymaktadır.

Sonuçlar birleştirildiğinde; (i) tek tabakalı sistemlerde 150 mg/L grafen ve 15 g/L Al_2O_3 optimum derişimlerdir; grafen daha düşük sürtünme, Al_2O_3 ise daha yüksek sertlik/rijitlik sağlamaktadır. (ii) Çok katmanlı mimariler, tek tabakalı muadillerine göre hem tribolojik hem korozyon performansını anlamlı biçimde iyileştirmektedir; GAN konfigürasyonu en düşük sürtünmeyi, AGN ise en düşük aşınma hızını ve en yüksek korozyon direncini sunmuştur. (iii) Gözlenen üstünlük; grafenin üst katmanda yağlayıcı film etkisiyle sürtünmeyi düşürmesi, Al_2O_3 'ün yük taşımayı artıran sert parçacık takviyesi ve katmanlar arası geçişlerin dislokasyon ve çatlak ilerlemesine karşı bariyer görevi görmesiyle açıklanabilir. Bu sinerjik etki, tribolojik yükler ve korozif ortamların birlikte etkili olduğu uygulamalar için çok katmanlı Ni-W esaslı

kompozit kaplamaları güçlü bir yüzey mühendisliği çözümü olarak konumlandırmaktadır.

8.2. Öneriler

Bu çalışmada elde edilen bulgular, Ni-W esaslı kaplamalarda çok katmanlı mimarilerin tribolojik ve korozyon performansını tek tabakalı kaplamalara göre anlamlı biçimde iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Ancak, elde edilen sonuçlar ışığında gelecekte yapılacak çalışmalara yönelik bazı öneriler geliştirilmiştir:

Katman Dizilimlerinin Geliştirilmesi: Bu tezde incelenen G–A–N kombinasyonlarının yanı sıra, farklı dizilim stratejileri (örneğin grafen ve Al_2O_3 'ün aynı katmanda hibrit olarak dağıtılması ya da daha fazla sayıda ardışık katman oluşturulması) değerlendirilerek sinerjik etkinin daha da güçlendirilmesi sağlanabilir.

Optimum Katkı Konsantrasyonlarının İncelenmesi: Grafen için 150 mg/L, Al_2O_3 için 15 g/L seviyeleri en uygun değerler olarak belirlenmiştir. Gelecekte bu değerlerin dar aralıklarla yeniden optimize edilmesi, kritik eşiklerin ve aglomerasyon sınırlarının daha hassas şekilde belirlenmesine katkı sağlayacaktır.

Farklı Seramik ve Karbon Esaslı Takviyeler: Al_2O_3 ve grafenin yanı sıra TiO_2 , ZrO_2 , SiC gibi seramik partiküller veya CNT, h-BN gibi katı yağlayıcı fazlar kullanılarak çok katmanlı yapılar zenginleştirilebilir. Bu yaklaşım, kaplamaların uygulama alanlarını genişletebilir.

Korozyon Testlerinin Uzun Süreli ve Farklı Ortamlarda Yapılması: Bu tezde nötr ortamda elde edilen korozyon bulguları değerli olmakla birlikte, farklı pH değerlerinde, tuz püskürtme testlerinde veya yüksek sıcaklık koşullarında yapılacak ilave testler, çok katmanlı kaplamaların gerçek servis ömürlerini daha iyi ortaya koyacaktır.

Modelleme ve Simülasyon Çalışmaları: Katmanlı yapılarda alt katmanların morfolojiye etkisi deneysel olarak gözlemlenmiştir. Bu etkinin atomistik simülasyonlar (örneğin moleküler dinamik veya faz alan modelleri) ile modellenmesi, büyüme mekanizmalarının daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayacaktır.

Endüstriyel Ölçekli Uygulamalar: Bu tez çalışması laboratuvar ölçeğinde gerçekleştirilmiştir. Gelecekte, kaplama parametrelerinin endüstriyel ölçekte uygulanabilirliği test edilmeli ve özellikle otomotiv, havacılık ve enerji sektörlerinde

tribo-korozyon koşullarına maruz kalan kritik parçalar üzerinde saha uygulamaları yapılmalıdır.



KAYNAKLAR

- Abakay, E. (2023). Çelikler için Yüksek Korozyon Dayanımına Sahip Vanadyum Nitrür Kaplamalar. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 10(2), 345-355.
- Adıgüzel, Z. (2015). Nanokristal Ni-W elektrolitik kaplamaların korozyon karakteristikleri, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- Allahyarzadeh, M. H., Aliofkhazraei, M., Rezvanian, A. R., Torabinejad, V., ve Rouhaghdam, A. S. (2016). Ni-W electrodeposited coatings: Characterization, properties and applications. Surface and Coatings Technology, 307, 978-1010.
- Armutçu, M. (2009). Anticorrosion coating based on poly(n-vinylcarbazole), polyaniline and their composites with oxide nanoparticle, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Atay, B. (2008). Nanofilm fotokromik kaplamalar, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi.
- Avcı, G. G. (2009). İşlevsel nano kaplamalar. Bilim ve Teknik Dergisi, 497, 48-49.
- Azazi, S. (2007). Yumuşak ve paslanmaz çelik elektrot yüzeylerinin elektrokimyasal olarak O-toluidin polimeri ile kaplanması ve korozyon performanslarının belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi.
- Barletta, M., Trovalusci, F., Gisario, A., ve Venettacci, S. (2013). New ways to the manufacturing of pigmented multi-layer protective coatings. Surface and Coatings Technology, 232, 860-867.
- Borawski, B., Singh, J., Todd, J. A., ve Wolfe, D. E. (2011). Multi-layer coating design architecture for optimum particulate erosion resistance. Wear, 271(11-12), 2782-2792.
- Bülbül, F. (2014). Sert ve yumuşak kaplamalar. Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 4(2), 32-41.
- Catania, G., ve Strozzi, M. (2018). Damping oriented design of thin-walled mechanical components by means of multi-layer coating technology. Coatings, 8(2), 73.
- Çakar, H. (2010). Elektrokimyasal Yöntemle Üretilen Ni-B Esaslı Kaplamaların NaCl Ortamındaki Korozyonu, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi.
- Çiftçi, N. (2022). Sol-jel yöntemi ile 316 LSS ve Ti implant malzemelerin üzerine hidroksiapatite (HAP) kaplamaların üretilmesi ve korozyon davranışlarının elektrokimyasal yöntemle incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi.
- Datta, P. K., Burnell-Gray, J. S., ve Natesan, K. (2002). Coating technology. Intermetallic Compounds-Principles and Practice: Progress, 3, 561-588.
- Despotopoulou, M., ve Burchill, M. T. (2002). Coatings for electrochemical applications. Progress in organic coatings, 45(2-3), 119-126.

- Dilek, S. (2021). Darbeli elektro-biriktirme yöntemi ile üretilen mikron altı boyutlu TiC seramik partikül takviyeli Ni-W-TiC kompozit kaplamalar: tribolojik ve korozyon özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi.
- Ghaferi, Z., Raeissi, K., Golozar, M. A., Saatchi, A., ve Kabi, S. (2010). Comparison of electrodeposition aspects and characteristics of Ni-W and Co-W alloy nanocrystalline coatings. *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, 7(4), 16-24.
- Gökmen, G. G. ve Kışla, D. (2022). Nanoteknoloji Temelli Antimikrobiyal Yüzey Kaplama Teknolojileri ve Potansiyel Uygulama Alanları. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 10(5), 821-837.
- Gül, H., Ergin, N., ve Uysal, M. (2021). Kesikli Akım Elektrobiriktirme Yöntemiyle Üretilen Ni/W-Si₃N₄ Kompozitlerinin Mikroyapı ve Aşınma Özelliklerine Si₃N₄ Konsantrasyonunun Etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (28), 1179-1184.
- Gül, H. ve 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(8), 6108-6119.
- Hu, Y., Yu, Y., Ge, H., Wei, G., ve Jiang, L. (2019). Study on mechanical and anticorrosion performance of NiW alloy coatings prepared by induced codeposition. *International Journal of Electrochemical Science*, 14(2), 1649-1657.
- Iroh, J. O., Zhu, Y., Shah, K., Levine, K., Rajagopalan, R., Uyar, T., ... ve Khramov, A. N. (2003). Electrochemical synthesis: a novel technique for processing multi-functional coatings. *Progress in organic coatings*, 47(3-4), 365-375.
- Jo, H. M., Kim, D. H., Lee, S. H., ve Lee, J. Y. (2022). Multi-layer barrier coating technology using nano-fibrillated cellulose and a hydrophobic coating agent. *BioResources*, 17(4), 6222.
- Kabi, S., Raeissi, K., ve Saatchi, A. (2009). Effect of polarization type on properties of Ni-W nanocrystalline electrodeposits. *Journal of applied electrochemistry*, 39, 1279-1285.
- Kang, K., Su, S., Yu, B., Sun, Z., Hu, S., Wang, Z., ... ve Wei, R. (2025). The review and prospect of tool coating technology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-33.
- Karakurkchi, A., Sakhnenko, M., Ved', M., Yermolenko, I., Pavlenko, S., Yevsieiev, V., Pavlov, Y., & Yemanov, V. (2019). Determining features of application of functional electrochemical coatings in technologies of surface treatment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(12 (99)), 29-38.
- Kıyak, T. (2008). Çelik yüzeylerdeki boya altı korozyonuna karşı çevre dostu iletken polipirol kaplamalar. *Fatih Üniversitesi Çevre Kulübü Konferans Yayını*, Gazi Üniversitesi.
- Kumar, P. M. K., Ray, S., & Srivastava, C. (2020). Effect of graphene addition on composition, morphology and corrosion behavior of ZnNiFe-graphene composite coatings. *Diamond and Related Materials*, 107, 107904.

- Kumar, U. P., Kennady, C. J., ve Zhou, Q. (2015). Effect of salicylaldehyde on microstructure and corrosion resistance of electrodeposited nanocrystalline Ni-W alloy coatings. *Surface and Coatings Technology*, 283, 148-155.
- Lagarde, M., Billard, A., Creus, J., Feaugas, X., Grosseau-Poussard, J. L., Touzain, S., ve Savall, C. (2018). Electrochemical behavior of NiW alloys obtained by magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 352, 581-590.
- Li, S., Song, G., Zhang, Y., Fu, Q., & Pan, C. (2021). Graphene-Reinforced Zn-Ni Alloy Composite Coating on Iron Substrates by Pulsed Reverse Electrodeposition and Its High Corrosion Resistance. *ACS Omega*, 6(21), 13728-13741.
- Liu, X., Xiang, Z., Niu, J., Xia, K., Yang, Y., Yan, B., ve Lu, W. (2015). The corrosion behaviors of amorphous, nanocrystalline and crystalline Ni-W alloys coating. *International Journal of Electrochemical Science*, 10(11), 9042-9048.
- Murray, J. N. (1997). Electrochemical test methods for evaluating organic coatings on metals: an update. Part I. Introduction and generalities regarding electrochemical testing of organic coatings. *Progress in Organic Coatings*, 30(4), 225-233.
- Müftüoğlu, E. E., ve Kanber, B. (2019). Krom kaplama yapılmış poliamid malzemelerin sıcaklık yükü altındaki gerilme dağılımlarının sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi.
- Ozan, Ş. (2023). Kesikli (darbeli) akım kaplama yöntemiyle üretilen ni-w kaplamalarının özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi.
- Özkan, S. (2011). Elektrokimyasal yöntemle nikel-SiC kompozit kaplamaların üretimi ve karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi.
- Paşaoğlu, D. I. (2011). Electrodeposition and characterization of Ni-W nanowires on anodized aluminum oxide templates Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Paşaoğlu, D. I. (2013). Anodize Alüminyum Şablonlara Elektrolitik Kaplama Yöntemi ile Kendi Kendini Taşıyabilen Ni-w Nano Tellerin Kaplanması ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Sarangi, C. K., Sahu, B. P., Mishra, B. K., & Mitra, R. (2020). Pulse electrodeposition and characterization of graphene oxide particle-reinforced Ni-W alloy matrix nanocomposite coatings. *Journal of Applied Electrochemistry*, 50, 265-279.
- Sriraman, K. R., Raman, S. G. S., ve Seshadri, S. K. (2007). Corrosion behaviour of electrodeposited nanocrystalline Ni-W and Ni-Fe-W alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 460, 39-45.
- Tan, S. (2022). Ultrasonik destekli akımlı kaplama tekniği ile üretilen ni-w-tio2 kaplamaların tribolojik davranışlarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi.
- Trentin, A., Pakseresht, A., Duran, A., Castro, Y., ve Galusek, D. (2022). Electrochemical characterization of polymeric coatings for corrosion protection: A review of advances and perspectives. *Polymers*, 14(12), 2306.

- Tseluikin, V. N. (2009). Composite electrochemical coatings: Preparation, structure, properties. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 45, 312-326.
- Upadhyay, V., ve Battocchi, D. (2016). Localized electrochemical characterization of organic coatings: a brief review. *Progress in Organic Coatings*, 99, 365-377.
- Ünal, E., Yaşar, A., ve Karahan, İ. H. (2020). Elektrodepolanmış Nanokompozit Kaplamalarda Elektrolit Bileşenlerinin Etkisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(1), 159-172.
- Walsh, F. C., ve de León, C. P. (2014). Versatile electrochemical coatings and surface layers from aqueous methanesulfonic acid. *Surface and Coatings Technology*, 259, 676-697.
- Yari, S., ve Dehghanian, C. (2013). Deposition and characterization of nanocrystalline and amorphous Ni-W coatings with embedded alumina nanoparticles. *Ceramics International*, 39(7), 7759-7766.
- Yıldız, R. A. (2012). Akımsız Ni-B kaplamaların 7075 Alaşımının yorulma davranışına etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Yurduseven, O., Yurduseven, O., ve Türk, A. S. (2010). Muhtelif Cisimlerin Radar Kesit Alanı Analizleri ve RKA Optimizasyonu.
- Zeynep, B. (2010). Bazı iletken polimerlerin elektrokimyasal sentezi ve uygulamaları, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi.
- Zhitomirsky, I., ve Gal-Or, L. (1999). Electrochemical coatings. *Materials Engineering-New York-*, 13, 83-146.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Erhan DURU

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü
- **Lisans** : 2017, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2019, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Araştırma Görevlisi

DiĞER ESERLER:

- Aslan, S. ve Duru, E. 2022. Microstructure and Wear Properties of Electrodeposited Ni-B-Al₂O₃ Composite Coating on Low Carbon Steel at Elevated Temperature, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(3), 1693–1704.
- Doğan, F., Uysal, M., Algül, H., Duru, E., Akbulut, H. ve Aslan, S. 2020. Optimization of Pulsed Electro Co-Deposition for Ni-B-TiN Composites and the Variation of Tribological and Corrosion Behaviors, *Surface and Coatings Technology*, 400, 126209.
- Doğan, F., Uysal, M., Duru, E., Akbulut, H. ve Aslan, S. 2020. Pulsed electrodeposition of Ni-B/TiN composites: effect of current density on the structure, mechanical, tribological, and corrosion properties, *Journal of Asian Ceramic Societies*, 8(4), 1271–1284.