

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

**NİKEL SÜLFAMAT İÇEREN BANYOLARDA GERÇEKLEŞTİRİLEN
NİKEL KAPLAMA ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE, BANYO BİLEŞİMİNE
İLAVE EDİLEN BORİK ASİT İLAVESİNİN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ömercan SİVRİ

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

EYLÜL 2025

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

**NİKEL SÜLFAMAT İÇEREN BANYOLARDA GERÇEKLEŞTİRİLEN
NİKEL KAPLAMA ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE, BANYO BİLEŞİMİNE
İLAVE EDİLEN BORİK ASİT İLAVESİNİN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ömercan SİVRİ

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Uğur ŞEN

EYLÜL 2025

Ömercan SİVRİ tarafından hazırlanan “Nikel Sülfamat İçeren Banyolarda Gerçekleştirilen Nikel Kaplama Özellikleri Üzerine, Banyo Bileşimine İlave Edilen Borik Asit İlavesinin Etkisinin Araştırılması ” adlı tez çalışması 09.09.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :	Prof.Dr.Uğur ŞEN (Danışman) Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Doç.Dr.Mehmet UYSAL Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Doç.Dr.Eren YILMAZ Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi	



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “Nikel Sülfamat İçeren Banyolarda Gerçekleştirilen Nikel Kaplama Özellikleri Üzerine, Banyo Bileşimine İlave Edilen Borik Asit İlavesinin Etkisinin Araştırılması” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(09/09/2025)

Ömercan SİVRİ





Kıymetli Aileme



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım, çalışmalarımın tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, beni teşvik eden ve yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Uğur ŞEN'e,

Deneysel çalışmalar sırasında laboratuvar imkanlarını sağlayan ve teknik desteğini esirgemeyen Ahmet ER'e ve Sezer YUMRUKAYA'ya,

Bugünlere gelmemde büyük emek ve fedakârlık gösteren, desteklerini, sevgilerini ve güvenlerini hiç eksik etmeyen kıymetli annem Emel SİVRİ'ye, babam Hasan SİVRİ'ye ve ablam Ceyda EREL'e,

Son olarak sabır ve anlayışla sevgisini eksik etmeyen, varlığını her zaman yanımda hissettiğim değerli eşim Nihal SİVRİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Ömercan SİVRİ



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxiii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
2. ÇELİK MALZEMELER VE ÇEŞİTLERİ	3
2.1. Çelik Malzemeler Hakkında	3
2.2. Çelik Malzemelerin Sınıflandırılması	3
2.2.1. Kimyasal bileşimine göre çeliklerin sınıflandırılması	3
2.2.1.1. Sade karbonlu (alaşımsız) çelikler	3
2.2.1.2. Alaşımlı çelikler	5
2.2.1.3. Paslanmaz çelikler	6
2.2.1.4. Takım çelikleri	8
2.2.2. Mikroyapısına göre çeliklerin sınıflandırılması	9
2.2.2.1. Ferritik yapı	10
2.2.2.2. Perlitik yapı	10
2.2.2.3. Bainitik yapı	10
2.2.2.4. Martensitik yapı	10
2.2.2.5. Östenitik yapı	11
2.2.2.6. Çift fazlı (dual-phase) yapı	11
2.3. AISI 1020 Çeliğinin Özellikleri	11
3. ELEKTROLİTİK (ELEKTROKİMYASAL) KAPLAMA	13
3.1. Elektrolitik Kaplamalar	13
3.2. Elektrolitik Kaplama Yöntemleri	13
3.2.1. Doğru akımla kaplama	14
3.2.2. Darbeli akımla kaplama	14
3.2.3. Ters akım kaplama	15
3.2.4. Tamburlu kaplama	15
3.2.5. Askı kaplama	15
3.2.6. Fırçayla kaplama	16
3.3. Elektrolitik Kaplama Türleri	16
3.3.1. Çinko kaplama	16
3.3.2. Bakır kaplama	17
3.3.3. Krom kaplama	17
3.3.4. Altın kaplama	17
3.3.5. Kalay kaplama	18

3.3.6. Nikel kaplama	18
4. NİKEL ESASLI KAPLAMALARDA KULLANILAN KAPLAMA BANYOLARI VE NİKEL KAPLAMALARIN ÖZELLİKLERİ	21
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	25
5.1. Giriş	25
5.2. Deney Düzenegi ve Numune Hazırlanması	26
5.2.1. Nikel sülfamat banyosunun hazırlanması	26
5.2.1.1. Kullanılan kimyasallar	26
5.2.1.2. Numune hazırlığı	27
5.2.2. Nikel sülfamat banyosunun kurulumu	27
5.3. Kaplama İşlemi	28
5.4. Karakterizasyon İşlemi	30
5.4.1. Optik mikroskop incelemeleri	31
5.4.2. SEM analizi	31
5.4.3. XRD analizi	32
5.4.4. Sertlik testleri	32
5.4.5. Tuz korozyon testleri	33
5.4.6. Aşınma testleri	33
6. ARAŞTIRMA SONUÇLARI	35
7. GENEL SONUÇLAR	69
KAYNAKLAR	71
ÖZGEÇMİŞ	75

KISALTMALAR

A	: Amper
AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Derneği
BCC	: Hacim Merkezli Kübik Kristal Yapı
BCT	: Hacim Merkezli Tetragonal Kristal Yapı
DC	: Doğru Akım
EDS	: Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi
FCC	: Yüzey Merkezli Kübik Kristal Yapı
HSLA	: Yüksek Dayanımlı Düşük Alaşımlı Çelikler
ISO	: Uluslararası Standardizasyon Örgütü
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	: X-Işını Kırınımı



SİMGELER

$^{\circ}\text{C}$	: Sıcaklık [Santigrat Derece]
μm	: Kalınlık [Mikron]
A/dm^2	: Akım Yoğunluğu
d	: Çap (milimetre)
H_3BO_3	: Borik Asit
HCl	: Hidroklorik Asit
$\text{HV}_{0.1}$	: Sertlik [Vickers]
NaCl	: Sodyum Klorür
$\text{Ni}(\text{NH}_2\text{SO}_3)_2$	: Nikel Sülfamat
$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	: Nikel Klorür
pH	: Asit/baz dengesi
t	: Zaman [Dakika]



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Düşük karbonlu çelikler (Karbon oranı $\%0,05 < C \leq \%0,20$).	4
Tablo 2.2. Orta karbonlu çelikler (Karbon oranı $\%0,20 < C \leq \%0,50$).	4
Tablo 2.3. Yüksek karbonlu çelikler (Karbon oranı $\%0,50 < C \leq \%2,10$).	4
Tablo 2.4. AISI 1020 çeliğinin kimyasal bileşimi.	12
Tablo 5.1. Nikel sülfamat kimyasal bileşimi.	26
Tablo 5.2. Nikel klorür kimyasal bileşimi.	26
Tablo 5.3. Borik asit kimyasal bileşimi.	27
Tablo 5.4. AISI 1020 çelik numunesinin kimyasal bileşimi.	27
Tablo 6.1. Aşınma testi öncesi ve sonrası ağırlık bilgileri	65
Tablo 6.2. Numunelerin sertlik, kalınlık ve aşınma derinliği bilgileri	66



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 5.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan numunelerin şekil ve boyutları.	27
Şekil 5.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan numunelerin Nikel kaplama öncesi ve sonrası görüntüleri.....	30
Şekil 5.4. Nikon Optiphot-100 markalı optik mikroskop görüntüsü.	31
Şekil 5.5. Zeiss Gemini Ultra Plus marka taramalı elektron mikroskobu görüntüsü. 32	
Şekil 5.6. Taber Abraser aşınma cihazı görüntüsü.	34
Şekil 6.1. 30°C sıcaklıkta 40 dakika süre ile kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için a) Borsuz, b) 5 gr/L H ₃ BO ₃ , c) 10 gr/L H ₃ BO ₃ , d) 20 gr/L H ₃ BO ₃ , e) 40 gr/L H ₃ BO ₃ , f) 60 gr/L H ₃ BO ₃ , oranlarda borik asit içeren Nikel kaplamaların optik mikroyapı görüntüleri.	35
Şekil 6.2. 45°C sıcaklıkta 40 dakika süre ile kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için a) Borsuz, b) 5 gr/L H ₃ BO ₃ , c) 10 gr/L H ₃ BO ₃ , d) 20 gr/L H ₃ BO ₃ , e) 40 gr/L H ₃ BO ₃ , f) 60 gr/L H ₃ BO ₃ , oranlarda borik asit içeren Nikel kaplamaların optik mikroyapı görüntüleri.	36
Şekil 6.3. 60°C sıcaklıkta 40 dakika süre ile kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için a) Borsuz, b) 5 gr/L H ₃ BO ₃ , c) 10 gr/L H ₃ BO ₃ , d) 20 gr/L H ₃ BO ₃ , e) 40 gr/L H ₃ BO ₃ , f) 60 gr/L H ₃ BO ₃ , oranlarda borik asit içeren Nikel kaplamaların optik mikroyapı görüntüleri.	36
Şekil 6.4. 30°C sıcaklıkta 40 dakika süre borsuz kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.	37
Şekil 6.5. 30°C sıcaklıkta 40 dakika süre 5 gr/L oranında borik asit ilaveli kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.	38
Şekil 6.6. 30°C sıcaklıkta 40 dakika süre 10 gr/L oranında borik asit ilaveli kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.	39
Şekil 6.7. 30°C sıcaklıkta 40 dakika süre 20 gr/L oranında borik asit ilaveli kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.	40
Şekil 6.8. 30°C sıcaklıkta 40 dakika süre 40 gr/L oranında borik asit ilaveli kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.	41
Şekil 6.9. 30°C sıcaklıkta 40 dakika süre 60 gr/L oranında borik asit ilaveli kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.	42

Şekil 6.10. 45°C sıcaklıkta 40 dakika süre borsuz kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.	43
Şekil 6.11. 45°C sıcaklıkta 40 dakika süre 5 gr/L oranında borik asit ilaveli kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.	44
Şekil 6.12. 45°C sıcaklıkta 40 dakika süre 10 gr/L oranında borik asit ilaveli kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.	45
Şekil 6.13. 45°C sıcaklıkta 40 dakika süre 20 gr/L oranında borik asit ilaveli kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.	46
Şekil 6.14. 45°C sıcaklıkta 40 dakika süre 40 gr/L oranında borik asit ilaveli kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.	47
Şekil 6.15. 45°C sıcaklıkta 40 dakika süre 60 gr/L oranında borik asit ilaveli kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.	48
Şekil 6.16. 60°C sıcaklıkta 40 dakika süre borsuz kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.	49
Şekil 6.17. 60°C sıcaklıkta 40 dakika süre 5 gr/L oranında borik asit ilaveli kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.	50
Şekil 6.18. 60°C sıcaklıkta 40 dakika süre 10 gr/L oranında borik asit ilaveli kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.	51
Şekil 6.19. 60°C sıcaklıkta 40 dakika süre 20 gr/L oranında borik asit ilaveli kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.	52
Şekil 6.20. 60°C sıcaklıkta 40 dakika süre 40 gr/L oranında borik asit ilaveli kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.	53
Şekil 6.21. 60°C sıcaklıkta 40 dakika süre 60 gr/L oranında borik asit ilaveli kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.	54
Şekil 6.22. H ₃ BO ₃ katkısız Nikel sülfamat banyosunda sırasıyla 60°C, 45°C ve 30°C sıcaklıklarda 40 dk süre ile Nikel kaplanmış AISI 1020 çeliklerinin XRD analizleri.	55

Şekil 6.23. 30°C sıcaklıkta sırasıyla 60 gr/L, 40 gr/L ve 20 gr/L H ₃ BO ₃ ilave edilen Nikel sülfamat banyosunda sırasıyla sıcaklıklarda 40 dk süre ile Nikel kaplanmış AISI 1020 çeliklerinin XRD analizleri.	55
Şekil 6.24. 45°C sıcaklıkta sırasıyla 60 gr/L, 40 gr/L ve 20 gr/L H ₃ BO ₃ ilave edilen Nikel sülfamat banyosunda sırasıyla sıcaklıklarda 40 dk süre ile Nikel kaplanmış AISI 1020 çeliklerinin XRD analizleri.	56
Şekil 6.25. 60°C sıcaklıkta sırasıyla 60 gr/L, 40 gr/L ve 20 gr/L H ₃ BO ₃ ilave edilen Nikel sülfamat banyosunda sırasıyla sıcaklıklarda 40 dk süre ile Nikel kaplanmış AISI 1020 çeliklerinin XRD analizleri.	56
Şekil 6.26. a) Farklı sıcaklıklarda borsuz ve 5-60 gr/L arasında H ₃ BO ₃ ilave edilerek Nikel kaplanmış AISI 1020 çeliğinin üzerinde oluşan kaplama tabakalarının kalınlıklarının H ₃ BO ₃ oranına bağlı olarak değişimi, b) Kaplama tabaka kalınlıklarının değişiminin iso-diyagramı.	58
Şekil 6.27. a) Farklı sıcaklıklarda borsuz ve 5-60 gr/L arasında H ₃ BO ₃ ilave edilerek Nikel sülfamat kaplanmış AISI 1020 çeliğinin üzerinde oluşan kaplama sertliklerinin H ₃ BO ₃ oranına bağlı olarak değişimi, b) Kaplama tabaka sertliğinin değişiminin iso-diyagramı.	60
Şekil 6.28. Borik asitsiz, 45°C sıcaklıkta yapılan Nikel kaplamanın tuz korozyon testi sonuçları.	61
Şekil 6.29. 5 gr/L oranında borik asit ilaveli, 45°C sıcaklıkta yapılan Nikel kaplamanın tuz korozyon testi sonuçları.	61
Şekil 6.30. 10 gr/L oranında borik asit ilaveli, 45°C sıcaklıkta yapılan Nikel kaplamanın tuz korozyon testi sonuçları.	62
Şekil 6.31. 20 gr/L oranında borik asit ilaveli, 45°C sıcaklıkta yapılan Nikel kaplamanın tuz korozyon testi sonuçları.	62
Şekil 6.32. 40 gr/L oranında borik asit ilaveli, 45°C sıcaklıkta yapılan Nikel kaplamanın tuz korozyon testi sonuçları.	62
Şekil 6.33. 60 gr/L oranında borik asit ilaveli, 45°C sıcaklıkta yapılan Nikel kaplamanın tuz korozyon testi sonuçları.	63
Şekil 6.34. Kaplama olmayan delik bölgesinde oluşan tuz korozyon testi sonuçları.	63
Şekil 6.35. AISI 1020 çeliğine uygulanan tuz korozyona testi sonucu numune yüzeyinden alınan SEM görüntüleri.	63
Şekil 6.36. AISI 1020 çeliği için SEM mikroyapı görüntüsü, sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.	64
Şekil 6.37. Aşınma deneyi sonrası numunenin görüntüsü.	65
Şekil 6.38. Numunelere göre Teber aşınma değeri ve aşınma derinliği grafiği.	66
Şekil 6.39. Aşınma işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliğinin aşınma testi sonrası a) Borsuz, b) 5 gr/L H ₃ BO ₃ , c) 10 gr/L H ₃ BO ₃ , d) 20 gr/L H ₃ BO ₃ , e) 40 gr/L H ₃ BO ₃ , f) 60 gr/L H ₃ BO ₃ , oranlarda borik asit içeren Nikel kaplamaların SEM görüntüleri.	67
Şekil 6.40. Aşınma deneyi gerçekleştirilen AISI 1020 çeliğinin aşınma deneyisıra seçili alanlardan alınan EDS analizleri.	68



NİKEL SÜLFAMAT İÇEREN BANYOLARDA GERÇEKLEŞTİRİLEN NİKEL KAPLAMA ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE, BANYO BİLEŞİMİNE İLAVE EDİLEN BORİK ASİT İLAVESİNİN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Nikel kaplama, metal yüzeylerin çevresel etkilere karşı korunması, aşınma ve korozyon direncinin artırılması ile birlikte estetik görünüm kazandırılması amacıyla yaygın olarak kullanılan yüzey kaplama yöntemleridir. Bu bağlamda, Nikel kaplama, düşük iç gerilimli, çatlak içermeyen ve homojen kaplama yapısı sunması sayesinde endüstriyel uygulamalarda sıkça tercih edilmektedir. Bu yöntem; otomotiv, havacılık, elektronik ve kalıp imalatı gibi pek çok endüstriyel alanda geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir. Özellikle elektronik bileşenler, kalıp yüzeyleri ve yüksek hassasiyet gerektiren parçaların kaplanması tercih edilen bu yöntem, kaliteli ve kalın bir kaplama elde etmeye olanak sağlar. Endüstride yaygın olarak kullanılan AISI 1020 yapı çeliğinin korozyon direncini ve yüzey özelliklerini artırmak amacıyla, bu çalışmada elektro-kimyasal kaplamanın avantajlarından yararlanılarak, Nikel sülfamat çözeltisi ile elde edilen Nikel esaslı kaplamalara çeşitli oranlarda ilave edilen borik asidin kaplama performansı ve kalitesi üzerine etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla Nikel sülfamat çözeltisi içerisine ilk olarak borik asit ilavesi yapılmadan, sonrasında sırasıyla 5, 10, 20, 40 ve 60 gr/L oranlarında borik asit ilavesi yapılarak 30 °C, 45 °C ve 60 °C sıcaklıkta 40 dk süreyle kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kaplama DC güç kaynağı kullanılarak, 4 A/dm² akım değerinde gerçekleştirilmiştir. Üretilen Ni esaslı kaplamaların yüzeyinde kaplamaların özelliklerinin incelenmesi amacıyla Optik mikroskop, Taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışını difraksiyon analizi (XRD), enerji dağılım spektroskopisi (EDS), Vickers mikrosertlik testleri, Tuz korozyon testi ve Taber aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Kaplama kalınlıkları 6,1 µm ile 26 µm değerleri arasında değişim göstermektedir. Kaplamaların sertlik değerleri borik asit katkısına bağlı olarak 176 HV_{0.1} ile 357 HV_{0.1} değerleri arasında değişim göstermiştir. Borik asit eklenen numunelerin korozyon ve aşınmaya karşı daha dirençli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda; borik asit ilavesinin kaplama kalitesi üzerinde belirleyici rol oynadığını göstermiştir. Borik asit içermeyen banyolarda gözlenen pürüzlü, düzenli olmayan ve gözenekli yapıların aksine, borik asit içeren çözeltilerle yapılan kaplamalarda çok daha düzgün, çatlak içermeyen ve homojen kaplama tabakası elde edilmiştir. Ayrıca borik asit ilave edilen kaplama banyolarından elde edilen Nikel esaslı kaplamaların sertliklerinde önemli artışlar gözlemlenmiştir. XRD çalışmaları Nikel haricinde minör faz olarak Ni₃B fazının varlığı da tespit edilmiştir.



INVESTIGATION OF THE EFFECT OF BORIC ACID ADDITION TO BATH COMPOSITION ON THE PROPERTIES OF NICKEL COATINGS DEPOSITED FROM NICKEL SULFAMATE BATHS

SUMMARY

Nickel electroplating has long been recognized as one of the most versatile and widely implemented surface modification technologies in modern materials engineering. Its core principle involves the electrodeposition of a nickel layer onto a conductive substrate through an electrolytic process. This relatively simple yet highly controllable method enables the formation of metallic coatings that can drastically improve the surface properties of engineering materials without compromising their bulk mechanical characteristics. Over the last century, this technique has evolved from being a decorative coating method into a technologically indispensable process that underpins critical components across multiple industries. In automotive and aerospace engineering, for instance, nickel plating is utilized to impart enhanced wear resistance and fatigue performance to lightweight steels and alloys. In electronics and micro-manufacturing, nickel deposits are prized for their solderability, corrosion protection, and dimensional precision. In marine and energy-related sectors, their role as protective barriers against harsh corrosive environments has been indispensable. This breadth of applications underlines the importance of continuously refining electroplating chemistries and parameters to meet ever-increasing industrial demands.

One of the most striking features of nickel electroplating lies in its ability to engineer the surface–substrate interface. Low carbon steels, such as AISI 1020, represent a family of materials that, while affordable and mechanically reliable, remain inherently susceptible to surface degradation phenomena such as corrosion, abrasion, and oxidation. Their intrinsic advantage excellent machinability, weldability, and plasticity render them ubiquitous in structural and mechanical contexts. However, their limited durability in aggressive environments poses challenges for high-performance service life. Nickel electroplating presents itself as an effective solution to overcome these limitations. By depositing a controlled nickel layer, the steel surface is endowed with greater hardness, refined tribological properties, and an extended resistance to corrosive agents, all while preserving the favorable mechanical attributes of the steel's interior structure.

Among the several available electrolyte formulations, nickel sulfamate baths have gained prominence due to their ability to yield coatings with superior microstructural qualities. In comparison to the conventional Watts bath, sulfamate-based electrolytes are associated with deposits that exhibit lower internal stress, excellent ductility, and strong adhesion to the substrate. These features are particularly vital when coatings are intended for precision parts, where dimensional integrity must be preserved without the risk of warping or embrittlement. Additionally, nickel sulfamate baths permit higher current densities, thereby accelerating deposition kinetics and enabling the formation of thick, coherent coatings in shorter processing times. The industrial relevance of such electrolytes is further amplified by their compatibility with a wide

variety of metallic substrates and their proven record in producing coatings with fine-grained, compact structures.

Despite these advantages, the performance of nickel sulfamate electrolytes can be significantly influenced by bath additives. Boric acid (H_3BO_3), in particular, has historically been recognized as a buffering agent that stabilizes the local cathodic pH during electroplating. Its function extends beyond pH control: boric acid reduces the deleterious effects of hydrogen evolution—a side reaction that can lead to porosity, microcracking, and inhomogeneous deposits. By moderating hydrogen generation and forming weak complexes with nickel ions, boric acid plays a role in nucleation control and grain refinement. Consequently, its presence in the electrolyte directly influences coating density, mechanical performance, and resistance to environmental degradation. While conventional literature has noted its role in Watts baths, fewer systematic investigations have been carried out on nickel sulfamate systems, particularly in relation to low carbon steels like AISI 1020.

The present research was therefore designed to address this knowledge gap. Electroplating experiments were conducted using nickel sulfamate baths, in which boric acid concentration was systematically varied to investigate its role in tailoring coating properties. The experimental matrix incorporated six boric acid levels (0, 5, 10, 20, 40, and 60 g/L) across three deposition temperatures (30 °C, 45 °C, and 60 °C). A constant current density of 4 A/dm² and a deposition time of 40 minutes were applied to maintain consistency. The choice of AISI 1020 steel as a substrate was deliberate, reflecting its industrial relevance as a cost-effective material in mechanical and structural engineering, yet one whose durability critically depends on surface enhancements.

A comprehensive suite of characterization techniques was deployed to evaluate the deposited nickel coatings. Scanning Electron Microscopy (SEM) was employed to observe surface morphology and microstructural uniformity. Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) provided insights into elemental distribution and confirmed the incorporation of nickel as the dominant phase. X-ray Diffraction (XRD) was applied to determine crystallographic orientation and to identify the potential formation of nickel boride phases, which are known to impart hardness. Mechanical assessments were conducted via Vickers microhardness testing under a 0.1 kg load, offering quantitative comparisons across the different bath conditions. Tribological performance was examined with a Taber abrasion tester, which simulated mechanical wear under controlled loading. Finally, corrosion resistance was assessed using ASTM B117 salt spray testing, providing a standardized evaluation of protective performance under chloride-rich conditions.

The results demonstrated a strong and consistent influence of boric acid on the coating characteristics. Coating thickness was found to increase proportionally with boric acid concentration, ranging from as low as 6.1 µm at 0 g/L to 26 µm at 60 g/L. Hardness values exhibited a similar trend, rising from 176 HV_{0.1} in the absence of boric acid to 357 HV_{0.1} at the highest tested concentration. Microstructural analysis confirmed that coatings produced without boric acid were irregular, porous, and prone to defects such as pinholes and surface roughness. In contrast, coatings prepared with higher boric acid levels displayed smoother, denser morphologies, with fine-grained structures indicative of improved nucleation dynamics.

XRD characterization offered further insights into the mechanism of performance improvement. In addition to the expected nickel peaks, the presence of Ni₃B phases

was identified in samples deposited at higher boric acid concentrations. The formation of these intermetallic compounds is significant, as they contribute directly to grain boundary strengthening and microstructural stabilization, thereby enhancing hardness and wear resistance. The correlation between microstructure and property improvements was also validated through wear testing. Taber abrasion results revealed that coatings produced in boric acid-deficient baths suffered from substantial mass loss and severe wear tracks, while those from 40 g/L and 60 g/L conditions demonstrated remarkable wear resistance, characterized by minimal weight reduction and smoother wear scars.

Corrosion behavior further highlighted the role of boric acid. Samples deposited without or with minimal boric acid additions exhibited early onset of red rust, blistering, and surface oxidation in salt spray tests. Conversely, samples obtained from baths containing 40–60 g/L boric acid showed no visible corrosion damage even after extended exposure, underscoring the dense and coherent nature of the deposits. This performance is attributed to the suppression of microstructural defects, improved passivation, and the formation of more uniform nickel matrices. Taken together, these observations confirm that boric acid concentration exerts a more pronounced influence on coating performance than other studied parameters such as bath temperature, which had a relatively secondary effect.

In conclusion, this study provides systematic evidence that the incorporation of boric acid into nickel sulfamate baths significantly enhances electroplated coatings on AISI 1020 steel. Its effects manifest through multiple pathways: stabilization of local cathodic pH, suppression of hydrogen evolution, facilitation of uniform nucleation, and promotion of secondary hardening phases such as Ni_3B . These mechanisms collectively yield coatings with superior thickness, hardness, wear resistance, and corrosion durability. The results not only confirm the essential role of boric acid but also offer valuable guidance for industrial plating practices, where optimized bath compositions can deliver cost-effective performance improvements.

Looking ahead, the findings suggest promising avenues for further investigation. Future research could extend to synergistic effects of boric acid with other bath additives, such as saccharin or organic brighteners, which are known to influence deposit stress and brightness. Moreover, the application of post-deposition treatments—such as heat treatment or laser surface modification—may unlock additional functionalities in nickel sulfamate coatings. By integrating electrochemical optimization with advanced surface engineering strategies, it is conceivable to extend the applicability of low-cost steels like AISI 1020 into domains that demand higher levels of performance. Ultimately, the present work contributes to both the scientific understanding and the industrial advancement of nickel electroplating, underscoring the transformative potential of bath chemistry optimization in surface engineering.

Beyond its immediate scientific contributions, the outcomes of this study hold significant implications for industrial practice. The demonstrated ability of boric acid to improve coating density, mechanical performance, and corrosion resistance indicates that nickel sulfamate plating can be optimized in a manner that reduces production costs while simultaneously enhancing product reliability. Industries such as automotive and aerospace, where component longevity and performance are directly tied to safety and economic efficiency, stand to benefit particularly from these findings. Furthermore, the results suggest that similar approaches could be extended to other low carbon steels and alloys, enabling broader adoption of nickel

electroplating as a sustainable surface engineering solution. By systematically controlling bath chemistry, manufacturers can achieve higher quality coatings without resorting to more expensive alloying or complex post-treatment techniques, thereby reinforcing the role of electroplating as a cost-effective yet technologically advanced method of surface enhancement.



1. GİRİŞ

Günümüzde malzeme yüzeylerinin işlevsel ömürlerini artırmak, korozyon ve aşınma gibi çevresel etkilere karşı daha dayanıklı hâle getirmek amacıyla gerçekleştirilen yüzey mühendisliği uygulamaları, özellikle düşük karbonlu çeliklerde yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Düşük karbonlu içeriği sayesinde AISI 1020 çeliği iyi şekillendirilebilir ve kabul edilebilir seviyede işlenebilirlik özellikleri sayesinde endüstriyel uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Ancak bu çelik türü, düşük karbon içeriğinin bir sonucu olarak, aşınma ve korozyon gibi yüzey bozulmalarına karşı sınırlı direnç göstermektedir [2]. Bu yüzden AISI 1020 çelik malzemelerinin yüzeylerine uygulanan kaplama yöntemleri malzemenin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ve kullanım ömrünün uzatılması açısından büyük öneme sahiptir [3].

Elektrolitik Nikel kaplamalar, iyi yapışma kabiliyeti, yüksek sertlik, estetik görünüm ve korozyon direnci gibi üstün özellikleri nedeniyle çeşitli mühendislik uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir [4]. Özellikle Nikel sülfamat ($\text{Ni}(\text{SO}_3\text{NH}_2)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) esaslı kaplamalar, düşük iç gerilim oluşturmaları, çatlak oluşumunu engellemeleri ve düzgün homojen ve kristal yapılar oluşturmaları gibi özellikleri sayesinde yüksek hassaslık istenen kaplama işlemlerinde tercih edilmektedir [5,6]. Nikel sülfamat banyoları, Nikel sülfat ya da klorür esaslı kaplama çözeltilerine göre daha dengeli bir yapı sergileyerek kaplama sürecinin daha kontrollü ve kararlı bir şekilde ilerlemesine olanak tanır [7].

Kaplama çözeltisinin performansı, sadece ana elektrolit bileşeniyle değil, aynı zamanda içerdiği yardımcı katkı maddeleri ile de doğrudan ilişkilidir. Bu katkı maddeleri arasında borik asit (H_3BO_3), çözeltinin pH stabilitesini sağlamada ve kaplama sürecinde oluşabilecek hidrojen kabarcıklarının yüzeyde tutunmasını engelleyerek yüzey kalitesini iyileştirmede önemli rol oynamaktadır. [8]. Literatürde yapılan bazı çalışmalar, borik asit katkısının yüzey pürüzlülüğünü azalttığını, kaplama yapısını homojenleştirdiğini ve kristal büyümesini optimize ettiğini ortaya koymuştur [9,10].

Wang ve arkadaşları, borik asit miktarının Nikel kaplamaların mikrosertliği ile tane morfolojisi üzerindeki etkilerini araştırmış ve borik asit konsantrasyonundaki artışın kristal yapıyı daha yoğun ve homojen hâle getirdiğini ortaya koymuştur [11]. Benzer şekilde, Chen ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalarda, kaplama banyolarına ilave edilen borik asidin kaplama yapılan parçaların yüzeylerinde çatlak oluşumu ve iç gerilimi belirgin şekilde azalttığı tespit edilmiştir [12]. Bunun yanı sıra, kaplama işlemi sırasında kullanılan sıcaklık ve zaman gibi parametrelerin; kaplama kalınlığı, mikroyapı kararlılığı ve sertlik özellikleri üzerinde doğrudan etkili olduğu çok sayıda akademik çalışmada ifade edilmiştir [13,14].

Bu çalışmada, AISI 1020 çeliği yüzeyine Nikel kaplama uygulanmış ve özellikle farklı oranlarda borik asit ilavesinin, sabit süre ve sıcaklık altında kaplama kalınlığı, Vickers mikrosertlik değeri, mikroyapısı ve morfolojisi üzerindeki etkileri ile korozyona dayanımı ve aşınma özellikleri de detaylı olarak incelenmiştir. Böylelikle borik asit katkısının kaplama performansı üzerindeki belirleyici rolü nicel verilerin ortaya konulması amaçlanmıştır.

2. ÇELİK MALZEMELER VE ÇEŞİTLERİ

2.1. Çelik Malzemeler Hakkında

Çelik malzemeler yapısında en fazla %2,1 oranına kadar Karbon içerebilen demir esaslı alaşımlardır. Ayrıca Manganez (Mn), Silisyum (Si), Krom (Cr), Nikel (Ni), Molibden (Mo) gibi elementler mikroyapı ve mekanik özellikleri önemli ölçüde etkiler (örneğin dayanım, tokluk, korozyon direnci). Bu esneklik, çeliğin inşaat, otomotiv, makine, enerji gibi birçok sektörde tercih edilmesinin temel sebebidir. Ayrıca, üretim teknolojilerindeki gelişmeler ve geri dönüşüm olanakları sayesinde hem ekonomik hem de çevresel fayda sağlar. Yapı malzemelerinden makine imalatına, enerji sektöründen otomotive kadar geniş bir kullanım alanı mevcuttur [14].

2.2. Çelik Malzemelerin Sınıflandırılması

2.2.1. Kimyasal bileşimine göre çeliklerin sınıflandırılması

Çeliklerin üretim yöntemlerine, kimyasal bileşimlerine ve kullanım alanlarına göre farklı olarak sınıflandırılabilir de en yaygın olarak kullanılan sınıflandırma yöntemi kimyasal bileşime göre sınıflandırmadır.

2.2.1.1. Sade karbonlu (alaşımsız) çelikler

Sade karbonlu çelikler, demir esaslı ve karbon elementi dışında önemli miktarda başka bir alaşım elementi içermeyen çelik grubudur. Bu çelikler, bileşiminde yalnızca Karbon, Manganez, Silisyum, Kükürt ve Fosfor gibi elementler bulundurur ve bu elementlerin oranları belirli sınırlarla tanımlanmıştır. Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü (AISI) tarafından yapılan sınıflandırmaya göre, %1,65'ten daha az manganez, %0,60'tan düşük silisyum ve %0,60'tan az bakır içeren çelikler sade karbonlu çelikler grubuna dâhil edilmektedir. Bu tür çelik malzemelerde karbon oranı yükseldikçe, malzemenin sertlik ve dayanım özellikleri yükselirken; süneklik özelliklerinde ve kaynaklanabilirlik kabiliyetinde azalma olduğu sonucuna varılmıştır [15].

Kimyasal bileşimindeki Karbon oranına göre üç ana gruba ayrılırlar: düşük karbonlu çelikler (%0,05–0,20 C), orta karbonlu çelikler (%0,20–0,50 C) ve yüksek karbonlu

Çelikler (%0,50–2,10 C). Karbon oranına göre elikler Tablo 2.1-2.3'te verilmiştir. Düşük karbonlu çelikler, yüksek süneklik, iyi şekillenebilirlik ve kaynaklanabilirlik özellikleri nedeniyle otomotiv sacları, borular, bağlantı elemanları ve genel yapı malzemeleri gibi düşük yük taşıyan uygulamalarda kullanılır. Orta karbonlu çelikler ise ısııl işlem uygulanarak mekanik özellikleri iyileştirilebilir olduğundan dişli, aks, krank mili ve mil gibi orta seviyede dayanım gerektiren makine parçalarında kullanılır. Yüksek karbonlu çelikler ise sertlik ve aşınma dayanımı yüksek yapılar olup, yaylar, kesici takımlar, kalıplar ve el aletleri gibi alanlarda tercih edilmektedirler [16].

Tablo 2.1.Düşük karbonlu elikler (Karbon oranı %0,05 <C ≤ %0,20).

AISI No	%C	Özellikler	Yaygın Kullanım Alanları
AISI 1006	0,06	Çok yumuşak, şekillendirilebilir	Tel, sac, soğuk şekillendirme
AISI 1008	0,08	İyi şekillendirme ve kaynak kabiliyeti	Otomotiv panelleri, bağlantı elemanları
AISI 1010	0,10	Yüksek süneklik	Borular, düşük yükte çalışan parçalar
AISI 1015	0,15	Orta derecede mukavemet	Civata, perçin, bağlantı parçaları
AISI 1020	0,20	İyi kaynaklanabilirlik ve tokluk	Mil, miller, yapı elemanları

Tablo 2.2.Orta karbonlu elikler (Karbon oranı %0,20 <C ≤ %0,50).

AISI No	%C	Özellikler	Yaygın Kullanım Alanları
AISI 1030	0,30	Isıl işlemle sertleştirilebilir	Dişli, kam, civata
AISI 1040	0,40	Yüksek mukavemet	Mil, aks, pres parçaları
AISI 1045	0,45	Sertlik ve işlenebilirlik dengesi	Kam ve krank milleri
AISI 1050	0,50	Yüksek dayanım	Yaylar, eki başı, tahrik milleri
AISI 1055	0,55	İyi kaynaklanabilirlik ve tokluk	Takım parçaları, palet ivileri

Tablo 2.3.Yüksek karbonlu elikler (Karbon oranı %0,50 <C ≤ %2,10).

AISI No	%C	Özellikler	Yaygın Kullanım Alanları
AISI 1060	0,60	Sert, aşınmaya dayanıklı	Yağ eliği, testere dişleri
AISI 1070	0,70	Yüksek sertlik, düşük süneklik	El aletleri, yaylar
AISI 1080	0,80	Çok sert işlenebilirlik düşük	Kesici aletler, zımbalar
AISI 1090	0,90	Çok yüksek sertlik, kırılğan	Takım eliği, kalıp parçaları
AISI 1095	0,95	Maksimum sertlik	Yaylar, bıçaklar, traş bıçakları

Sade karbonlu çeliklerin mikroyapısı, karbon miktarına ve soğuma hızına bağı olarak ferrit, perlit, sementit ve martensit fazlarından oluşabilir. Özellikle düşük karbonlu çelikler ferrit ve perlitten oluşan yumuşak yapıya sahipken, yüksek karbonlu çelikler daha sert sementit fazına sahiptir. Bu elikler genellikle sıcak haddeleme, soğuk çekme, normalizasyon ve yüzey sertleştirme gibi işlemlerle nihai ürün hâline getirilir.

Sade karbonlu çeliklerin avantajları arasında düşük maliyet, yüksek üretim verimliliğı, geniş hammadde erişimi ve kolay şekillendirilebilirlik yer alırken, en önemli dezavantajları düşük korozyon direnci ve sınırlı yüksek sıcaklık performansı olarak gösterilmektedir. Bu nedenle, özellikle dış ortam koşullarında kullanılan sade karbonlu çelikler, yüzey kaplama (galvanizleme, Nikel kaplama gibi) ya da boya işlemleriyle korozyona karşı korunmaktadır [17].

Literatürde yapılan birçok çalışmada, sade karbonlu çeliklerin özellikle kaynaklanabilirlik, sertleşebilirlik ve ısıl işlem sonrası mekanik özellikleri bakımından geniş bir değerlendirmeye tabi tutulduğu görölmektedir. Örneğin, Şeker (2021) alışmasında düşük karbonlu çeliklerin çeşitli ısıl işlem teknikleri sonrası mikroyapı dönüşümleri ve mekanik performansları analiz edilmiş; düşük karbon içeriğinin özellikle kaynaklı imalatlarda avantaj sağladığı belirlenmiştir. Aynı şekilde, Totten (2006) tarafından sunulan kaynakta, karbon miktarının mikroyapı üzerindeki doğrudan etkisinin, ferrit-perlit dengesini ve dolayısıyla dayanım/süneklik oranını belirlediğı ifade edilmiştir [15,18].

2.2.1.2. Alaşımlı elikler

Alaşımlı elikler, demir–karbon esaslı temel yapıya ek olarak mekanik özellikleri, sertleşebilirliğı, aşınma direnci, tokluk, korozyon direnci veya yüksek sıcaklık dayanımı gibi özel nitelikleri artırmak amacıyla bir veya birden fazla alaşım elementi içeren çeliklerdir. Bu eliklerde genellikle alaşım elementleri olarak Krom (Cr), Nikel (Ni), Molibden (Mo), Vanadyum (V), Tungsten (W), Manganez (Mn), Silisyum (Si), Niyobyum (Nb) ve Bor (B) gibi elementler kontrollü şekilde eklenmektedir. Amerikan Demir ve elik Enstitüsü (AISI) sınıflamasına göre, alaşım elementlerinin toplamı %1,65'i aşarsa bu çelikler "alaşımlı elik" olarak değerlendirilir [15].

Alaşımlı elikler, içeriğinde bulunan alaşım elementlerinin miktarına göre “düşük alaşımlı çelikler” ve “yüksek alaşımlı çelikler” olmak üzere iki grupta incelenir. Düşük alaşımlı çelikler, genellikle %1,5–5 arasında toplam alaşım içeriğine sahip olup, yapı

Çelikleri, dişli, mil, krank ve benzeri makine elemanlarında kullanılır. Yüksek alaşımlı çelikler ise genellikle %5'ten fazla alaşım elementi içerir ve aşırı sıcaklık, basınç veya koroziif ortamlarda yüksek performans sunarlar; örneğin paslanmaz çelikler bu gruba dahildir. Alaşım elementleri, çeliğin sertleēebilirlilięini artırarak ısııl işlemlerle daha derin sertlik kazandırılmasına olanak tanır; aynı zamanda çekme mukavemeti, darbe dayanımı, sürtünme direnci ve yüksek sıcaklık altında şekil kararlılığı gibi özellikleri de iyileştirir.

Alaşımlı eliklerin üretimi sırasında, her bir alaşım elementi farklı roller üstlenir. Örneğin, Krom sertlik ve korozyon direncini arttırırken, Nikel darbe dayanımı ve tokluğu arttırır. Molibden yüksek sıcaklıkta mukavemet ve sertleēebilirlilięi yükseltirken, Vanadyum tane küçültücü etkisiyle hem dayanımı hem de sünekliliği arttırır. Bu nedenle alaşımlı çelikler, yüksek performans gerektiren sektörlerde yaygın olarak tercih edilmektedir. Otomotiv, savunma sanayi, enerji sistemleri, uçak ve uzay endüstrisi, nükleer reaktörler, basınçlı kaplar, kalıp ve takım üretimi gibi alanlarda sıkça kullanılırlar [16,19].

Alaşımlı eliklerin en büyük avantajı, belirli uygulamalara özel olarak geliştirilebilen geniş bir mekanik özellik yelpazesi sunmasıdır. Yüksek sertleēebilirlilik, dayanım ve tokluk kombinasyonları, yüksek sıcaklıklarda boyutsal kararlılık, iyi yorulma ve aşınma direnci bu malzemelerin ne çıkan özellikleridir. Bununla birlikte, içerdiği elementlerin maliyeti, üretim sırasında daha hassas işlem kontrolü gerektirmesi ve bazı türlerinin kaynaklanabilirliğinin sınırlı olması gibi dezavantajları da vardır [15]. Bu nedenle, alaşımlı çeliklerin kullanımı öncesinde hem mekanik gereklilikler hem de ekonomik faktörler dikkatle değerlendirilmelidir.

2.2.1.3. Paslanmaz elikler

Paslanmaz elikler, en az %10,5 oranında Krom (Cr) içeren ve bu özelliği sayesinde atmosferik koşullarda korozyona karşı yüksek direnç gösteren özel alaşımlı elik türleridir. Paslanmaz eliklerin yüzeyinde kendiliğinden oluşan ince Krom oksit (Cr_2O_3) tabakası neticesinde, oksijen ile reaksiyon oluşturarak malzemenin iç kısımlarına doğru ilerleyen korozyonu önemli ölçüde engeller. Bu koruyucu film tabakası, hasar gördüğünde çevreden alınan oksijenle kendini onarabilme özelliğine de sahiptir. Bu yönüyle paslanmaz çelikler, uzun ömürlü, bakım gereksinimi düşük ve görsel açıdan estetik tercihlerde ne çıkan mühendislik malzemeleridir [16,20].

Paslanmaz çeliklerin sınıflandırılması, mikro yapılarında baskın olan fazlara göre yapılmaktadır. Östenitik paslanmaz çelikler, en yaygın kullanılan grup olup, %18 Cr ve %8 Ni içeriğiyle mükemmel şekillendirilebilirlik, kaynaklanabilirlik ve korozyon direnci sunar. Manyetik özelliğe sahip değildir ve düşük sıcaklıklarda da tokluklarını koruma özelliğine sahiptirler. Ferritik paslanmaz çelikler ise %11–18 Cr içerir, karbon oranı düşüktür ve manyetikdir; daha düşük maliyetli olmalarına rağmen kaynak kabiliyetleri sınırlıdır. Martensitik paslanmaz çelikler ise %12–14 Cr içeriği ve daha yüksek karbon oranı ile ısıtılma ile sertleştirilebilen, yüksek mukavemetli ve manyetik çeliklerdir. Ayrıca, duplex paslanmaz çelikler (östenit + ferrit faz karışımı), hem yüksek mukavemet hem de mükemmel korozyon direnci sunarken, çökeltme sertleşmeli (precipitation hardening) paslanmaz çelikler ise özellikle havacılık ve savunma sanayi uygulamaları için yüksek dayanım ve boyutsal stabilite sunar [15,21].

Alaşımların elementlerinin çeliğin performansına etkisi oldukça büyüktür. Krom, korozyon direncinin temel kaynağıdır. Nikel, östenitik yapı stabilizasyonunu sağlarken sünekliği artırır. Molibden (Mo) özellikle klor iyonlarına karşı direnci artırır. Azot (N), dayanımı yükseltir ve korozyon direncine katkı sağlar. Manganez ve Niyobyum gibi elementler de kontrollü oranlarda paslanmaz çelik bileşimlerine dahil edilerek özel amaçlı çeliklerin tasarımında kullanılır [19].

Paslanmaz çeliklerin avantajları arasında yüksek korozyon direnci, uzun servis ömrü, yüksek sıcaklık dayanımı, kolay temizlenebilir yüzey yapısı ve estetik görünüm sayılabilir. Özellikle su taşıma boruları, mutfak eşyaları, bina cephe kaplamaları, ısı eşanjörleri, medikal ekipmanlar, gıda işleme makineleri ve petrokimya sistemleri gibi alanlarda kullanılmaktadır. Bununla birlikte, alaşım elementi maliyetleri nedeniyle paslanmaz çeliklerin ekonomik açıdan alaşımsız veya düşük alaşımlı çeliklere göre daha pahalı olduğu, bazı türlerinin ise düşük kaynaklanabilirlik ve yüksek termal genleşme katsayısı gibi sınırlayıcı dezavantajlara sahip olduğu bilinmektedir [17,22].

Paslanmaz çeliklerin farklı ortam koşullarındaki korozyon davranışları, yüzey işlem tekniklerinin (örneğin elektropolaj, pasivasyon) etkileri ve kaynak sonrası mikroyapısal dönüşümleri literatürde yapılan kapsamlı çalışmalarla detaylı şekilde araştırılmıştır. Sedriks (1996), özellikle klor iyonlarının bulunduğu ortamlarda pitting (çukurcuk) korozyon mekanizmalarını östenitik çelikler üzerinde çalışmıştır. Benzer şekilde, Davis (1994) paslanmaz çeliklerin farklı mikro yapılarına göre mekanik ve korozyon performanslarını karşılaştırmalı olarak değerlendirmiştir. Bu çalışmalar,

paslanmaz çeliklerin uygulama alanı seçimi ve servis koşullarına göre tasarım gerekliliklerinin belirlenmesinde önemli bilgiler sunmaktadır [20,21].

Sonuç olarak, paslanmaz çelikler; yüksek korozyon direnci, dayanım ve estetik gerektiren mühendislik uygulamalarında vazgeçilmez bir malzeme sınıfı hâline gelmiştir. Doğru alaşım seçimi ve uygun üretim koşulları ile bu çelikler, zorlu çevresel koşullarda dahi güvenilir performans sergilemektedir.

2.2.1.4. Takım çelikleri

Takım çelikleri, kesme, şekillendirme, dövme, ekstrüzyon, döküm ve kalıplama gibi yüksek mekanik ve/veya termal zorlamaya maruz kalan işlemlerde kullanılan; bu nedenle yüksek sertlik, aşınma direnci, tokluk, ısıl işlemle sertleşebilme ve boyutsal kararlılık gibi özelliklere sahip özel çelik grubudur. Genellikle yüksek karbonlu yapıda olup, çeşitli alaşım elementleri (Cr, W, Mo, V, Co, Mn) içererek bu üstün niteliklerini kazanırlar. Takım çelikleri, yüksek sıcaklıklarda bile sertliklerini koruyabilmeli, aşınma altında şekil değiştirmemeli ve tekrarlayan mekanik zorlamalara dayanıklılık göstermelidir [15,23].

Takım çelikleri ASTM-A681 standardına göre soğuk iş takım çelikleri, sıcak iş takım çelikleri ve yüksek hız çelikleri olmak üzere üç grupta sınıflandırılmaktadır. Soğuk iş takım çelikleri (örneğin AISI O1, D2), düşük veya orta sıcaklıkta çalışan kesme kalıpları, zımbalar, makas bıçakları gibi aşınma riski yüksek uygulamalarda kullanılır. Bu tür çelikler, genellikle yüksek karbon ve krom içeriği sayesinde belirgin sertlik ve aşınma direnci sergilemektedir. Sıcak iş takım çelikleri (örneğin AISI H13, H11), 200°C ile 700°C arasındaki sıcaklıklarda çalışan dövme kalıpları, basınçlı döküm kalıpları ve ekstrüzyon sistemleri gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu çelik grubu, yüksek sıcaklık mukavemeti, termal şok dayanımı ve ısı iletkenliği açısından optimize edilmiştir. Öte yandan, yüksek hız çelikleri (örneğin AISI M2, T1), özellikle yüksek devirle çalışan takım tezgâhlarında tercih edilmekte olup; 500°C üzerindeki sıcaklıklarda bile kesme kabiliyetlerini koruyabilen, Tungsten (W), Molibden (Mo), Vanadyum (V) ve Kobalt (Co) gibi alaşım elementleriyle zenginleştirilmiş özel çeliklerdir. Bu çeliklerin yüksek sertliği, hızla dönen matkap, freze ve torna uçlarında stabil performans göstermesini sağlar [19,24].

Takım çeliklerinde bulunan alaşım elementleri, malzemenin mekanik ve kimyasal özelliklerini belirlemede önemli rol oynar. Karbon, çeliğin sertlik ve aşınma direnci

kazanmasında temel etkenlerden biridir. Krom elementi ise sertlik özelliklerine katkı sağlamanın yanı sıra çeliğin korozyona karşı direncini de önemli ölçüde artırır. Tungsten ve Molibden yüksek sıcaklıkta sertlik ve sürünme direnci sağlarken, Vanadyum tane küçültücü etkisiyle darbe dayanımını iyileştirir. Kobalt ise özellikle yüksek hız çeliklerinde yüksek sıcaklıkta kesme performansını artırır [16].

Takım çeliklerinin başlıca avantajları arasında yüksek sertlik ve aşınma direnci, ısıtılma işlem sonrası boyutsal kararlılık, yüksek sıcaklık dayanımı ve uzun servis ömrü yer alır. Ancak, üretim maliyetleri alaşımsız ve alaşımlı çeliklere kıyasla yüksektir ve bazı türlerin işlenebilirliği zordur. Ayrıca, uygun ısıtılma işlem uygulanmadığında kırılma (gevreklik) oluşma riski de artmaktadır. Bu nedenle takım çeliklerinin seçimi ve kullanımı sırasında proses koşulları, termal çevrim ve yükleme profilleri titizlikle analiz edilmelidir [18].

Literatürde, takım çelikleri üzerine yapılan araştırmalar genellikle ısıtılma işlem yöntemleri, mikro yapı karakterizasyonları, sertlik ve aşınma davranışları üzerinedir. Örneğin, AISI D2 takım çeliğine uygulanan farklı sertleştirme ve temperleme işlemlerinin mikroyapı ve aşınma direnci üzerindeki etkilerini incelemiştir. Aynı şekilde, Bhadeshia (2015) tarafından yapılan kapsamlı çalışmada yüksek hız çeliklerinde Tungsten ve Molibdenin birincil karbür oluşumuna etkisi değerlendirilmiş ve takım ömrüyle ilişkisi kurulmuştur. Bu tür çalışmalar, takım çeliklerinin mühendislik uygulamalarında daha etkili kullanılmasına yönelik önemli veriler sunmaktadır [19,25].

Sonuç olarak, takım çelikleri, zorlayıcı iş koşullarında yüksek performans sağlayacak ve uzun ömürlü olacak şekilde tasarlanmış, dayanım ve yüksek sertlik sunan çelik malzemelerdir. Uygulama alanlarına özgü olarak geliştirilen bu malzemeler hem malzeme mühendisliği hem de üretim teknolojileri açısından stratejik bir öneme sahiptir.

2.2.2. Mikroyapısına göre çeliklerin sınıflandırılması

Çeliklerin mekanik davranışları ve servis performansları, yalnızca kimyasal bileşimlerine değil, aynı zamanda içerdikleri mikro yapıya da doğrudan bağlıdır. Çeliklerdeki mikro yapı; üretim süreci, ısıtılma işlem, soğuma hızı ve alaşım elementlerinin etkisiyle değişkenlik gösteren, malzemenin iç düzenini tanımlayan kristal fazların ve tanelerin bütünüdür. Mikro yapı bileşenleri, çeliğin süneklik, mukavemet, tokluk,

aşınma direnci, ısı iletkenlik ve şekillendirilebilirlik gibi birçok özelliğini belirler. Bu nedenle çelikler, içerdii baskın faz türlerine göre ferritik, perlitik, bainitik, martensitik, östenitik ve çift fazlı (dual-phase) olmak üzere sınıflandırılır [16,19].

2.2.2.1. Ferritik yapı

Ferrit (α -demir), düşük karbon çözünürlüğüne sahip bir BCC (body-centered cubic) kristal yapıdır. Sünek ve yumuşak bir faz olan ferrit, düşük karbonlu çeliklerde ana faz olarak bulunur. Genellikle %0,02–0,025'e kadar karbon çözebilir. Düşük sertlik ve yüksek şekillendirilebilirlik sağlar. Bu nedenle ferritik çelikler, otomotiv sacları ve boru sistemlerinde yaygın şekilde kullanılır [15].

2.2.2.2. Perlitik yapı

Perlit, ferrit ve sementit (Fe_3C) lamellerinden oluşan bir ötektoid faz karışımıdır. %0,76 karbon içeren ötektoid çeliklerde dönüşüm ürünüdür. Perlit, ferrite kıyasla daha sert ve kırılgan ancak mukavemeti daha yüksektir. Çekme ve akma dayanımı yönünden orta düzey özellikler sunar. Islah çeliklerinde ve orta karbonlu yapı çeliklerinde yaygındır. Soğuma hızına bağı olarak lamel aralığı değişir ve bu da mekanik özellikleri etkiler [17].

2.2.2.3. Bainitik yapı

Bainit, perlit ve martensit arasında bir sertlik düzeyine sahip, iğne benzeri yapıda ferrit ve karbürlerden oluşan bir fazdır. Orta sıcaklıklarda (250–550°C) dönüşen östenitten meydana gelir. Daha yüksek sertlik ve aşınma direnci gösterir, aynı zamanda daha iyi tokluk ve yorgunluk direncine sahiptir. Otomotiv sektöründe, yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelikler (HSLA) gibi uygulamalarda tercih edilmektedir [19].

2.2.2.4. Martensitik yapı

Martensit, yüksek sıcaklıkta oluşan östenitin ani su verilmesiyle (suda soğutma) oluşan, sert ve gevrek bir fazdır. BCT (body-centered tetragonal) kafes yapısına sahiptir ve karbon atomlarının kafese interstisyel olarak yerleşmesiyle büyük iç gerilim oluşturur. Bu yapı çeliğe yüksek sertlik ve aşınma direnci kazandırırken, kırılganlık özelliğini de artırır. Takım çelikleri ve yüzey sertleştirilmiş çelik parçalar için uygundur. Ancak ısı ıl işlem sonrası temperleme (tavlama) yapılmadığı sürece kırılganlık riski taşır [15,16].

2.2.2.5. Östenitik yapı

Östenit (γ -demir), FCC (face-centered cubic) kristal yapıya sahip olup yüksek sıcaklıkta kararlı bir fazdır. %2'ye kadar karbon çözebilir. Oda sıcaklığında östenitik faz kararsız olsa da yüksek Nikel ve Manganez içeriği ile stabilize edilebilir. Bu yapı, paslanmaz çeliklerde (ör. 304, 316) bulunur ve mükemmel tokluk, süneklik ve korozyon direnci sunar. Ayrıca manyetik değildir ve kriyojenik ortamlarda dahi tokluk gösterir. Kimya, medikal ve gıda sektörlerinde tercih edilir [20].

2.2.2.6. Çift fazlı (dual-phase) yapı

Çift fazlı çelikler, ferrit ve martensit fazlarının birlikte bulunduğu mikro yapıya sahiptir. Bu çelikler hem yüksek mukavemet hem de iyi şekillendirilebilirlik sunar. Genellikle düşük karbonlu olup, özel ısıl işlemle östenit fazı martensite çevrilir. Otomotiv sanayinde çarpışma direncini artırmak amacıyla tercih edilen AHSS (advanced high strength steels) grubu içinde yer alır [19].

2.3. AISI 1020 Çeliğinin Özellikleri

AISI 1020 çeliği, düşük karbonlu (%0,05–0,20 C), alaşımsız çelikler sınıfında yer alan ve yaygın mühendislik uygulamalarında kullanılan bir malzemedir. Kimyasal bileşiminde ayrıca %0,30–0,60 aralığında Manganez (Mn) bulunur. Bu çelik, mekanik özellikleri bakımından yüksek süneklik, iyi kaynaklanabilirlik, soğuk şekillendirilebilirlik ve işlenebilirlik gibi özellikler sunar. Ancak karbon oranının düşük olması nedeniyle sertliği sınırlı olup, yüksek aşınma direnci veya çekme mukavemeti gerektiren uygulamalar için uygun değildir. Bu nedenle yüzey sertleştirme yöntemleri (Sementasyon, Nitrasyon, Borlama, Bilye püskürtme gibi...) ile takviye edilir [15,16].

Mikro yapısal açıdan değerlendirildiğinde, AISI 1020 çeliği genellikle ferrit + perlit faz bileşimine sahiptir. Karbon oranının düşük olması nedeniyle ferrit fazı yapıda baskındır; perlit ise lamelli formda daha düşük oranda yer alır. Bu yapı, çeliğe yumuşaklık ve işlenebilirlik kazandırırken, özellikle kaynaklı imalat ve soğuk şekillendirme gerektiren uygulamalarda önemli avantaj sağlar. Isıl işlem uygulanmadığında ferrit-perlit yapısını koruyan bu çelik, normalleştirme veya tavlama sonrası tane yapısı homojen hale getirilerek mekanik davranışları daha kararlı hâle getirilebilir [17].

Sınıflandırma açısından AISI 1020 çeliği; hem kimyasal bileşimi yönünden “sade karbonlu (alaşımsız) çelikler” grubunda hem de mikro yapısı yönünden “ferritik–perlitik yapı” sınıfında yer almaktadır. Bu özellikleri nedeniyle AISI 1020, otomotiv sanayinde şasi parçaları, bağlantı elemanları, akslar ve miller gibi orta seviyede dayanım ve yüksek şekillendirme kabiliyeti gerektiren parçalarda tercih edilir. Ayrıca kaplama işlemlerine uygunluğu, yüzey mühendisliği uygulamaları (örneğin Nikel kaplama) için elverişli bir altlık malzeme olmasını sağlar. AISI 1020 çeliğini oluşturan elementlerin kimyasal bileşimi Tablo 2.4’te verilmiştir.

Tablo 2.4. AISI 1020 çeliğinin kimyasal bileşimi.

Element	C	Mn	P	Si	S	Fe
% (Ağırlık)	0,17-0,23	0,30-0,60	≤ 0,04	0,29-0,40	≤ 0,050	98,8-99,2

Sonuç olarak, AISI 1020 çeliği; düşük karbon içeriği ile kolay şekillendirme ve kaynaklama imkânı sunarken, mikroyapısında baskın olan ferrit fazı sayesinde yüksek tokluk ve düşük sertlik özellikleri gösterir. Bu çeliğin yapısal sınıflandırmadaki yeri, onun mekanik özelliklerinin anlaşılmasında ve uygun uygulamalara yönlendirilmesinde temel rol oynamaktadır.

3. ELEKTROLİTİK (ELEKTROKİMYASAL) KAPLAMA

3.1. Elektrolitik Kaplamalar

Elektrolitik kaplama, iletken veya metal yüzeylerin üzerine farklı bir metalin çöktürülmesi işlemini ifade eden, yaygın ve etkili bir yüzey kaplama yöntemidir. Bu yöntem, çözelti içinde çözünmüş metal iyonlarının bir elektriksel akım yardımıyla katot konumundaki iş parçası üzerine indirgenmesi prensibine dayanır. Bu işlem sırasında kullanılan anot, genellikle kaplanmak istenen metalin kendisinden seçilir ve çözeltideki iyon konsantrasyonunun dengede tutulmasını sağlar. Katot ise kaplanacak yüzeyi temsil eder. Metal iyonlarının yüzeye düzgün bir şekilde çöktürülmesiyle birlikte, parçanın yüzey özellikleri önemli ölçüde geliştirilir [26].

Elektrolitik kaplama işlemi, endüstri sektöründe çok çeşitli alanlarda yaygın olarak tercih edilir. Otomotiv, havacılık, savunma, elektronik, beyaz eşya, takı üretimi ve tıbbi cihaz sektörlerinde sıklıkla tercih edilen bu yöntem; özellikle malzemenin aşınma ve korozyon direncini artırmak, elektriksel iletkenliğini düzenlemek ve estetik bir görünüm kazandırmak için uygulanmaktadır. Yöntemin temel avantajları arasında düşük maliyetli ekipmanlarla çalışılabilmesi, seri üretime uyumlu olması, geniş yüzeylere homojen kaplama yapılabilmesi ve kaplama kalınlığının istenilen hassaslıkta ayarlanabilmesi yer almaktadır. Ancak buna rağmen bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Örneğin karmaşık geometrilere sahip parçalarda akım dağılımı nedeniyle homojen olmayan kaplamalar oluşabilmektedir. Ayrıca yüksek iç gerilim nedeniyle kaplamalarda çatlama, soyulma veya gözeneklenme gibi yapısal problemler görülebilmektedir [27,28].

3.2. Elektrolitik Kaplama Yöntemleri

"Elektrolitik kaplama yöntemleri; kullanılan akım türü, kaplanacak yüzeyin niteliği ve uygulama biçimine göre çeşitli sınıflara ayrılmaktadır. Temel olarak bu yöntemlerin tamamı, bir elektrolit çözeltisi içinde metal iyonlarının, bir dış güç kaynağından sağlanan elektrik akımı ile katot yüzeye indirgenmesi esasına dayanır. Ancak uygulanan akımın biçimi, kaplama sürecinin hızı, çözeltideki iyon taşınımı ve yüzeye

Çöken metalin mikroyapısı üzerinde doğrudan etkili olduğu için farklı tekniklerin geliştirilmesi kaçınılmaz olmuştur.

Bu yöntemler genel olarak iki ana grupta sınıflandırılır: ilki elektrik akımının uygulanış biçimine göre sınıflandırma, diğeri ise fiziksel uygulama şekline göre sınıflandırmadır. Akım türüne göre sınıflandırıldığında; sabit doğru akım (DC), darbeli akım (pulse) ve ters akım (reverse pulse) gibi yöntemler ön plana çıkmaktadır. Bu gruplandırma, kaplama kalitesi üzerinde doğrudan etkili olan parametrelerin başında gelir. Özellikle darbeli akım ve ters akım gibi gelişmiş akım kontrol yöntemleri, daha ince taneli, çatlak içermeyen ve yoğun kaplamalar elde edilmesini mümkün kılar.

Fiziksel uygulama şekline göre yapılan sınıflandırmalarda ise parçanın kaplama çözeltisine yerleştirilme biçimi dikkate alınır. Örneğin küçük parçaların topluca kaplandığı tamburlu (barrel) yöntem, büyük ve hassas parçalar için kullanılan askı (rack) yöntemi veya saha uygulamaları için tercih edilen fırça (brush) yöntemi gibi alt sınıflar bu kapsamdadır. Her yöntem; işlem süresi, maliyet, yüzey kalitesi ve ekipman gereksinimi bakımından farklı avantaj ve dezavantajlar sunar.

Bu nedenlerle elektrolitik kaplama yöntemlerinin sahip olduğu çeşitlilik, yüzey kaplama teknolojilerinin ilerlemesi açısından kritik bir yol oynamakta ve kaplanacak malzemenin kullanım alanına uygun yöntem seçilmesi, kaplama performansını doğrudan belirlemektedir.

3.2.1. Doğru akımla kaplama

Elektrolitik kaplama farklı yöntemlerle uygulanabilmektedir. Bunlar kaplama yöntemlerinden en yaygın olanı doğru akım (DC) ile kaplamadır. Bu yöntemde sabit bir doğru akım kullanılarak kaplama gerçekleştirilir. Nikel, inko, Bakır gibi yaygın metallerin elik yüzeylere kaplanmasında sıklıkla tercih edilen bu yöntem, basitliği ve düşük ekipman maliyeti ile endüstriyel üretim süreçlerine kolayca entegre edilebilmektedir. Bununla birlikte, bu yöntemde kristal yapı kontrolü sınırlı olabildiğinden dolayı yüzeyde düzensiz çökelmeler, çatlaklar veya gözenekler oluşma riski vardır. Bu durum, özellikle yüksek performans gerektiren uygulamalarda yüzey kalitesini düşürebilir [26].

3.2.2. Darbeli akımla kaplama

Yüzey kalitesinin daha iyi kontrol edilmesi gerektiği durumlarda darbeli akım kaplama (pulse plating) yöntemi devreye girmektedir. Bu yöntemde elektrik akımı sabit değil,

belirli bir frekansta açılıp kapanan darbeler halinde uygulanır. Bu sayede iyonların katot yüzeyine kontrollü şekilde ulaşması sağlanır ve kristal büyümesi daha homojen hale gelir. Pulse yöntemi ile yapılan kaplamalarda daha ince taneli, sıkı yapılı ve çatlak içermeyen yüzeyler elde edilebilmektedir. Ayrıca iç gerilim önemli ölçüde azaltıldığı için kaplamaların yapışma kabiliyeti artmakta ve daha iyi mekanik performans sergilenmektedir. Birçok avantajı sayesinde pulse plating yöntemi, mikroelektronik bileşenlerde, hassas optik yüzeylerde ve yüksek sertlik gerektiren kaplama işlemlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir [29].

3.2.3. Ters akım kaplama

Darbeli akım kaplama yönteminin daha gelişmiş bir versiyonu olan ters akım kaplama (reverse pulse plating) ise hem pozitif hem de negatif akım darbelerinin dönüşümlü olarak uygulandığı bir tekniktir. Bu işlem sırasında yüzeye çöken metal iyonlarının belirli aralıklarla yeniden çözülmesi sağlanarak, yüzeyde oluşabilecek mikroskobik düzensizliklerin ortadan kaldırılması hedeflenir. Bu yöntem, özellikle düşük yüzey pürüzlülüğü ve yüksek kaplama yoğunluğu istenen durumlarda avantaj sağlamaktadır. Bununla birlikte, bu tür işlemler daha karmaşık ekipman ve yüksek enerji tüketimi gerektirdiğinden, genellikle yüksek hassasiyetli uygulamalarla sınırlıdır [30].

3.2.4. Tamburlu kaplama

Elektrolitik kaplama yalnızca akım şekli açısından değil, aynı zamanda parçanın kaplandığı fiziksel düzeneğe göre de sınıflandırılabilir. Örneğin, seri üretime uygun küçük parça kaplamalarında tamburlu kaplama (barrel plating) yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem sayesinde küçük parçalar dönen bir tambur içine yerleştirilir ve aynı anda yüzlerce parça kaplama çözeltisi içerisinde kaplanabilir. Bu yöntem özellikle cıvata, somun, rondela gibi bağlantı elemanlarının kaplanmasında tercih edilmektedir. Ancak parçaların tambur içinde sürtünmeye maruz kalması nedeniyle yüzeyde deformasyon riski vardır ve kaplama kalınlığı kontrolü sınırlıdır [26].

3.2.5. Askı kaplama

Büyük ve hassas parçaların kaplanması gerektiğinde ise askı kaplama (rack plating) yöntemi kullanılır. Parçalar özel iletken askılara sabitlenerek çözeltiye daldırılır ve kaplama işlemi gerçekleştirilir. Bu yöntem neticesinde daha homojen, kalın ve yüksek

kaliteli kaplamalar yapılabilir. Fakat askı sisteminin karmaşıklığı ve temas noktalarında kaplama oluşmaması gibi dezavantajlar da bulunmaktadır [27].

3.2.6. Fırçayla kaplama

Son olarak, fırça kaplama (brush plating) yöntemi ise taşınabilir uygulamalar için geliştirilmiş bir tekniktir. Özellikle büyük ekipmanların yerinde onarımı veya belirli bir alanın lokal kaplanması gereken durumlarda tercih edilir. Bu yöntemde anot bir fırça şeklindedir ve operatör tarafından manuel olarak yüzeye temas ettirilerek kaplama gerçekleştirilir. Avantajı, saha koşullarında uygulama yapılabilmesidir; ancak kaplama kalitesi ve homojenliği genellikle düşüktür ve işlem büyük oranda operatör becerisine bağlıdır [26].

3.3. Elektrolitik Kaplama Türleri

Elektrolitik kaplama teknolojisi, farklı metallerin belirli yüzey özelliklerini geliştirmek amacıyla metal yüzeylere çöktürülmesini sağlayan bir yüzey kaplama yöntemidir. Bu kaplama yöntemi, kullanılacak metalin türüne ve istenen yüzey özelliklerine göre çeşitlilikler içermektedir. Her kaplama türü hem kimyasal özellikleri hem de işlevsel etkileri bakımından birbirinden ayrılmaktadır. Uygulama alanı, kaplama kalınlığı, işlem maliyeti, çevresel etkiler ve görünüm gibi birçok faktör, hangi kaplama türünün tercih edileceğini belirlemektedir. Bu bağlamda, özellikle koruma, iletkenlik ve dekoratif amaçlar için en yaygın kullanılan kaplama türleri arasında Çinko, Bakır, Nikel, Krom, Altın, Gümüş ve Kalay kaplamalar yer almaktadır. Her bir kaplama türü, kendi içinde farklı elektrolit türleriyle uygulanabilirken, kullanılan çözeltinin bileşimi ve kaplama parametreleri nihai yüzey performansını doğrudan etkilemektedir.

3.3.1. Çinko kaplama

Çinko kaplama, özellikle Çelik ve Demir esaslı alaşımların yüzeylerini korozyona karşı korumak amacıyla yaygın olarak kullanılan bir elektrolitik kaplama yöntemidir. Bu yöntemin temel işlevi, Çinko metalinin katodik koruma sağlayan özelliğinden faydalanarak, altlık malzemenin oksidasyonunu önlemektir. Çinko, Çeliğe kıyasla daha elektropozitif bir metaldir; bu nedenle, korozif ortamlarda önce kendisi reaksiyona girerek çelik altlığı paslanmaya karşı korur. Bu yönüyle Çinko kaplama, galvanik korozyon ortamlarında uzun süreli dayanım sağlamakta, özellikle otomotiv, yapı inşaatı, boru hatları ve bağlantı elemanları gibi uygulamalarda sıklıkla tercih

edilmektedir. Asidik ve alkali elektrolit çözeltileriyle uygulanabilen Çinko kaplamalar, düşük maliyetli ve seri üretime uygun olmaları bakımından sanayide büyük ölçekli kullanıma olanak tanır. Ancak çizilme, mekanik darbeler ve bazı kimyasal ajanlara karşı sınırlı direnç göstermeleri nedeniyle, ileri mühendislik uygulamaları için tek başına yeterli değildir.

3.3.2. Bakır kaplama

Bakır kaplama, yüksek elektriksel ve termal iletkenliği nedeniyle genellikle elektronik, enerji iletim hatları ve baskı devre kartları gibi uygulamalarda tercih edilen bir kaplama türüdür. Ayrıca çok katmanlı kaplama sistemlerinde, alt katman görevi görerek diğer kaplamaların altlık yüzeyle olan yapışmasını artırma işlevi de görmektedir. Elektrolitik Bakır kaplama, sülfat esaslı banyolar kullanılarak gerçekleştirilmekte ve düzgün kristal yapı sayesinde estetik olarak da tatmin edici yüzeyler elde edilmektedir. Ancak Bakır, ortam koşullarına karşı nispeten hassas bir metaldir ve atmosferik korozyona uğramaya eğilimlidir. Bu nedenle tek başına kullanıldığında uzun vadeli koruma sağlamaz; genellikle üzerine Nikel veya Kalay gibi daha pasif metallerle kaplama yapılması gerekebilir. Özellikle düşük karbonlu çelik altlıklarda, Bakır kaplama genelde ara tabaka olarak görev görmektedir.

3.3.3. Krom kaplama

Endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılan Krom kaplamalar, yüksek sertlik, aşınmaya karşı direnci ve kimyasal stabilite gibi özellikleriyle ön plana çıkmaktadır. Genellikle endüstriyel (sert ve kalın) ve dekoratif (ince ve parlak) olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Dekoratif Krom kaplamalar otomotiv dış parçaları, ev eşyaları ve mimari uygulamalarda tercih edilirken; endüstriyel Krom kaplamalar silindirler, kalıp yüzeyleri ve yüksek yük taşıyan makine parçaları gibi alanlarda kullanılır. Krom kaplamalar, özellikle yüzey sertliğini arttırarak tribolojik performansı iyileştirir. Ancak hekzavalent Krom içeren elektrolitlerin çevresel ve sağlık açısından oluşturduğu tehditler nedeniyle bu kaplama yöntemi günümüzde bazı düzenlemelere ve kısıtlamalara tabi tutulmuştur. Bu bağlamda alternatif çözümler geliştirilmeye çalışılmaktadır.

3.3.4. Altın kaplama

Altın ve Gümüş esaslı kaplamalar, elektriksel iletkenliğin yüksek olması, kimyasal stabilite sağlaması ve estetik açıdan cazip bir görünüm sunması nedeniyle endüstriyel

ve dekoratif alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Altın kaplama, inert yapısı sayesinde korozyon ortamlarında bile oksitlenmeye karşı dirençli olup, özellikle mikroelektronik, uzay teknolojileri ve haberleşme ekipmanlarında güvenilir temas yüzeyleri oluşturur. Gümüş ise Altına kıyasla daha düşük maliyetli olmasına rağmen, benzer şekilde iyi iletkenlik özelliklerine sahiptir. Ayrıca antibakteriyel özellikleri sayesinde tıp teknolojilerinde de kullanım alanı bulmaktadır. Her iki kaplama türü de yüksek maliyetli olduğundan, genellikle çok ince tabakalar hâlinde ve seçici bölgelerde uygulanır. Altlık malzeme olarak Çelik kullanıldığında, doğrudan kaplama yerine önce ara katman olarak Nikel veya Bakır uygulanması önerilmektedir.

3.3.5. Kalay kaplama

Kalay kaplama, özellikle gıda ambalajlama, lehimlenebilirlik ve paslanmaya karşı direnç gibi işlevsel özellikleriyle tercih edilen kaplama türüdür. Gıdayla temasa uygunluğu ve toksik olmayan yapısı nedeniyle konserve kutuları gibi uygulamalarda yaygın olarak tercih edilir. Elektronik endüstrisinde ise lehimlenebilirliği artırmak amacıyla iletken yüzeylerde kullanılır. Kalay kaplamalar genellikle parlak ve düzgün yüzeyler oluşturur, ancak mekanik dayanımları sınırlıdır. AISI 1020 gibi düşük karbonlu çelikler üzerinde kullanıldığında, Çeliğin oksidasyon eğilimini azaltmakla birlikte yapısal dayanımı artırmaz; bu nedenle tek başına mekanik yük taşıyan uygulamalarda yeterli değildir.

3.3.6. Nikel kaplama

Nikel kaplama, korozyon direnci, aşınma dayanımı, sertlik ve dekoratif görünüm kazandırmak amacıyla endüstride en yaygın kullanılan elektrolitik kaplama türlerinden biridir. Nikel, pasivasyon eğilimi sayesinde çelik yüzeylerde etkili bir bariyer oluşturarak çevresel etkilerden kaynaklanan hasarları minimize eder. Nikel kaplamalar, aynı zamanda diğer kaplamalar için ara katman görevi de görebilir ve farklı metallerin yüzeye tutunmasını kolaylaştırır.

Bu yüzden Nikel kaplama uygulamalarında kullanılan Nikel sülfamat banyoları, düşük iç gerilimli, çatlak içermeyen ve yüksek yapışma kabiliyetine sahip kaplamalar üretmeleriyle tercih edilmektedir. Geleneksel sülfat veya klorür bazlı banyolara kıyasla, sülfamat banyoları daha kararlı bir elektrolit yapısı sunar ve bu sayede kalın, düzgün ve homojen kaplamalar elde edilmesine olanak tanır. Ayrıca bu banyolar, katkı

maddeleri (örneğin borik asit) ile modifiye edilerek kaplamanın kristal yapısı ve mekanik özellikleri üzerinde doğrudan kontrol sağlayabilir [26].

Özellikle AISI 1020 çeliği gibi düşük karbonlu ve yüzey özellikleri yetersiz malzemelerin performansını artırmak amacıyla uygulanan Nikel kaplamalar hem koruyucu hem de fonksiyonel özellikler kazandırmaktadır. Bu kaplamalar, çelik malzemenin korozyon direncini arttırmakla birlikte, kaplamanın mikroyapısını sıkılaştırarak yüzey sertliğini ve aşınma dayanımını da artırır.





4. NİKEL ESASLI KAPLAMALARDA KULLANILAN KAPLAMA BANYOLARI VE NİKEL KAPLAMALARIN ÖZELLİKLERİ

Metal yüzeylerin işlevsel ve mekanik özelliklerini iyileştirmeye yönelik yüzey kaplama teknikleri, malzeme mühendisliğinde önemli uygulama alanlarına sahiptir. Özellikle düşük karbonlu çelikler, sınırlı korozyon ve aşınma dayanımları nedeniyle yüzey modifikasyonuna ihtiyaç duymaktadır. Bu bağlamda, Nikel kaplama yöntemleri hem koruyucu hem de dekoratif amaçlarla sıkça tercih edilmektedir [26].

Nikel kaplamalar, elektrolitik yöntemlerle gerçekleştirilmekte olup, Nikel sülfamat bazlı banyolar, çatlak içermeyen yapılarıyla ve düşük iç gerilim özellikleriyle ön plana çıkmaktadır [8]. Sülfamat esaslı banyolar, yüksek saflıkta, homojen ve kalın kaplamalar elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Nikel sülfamat banyolarında borik asit katkısının çözeltideki pH dengesini stabilize ettiği ve kaplamaların mikroyapısını olumlu yönde etkilediği rapor edilmiştir [22]. Katkı maddelerinin kristal yapı üzerindeki etkileri değerlendirilmiş, borik asidin yapı içerisindeki dengeleyici rolü vurgulanmıştır [31].

Metal ve metal olmayan bileşenlerden kompozit oluşturmak için en etkili yöntemlerden biri olan elektrolitik kaplama basit ve düşük maliyetlidir [32].

Elektrolitik nikel kaplama işlemi ilk kez 1837 yılında C. Bird tarafından gerçekleştirilmiş; bu süreçte nikel klorür ve nikel sülfat içeren bir elektrolit kullanılarak platin anot üzerinde kaplama elde edilmiştir. Bu yöntemin endüstriyel uygulanabilirliği 1840 yılında J. Shore tarafından fark edilmiş ve İngiltere'de bu alanda ilk ticari kaplama patenti alınmıştır [33,34].

Elektrolitik kaplama, malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini iyileştirmek amacıyla uygulanan bir elektrokimyasal yüzey kaplama yöntemidir. Bu yöntemde, metal yüzeyler elektrolit çözeltisi içerisinde elektrik akımı yardımıyla kaplanarak, yüzeyde oksidasyon gibi istenmeyen reaksiyonların önüne geçilir. Böylece malzemenin korozyon direnci, aşınma dayanımı ve estetik görünümü önemli ölçüde artırılır [35].

Nikel kaplamalar; mükemmel korozyon ve aşınma dirençleri ile birlikte, iyi işlenebilirlik özellikleri sayesinde mühendislik uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu kaplamaların yapısal karakteristikleri, korozyon ve mekanik performansları; kaplama banyosunun bileşimi, katkı maddeleri, akım yoğunluğu, pH değeri, kaplama süresi gibi işlem parametrelerine doğrudan bağlıdır [36].

Nikel kaplama çeşitlerinden olan Nikel Fosfor (Ni-P) kaplamaların özellikleri incelendiğinde, yapılarında bulunan fosfor oranına bağlı olarak kaplamanın korozyon direnci, sertlik ve mikroyapısal özellikleri gibi performans kriterleri, doğrudan bu fosfor miktarı ile bağlantılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır [37].

Borik asit katkısı, çözeltinin tamponlanmasını sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda kaplamanın tane yapısını, mikrosertliğini ve yüzey bütünlüğünü doğrudan etkilemektedir. Borik asidin yüksek konsantrasyonlarda kullanımı çözeltideki iyon hareketliliğini sınırlandırabileceği ve bu durumun kaplama kalitesine doğrudan etki ettiği belirtilmiştir. Katkı oranının dikkatle kontrol edilmesi gerektiği vurgulanmıştır [38,39].

HOARE yaptığı çalışmaların neticesinde kaplama banyosunda bulunan borik asit varlığı sayesinde Nikelin ilk olarak çöktüğü bulgularına ulaşmıştır [40].

Godon ve arkadaşları, borik asidin Nikel kaplama çözeltilerindeki rolü üzerine yaptıkları araştırmaların neticesinde borik asidin Nikel kaplamada katalitik etkinlik gösterdiğini ve kaplama çözeltisinde asıl olarak Nikel iyonlarının daha etkin biçimde çökertilmesini sağladığı tespit etmişlerdir. Borik asit, Nikel birikiminin gerçekleşmesi için gereken aşırı gerilimi düşürerek, hidrojen evrim reaksiyonu yerine Nikelin daha öncelikli olarak yüzeyde birikmesine olanak verir. Ayrıca borik asitin, çözelti pH'ını stabilize ederek metal-çözelti arayüzeyinde lokal tampon görevi gördüğü ve bu sayede kaplamanın mikroyapısını ve yüzey kalitesini olumlu etkilediği belirtilmiştir [41].

Yerli literatürde yapılan çalışmalarda da benzer bulgulara ulaşılmıştır. AISI 1010 çeliği üzerine uygulanan Nikel kaplamalarda sülfat ve sülfamat banyoları karşılaştırılmış, sülfamat banyolarının daha düzgün ve homojen yüzey oluşturduğu ifade edilmiştir [42]. Akım yoğunluğunun kaplama yapısı üzerindeki etkisi incelenmiş ve optimum akım değerinin yüzey sertliğini artırdığı gözlemlenmiştir [43]. Borik asidin çözeltide pH stabilizatörü olarak işlev görmesinin yanı sıra, kristal büyümesine olumlu katkılar sağladığı gösterilmiştir [44].

Düşük karbonlu çeliklerden olan AISI 1020 çeliği üzerine yapılan kaplamalarda da benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Düşük karbonlu çelikler üzerine uygulanan Nikel kaplamalarda belirli akım yoğunluklarında maksimum sertlik elde edildiği bildirilmiştir. Akım yoğunluğunun artmasının kaplama tane boyutunu etkileyerek mikroyapı homojenliğini azalttığı gösterilmiştir [45,46].

Kaplama süresi, sıcaklık ve katkı maddesi oranı gibi parametrelerin etkileri SEM ve XRD analizleriyle desteklenerek literatürde de detaylı biçimde ele alınmıştır. Sülfamat kaplamaların tavlama sonrası mikroyapısal değişimi gözlemlenmiş, borik asit miktarının kaplama iç gerilimine ve mikrokristal yapıya etkileri detaylı biçimde analiz edilmiştir [47,48]. Ayrıca sıcaklık ve katkı oranı arasındaki etkileşimin, kaplamanın sertliği ve korozyon dayanımı üzerinde belirleyici olduğu gösterilmiştir [49].

Nikel kaplama yapılan banyolarda; malzeme yüzeyine yapışan Nikel oranını arttırmak amacıyla süreci etkileyen faktörler üzerine araştırmalar yapılmıştır. Sıcaklık, Nikel sülfat (NiSO_4), Nikel klorür (NiCl_2) ve borik asit (H_3BO_3) miktarının banyolardaki verimli kullanılan nikel oranını önemli ölçüde arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır [50].

Borik asit, çözeltideki pH değişimlerini tamponlayarak kaplama yüzeyinde bozuklukları önler. Ayrıca sülfamat esaslı banyolar, düşük iç gerilimli ve kalın kaplama üretme yetenekleri nedeniyle mühendislik uygulamaları için yaygın olarak tercih edilmektedir [51].

Borik asidin, Nikel-Tungsten (Ni-W) alaşımlarının hem kaplama süreci hem de elde edilen kaplama yapısı üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. Özellikle borik asit, tamponlayıcı olarak işlev görerek katot yüzeyine yakın pH'ı stabilize etmiş ve düzgün tane büyümesini teşvik etmiştir. Borik asit konsantrasyonu arttıkça, Ni-W kaplamalarının tane boyutları daha ince hale gelmiş ve yüzey düzgünlüğü artmıştır. Bu durum, kaplamanın mekanik bütünlüğü ve korozyon direnci açısından oldukça önemli olduğu sonucuna ulaşılmıştır [52].

Baskara ve arkadaşları (2006) yaptıkları çalışmada Nikel bor kaplamalarda bor oranı arttıkça yüzey sertliğinin ve aşınma direncinin yükseldiği sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca, Ni-B kaplamaların hem ekonomik hem de teknik açıdan yüksek performans gösterdiği belirtilmiştir [53].

Krishnaveni ve arkadaşları (2005), yapmış oldukları araştırmalarda Nikel Bor (Ni-B) esaslı kaplamalarda bor içeriğinin artmasıyla kaplama sertliğinin yükseldiğini, en

yüksek sertlik değerine ise ısıtıl işlem uygulanmış Ni-B kaplamalarda elde edildiği sonucuna ulaşmışlardır. Bu sonuçlar, bor katkısının ve ısıtıl işlemin kaplama performansında kritik rol oynadığını göstermektedir [54].



5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Giriş

Yüzey kaplama teknolojileri, endüstride yaygın olarak kullanılan düşük karbonlu çeliklerin, özellikle korozyon ve aşınma gibi dış etkenlere karşı dayanımını artırmak amacıyla uygulanan önemli yüzey mühendisliği işlemleridir. Bu yöntemler sayesinde, iş parçalarının servis ömrü uzatılmakta, bakım onarım maliyetleri azaltılmakta ve ekipman duruş zamanları en aza indirilmektedir. Özellikle kimyasal ortamlarda veya mekanik zorlanmalara maruz kalan parçaların yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi, üretim verimliliği ve malzeme dayanımı açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bu tür uygulamalar düşünüldüğünde, yüzey kaplamaları hem ekonomik hem de teknik anlamda ciddi katkılar sunmaktadır.

Bu çalışma ile, AISI 1020 çeliği yüzeyine elektrolitik yöntemle Nikel kaplama işlemi uygulanmıştır. Nikel kaplama, bilindiği üzere yüzeyde hem koruyucu hem de dekoratif özellikler kazandırmakta; özellikle sülfamat bazlı banyolar kullanıldığında düşük iç gerilimli, çatlak içermeyen ve yapışma kabiliyeti yüksek kaplamalar elde edilebilmektedir. Bu özelliklerinden dolayı Nikel kaplama yöntemi, hassas uygulamalar ve yüksek yüzey kalitesi gerektiren alanlarda tercih edilmektedir.

Deneysel çalışma kapsamında, kaplama uygulaması iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, elektrolit çözeltisine borik asit ilave edilmeden Nikel kaplama gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada ise aynı çözeltinin içerisine farklı oranlarda borik asit (H_3BO_3) eklenerek kaplama işlemi tekrar edilmiştir. Her iki durumda da kaplama süreleri ve kaplama sıcaklıkları değişken parametreler olarak belirlenmiş ve bu parametrelerin kaplama kalitesi üzerindeki etkileri detaylı şekilde araştırılmıştır.

Kaplama işlemlerinin ardından elde edilen numuneler, öncelikle yüzey morfolojisi açısından taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiş; ardından mikroyüzey sertliği ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca, kaplamaların korozyon dayanımı ve aşınma testleri değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular hem borik asit katkısının hem de işlem parametrelerinin kaplama performansına etkilerini ortaya koymak açısından karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Bu çalışma ile, AISI 1020 çeliği gibi yüzey özellikleri zayıf olan bir malzemenin, uygun kaplama koşulları altında yüksek yüzey performansı sergileyebileceği ve borik asit katkısının kaplamanın mikroyapı ve dayanım özellikleri üzerinde belirleyici bir etken olduğu ortaya konulmuştur.

5.2. Deney Düzenegi ve Numune Hazırlanması

Kaplama işleminde kullanılmak üzere düşük karbonlu AISI 1020 çelik numuneleri uygun boyutlarda kesilerek hazırlanmış ardından kaplama işlemleri için Nikel sülfamat esaslı elektrolit banyosu hazırlanarak kaplama gerçekleştirilmiştir.

5.2.1. Nikel sülfamat banyosunun hazırlanması

AISI 1020 çeliklerine yapılacak olan Nikel kaplama için oluşturacağımız kaplama banyosu belirli oranlarda bulunan kimyasalların kaplama için kullanılacak kaplama banyosunda birleşmesi ile oluşturulmuştur.

5.2.1.1. Kullanılan kimyasallar

Kaplama işlemleri için kullanılan elektrolit banyo, laboratuvar ortamında 2 litrelik cam beher içerisinde hazırlanmıştır. Banyoda kullanılan kimyasal bileşenler ve miktarları:

- Nikel sülfamat ($\text{Ni}(\text{SO}_3\text{NH}_2)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$): 630 ml/L
- Nikel klorür ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$): 15 gr/L
- Borik asit (H_3BO_3): 0, 5, 10, 20, 40, 60 gr/L (değişken parametre)

Tüm bileşenler homojen hâle getirilene kadar karıştırılmış ve çözelti hacmi saf (demineralize) su ile 2 litreye tamamlanmıştır. Bu kimyasallardan Nikel sülfamatın kimyasal bileşimi Tablo 5.1’de, Nikel klorür Tablo 5.2’de, borik asidin kimyasal bileşimi ise Tablo 5.3’te verilmiştir.

Tablo 5.1. Nikel sülfamat kimyasal bileşimi.

Element	Ni	N	H	S	O
% (Ağırlık)	23,4	11,17	1,61	25,56	38,27

Tablo 5.2. Nikel klorür kimyasal bileşimi.

Element	Ni	Cl	6H ₂ O
% (Ağırlık)	24,7	29,84	45,46

Tablo 5.3.Borik asit kimyasal bileşimi.

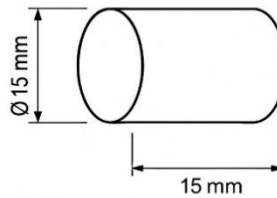
Element	H	B	O
% (Ağırlık)	4,89	17,48	77,63

5.2.1.2. Numune hazırlığı

Bu çalışmada kaplama altlığı olarak kullanılan numuneler, AISI 1020 çeliği olup, 15×15 mm boyutlarında kesilerek hazırlanmıştır. Çalışmamızda kullandığımız AISI 1020 çeliğinin kimyasal bileşimi Tablo 5.4'te, hazırlanan numulere ait şematik görünüm Şekil 5.1.'de verilmiştir. Numunelerin yüzey hazırlığı, kaplama kalitesini doğrudan etkileyen bir unsur olduğundan, yüzeyler sırasıyla 200, 400, 600, 800, 1000 ve 2000 mesh zımpara ile zımparalanarak düzgün hâle getirilmiştir. Sonrasında numuneler, kirleticilerden ve yüzey oksitlerinden arındırılması amacıyla %5'lik hidroklorik asit (HCl) çözeltisinde 30 saniye süre ile bekletilmiş ve takiben saf su ile durulanarak kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 5.4. AISI 1020 çelik numunesinin kimyasal bileşimi.

Element	C	Mn	P	Si	S	Fe
% (Ağırlık)	0,19	0,44	0,005	0,30	0,044	99,021

**Şekil 5.1.** Deneysel çalışmalarda kullanılan numunelerin şekil ve boyutları.**5.2.2. Nikel sülfamat banyosunun kurulumu**

Yapılan çalışma kapsamında AISI 1020 çeliği üzerine gerçekleştirilen elektrolitik Nikel kaplama işlemleri için, düşük iç gerilimli kaplamalar elde edilmesini sağlayan Nikel sülfamat esaslı bir banyo oluşturulmuştur. Nikel sülfamat banyoları, kaplama sırasında çatlak oluşumunu en aza indirmesi, yüksek yapışma kabiliyeti sunması ve kalın, homojen kaplamalar elde edebilmesi açısından özellikle tercih edilmektedir.

Bunun yanı sıra, sülfamat iyonlarının çözeltideki kararlılığı sayesinde uzun süreli kaplama işlemlerinde dahi performans kaybı yaşanmamaktadır.

Hazırlanan kaplama banyosunun toplam hacmi 2 litre olarak belirlenmiş ve çözeltiyi oluşturan bileşenler: Nikel sülfamat ($\text{Ni}(\text{SO}_3\text{NH}_2)_2$), Nikel klorür ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), borik asit (H_3BO_3) ve saf su (H_2O). Bu bileşenler sırasıyla Nikel iyonu kaynağı, tamponlayıcı katkı maddesi ve çözücü görevini üstlenmektedir. Borik asit, çözeltideki hidrojen gazı oluşumunu sınırlandırmakta ve kaplama sırasında yüzeyde meydana gelebilecek gözeneklenmeleri önlemektedir. Ayrıca kristal büyümesini dengeleyerek daha düzgün ve kompakt bir yapı oluşmasına katkı sağlamaktadır.

DeneySEL süreçte, iki ayrı kaplama banyosu grubu oluşturulmuştur. İlk grupta yalnızca Nikel sülfamat ve saf sudan oluşan, borik asit içermeyen çözelti hazırlanmıştır. İkinci grupta ise aynı Nikel sülfamat çözeltisine sırasıyla farklı konsantrasyonlarda borik asit ilavesi yapılmıştır. Her bir kaplama banyosu, ayrı ayrı hazırlanarak istenen sıcaklıklarına göre ısıtılmış ve karıştırıcı yardımıyla homojen bir çözelti elde edilmiştir.

Kimyasallar ortam koşullarına uyum sağladıktan sonra, tartım işlemleri hassasiyetli analitik terazi ile gerçekleştirilmiştir. Öncelikle Nikel sülfamat belirlenen miktarda saf su içerisinde çözülmüş, ardından borik asit yavaş yavaş ilave edilerek tamamen çözünmesi sağlanmıştır. Hazırlanan çözeltinin toplam hacmi 2000 ml'ye tamamlanmış ve pH değeri 4.0–4.5 aralığına ayarlanarak kullanıma hazır hâle getirilmiştir.

Kaplama banyosu kullanımı süresince, sıcaklık değişimleri termometre ile sürekli olarak takip edilmiş ve banyo içindeki çözeltinin yüzey gerilimini düşürmek amacıyla az miktarda Nikel nemlendirici ilave edilmiştir. Bu katkı, özellikle hidrojen gazı kabarcıklarının katot yüzeyinde tutunmasını engelleyerek yüzeyde çukur oluşumunu minimize etmektedir.

Hazırlanan banyolar, deney gruplarına uygun şekilde AISI 1020 çelik numunelerin kaplanması için kullanılmış; böylece borik asit oranının ve kaplama parametrelerinin kaplama kalitesi üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

5.3. Kaplama İşlemi

Bu tez çalışmasında, düşük karbonlu AISI 1020 çelik numunelerine, Nikel sülfamat esaslı elektrolit banyosu kullanılarak Nikel kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Uygulanan kaplama yöntemi, çözeltide çözünmüş Nikel iyonlarının elektrik akımı yardımıyla katot yüzeyine indirgenmesi esasına dayanmakta olup, bu süreçte çözeltinin fiziksel ve kimyasal parametreleri titizlikle kontrol edilmiştir.

Kaplama işlemleri, 2 litre hacmindeki cam reaktörler içerisinde yürütülmüş; reaktörler, sıcaklık kontrollü bir su banyosu içerisine yerleştirilerek belirlenen sıcaklıklarda (30°C, 45°C ve 60°C) sabitlenmiştir. Kaplama çözeltisi, daha önce hazırlanmış Nikel sülfamat, saf su ve opsiyonel olarak borik asit içeren karışımlardan oluşturulmuş, çözeltinin pH değeri 4.0–4.5 aralığına ayarlanmıştır. pH ayarlamaları, seyreltik sülfamik asit veya amonyum hidroksit ilavesiyle gerçekleştirilmiş ve her deney öncesi pH değeri bir pH metre yardımıyla doğrulanmıştır.

Elektrolitik hücrede anot olarak %99,9 saflıkta elektrolitik Nikel levhalar, katot olarak ise 15 × 15 mm boyutlarında hazırlanan AISI 1020 çelik numuneler kullanılmıştır. Elektrotlar, elektriksel iletkenliği yüksek Bakır iletken kablolar ile doğru akım DC (redresör) güç kaynağına bağlanmış ve hücreye paralel olarak, birbirinden yaklaşık 3–4 cm mesafede yerleştirilmiştir. 4 A/dm² akım yoğunluğu altında kaplama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Akım değerleri hem ampermetre hem de dijital güç kaynağı ekranı üzerinden sürekli olarak izlenmiştir.

Kaplama sürecinden önce temizleme işlemi için numuneler önce etanol ve saf su ile ultrasonik banyoda 10 dakika süreyle yıkanmış, daha sonra %5'lik HCl çözeltisinde 30 saniye tutulmak suretiyle aktif hale getirilmiş ve son olarak saf su ile durulanarak kurutulmuştur. Tüm bu işlemler, kaplama kalitesini artırmak ve yüzeydeki oksit, yağ veya yabancı partikülleri uzaklaştırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Kaplama işlemi boyunca çözeltinin homojenliğini sağlamak için karıştırıcı kullanımı sağlanmıştır. Hidrojen kabarcıklarının yüzeyde tutunmasını önlemek ve kaplama bütünlüğünü artırmak amacıyla banyoya az miktarda yüzey aktif nemlendirici (%0,05 oranında) ilave edilmiştir. Bu katkı, yüzey gerilimini düşürerek hidrojenin serbest kalmasını kolaylaştırmakta ve çukur oluşumunu engellemektedir.

Kaplama kalitesinin süre, sıcaklık ve borik asit miktarı gibi parametrelerle olan ilişkisini ortaya koyabilmek amacıyla her bir değişken sistematik biçimde kontrol altında tutulmuş, yalnızca bir parametre değiştirilerek karşılaştırmalı analiz yapılmasına olanak tanınmıştır. Nikel kaplaması yapılan ve kaplamasız numune görseli Şekil 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.2. Deneyisel çalışmalarda kullanılan numunelerin Nikel kaplama öncesi ve sonrası görüntüleri.

5.4. Karakterizasyon İşlemi

Kaplama işlemi sonrasında elde edilen Nikel kaplı AISI 1020 çelik numunelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla çeşitli analiz ve karakterizasyon teknikleri uygulanmıştır. Bu kapsamda; numunelerin mikroyapı, yüzey morfolojisi, elementel dağılım, sertlik ve aşınma özellikleri detaylı biçimde incelenmiştir. Analizlerin sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için numuneler, uluslararası metalografi standartlarına uygun olarak hazırlanmıştır.

Kaplama işlemi tamamlanan numuneler, ilk olarak mikroyapı ve kesit incelemeleri için uygun boyutlarda kesilmiştir. Kesme işlemi, numunenin ısı etkilerinden zarar görmemesi amacıyla Struers Labotom-5 markalı su soğutmalı metal kesme cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kesme işleminin ardından numunelerin mikroyapı analizi yapılması amacıyla Struers CitoPress-5 markalı bakalit alma cihazı ile bakalite alınmıştır.

Bakalite alınan numuneler metalografik olarak mikroskop altında incelenebilmesi için yüzey hazırlama metotlarından geçmesi gerekir bu amaçla Struers'in Laboforce-30 cihazıyla zımparalama işlemi yapılmıştır. Zımparalama istenen yüzey kalitesi için sırasıyla 200, 400, 600, 800, 1000 ve 2000 mesh'lik zımpara kâğıtları kullanılarak aşındırılmış; daha sonra 3 µm ve 1 µm alüminyum oksit tozlarıyla parlatma işlemi uygulanmıştır. Parlatma sonrası oluşabilecek yüzey oksitleri veya kalıntıların uzaklaştırılması amacıyla numuneler Etil alkol ve saf su karışımında ultrasonik banyo

ile temizlenmiş ve kurutulmuştur. Bu şekilde yüzey ve kesit analizlerine uygun numune yüzeyi elde edilmiştir.

5.4.1. Optik mikroskop incelemeleri

Kaplama kalınlığı, tabaka bütünlüğü ve ara yüzey geçişlerinin genel yapısını analiz etmek amacıyla Şekil 5.4'te verilen Nikon Optiphot-100 markalı optik mikroskop kullanılmıştır. Mikroyapıların net biçimde ortaya çıkması için numune kesitleri uygun kimyasal reaktif ile dağlanmış ve farklı büyütme seviyelerinde görüntülenmiştir. Bu analiz, kaplamanın çelik altlıkla olan bağlanma karakterini, kaplama kalınlıklarını ortaya koymak açısından önem taşımaktadır. Yapılan optik mikroskop analizleri neticesinde borik asit ilavesinin kaplama kalınlığını 6,1 μm değerinden 26 μm değerine kadar arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 5.3. Nikon Optiphot-100 markalı optik mikroskop görüntüsü.

5.4.2. SEM analizi

Metalografik numune hazırlama aşaması tamamlanan numuneler Şekil 5.5'te verilen Zeiss Gemini Ultra Plus marka Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile analize alınmıştır. SEM analizleri, farklı parametreler altında elde edilen kaplamaların, gözeneklilik durumu, çukur oluşumu ve yüzey düzgünlüğü gibi kritik faktörleri değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Ayrıca SEM kesit görüntüleri

kullanılarak, kaplama tabakasının kesit üzerindeki kalınlık dağılımı detaylı şekilde incelenmiştir. SEM cihazı ile entegre çalışan Oxford Instruments X-Max marka EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) cihazıyla noktasal ve bölgesel elementel analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.4. Zeiss Gemini Ultra Plus marka taramalı elektron mikroskobu görüntüsü.

5.4.3. XRD analizi

Kaplama yüzeyinde oluşan fazlar ve kristal yapılar, X-Işını Difraksiyonu (XRD) (Rigaku Ultima X-ray Difraktometre) yöntemi ile analiz edilmiştir. Elde edilen difraksiyon desenleri, PDF (Powder Diffraction File) veri tabanı ile karşılaştırılarak mevcut fazlar belirlenmiştir. Bu analiz sayesinde borik asit katkısının kristal yapı üzerindeki etkileri ve olası ara faz oluşumları tespit edilmiştir.

5.4.4. Sertlik testleri

Kaplama tabakasının mekanik dayanımını belirlemek amacıyla Vickers mikrosertlik testi uygulanmıştır. Her numunenin beş ayrı bölgesinden gerçekleştirilen ölçümlerin sonucunda elde edilen değerlerin ortalaması esas alınarak ASTM E384 standardı doğrultusunda değerlendirme yapılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri, kaplama süreleri ve borik asit konsantrasyonları arasındaki ilişkiyi ortaya koymak açısından kritik rol oynamıştır.

5.4.5. Tuz korozyon testleri

Tuz korozyon testi, metalik ve metal kaplamalı yüzeylerin korozyon direncini değerlendirmek amacıyla yaygın olarak kullanılan, hızlandırılmış bir çevresel test yöntemidir. Bu test, ISO 9227 ve ASTM B117 gibi uluslararası standartlara uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Test ortamı genellikle %5'lik sodyum klorür (NaCl) çözeltisinden oluşur ve 35 ± 2 °C sıcaklıkta tutulur. Bu koşullar, metal yüzeylerde oluşabilecek pasif tabaka bozulmalarını hızlandırarak korozyon davranışının gözlemlenmesini sağlar.

%5 NaCl çözeltisi hem klorür iyonlarının agresifliği hem de sodyum iyonlarının iletkenliği sayesinde test edilen kaplama yüzeyinde yoğun bir elektrokimyasal stres oluşturur. Bu sayede, özellikle Nikel kaplamalar gibi koruyucu yüzeylerin çatlama, pul pul dökülme ve gözeneklilik gibi zayıf noktaları kısa sürede açığa çıkar.

Test esnasında, numuneler 15° - 30° açıyla yerleştirilerek yüzeye sürekli olarak ince tanecikli tuz çözeltisi püskürtülür. Oluşan tuz sisi, numune yüzeyinde homojen bir korozyon ortamı meydana getirir. Bu ortamda geçen süre sonunda kaplama yüzeyinde oluşan paslanma, renk değişimi, kabarma, soyulma gibi fiziksel değişiklikler incelenerek korozyon direnci değerlendirilir.

5.4.6. Aşınma testleri

Malzeme yüzeylerinin aşınma direncini değerlendirmek amacıyla sıklıkla tercih edilen yöntemlerden biri Taber aşınma testidir. Şekil 5.6'da gösterilen Taber Abraser cihazı ile gerçekleştirilen bu test özellikle kaplanmış yüzeylerin mekanik dayanıklılığı ve yüzey bütünlüğü açısından oldukça önemli bilgiler sunmaktadır. ASTM D1044 ve ASTM D4060 standartlarına göre uygulanan bu yöntem, döner bir platform üzerine yerleştirilen numune yüzeyinin belirli bir süre boyunca sabit bir yük altında aşındırıcı disklerle işlenmesine dayanır.

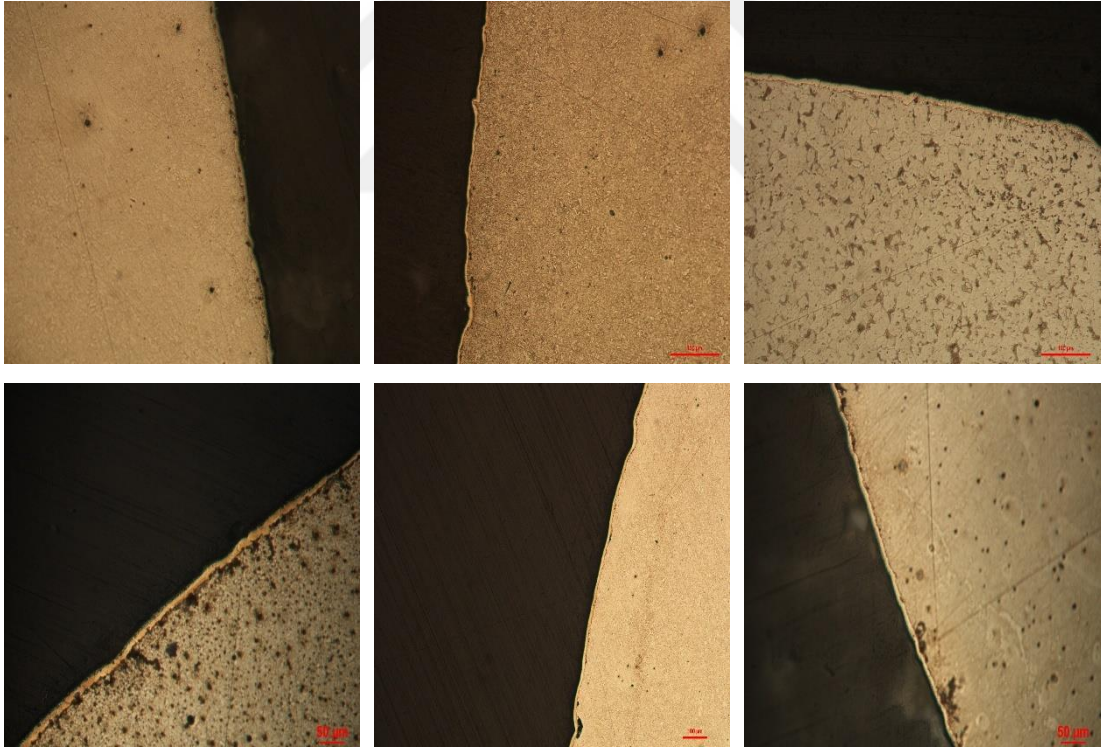
Test sırasında, numune belirli bir devir sayısında döndürülürken, yüzeye uygulanan aşındırıcı diskler yüzeyde kontrollü bir mekanik aşınma gerçekleştirmektedir. Elde edilen aşınma miktarı, test öncesi ve sonrası ölçülen kütle farkı ya da hacimsel kayıp ile belirlenir. Bu fark aşınma katsayısı olarak ifade edilir. Düşük aşınma katsayısı, yüksek aşınma direncine işaret eder.



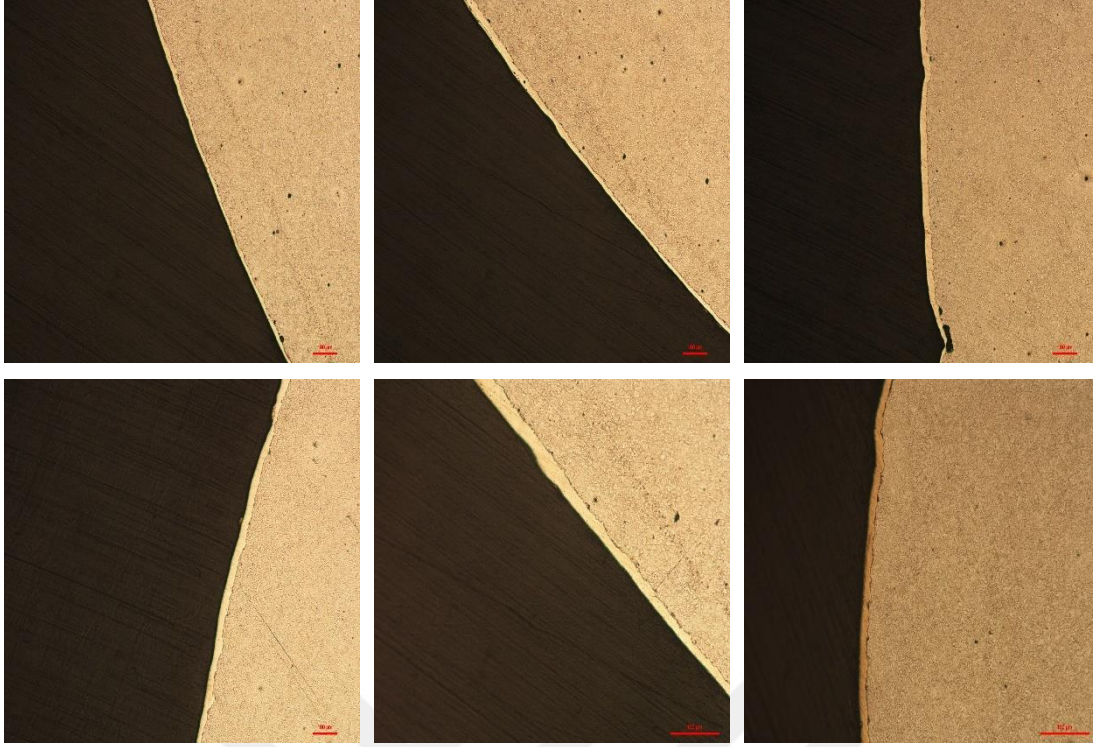
Şekil 5.5. Taber Abraser aşınma cihazı görüntüsü.

6. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

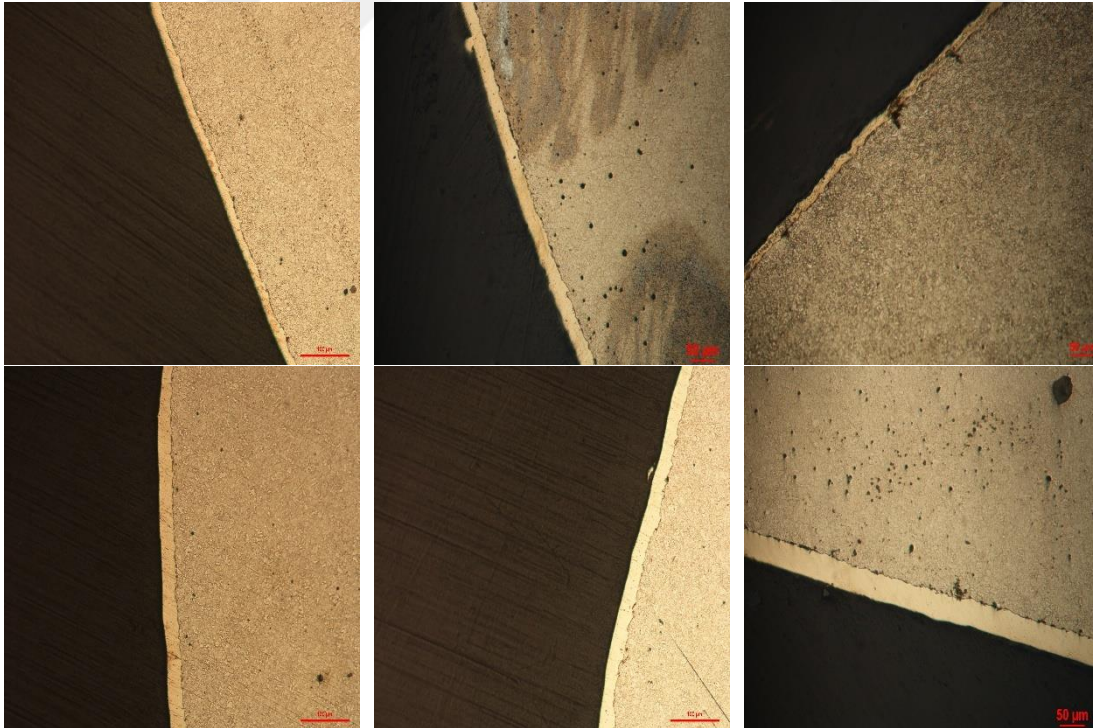
Şekil 6.1.-6.3'te 30°C, 45°C, 60°C sıcaklıkta 40 dakika süreyle ve değişik oranlarda H_3BO_3 eklenmiş Nikel sülfamat içerikli banyoda Nikel kaplanmış AISI 1020 çeliği üzerinde oluşturulan kaplamaların optik mikroyapı görüntüleri görülmektedir. Mikroyapı görüntülerinin gruplandırılmasında kaplama sıcaklığı ve süresi sabit tutularak kaplama banyosuna ilave edilen H_3BO_3 miktarına göre gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde; altlık malzemelerin mikroyapıları ile üzerlerinde oluşan kaplama görüntüleri kontrast farklılığı göstermektedir. Kaplama tabakaları açık renkli olarak, mikroyapıda belirgin bir şekilde görülmektedir. Kaplama tabakası altlık malzeme üzerinde sürekli ve homojen bir yapıdadır.



Şekil 6.1. 30°C sıcaklıkta 40 dakika süre ile kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için a) Borsuz, b) 5 gr/L H_3BO_3 , c) 10 gr/L H_3BO_3 , d) 20 gr/L H_3BO_3 , e) 40 gr/L H_3BO_3 , f) 60 gr/L H_3BO_3 , oranlarda borik asit içeren Nikel kaplamaların optik mikroyapı görüntüleri.



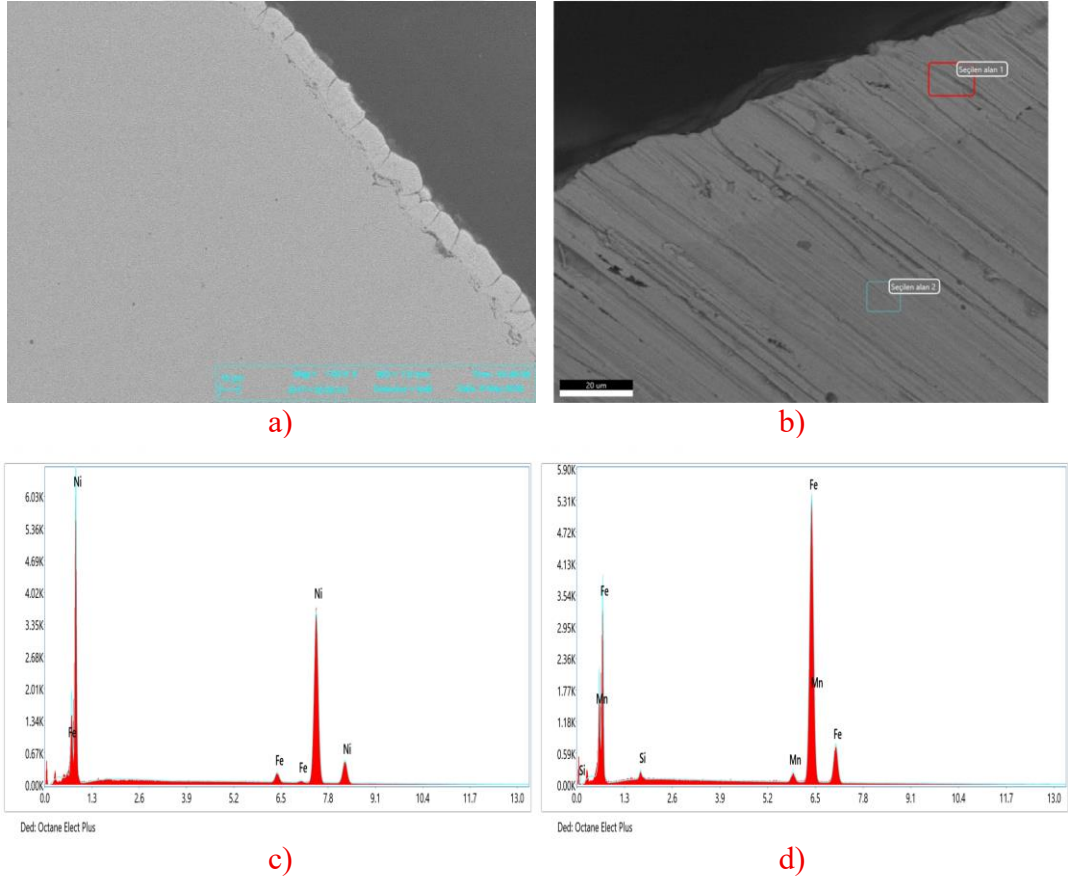
Şekil 6.2. 45°C sıcaklıkta 40 dakika süre ile kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için a) Borsuz, b) 5 gr/L H_3BO_3 , c) 10 gr/L H_3BO_3 , d) 20 gr/L H_3BO_3 , e) 40 gr/L H_3BO_3 , f) 60 gr/L H_3BO_3 , oranlarda borik asit içeren Nikel kaplamaların optik mikroyapı görüntüleri.



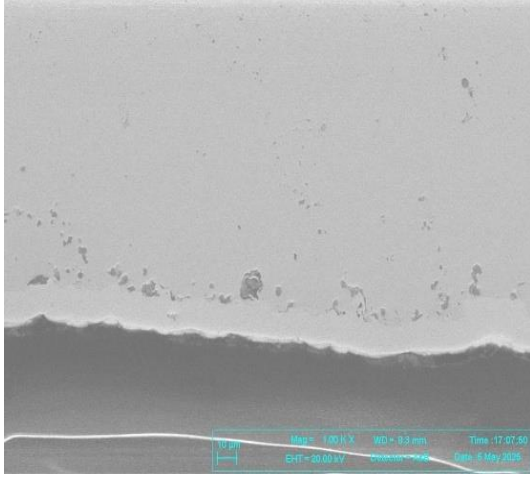
Şekil 6.3. 60°C sıcaklıkta 40 dakika süre ile kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için a) Borsuz, b) 5 gr/L H_3BO_3 , c) 10 gr/L H_3BO_3 , d) 20 gr/L H_3BO_3 , e) 40 gr/L H_3BO_3 , f) 60 gr/L H_3BO_3 , oranlarda borik asit içeren Nikel kaplamaların optik mikroyapı görüntüleri.

Bu aşamada H_3BO_3 katkısı arttıkça oluşan Nikel tabakasının kalınlığında bir artış görülmektedir. Oluşan tüm Nikel kaplama tabakaları gözeneksiz ve düz kompakt bir yapıdadır. Altlık malzeme ile çok iyi bir bütünlük sergilemekte olup, herhangi bir ayrılma, kopma ve boşluk oluşumu gibi olumsuz bir etkiye rastlanmamıştır. Tsuru ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmalarda borik asit katkısının tabaka kalınlığı ve kalıntı gerilme değerleri üzerinde etkili olduğunu belirtmektedir. Borik asit konsantrasyonunun artmasıyla kaplama yapısının daha kompakt, iç gerilimlerin azaldığı ve kalınlığın arttığını göstermiştir. Bu sonuç " H_3BO_3 katkısı arttıkça kaplama kalınlığı artmakta, düz ve gözeneksiz yapı gözlenmekte, altlıkla iyi birliktelik sağlanmakta" sonuçları ile doğrudan uyumludur. C. E. Dávalos ve arkadaşları borik asit içeren banyolarda yapmış oldukları kaplama çalışmalarında birikim miktarının uygulanan akım ile ilişkisini araştırmışlardır [8,55].

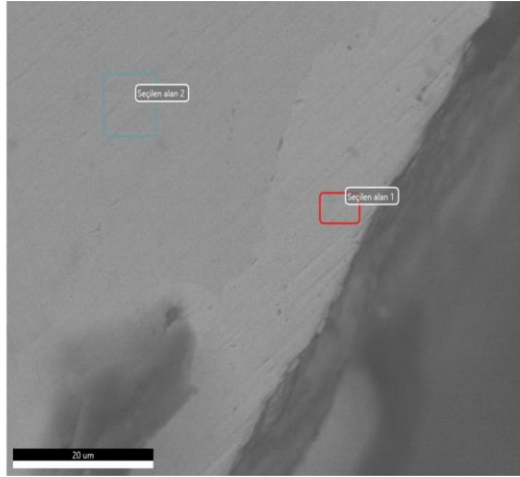
Şekil 6.4.-6.21.'de; Farklı oranlarda borik asit (H_3BO_3) ilave edilmiş AISI 1020 çelikleri üzerine $30^\circ C$, $45^\circ C$, $60^\circ C$ sıcaklıklarında uygulanan Nikel kaplamalara ait SEM görüntüleri ve bölgelere bağlı olarak EDS analizleri görülmektedir.



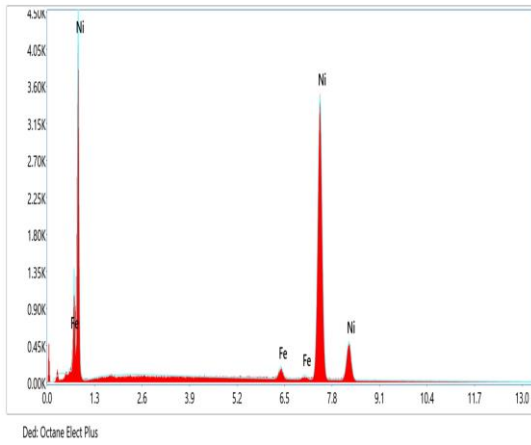
Şekil 6.4. $30^\circ C$ sıcaklıkta 40 dakika süre borsuz kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.



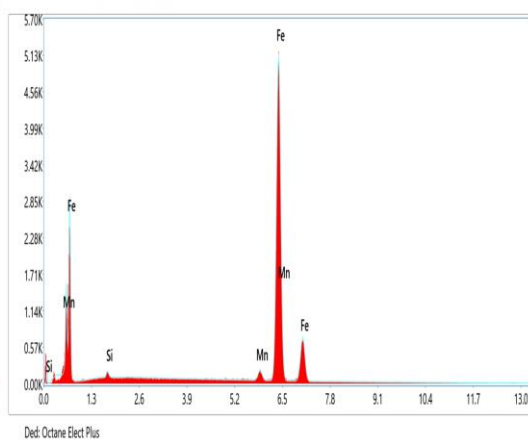
a)



b)

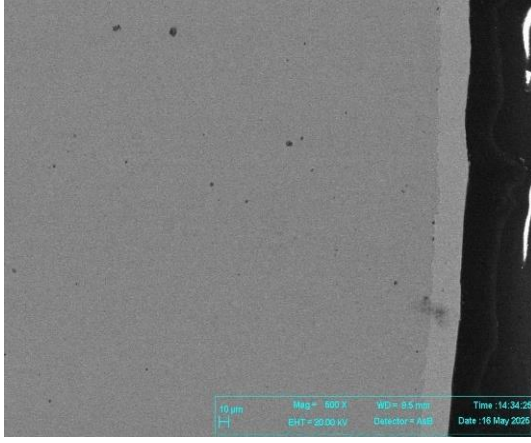


c)

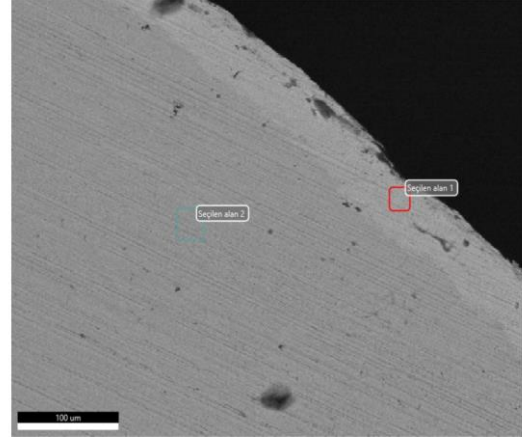


d)

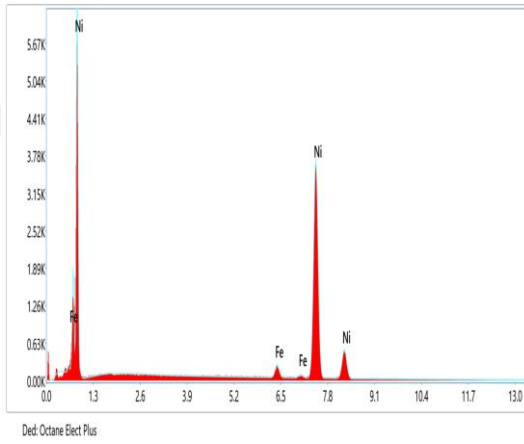
Şekil 6.5. 30°C sıcaklıkta 40 dakika süre 5 gr/L oranında borik asit ilaveli kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.



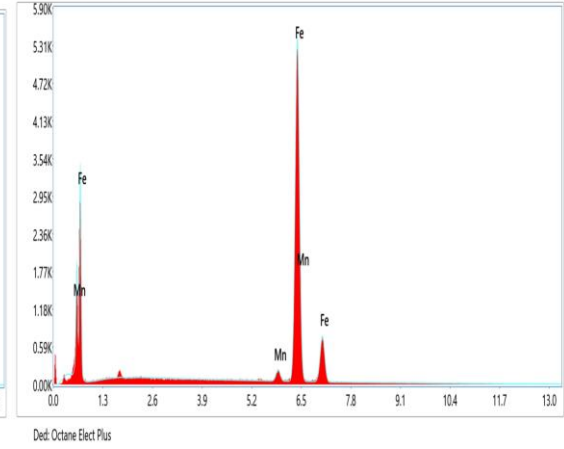
a)



b)

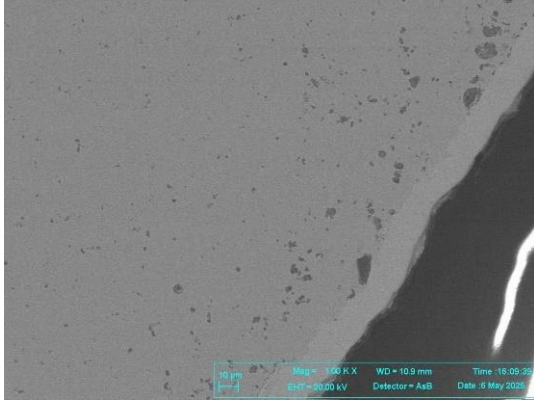


c)

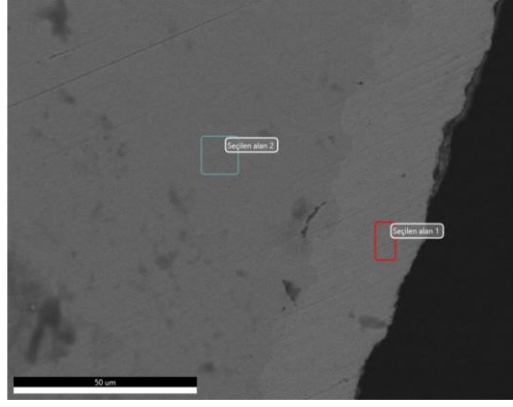


d)

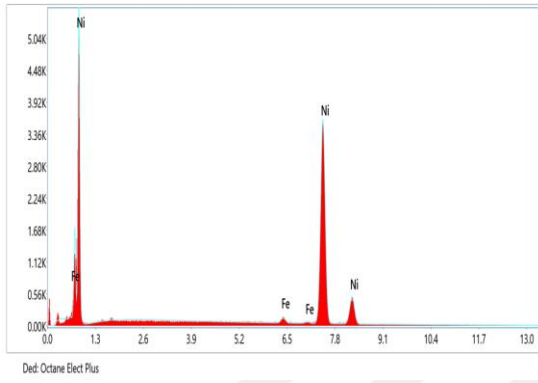
Şekil 6.6. 30°C sıcaklıkta 40 dakika süre 10 gr/L oranında borik asit ilaveli kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.



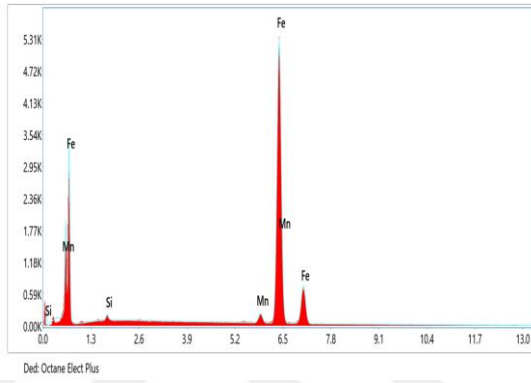
a)



b)

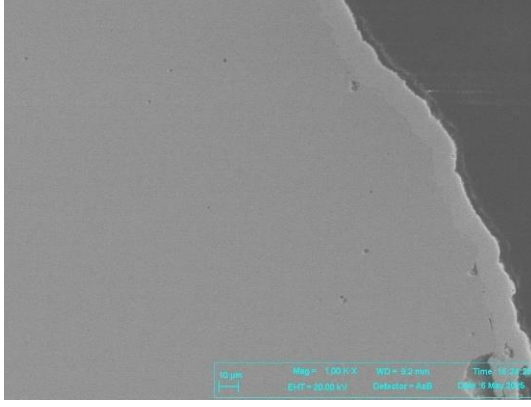


c)

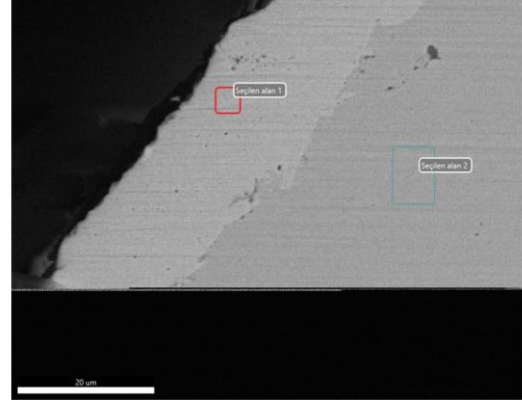


d)

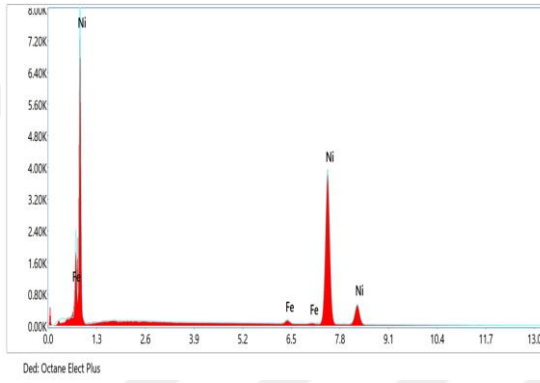
Şekil 6.7. 30°C sıcaklıkta 40 dakika süre 20 gr/L oranında borik asit ilaveli kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.



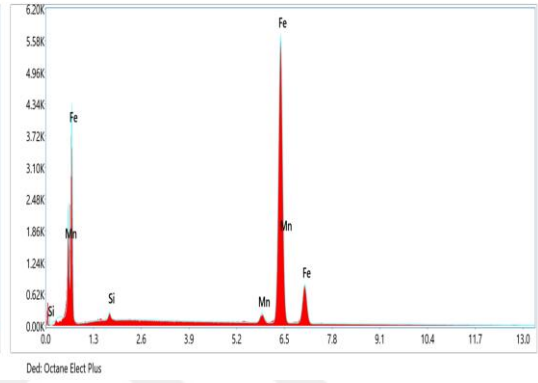
a)



b)

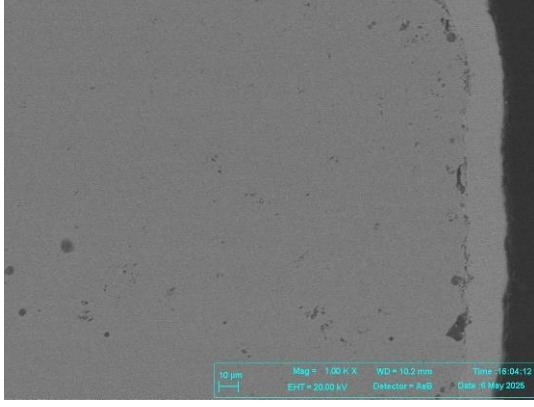


c)

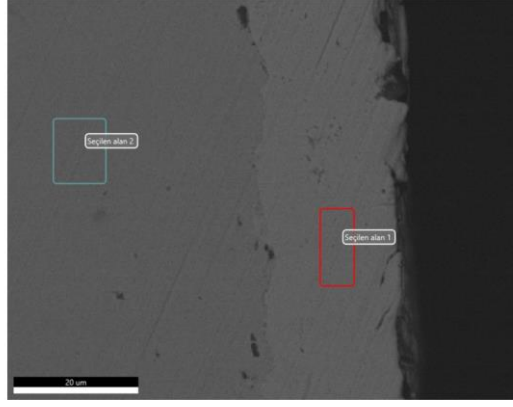


d)

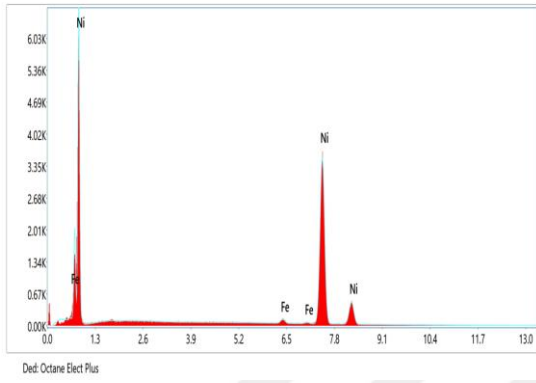
Şekil 6.8. 30°C sıcaklıkta 40 dakika süre 40 gr/L oranında borik asit ilaveli kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.



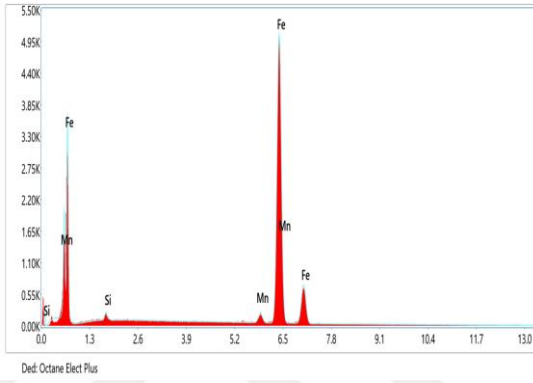
a)



b)

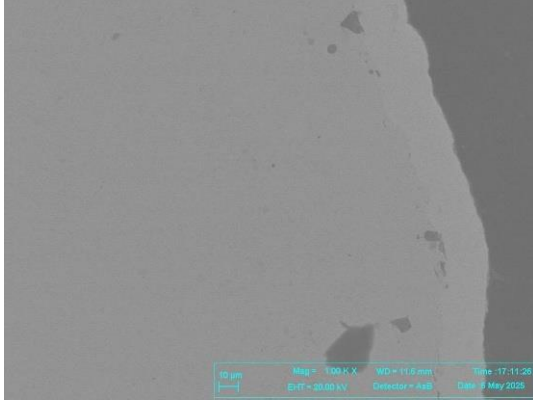


c)

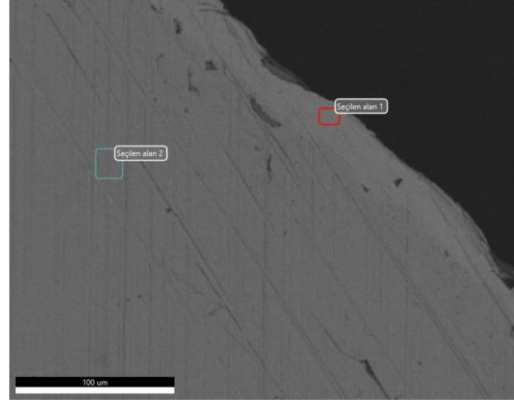


d)

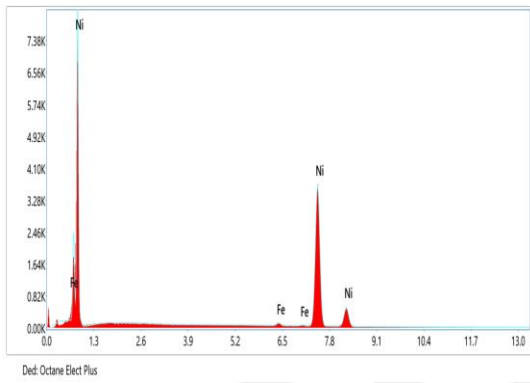
Şekil 6.9. 30°C sıcaklıkta 40 dakika süre 60 gr/L oranında borik asit ilaveli kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.



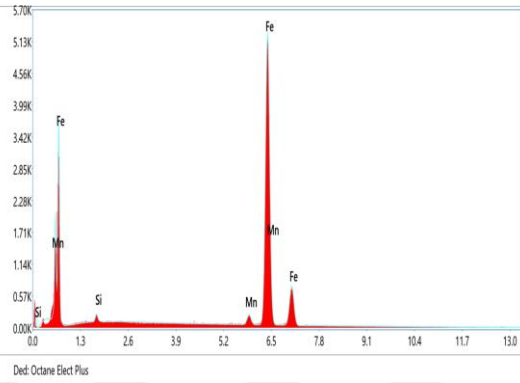
a)



b)

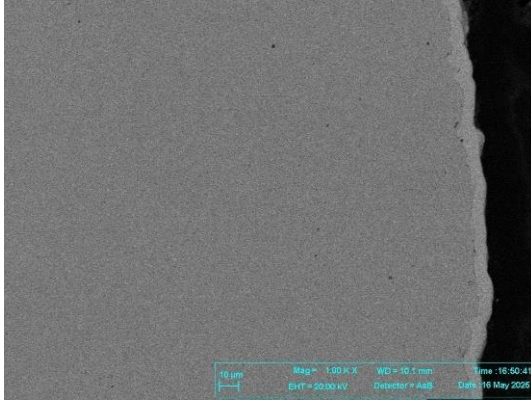


c)

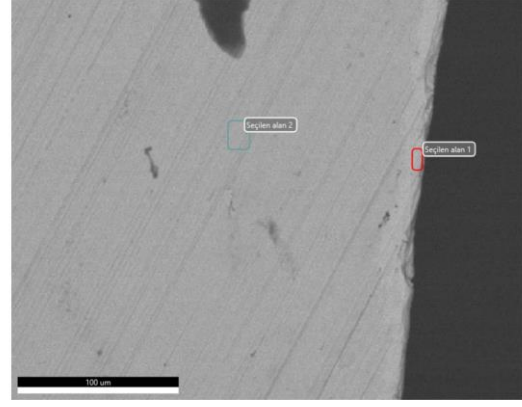


d)

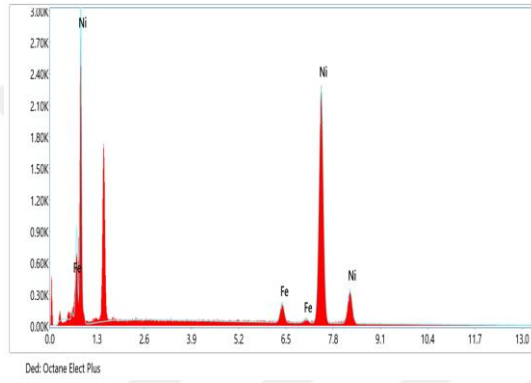
Şekil 6.11. 45°C sıcaklıkta 40 dakika süre 5 gr/L oranında borik asit ilaveli kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.



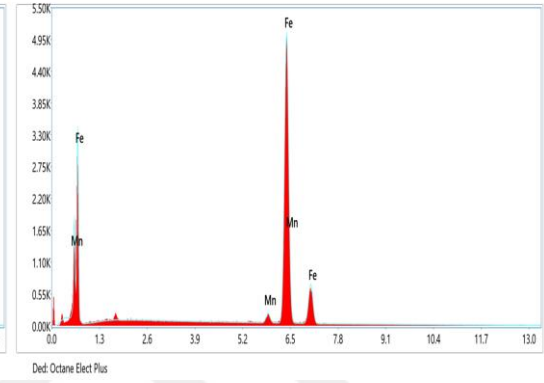
a)



b)

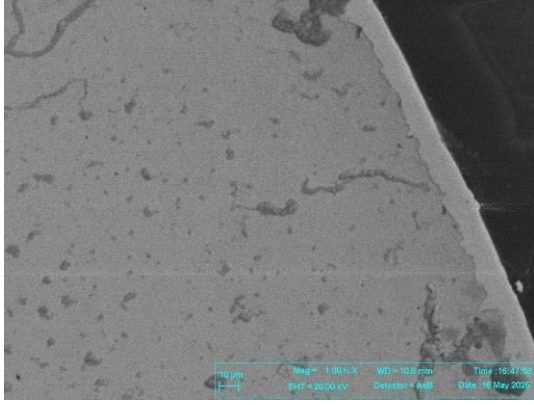


c)

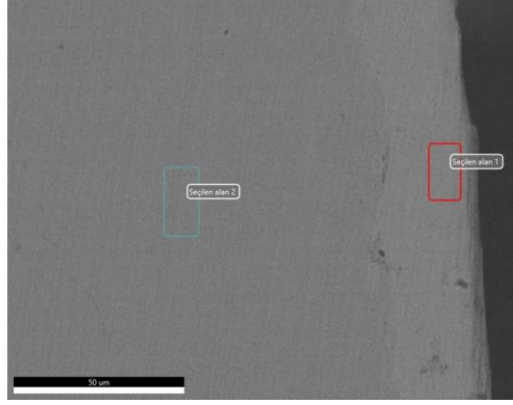


d)

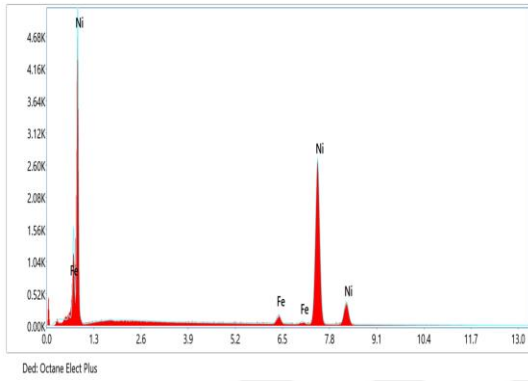
Şekil 6.12. 45°C sıcaklıkta 40 dakika süre 10 gr/L oranında borik asit ilaveli kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.



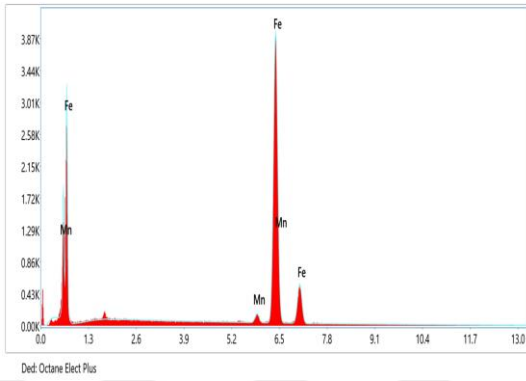
a)



b)

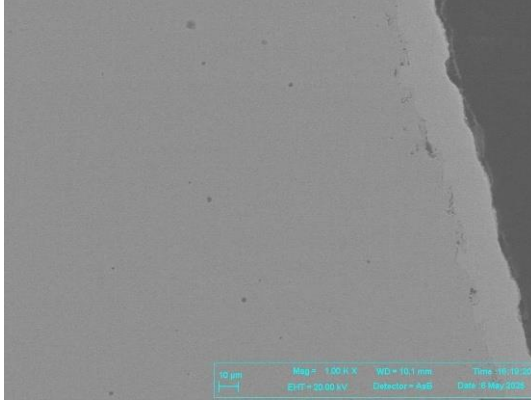


c)

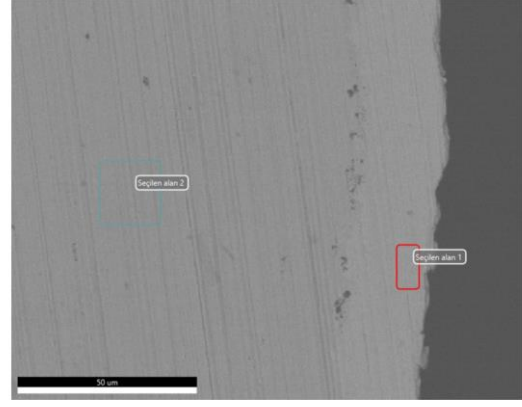


d)

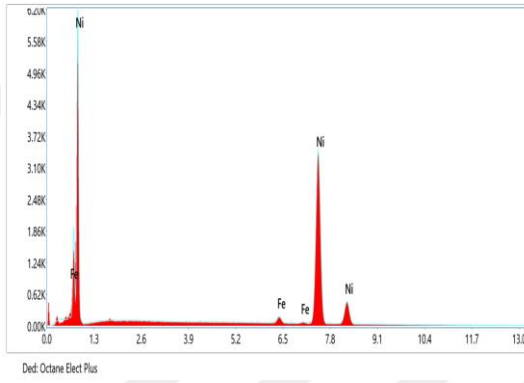
Şekil 6.13. 45°C sıcaklıkta 40 dakika süre 20 gr/L oranında borik asit ilaveli kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.



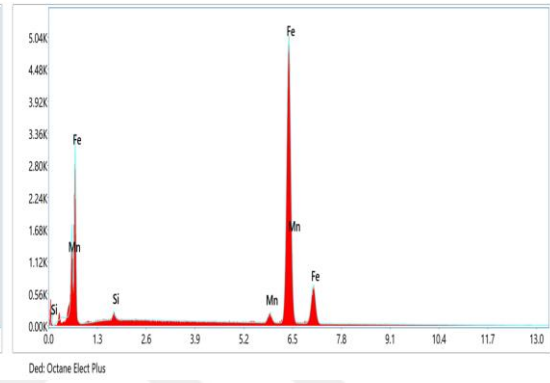
a)



b)

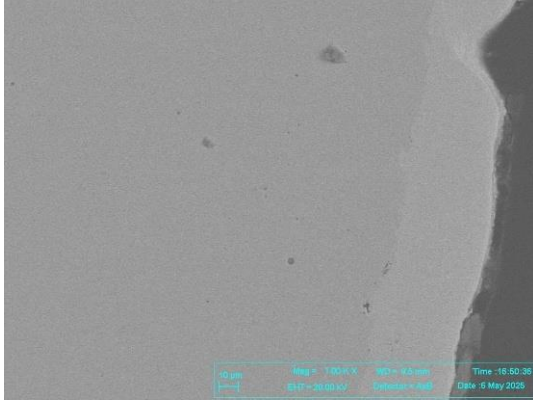


c)

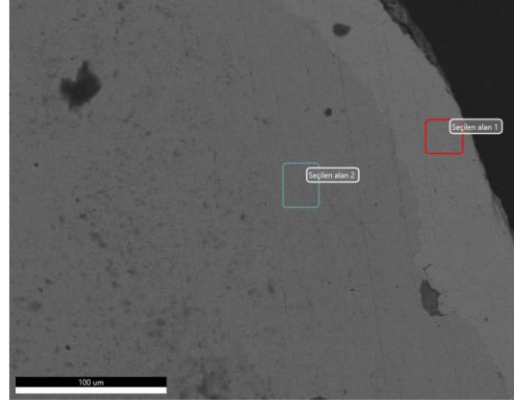


d)

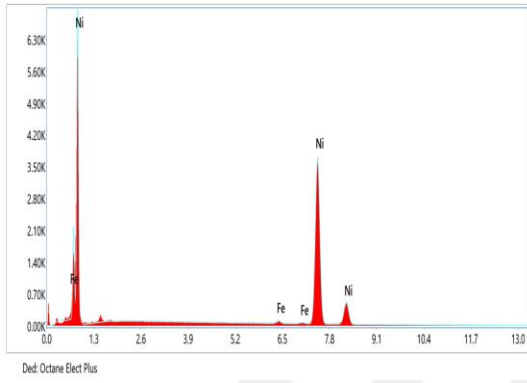
Şekil 6.14. 45°C sıcaklıkta 40 dakika süre 40 gr/L oranında borik asit ilaveli kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.



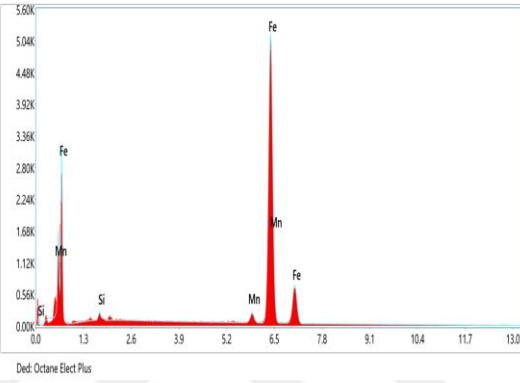
a)



b)

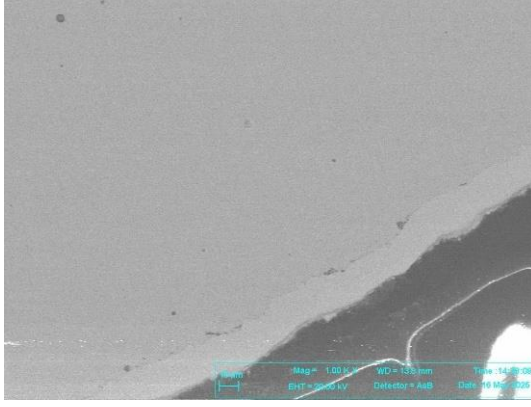


c)

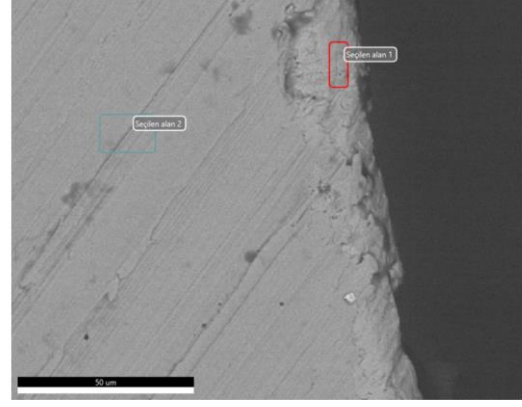


d)

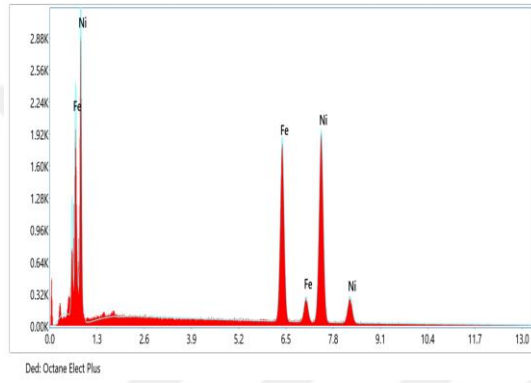
Şekil 6.15. 45°C sıcaklıkta 40 dakika süre 60 gr/L oranında borik asit ilaveli kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.



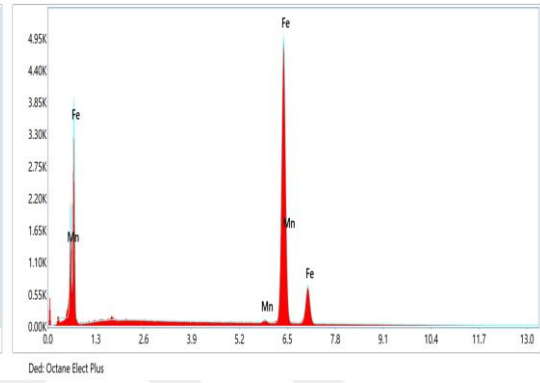
a)



b)

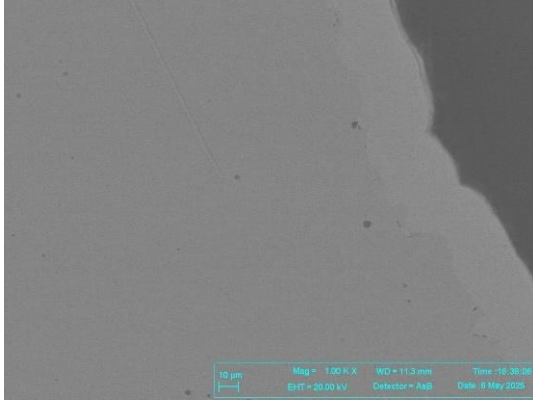


c)

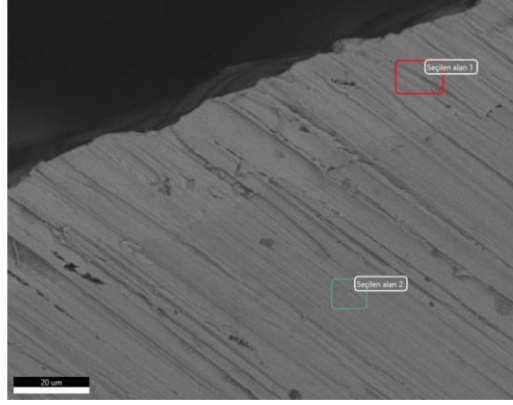


d)

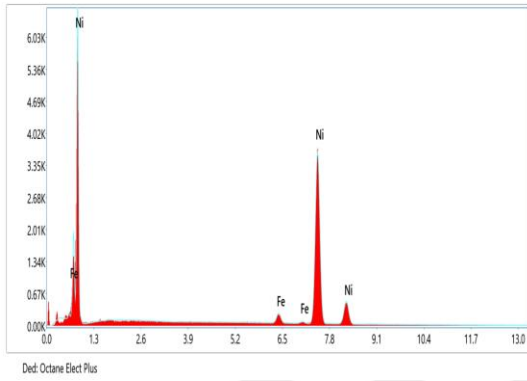
Şekil 6.16. 60°C sıcaklıkta 40 dakika süre borsuz kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.



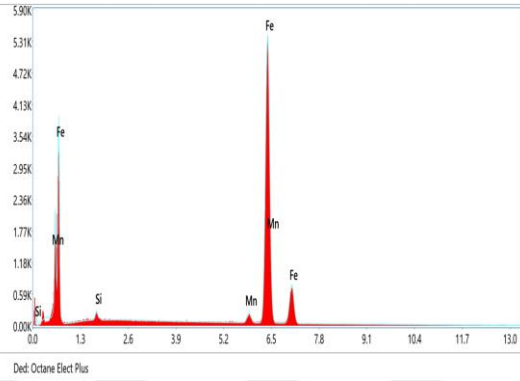
a)



b)

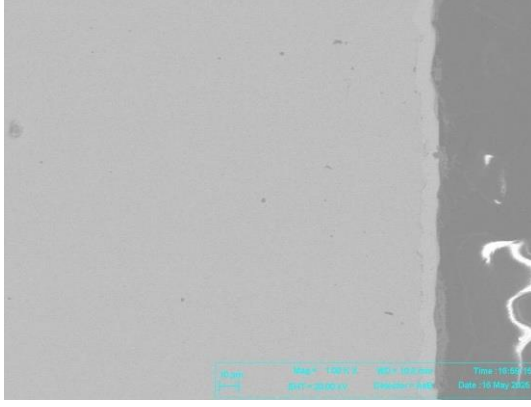


c)

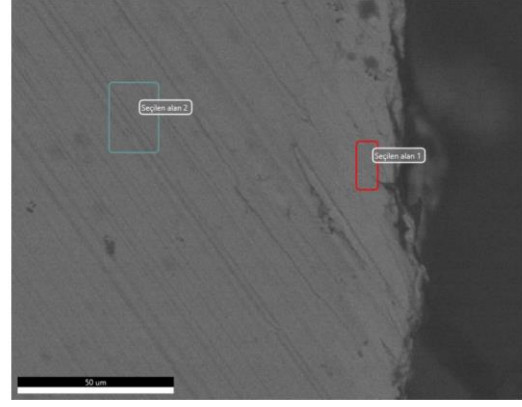


d)

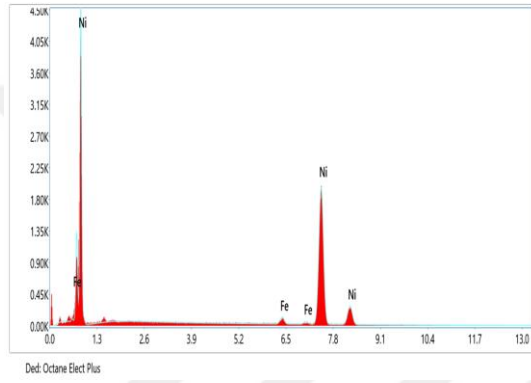
Şekil 6.17. 60°C sıcaklıkta 40 dakika süre 5 gr/L oranında borik asit ilaveli kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.



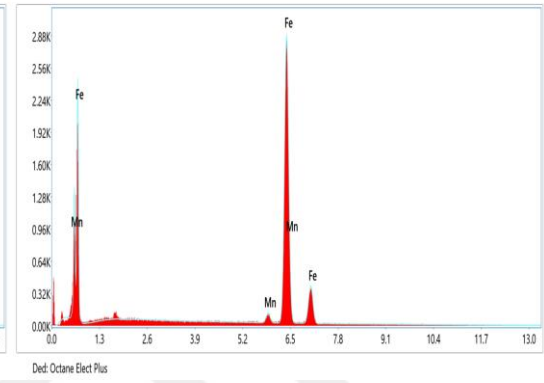
a)



b)

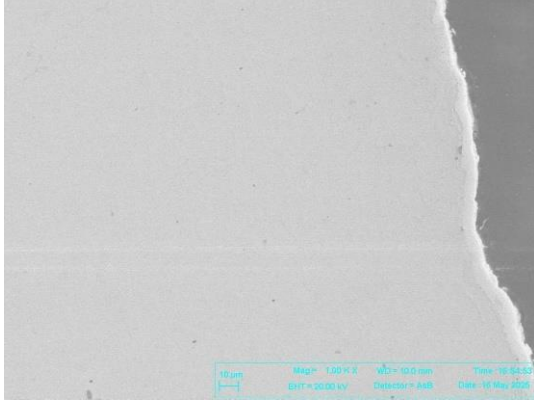


c)

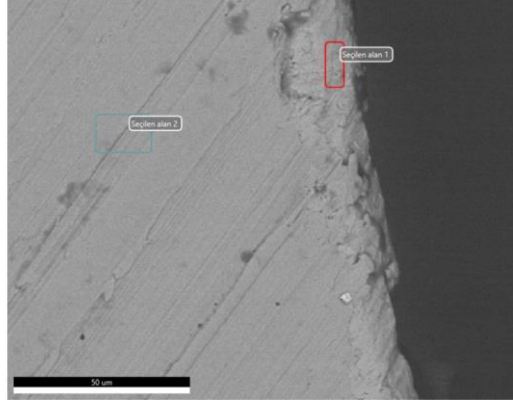


d)

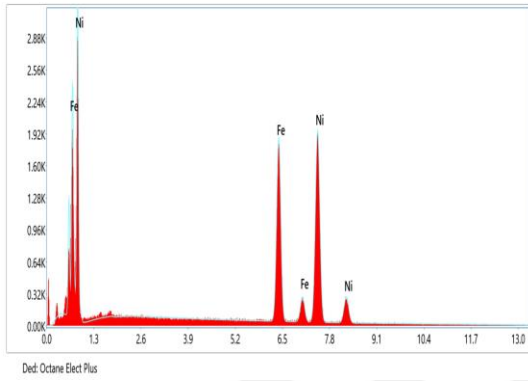
Şekil 6.18. 60°C sıcaklıkta 40 dakika süre 10 gr/L oranında borik asit ilaveli kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.



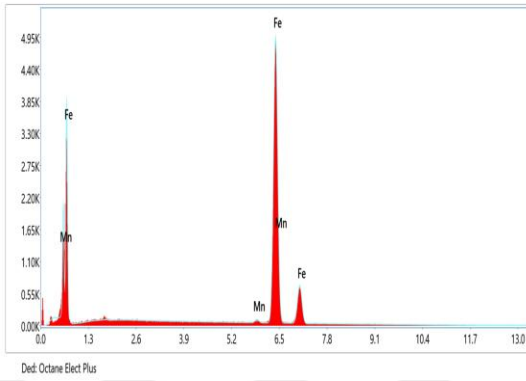
a)



b)

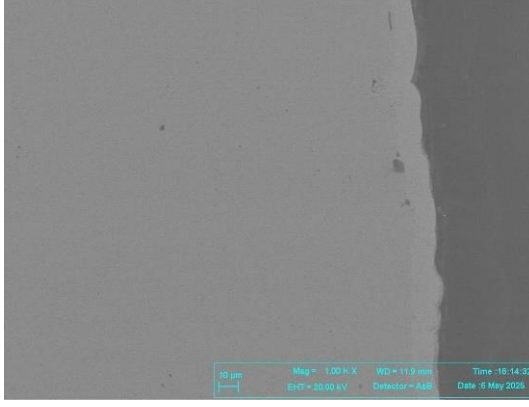


c)

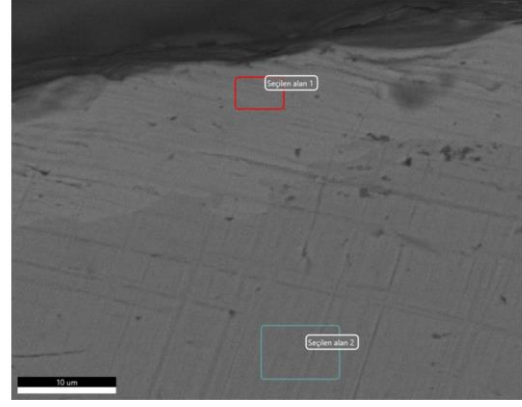


d)

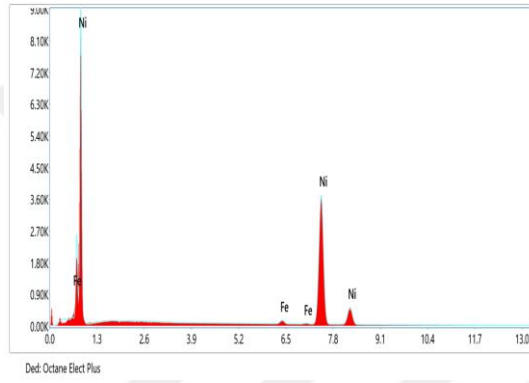
Şekil 6.19. 60°C sıcaklıkta 40 dakika süre 20 gr/L oranında borik asit ilaveli kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.



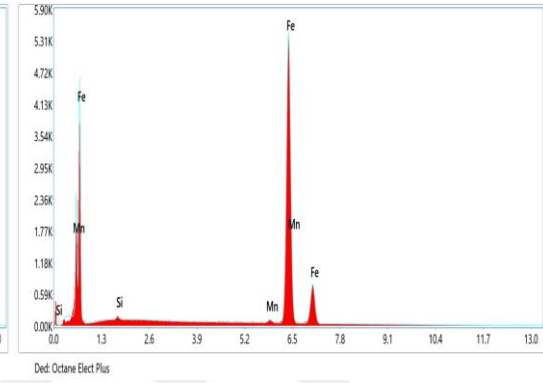
a)



b)

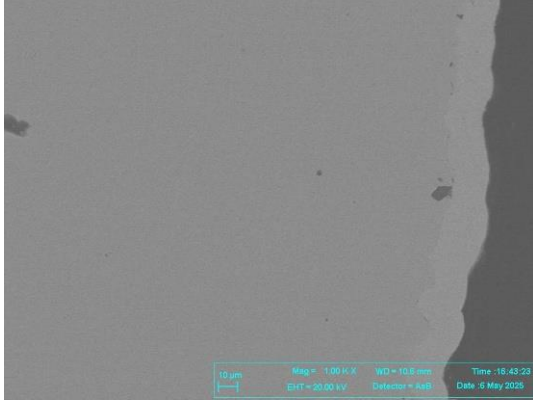


c)

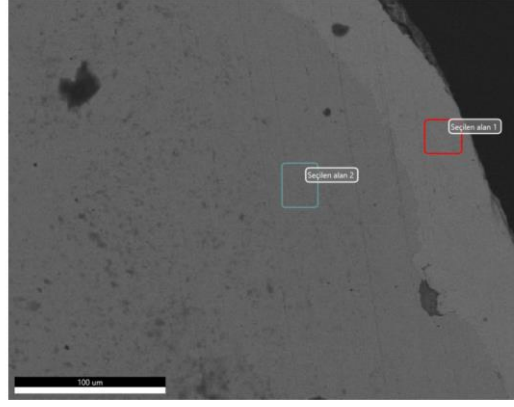


d)

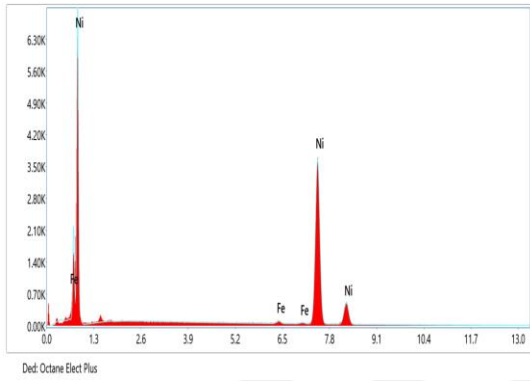
Şekil 6.20. 60°C sıcaklıkta 40 dakika süre 40 gr/L oranında borik asit ilaveli kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.



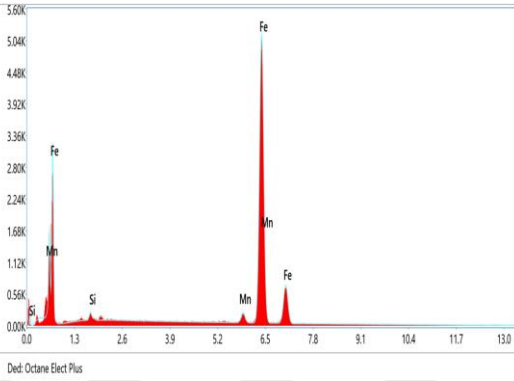
a)



b)



c)



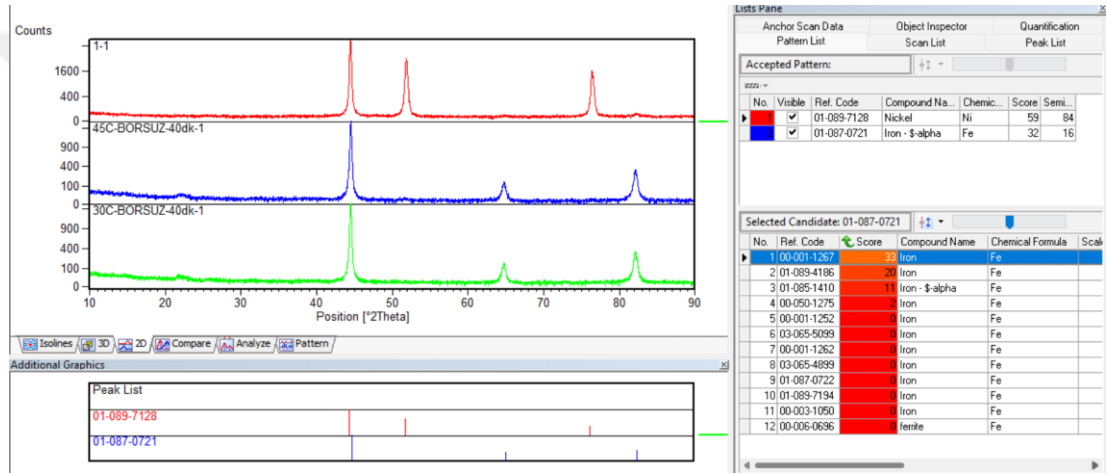
d)

Şekil 6.21. 60°C sıcaklıkta 40 dakika süre 60 gr/L oranında borik asit ilaveli kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliği için (a ve b) SEM mikroyapı görüntüleri, (c ve d) sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.

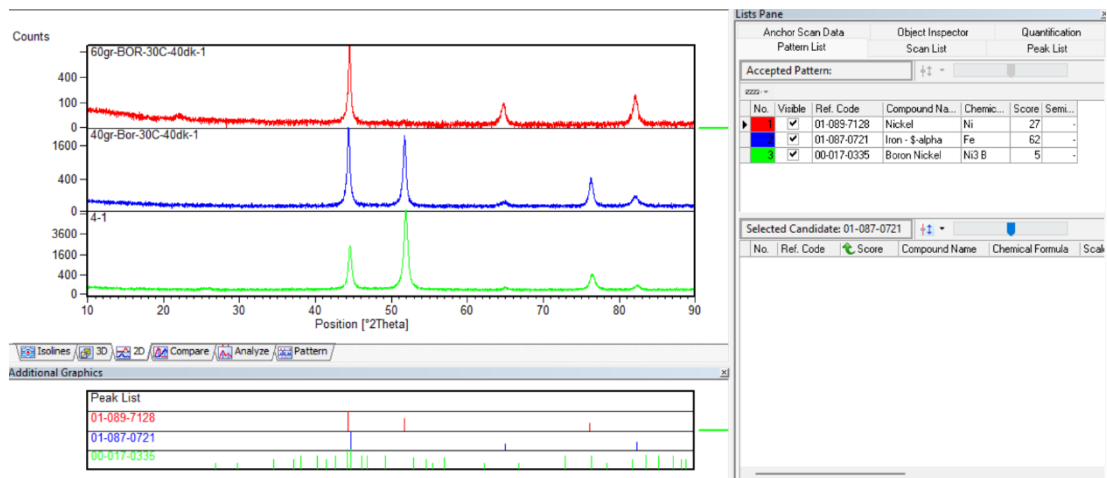
Nikel sülfamat içerikli Nikel kaplama banyolarında çeşitli oranlarda borik asit ilavesi ile elde edilen Nikel kaplamaların Taramalı Elektron Mikroskopu incelemelerinde kaplama tabakası ile matris arasında mikro porozitelerin oluştuğu ve yine zaman zaman kaplama tabakasının içerisinde, çok az da olsa kısmi mikro porozitelerin varlığı söz konusudur. Borik asit içeriğinin artışıyla kaplama tabakalarının artış gösterdiği gözlemlenmiştir. EDS analizleri kaplama tabakalarının Ni elementi içerdiğini açık bir şekilde göstermektedir. Takeoka ve arkadaşları [56] borik asit içermeyen sistemlerde gözenekli yapı oluşumunun yaygın olduğunu ve kaplamaların düzensiz yüzey morfolojisine sahip olduğunu belirtmiştir. Dávalos ve arkadaşları [8] kaplanmada oluşan gözenekli yapılar hakkında teferruatlı çalışmalar sunmuşlardır. Literatürde bildirilen SEM ve AFM/EDS analizleri, borik asit içermeyen sülfamat banyolarından elde edilen Nikel kaplamaların, genellikle hidrojen gazı çıkışı ve Ni(OH)_2 oluşumu

nedeniyle yerel gözeneklilik ve düzensiz yüzey morfolojisi sergilediğini göstermektedir. Buna karşılık, borik asit ilavesiyle elde edilen kaplamalar kompakt, gözeneksiz ve düzgün bir mikroyapı göstermektedir. Bu çalışmada SEM ve EDS ile gerçekleştirilen yüzey morfolojisi incelemelerinde, borik asit miktarının artışına paralel olarak kaplamalarda daha homojen, çatlak içermeyen ve kompakt yapılar gözlemlenmiştir. Borsuz ve düşük borik asit oranlarında yüzeylerde düzensiz dağılımlı gözenekler ve zayıf yapışma eğilimleri gözlenmiş bor miktarı arttıkça düzgün kristal yapılar oluşmuş, kaplama kalitesi üst seviyelere ulaştığı görsellerde gösterilmiştir (Şekil 6.4-6.21).

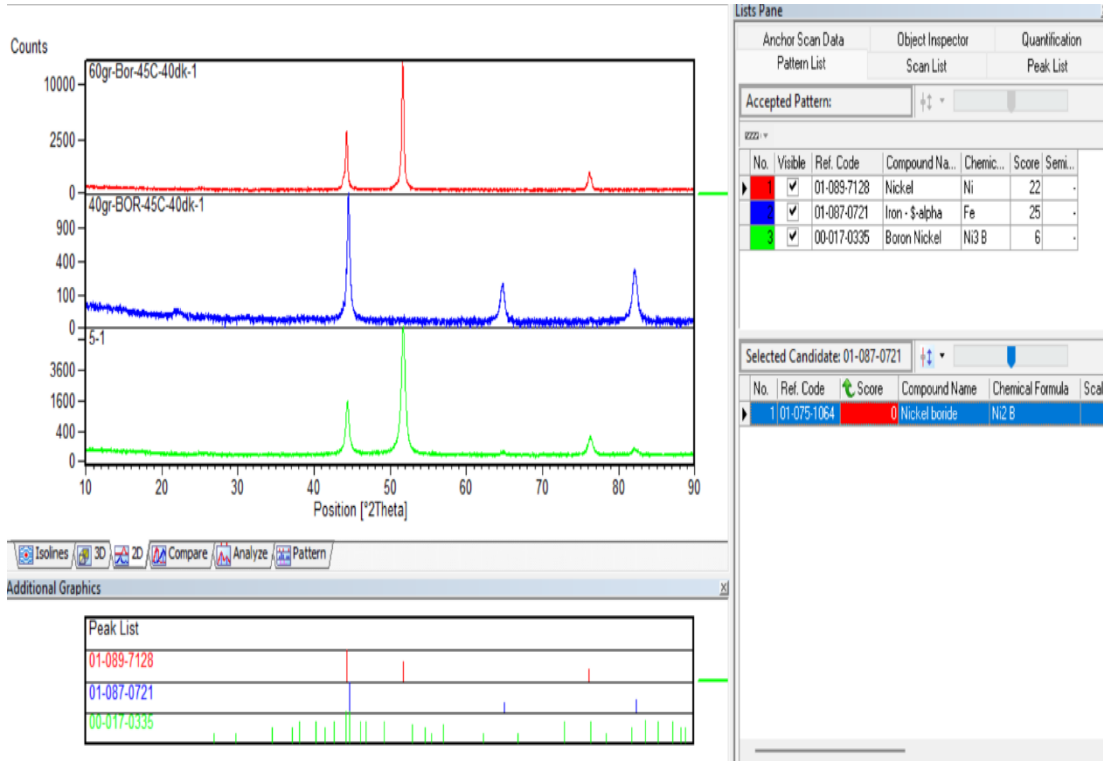
Nikel kaplama yapılan numunelere ait XRD analizleri Şekil 6.22-6.25'te verilmiştir.



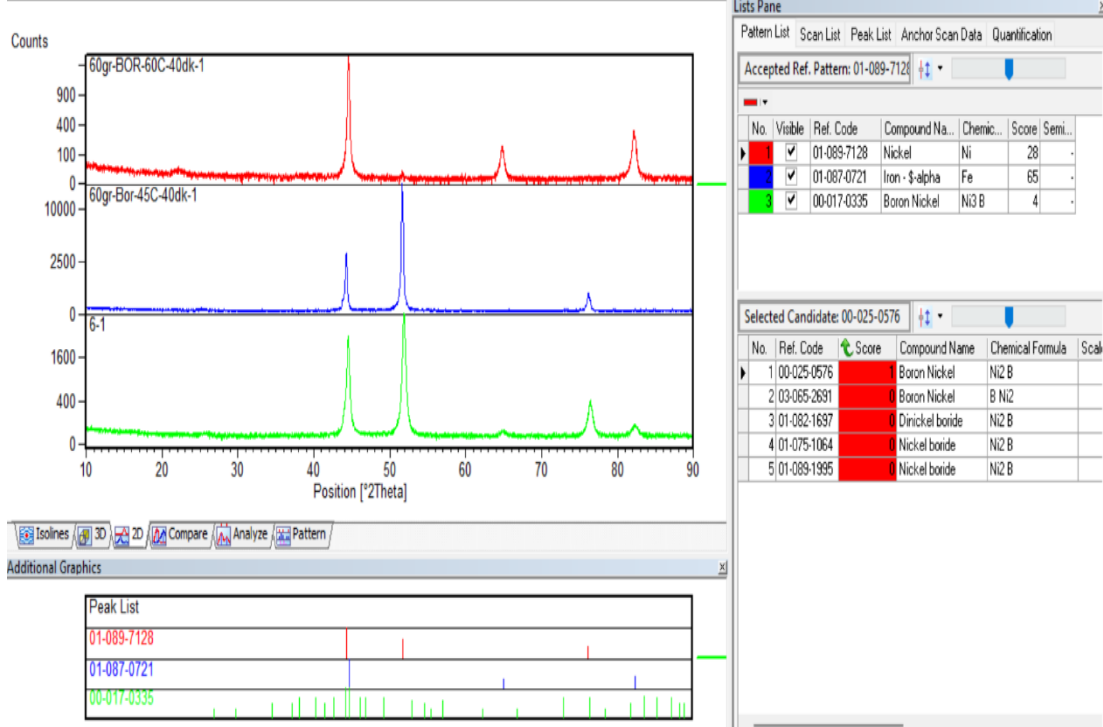
Şekil 6.22. H_3BO_3 katkısız Nikel sülfamat banyosunda sırasıyla 60°C, 45°C ve 30°C sıcaklıklarda 40 dk süre ile Nikel kaplanmış AISI 1020 çeliklerinin XRD analizleri.



Şekil 6.23. 30°C sıcaklıkta sırasıyla 60 gr/L, 40 gr/L ve 20 gr/L H_3BO_3 ilave edilen Nikel sülfamat banyosunda sırasıyla sıcaklıklarda 40 dk süre ile Nikel kaplanmış AISI 1020 çeliklerinin XRD analizleri.



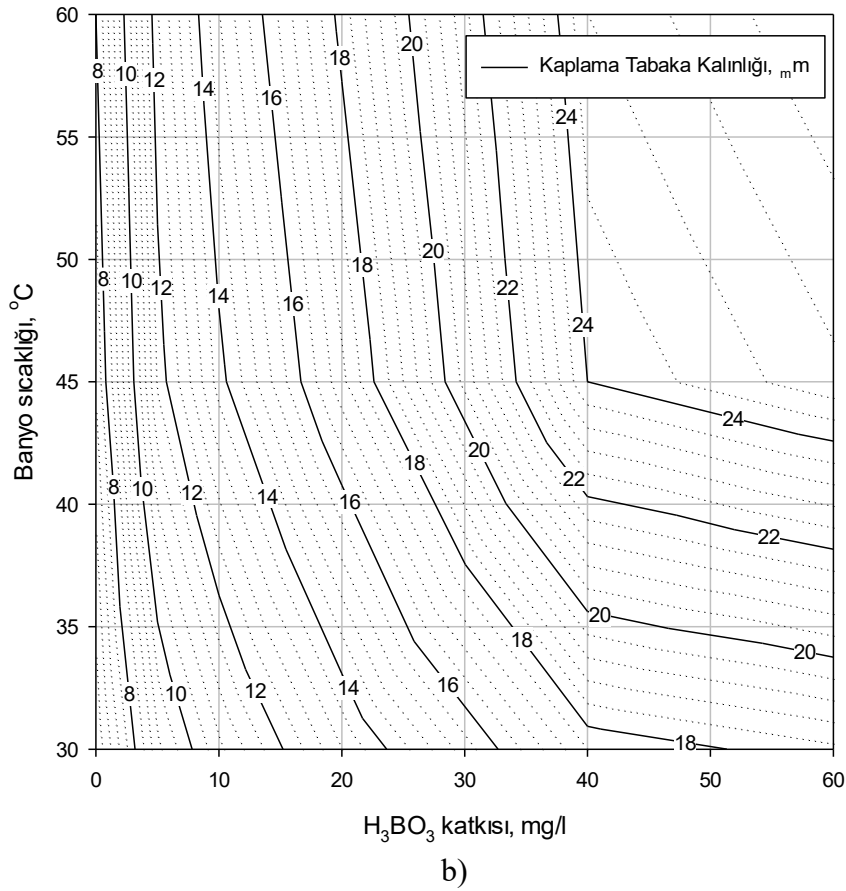
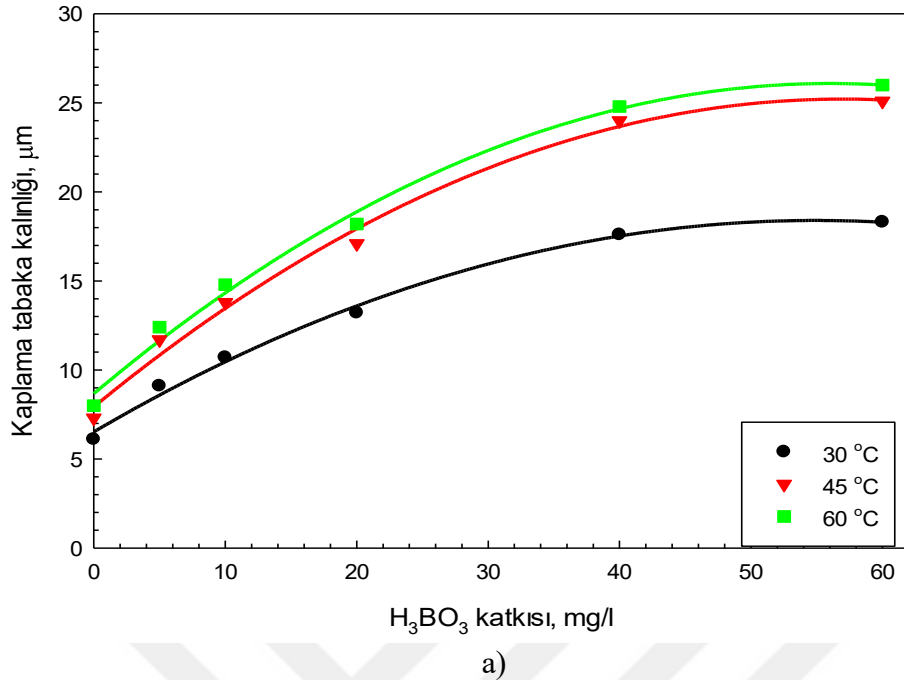
Şekil 6.24. 45°C sıcaklıkta sırasıyla 60 gr/L, 40 gr/L ve 20 gr/L H₃BO₃ ilave edilen Nikel sülfamat banyosunda sırasıyla sıcaklıklarda 40 dk süre ile Nikel kaplanmış AISI 1020 çeliklerinin XRD analizleri.



Şekil 6.25. 60°C sıcaklıkta sırasıyla 60 gr/L, 40 gr/L ve 20 gr/L H₃BO₃ ilave edilen Nikel sülfamat banyosunda sırasıyla sıcaklıklarda 40 dk süre ile Nikel kaplanmış AISI 1020 çeliklerinin XRD analizleri.

Şekil 6.22-6.25'te verilen XRD sonuçlarına göre kaplama tabakası Nikel sülfamat çözeltilerinden elde edilmesi durumunda Nikel ve borik asit ilavesiyle Nikel ve Ni_3B fazlarını içermektedir. Tambe ve arkadaşları yapmış oldukları Nikel sülfamat çözeltilisine borik asit ilavesinde Nikel fazını tespit etmişlerdir [14]. Ancak bu çalışmada Nikel haricinde Ni_3B fazının da varlığı tespit edilmiştir. Bu da sertlikteki artışı açıklamak için gerekli olabilecek bir sebep olarak karşımıza çıkmaktadır. Yine EDS analizlerinde kalitatif olarak bor elementinin piki görülmektedir. Bu durum kaplama tabakası içerisinde bor elementinin varlığı açısından yine belirleyici bir delil niteliğindedir.

30°C, 45°C ve 60°C sıcaklıkta, 45 dakika süreyle, 0-60 gr/L aralığında H_3BO_3 içeren kaplama banyolarında Nikel kaplama işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliğinin yüzeyinde oluşan kaplama tabakalarının tabaka kalınlıklarının ve kaplama sertliklerinin sıcaklığa ve H_3BO_3 oranına bağlı olarak değişimi Şekil 6.26.-6.27'de verilmektedir. Bu çalışmada incelendiği üzere, borik asit oranının arttırılmasıyla kaplama banyo sıcaklıklarına da bağlı olarak oluşan kaplamaların kalınlıkları 6,1 μm değerinden ile 26 μm değerine, kaplamanın sertlik değerleri ise 176 $\text{HV}_{0.1}$ değerinden 357 $\text{HV}_{0.1}$ sertliğine kadar artırarak daha dayanıklı yüzeyler oluşturduğu sonucuna ulaşılmıştır.

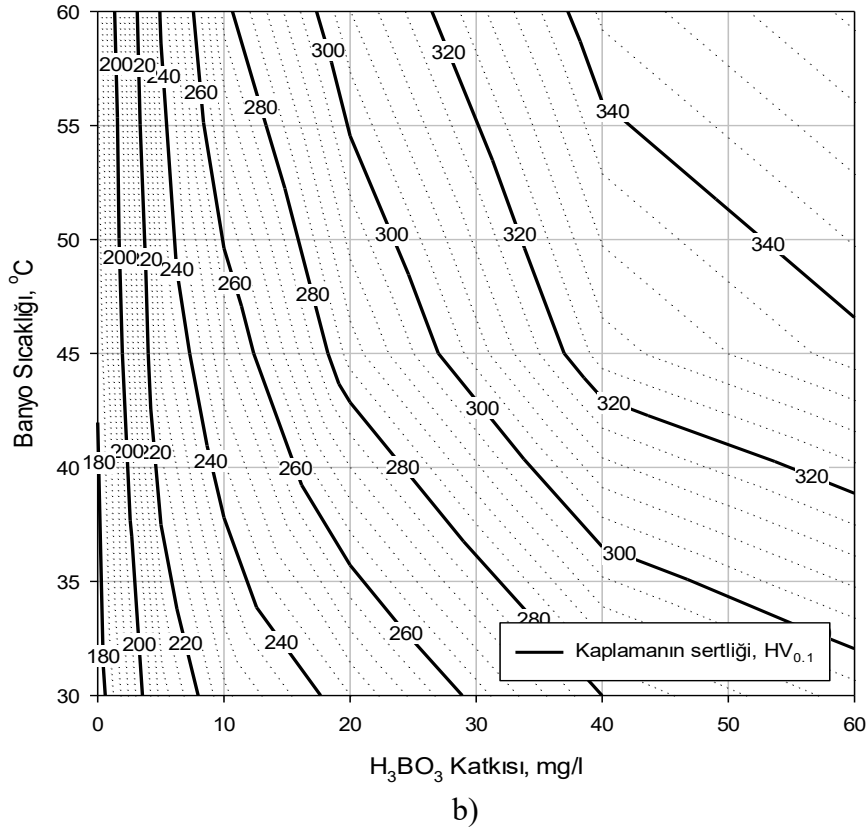
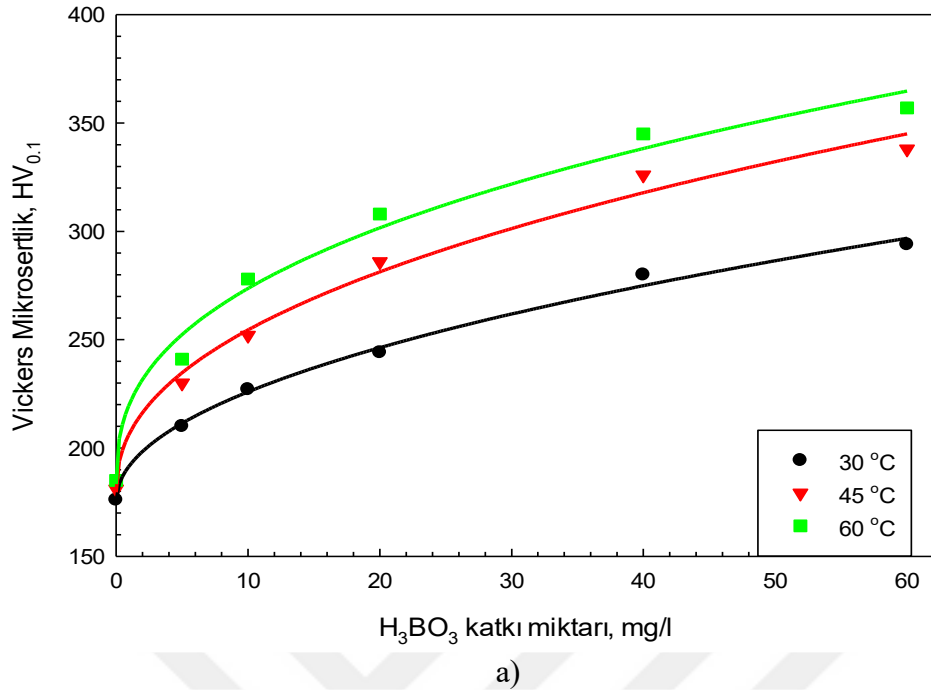


Şekil 6.26. a) Farklı sıcaklıklarda borsuz ve 5-60 gr/L arasında H_3BO_3 ilave edilerek Nikel kaplanmış AISI 1020 çeliğinin üzerinde oluşan kaplama tabakalarının kalınlıklarının H_3BO_3 oranına bağlı olarak değişimi, b) Kaplama tabaka kalınlıklarının değişiminin iso-diyagramı.

Şekil 6.26'den de görüldüğü üzere Nikel sülfamat esaslı nikel kaplama banyosuna 60 g/L değerlerine kadar borik asit ilavesi sırasıyla 30 °C, 45 °C ve 60 °C sıcaklıklar için katkısız kaplama banyolarına göre tabaka kalınlıklarında %200, %243,8 ve %225 oranlarında artış göstermiştir.

Yine ortalama tabaka kalınlıklarının banyo sıcaklığının 30°C'ye göre %50 ve %100 artmasıyla, tabaka kalınlıklarındaki artış değeri sırasıyla %32 ve %38,9 oranlarında artış göstermiştir. Buradan da anlaşılabacağı üzere banyo sıcaklığı ve H_3BO_3 oranlarındaki artış, kaplama tabaka kalınlığının artışına sebep olmuştur. Salman ve arkadaşları yaptıkları çalışmada düşük karbonlu çelik üzerine yapılan Nikel kaplamanın kalınlık ve yüzey sertliği üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sıcaklık arttıkça hem sertlik hem tabaka kalınlığı artışını açıklamışlardır [57].

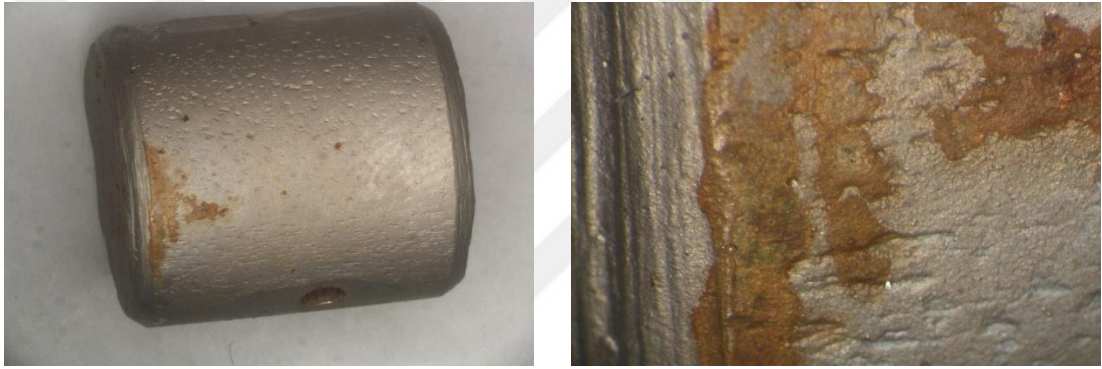
Karabulut ve arkadaşları da AISI 1020 çeliği üzerindeki Ni-B kaplamalarında borik asit içeriğinin etkisini incelemiştir. Yaptıkları incelemelerde H_3BO_3 konsantrasyonu arttıkça kaplama sertliğinin ve yapısal bütünlüğün iyileştiğini belirtmişlerdir [58]. Prince ve arkadaşlarında AISI 1020 çeliğe uygulanmış nikel elektro kaplamalarının mikrosertliği, kaplama kalınlığı ve enerji yoğunluğu ilişkisi X-ışını / mikrosertlik ölçümleri ile değerlendirilmiştir [59].



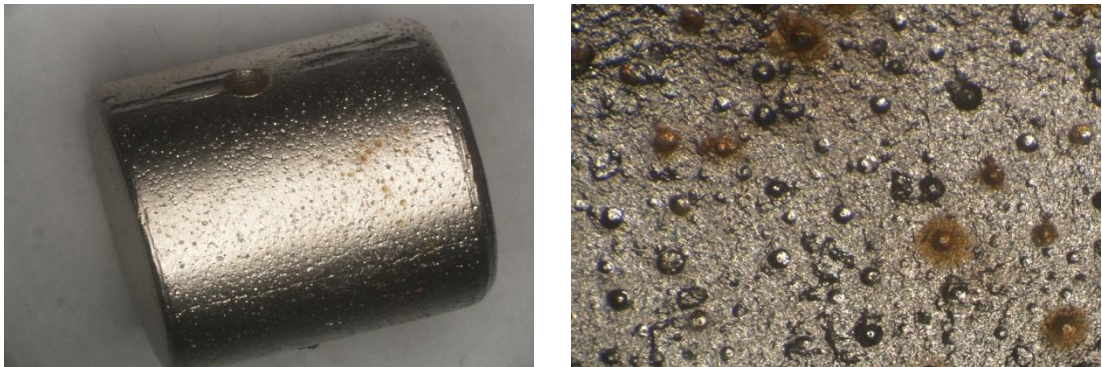
Şekil 6.27. a) Farklı sıcaklıklarda borsuz ve 5-60 gr/L arasında H_3BO_3 ilave edilerek Nikel sülfamat kaplanmış AISI 1020 çeliğinin üzerinde oluşan kaplama sertliklerinin H_3BO_3 oranına bağlı olarak değişimi, b) Kaplama tabaka sertliğinin değişiminin iso-diyagramı.

Şekil 6.27’den de görüldüğü üzere Nikel sülfamat esaslı nikel kaplama banyosuna 60 g/L değerlerine kadar borik asit ilavesi sırasıyla 30 °C, 45 °C ve 60 °C sıcaklıklar için katkısız oranla kaplama sertliklerinde %67, %86,7 ve %93 oranlarında artış göstermiştir. Yine ortalama kaplama sertliklerinin banyo sıcaklığının 30°C’ye göre %50 ve %100 artmasıyla, sırasıyla tabaka kalınlıklarındaki artış değeri %12,7 ve %19,8 oranlarında artış göstermiştir. Buradan da anlaşılabileceği üzere banyo sıcaklığı ve H_3BO_3 oranlarındaki artış, kaplama tabaka sertliklerinin de artışına sebep olmuştur.

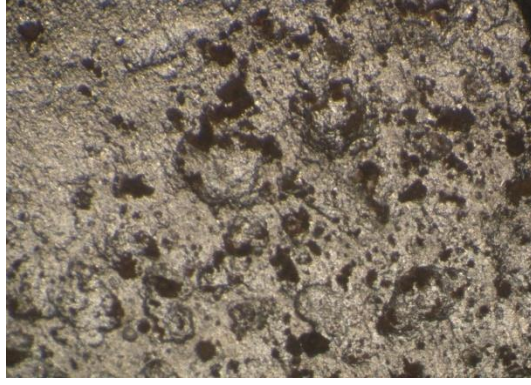
35 °C sıcaklıkta %5 NaCl (sodyum klorür) çözeltisi ile numunelerin her yerine eşit şekilde etkileyecek şekilde tuz test kabinine eğimli bir yapıda konumlandırarak yapılan 72 saatlik tuz korozyon deneyi sonucunda oluşan korozyon görüntüleri Şekil 6.28-6.34’te SEM görüntüleri ve EDS analizleri ise Şekil 6.35-36’te verilmektedir.



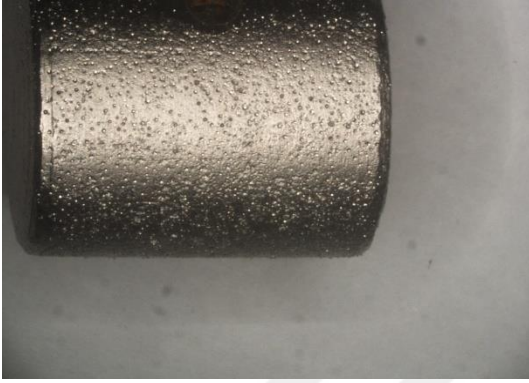
Şekil 6.28. Borik asitsiz, 45°C sıcaklıkta yapılan Nikel kaplamanın tuz korozyon testi sonuçları.



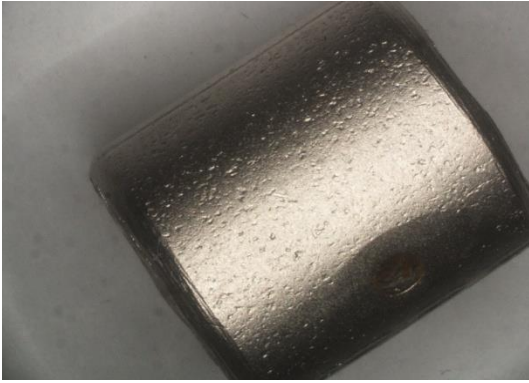
Şekil 6.29. 5 gr/L oranında borik asit ilaveli, 45°C sıcaklıkta yapılan Nikel kaplamanın tuz korozyon testi sonuçları.



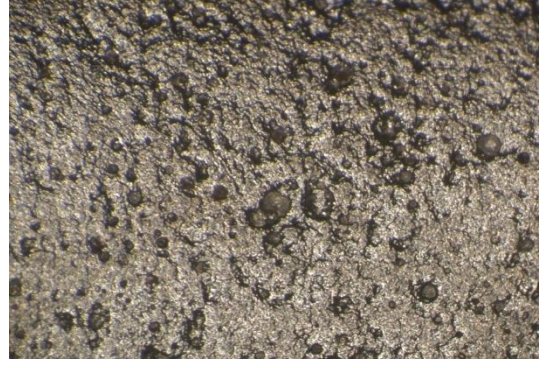
Şekil 6.30. 10 gr/L oranında borik asit ilaveli, 45°C sıcaklıkta yapılan Nikel kaplamanın tuz korozyon testi sonuçları.



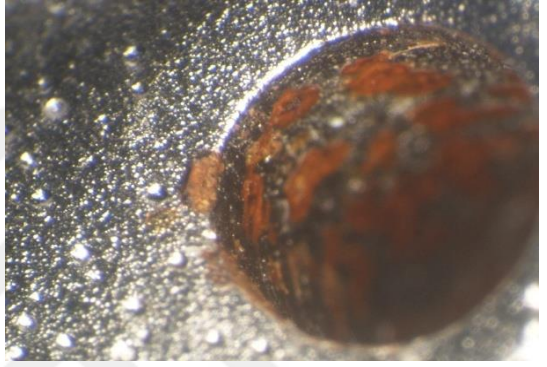
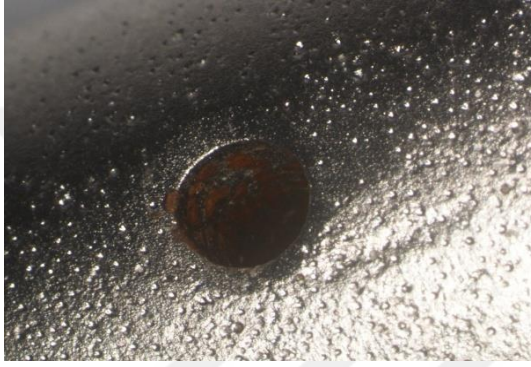
Şekil 6.31. 20 gr/L oranında borik asit ilaveli, 45°C sıcaklıkta yapılan Nikel kaplamanın tuz korozyon testi sonuçları.



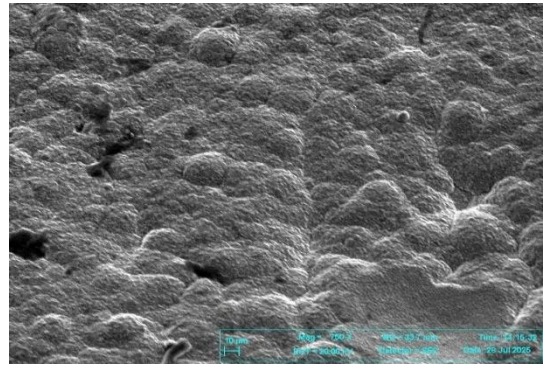
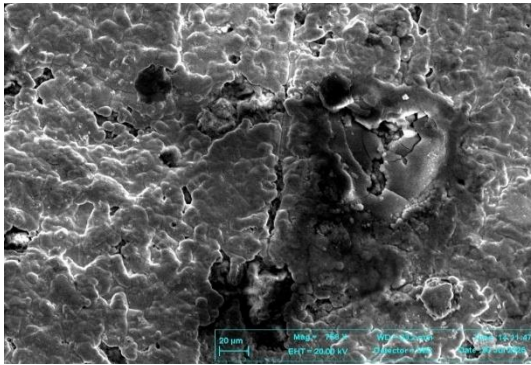
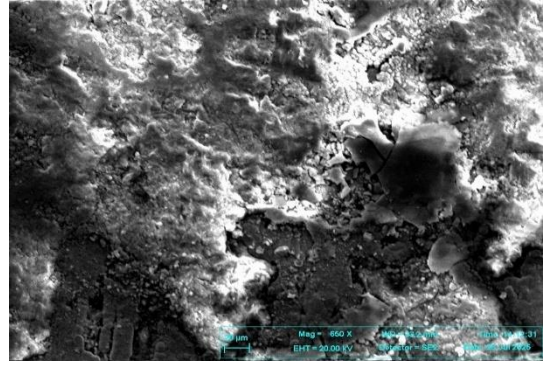
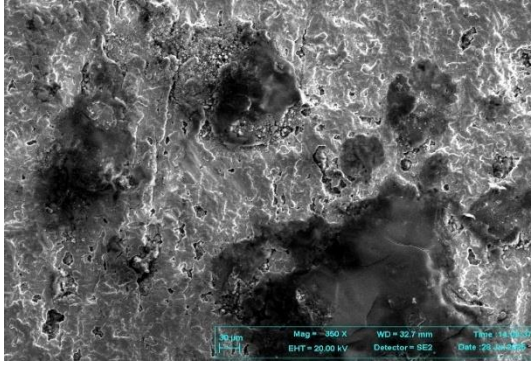
Şekil 6.32. 40 gr/L oranında borik asit ilaveli, 45°C sıcaklıkta yapılan Nikel kaplamanın tuz korozyon testi sonuçları.



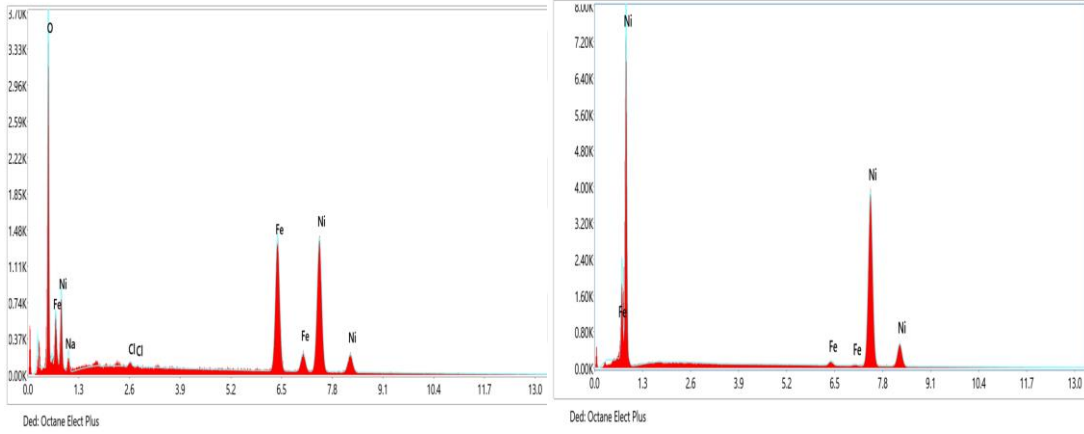
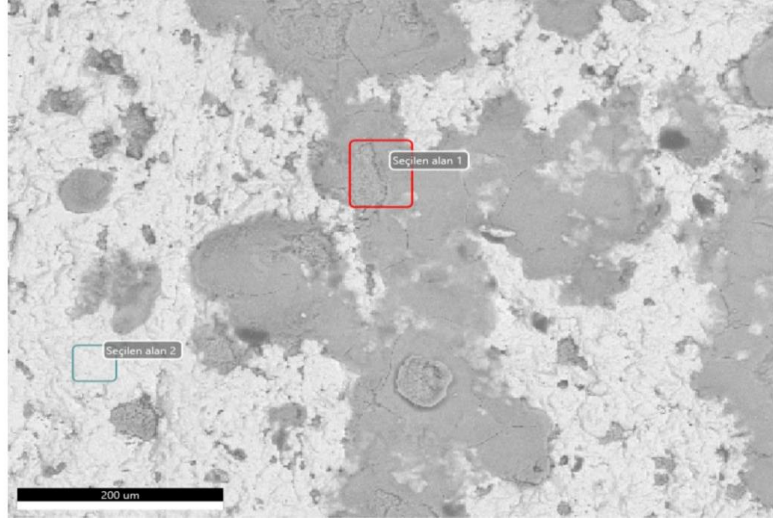
Şekil 6.33. 60 gr/L oranında borik asit ilaveli, 45°C sıcaklıkta yapılan Nikel kaplamanın tuz korozyon testi sonuçları.



Şekil 6.34. Kaplama olmayan delik bölgesinde oluşan tuz korozyon testi sonuçları.



Şekil 6.35. AISI 1020 çeliğine uygulanan tuz korozyona testi sonucu numune yüzeyinden alınan SEM görüntüleri.



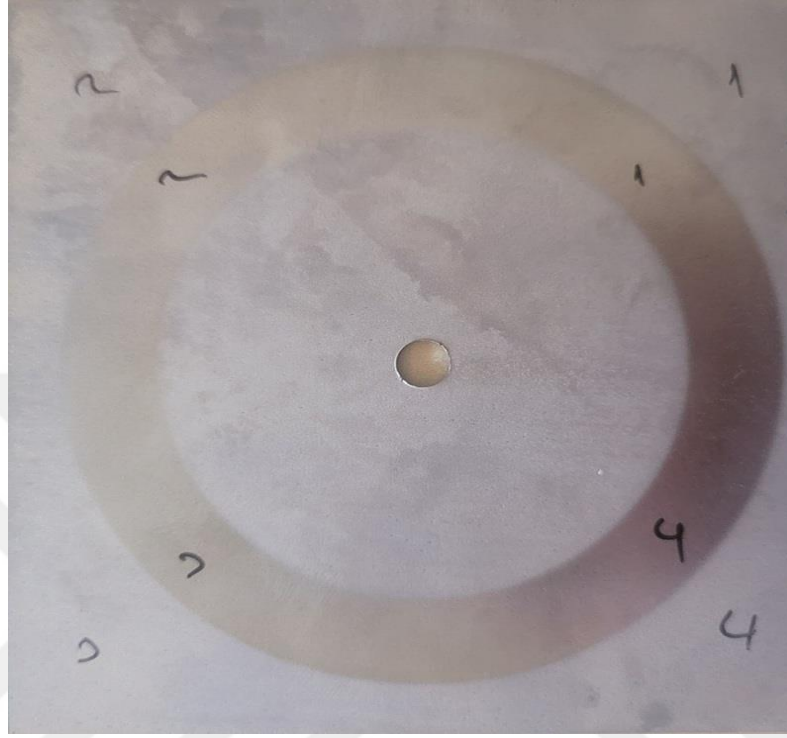
Şekil 6.36. AISI 1020 çeliği için SEM mikroyapı görüntüsü, sırasıyla 1 ve 2 bölgelerinden alınmış EDS analizleri görülmektedir.

Borik asit içermeyen kaplamalarda kenar bölgelerde bölgesel paslanma izleri gözlemlenmiştir. Yine düşük borik asit katkılı numunelerde (5–10 gr/L) çok az miktarda kısmi paslanma izleri gözlemlenmiştir. 20, 40 ve 60 gr/L bor katkısı ile kaplanan numunelerde korozyon izine rastlanmamıştır. Kaplama yüzeyleri bütünlüğünü korumuş ve gözle görülür bozulma göstermemiştir.

Nikel sülfamat çözeltisine borik asit ilavesinin kaplamaların iç gerilme değerlerinin azalmasına sebep olduğunu bu alandaki önemli çalışmalarda belirtmişlerdir [55]. Borik asit miktarının artmasıyla birlikte kaplamanın korozyon direncinin artış sebebinin kaplamada oluşan iç gerilmelerdeki azalma sebebiyle olduğu düşünülmektedir [60].

15x15 cm ebatlarında hazırlanan AISI 1020 çelik numunelerinin kaplama sonrası aşınma direncinin tespit edilmesi amacıyla aşınma testi yapılmıştır. Taber Abraser

cihazı ve CS-10 tipi diskle yapılan aşınma testleri, borik asit oranının yükselmesinin kaplamaları aşınmaya karşı daha dayanıklı hale getirdiğini göstermiştir. Devir hızı 60 rpm olarak ayarlanmış olup test süreci 1000 devir olarak uygulanmıştır. Aşınma deneyi sonrası numunenin görünümü Şekil 6.37’de verilektedir.



Şekil 6.37. Aşınma deneyi sonrası numunenin görüntüsü

Aşınma deneyi öncesi ve sonrasında ölçülen ağırlık bilgileri ile toplam ağırlık kaybı bilgileri Tablo 6.1’de, numunelerin sertlik, kaplama kalınlığı ve aşınma derinliği bilgileri Tablo 6.2’de verilmektedir.

Tablo 6.1.Aşınma testi öncesi ve sonrası ağırlık bilgileri

Numune	İlk Ağırlık (gr)	Son Ağırlık (gr)	Fark (gr)
Borsuz	69,629	69,589	0,040
5 gr/L	69,953	69,926	0,027
10 gr/L	71,448	71,428	0,020
20 gr/L	71,482	71,466	0,016
40 gr/L	69,930	69,919	0,011
60 gr/L	72,858	72,850	0,008

Tablo 6.2.Numunelerin sertlik, kalınlık ve aşınma derinliği bilgileri

Numune	Sertlik (HV _{0.1})	Kalınlık(μm)	Aşınma Derinliği (μm)
Borsuz	197	9,1	0,2258
5 gr/L	239	12,2	0,1468
10 gr/L	280	14,8	0,1130
20 gr/L	308	18,3	0,0904
40 gr/L	342	24,7	0,0564
60 gr/L	357	26	0,0452

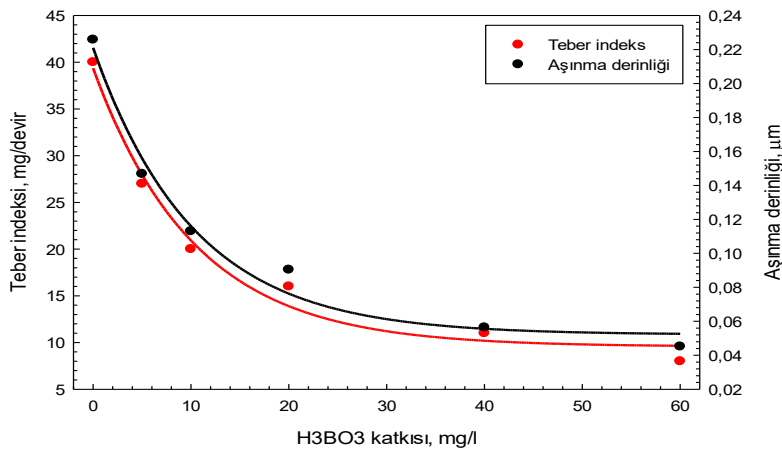
Aşınma testleri sonucunda, yapılan kaplamaların dayanımı bulmak için aşınma indeksi değeri hesaplanmıştır. ISO ve ASTM standartlarında aşınma indeksi (K) formülü:

$$K = \frac{\Delta M}{R} \times 1000$$

ΔM =Ağırlık kaybı(mg), R=Devir sayısı)

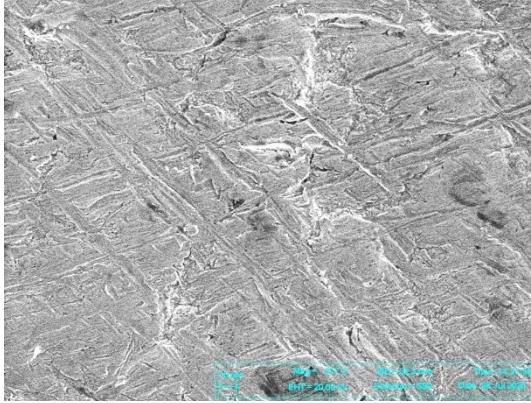
Yapılan hesaplama neticesinde bulunan aşınma miktarı grafiği Şekil 6.38’te verilmektedir.

Borik asit miktarının artışıyla birlikte kaplamalarda gözlemlenen aşınma değerinin azalması, borik asit ilavesinin Nikel kaplamaların aşınma direncini arttırdığı sonucunu ortaya çıkarmıştır. Aşınma sonrasında aşınma yapılan alanın SEM görüntüleri Şekil 6.39’da EDS analizleri Şekil 6.40’te verilmektedir.

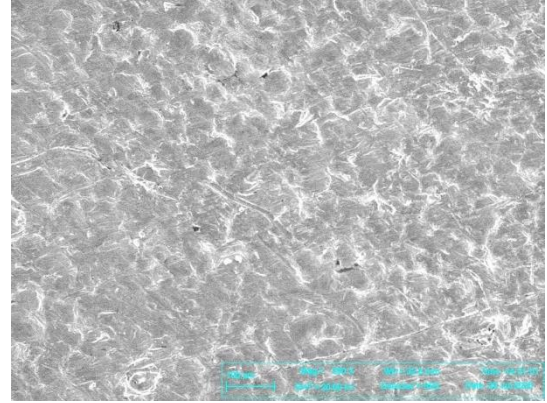
**Şekil 6.38.** Numunelere göre Teber aşınma değeri ve aşınma derinliği grafiği.

Borik asit miktarının artışıyla birlikte kaplamalarda gözlemlenen aşınma değerinin azalması, borik asit ilavesinin, Nikel kaplamaların aşınma direncini arttırdığı sonucunu

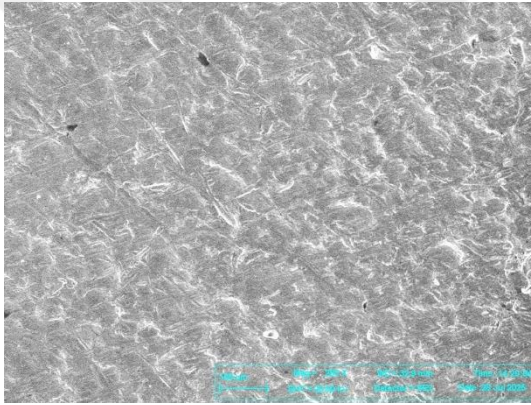
ortaya çıkarmıştır. Aşınma sonrasında aşınma izinden alanın SEM görüntüleri Şekil 6.39'da ve EDS analizleri Şekil 6.40'ta verilmiştir.



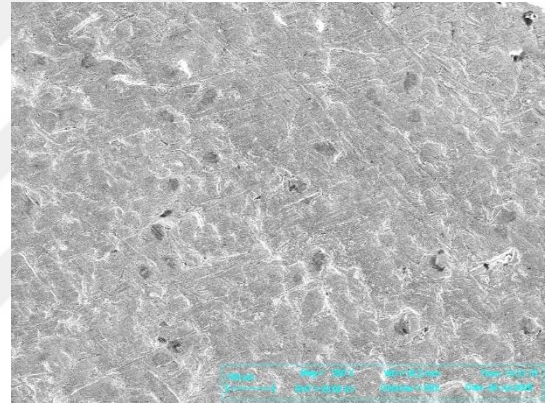
a)



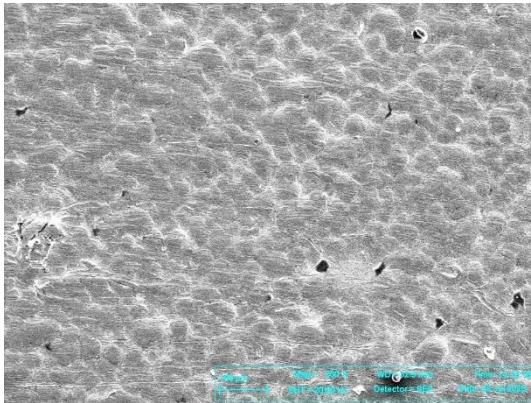
b)



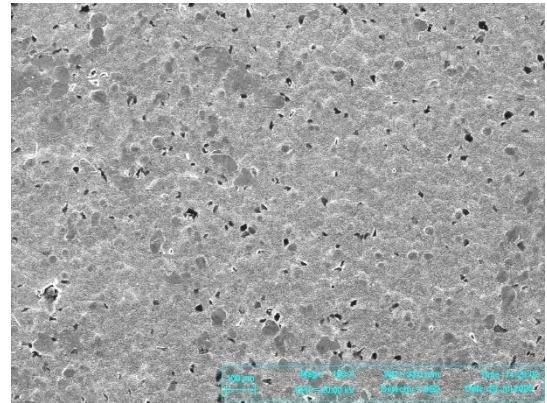
c)



d)

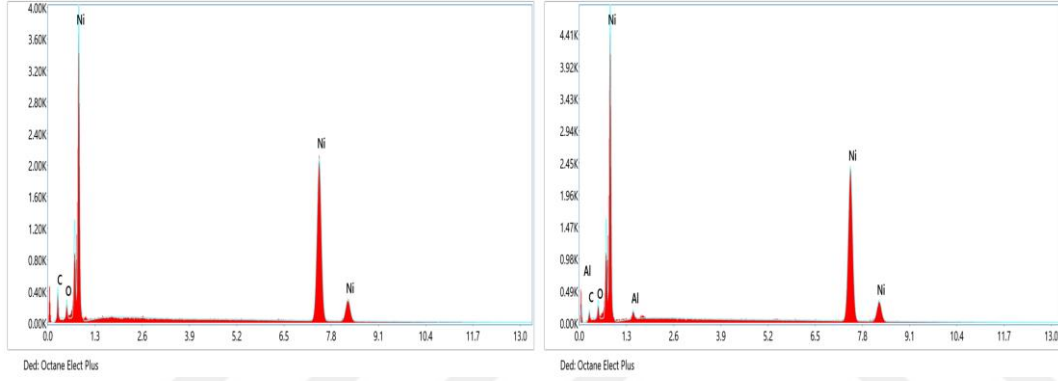
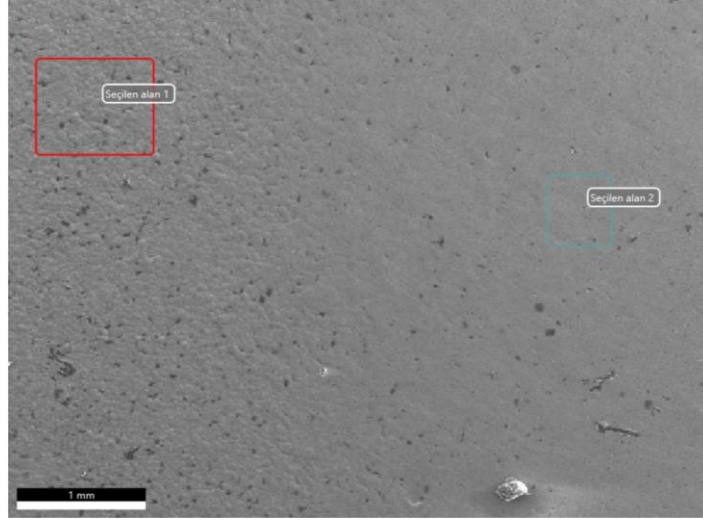


e)



f)

Şekil 6.39. Aşınma işlemine tabii tutulan AISI 1020 çeliğinin aşınma testi sonrası a) Borsuz, b) 5 gr/L H_3BO_3 , c) 10 gr/L H_3BO_3 , d) 20 gr/L H_3BO_3 , e) 40 gr/L H_3BO_3 , f) 60 gr/L H_3BO_3 , oranlarda borik asit içeren Nikel kaplamaların SEM görüntüleri.



Şekil 6.40. Aşınma deneyi gerçekleştirilen AISI 1020 çeliğinin aşınma deneyisonrası seçili alanlardan alınan EDS analizleri.

7. GENEL SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında, AISI 1020 düşük karbonlu çelik yüzeyine nikel sülfamat bazlı elektrolitik kaplamalar uygulanarak, borik asit (H_3BO_3) katkısının kaplama tabakalarının morfolojik, mekanik ve kimyasal özellikleri üzerindeki etkileri sistematik olarak incelenmiştir. Deneysel parametreler olarak sabit sıcaklıklar 30 °C, 45 °C ve 60 °C, 40 dakikalık sabit süre ve 4 A/dm² sabit akım yoğunluğu seçilmiştir. Borik asit konsantrasyonu ise sırasıyla 0, 5, 10, 20, 40 ve 60 g/L olacak şekilde değiştirilmiştir. Elde edilen veriler niceliksel (ölçülebilir) ve niteliksel (gözlemsel) olarak aşağıda özetlenmiştir:

Kaplama kalınlığı üzerindeki etkiler; kaplama kalınlığı hem sıcaklığa hem de H_3BO_3 konsantrasyonuna bağlı olarak anlamlı şekilde değişmiştir. Borsuz çözeltilerle elde edilen kaplama kalınlıkları 6,1–8 µm aralığında, 5 g/L H_3BO_3 içeren banyolarda 9,1–12,4 µm aralığında, 10 g/L H_3BO_3 içeren banyolarda 10,7–14,8 µm aralığında gerçekleşmiştir. 20 g/L H_3BO_3 içeren banyolarda bu değer 13,2–18,2 µm aralığında, 40 g/L H_3BO_3 içeren banyolarda 17,6–24,8 µm'ye çıkarken, en yüksek kalınlık 60 g/L borik asit içeren banyolarda 18,3–26 µm olarak ölçülmüştür.

Mikrosertlik değişimi; kaplanan numunelerin Vickers mikrosertlik değerleri, borik asit varlığına ve sıcaklığa bağlı olarak ciddi artışlar göstermiştir: Borsuz banyolarda elde edilen kaplamaların sertlik değeri 176–185 HV_{0.1} aralığında iken, 5 g/L H_3BO_3 ilaveli kaplamalarda bu değer 210–241 HV_{0.1} aralığına 10 g/L H_3BO_3 ilaveli kaplamalarda 227–278 HV_{0.1} aralığına ulaşmıştır. 20 g/L H_3BO_3 ilaveli kaplamalarda 244–308 HV_{0.1} aralığında, 40 g/L H_3BO_3 ilaveli kaplamalarda 282–345 HV_{0.1} aralığında ve en yüksek mikrosertlik değeri ise 60 g/L H_3BO_3 içeren kaplamada 294–357 HV_{0.1} olarak tespit edilmiştir. Bu artış, muhtemelen XRD analizlerinde gözlenen Ni_3B fazı oluşumu ile ilişkilendirilmiştir.

Yüzey Morfolojisi ve Mikroyapı Gözlemleri (SEM & Optik); SEM ve Optik mikroskop analizleriyle elde edilen bulgular, borik asidin kaplama yapısının homojenliğine olan katkısını ortaya koymuştur: Borik asit içermeyen kaplamalarda gözlenen morfoloji gözenekli, çatlaklı ve düzensiz bir yapıya sahipken, 5–10 ve 20 g/L

H₃BO₃ ilaveli kaplamalarda gözeneklerin ve çatlakların azaldığı ve yüzey parlaklığının arttığı gözlemlenirken, 40–60 g/L borik asit katkılı kaplamalarda kompakt, pürüzsüz, çatlak içermeyen ve yoğun tane yapılı tabakalar gözlenmiştir.

XRD Analizi ve Faz Tanımlamaları; XRD analizleri sonucunda, kaplamalarda temel olarak nikel (Ni) fazının yanı sıra borik asit katkısına bağlı olarak oluşan Ni₃B intermetalik fazı tespit edilmiştir. Bu faz malzemenin sertliğini ve korozyon direncini artırmakta, mikroyapısal homojenlik sağlamakta, sert ve sürekli bir faz geçiş bölgesi oluşturmaktadır.

Korozyon Dayanımı (Tuz Püskürtme Testi); Kaplamaların tuzlu ortamda korozyon dayanımı, test süresince gözlemlenen oksitlenme ve kaplama altı korozyon alanları üzerinden değerlendirilmiştir. Borsuz kaplamalar, ilk 24 saat içinde korozyon belirtileri gösterirken, 5-10 g/L H₃BO₃ katkılı kaplamalarda çok az miktarda kısmi paslanma izleri gözlemlenmiştir. 20–40 ve 60 g/L H₃BO₃ katkılı kaplamalarda ise 72 saate kadar oksitlenme belirtileri gözlenmemiş korozyon izine rastlanmamıştır.

Aşınma Dayanımı; aşınma testleri sonucunda, kütle kaybı ve yüzey pürüzlülüğü değerleri belirlenmiştir. Borsuz kaplamalarda ortalama aşınma derinliği 0,2258 µm seviyelerinde iken, 5 g/L H₃BO₃ katkılı kaplamalarda 0,1468 µm, 10 g/L H₃BO₃ katkılı kaplamalarda 0,1130 µm, 20 g/L H₃BO₃ katkılı kaplamalarda 0,0904 µm, 40–60 g/L borik asit içeren kaplamalarda bu değer 0,0564-0,0452 µm düzeylerine kadar düşmüştür.

SEM incelemeleri, yüzeyde daha az çizik ve mikro çöküntü olduğunu ortaya koymuştur.

Sonuç olarak; bu çalışmada elde edilen bulgular borik asidin Nikel sülfamat banyolarındaki fonksiyonunun yalnızca tampon görevi görmekle sınırlı kalmadığını, aynı zamanda kaplama yapısının kristal morfolojisi, sertliği, korozyon ve aşınma direnci üzerinde belirleyici rol oynadığını ortaya koymuştur.

Optimal sonuçların 60°C sıcaklık, 40–60 g/L borik asit konsantrasyonu aralığında gerçekleştirilen kaplamalarda elde edildiği anlaşılmıştır.

Bu bağlamda, AISI 1020 gibi düşük alaşımlı ve düşük karbonlu çeliklerin yüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla, borik asit katkılı nikel kaplamalar; düşük maliyetli, endüstriyel olarak uygulanabilir ve yüksek performanslı bir yüzey mühendisliği çözümü sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Matar M. S., Yousef A., Bastaweesy A.M., Qudsieh I.Y., Maafa I. M. (2024). Enhancement in Corrosion Resistance of Low-Carbon Steel via Surface Modification *Coatings* 2024, 14(12), 1518. <https://doi.org/10.3390/coatings14121518>
- [2] N. Marcuz, R.P. Ribeiro, E.C. Rangel, N.C. Cruz , L.G. Possato, K.S. Coan , C.R. Grandini , D.R.N. Correa (2020). Exploiting the effect of PEO parameters on the surface of AISI 1020 low-carbon steel treated in a TaOH-rich electrolyte. *Surface and Coatings Technology*, 477, 130374. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130374>
- [3] Özdemir, M. & Yılmaz, E. (2015). Surface modification of AISI 1020 steel and its effect on corrosion resistance. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24(7), 2742–2750.
- [4] Eliaz, N. (2019). Nickel electroplating for corrosion resistance: A review. *Corrosion Reviews*, 37(1), 1–18.
- [5] Lelevic, A. (2018). Ni-P coatings electroplating – A review, Part I: Pure Ni-P alloy. arXiv. <https://doi.org/10.20964/2013.07.10>
- [6] Fayyaz, O., Khan, A., Shakoor, R. A., Hasan, A., Yusuf, M. M., Montemor, M. F., Rasul, S., Khan, K., Faruque, M. R. I., & Okonkwo, P. C. (2021). Enhancement of mechanical and corrosion resistance properties of electrodeposited Ni–P–TiC composite coatings. *Scientific Reports*, 11(1), Article 5327. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84716-6>
- [7] Próchniak, M., & Grdeń, M. (2022, November 11). Electrochemical deposition of nickel from aqueous electrolytic baths prepared by dissolution of metallic powder. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 26, 431–447. <https://doi.org/10.1007/s10008-021-05084-9>
- [8] C.E. Dávalos, J.R. López, H. Ruiz, Alia Méndez, R. Antaño-López, G. Trejo. (2013). Study of the Role of Boric Acid During the Electrochemical Deposition of Ni in a Sulfamate Bath. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 8 (2013) 9785 – 9800 <https://doi.org/10.48550/arXiv.1807.04693>,
- [9] Liu, Q., Wang, J., & Li, C. (2021). Optimization of Ni-coatings using boric acid: Microstructure and properties. *Electrochimica Acta*, 378, 138100.
- [10] Wang, J., Liu, T., & Zhang, H. (2021). Influence of boric acid on microstructure and hardness of electroplated nickel coatings. *Materials Today Communications*, 29, 102894.
- [11] Chen, Y., Zhao, Q., & Huang, L. (2019). Study on the internal stress and adhesion of Ni coatings in sulfamate baths. *Surface Engineering*, 35(2), 157–165.

- [12] Shrestha, S., Rajbhandari, R., & Shrestha, S. (2022). Effect of deposition parameters on nickel electrodeposition from sulfamate bath. *Engineering Journal*, 26(1), 101–112.
- [13] Lin, Y., & Yu, J. (2018). Influence of temperature and time on nickel plating layer properties. *Journal of Coating Science and Technology*, 5(3), 199–205.
- [14] Tambe, C. E., Green, T. A., & Roy, S. (2024, October 8). The multifaceted role of boric acid in nickel electrodeposition and electroforming. *Journal of the Electrochemical Society*, 171(10), Article 102503. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ad80d3>
- [15] Totten, G. E. (2006). *Steel Heat Treatment Handbook*. CRC Press.
- [16] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2014). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Wiley.
- [17] Avner, S. H. (1997). *Introduction to Physical Metallurgy*. McGraw-Hill.
- [18] Kurt A., Elitaş M., Demir B., Yazıcı Ö.(2021). Sıcak Haddeleme Yolluk Makarası Soğuk İş Takım Çeliklerinin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.823799>
- [19] Bhadeshia, H., Honeycombe R. (2015). *Steels: Microstructure and Properties*.
- [20] Davis, J. R. (1994). *Stainless Steels*. ASM International.
- [21] Sedriks, A. J. (1996). *Corrosion of Stainless Steels*. John Wiley & Sons.
- [22] Davis, J. R. (2000). *Nickel, Cobalt, and Their Alloys* ASM International.
- [23] Budinski, K. G., & Budinski, M. K. (2010). *Engineering Materials: Properties and Selection*. Pearson.
- [24] Davis, J. R. (1995). *Tool Materials*. ASM International.
- [25] Ersöz E. ve Ovalı I., “AISI D2 soğuk iş takım çeliğine uygulanan endüstriyel kriyojenik işlemin aşınma davranışları üzerindeki etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 21(2): 411-417, (2018).
- [26] Schlesinger, M., & Paunovic, M. (2010). *Modern Electroplating* (5th ed.). Nickel Plating (s. 121–144), <https://doi.org/10.1002/9780470602638.ch12>
- [27] Dini, J. W. (1993). *Electrodeposition: The Materials Science of Coatings and Substrates*. Noyes Publications.
- [28] Gabe, D. R. (1997). *Principles of Metal Surface Treatment and Protection*.
- [29] Wasekar, N. P., Haridoss, P., & Sundararajan, G. (2017). Pulse electrodeposition of nickel and nickel–tungsten alloy coatings. *Surface and Coatings Technology*, 309, 758–769
- [30] Lin, C. H.(2003). The effects of pH value and boric acid on the microstructure of electroplated nickel. *Materials Chemistry and Physics*, 82(2), 391–396.
- [31] Li, J., & Zhang, X. (2015). Influence of additives on nickel electroplating. *Surface and Coatings Technology*, 276, 521–528. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.06.051>
- [32] Rezaeiolum, A., Aliofkhazraei, M., Karimzadeh, A., Rouhaghdam, A. S., Miresmaeili, R., Electrodeposition of Ni–Mo and Ni–Mo-(nano Al₂O₃)

multilayer coatings Surface Engineering, 34 (6), 423-432, 2017.
<https://doi.org/10.1080/02670844.2017.1327009>

- [33] Prof. Dr. Çakır, A.F., 1983. Metalik Kaplamalar, Elektrolitik Nikel Kaplamalar, s. 3-13, 27-30, 40-47, SEGEM Yayınları, İstanbul
- [34] Dennis, J. K. and Such T. E., 1972. Nickel and Chromium Plating, s. 1- 9, Butterworth & Co. Publishers, London.
- [35] Öndüç A. (2024) 1040 Çeliğinin farklı veri döngülerinde akımlı Nikel Fosfor kaplanmaso ve aşınma sonuçlarının karşılaştırılması (Yüksek lisans tezi) Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi [3]
- [36] Birlik I., AZEM N. Influence of Bath Composition on the Structure and Properties of Nickel Coatings Produced by Electrodeposition Technique. Dokuz Eylül Üniversitesi-Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi Cilt 20, Sayı 59, Mayıs, 2018
- [37] Akyol A., Algül H., Bilaç O., Ulu S., Gül H., Uysal M., Çay Y, Alp A. Academic Platform Journal of Engineering and Science 7-3, 442-448, 2019 Elektrolitik Sert Metal Kaplamaya Alternatif Çevreye Duyarlı Ni-P Kaplamaların 6061 Serisi Alüminyum Altlık Üzerine Akımsız Yöntemle Biriktirilmesinde Sodyum hipofosfit, Sıcaklık ve Zamanın Etkisi
- [38] Wang, C., et al. (2014). Effect of boric acid concentration on microhardness of nickel deposits. Materials Research, 17(3), 663–670.
- [39] Zhao, H., et al. (2016). Control of internal stress and surface roughness in nickel sulfamate plating. Journal of Applied Electrochemistry, 46, 123–131.
- [40] Hoare J.P. (1987) Boric Acid as a Catalyst in Nickel Plating Solutions. Journal of the Electrochemical Society, <https://doi.org/10.1149/1.2100348>
- [41] Godon et al., 2011 Characterization of electrodeposited nickel coatings from sulphamate electrolyte without additive; Materials Characterization Pages 164-173 <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2010.11.011>
- [42] Yılmaz, E., & Demir, A. (2018). AISI 1010 çeliği üzerine farklı nikel kaplamaların karşılaştırılması. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 31(4), 980–988.
- [43] Doğan, T., & Akbulut, H. (2017). Nikel kaplamalarda akım yoğunluğunun etkisi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23(5), 812–820.
- [44] Karabulut, Ş., & Atik, E. (2019). Nikel kaplamalarda borik asidin kristal yapıya etkisi. Fırat Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 31(1), 85–92.
- [45] Uçar, A., & Koç, R. (2021). AISI 1020 çeliği üzerine uygulanan nikel kaplamalarda mekanik özelliklerin incelenmesi. Selçuk Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 20(2), 33–40.
- [46] Kaya, F., & Aydın, M. (2018). Nikel kaplamalarda tane boyutu ve mikroyapı homojenliği. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yayınları.
- [47] Zhang, Y., & Chen, T. (2012). Microstructural evolution of nickel coatings during annealing. Materials Characterization, 69, 70–75.
- [48] Kim, S. H., et al. (2011). Effect of boric acid on internal stress and morphology of nickel deposits. Electrochimica Acta, 56, 3413–3420.

- [49] Tiryakioğlu, M., & Karakoç, H. (2020). Elektrolitik kaplamalarda sıcaklık ve katkı oranının etkisi. *Journal of Materials Science and Surface Engineering*, 8(3), 114–122.
- [50] Karaoğlu A.D., Meriç A. Optimizing the efficiently used nickel ratio in nickel plating process by using response surface methodology Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2019; 25(4): 507-512. <https://doi.org/10.5505/pajes.2018.67864>
- [51] Rose I., Whittington C., Nickel Plating Handbook, Nickel Institute, Brussels, 2014.
- [52] Wu, Y., Chang, D., Kim, D., & Kwon, S. (2003). Influence of boric acid on the electrodepositing process and structures of Ni–W alloy coating. *Surface and Coatings Technology*, 173(2-3), 259–264. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(03\)00449-3](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00449-3)
- [53] Baskara, I., Sakthi Kumar, R., Sankara Narayanan, T. S. N. and Stephen, A., 2006. Formation of electroless Ni–B coatings using low temperature bath and evaluation of their characteristic properties, *Surface & Coatings Technology*, 200, 6888–6894. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.10.013>
- [54] Krishnaveni, K., Sankara Narayanan, T. S. N. and Seshadri, S. K., 2005. Electroless Ni–B coatings: preparation and evaluation of hardness and wear resistance, *Surface & Coatings Technology*, 190, 115– 121. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.01.038>
- [55] Tsuru Y., Nomura M., Foulkes F.R. (2002). Effects of boric acid on hydrogen evolution and internal stress in films deposited from a nickel sulfamate bath. *Journal of Applied Electrochemistry*, 32, 629–634. <https://doi.org/10.1023/A:1020130205866>
- [56] Takeoka H., Seike M., Nakamura Y., Imai H., Oaki Y., Fujii S. (2022) Electroless nickel plating on a biomineral-based sponge structure. *Materials Advances*
- [57] Salman et al. (2022) – Effect of Nickel Electroplating on Surface Hardness of Low Carbon Steel Energy, Material and Product Design, Vol. 1(2):46-52 <https://doi.org/10.29303/emdp.v1i2.1495>
- [58] Karabulut et al. (2016) – Effect of H₃BO₃ on the Corrosion Properties of Ni–B Based Electroplating Coatings <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.131.147>
- [59] Prince M., Gopalakrishnan P., Bhuvanashakaran G. (2010) – Laser Surface Alloying of Nickel and Chromium (III) Electroplated AISI 1020 Steel
- [60] Wakuda, Y., Yoshida, K., Tashiro, K., & Honma, H. (2011). Physical properties of plating films from boric acid-free nickel sulfamate bath. *Journal of the Surface Finishing Society of Japan*, 62(2), 131–137. <https://doi.org/10.4139/sfj.62.131>

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ömercan SİVRİ

ÖĞRENİM DURUMU:

- Lisans** : 2015, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölüm
- Yükseklisans** : 2025, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2016-2020 yılları arasında özel sektörde makine mühendisi olarak çalıştı.
- 2021 yılından itibaren Eskişehir 1'inci Hava Bakım Fabrika Müdürlüğünde çalışmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Şen U., Sivri Ö. (2025, 4-6, Temmuz). AISI 1020 Çeliğinin yüzeyinde gerçekleştirilen Nikel sülfamat kaplamalara borik asit ilavesinin kaplama özellikleri üzerine etkisi. Karadeniz 18. Uluslararası Uygulamalı Bilimler Kongresi- Rize, Turkey.