

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TERMO-REAKTİF DİFÜZYON TEKNİĞİ İLE ÇELİKLERİN NbN
KAPLANMASI VE ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS

Dilara NACAR

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

NİSAN 2024

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TERMO-REAKTİF DİFÜZYON TEKNİĞİ İLE ÇELİKLERİN NbN
KAPLANMASI VE ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Dilara NACAR

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şaduman ŞEN

NİSAN 2024

Dilara Nacar tarafından hazırlanan “TERMO-REAKTİF DİFÜZYON TEKNİĞİ İLE ÇELİKLERİN NbN KAPLANMASI VE ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması 29.04.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :	Prof. Dr. Özkan ÖZDEMİR Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Prof. Dr. Şaduman ŞEN (Danışman) Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Dr. Öğr. Üyesi Eray ABAKAY Sakarya 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 “Termo-reaktif difüzyon tekniği ile çeliklerin NbN kaplanması ve özelliklerinin 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.

(24/05/2024).

Dilara NACAR





Aileme..



TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yürütülmesinde değerli fikirleri ve tecrübeleriyle yolumuza ışık tutan, çalışmamın her aşamasında tarafıma yol gösteren saygıdeğer hocamız Prof. Dr. Şaduman ŞEN ve Prof. Dr.Uğur Şen'e, araştırmamın yürütmemizde bize yardımcı olan, değerli fikir ve tecrübelerinden yararlandığım, parçası olmaktan onur duyduğum tüm Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü hocalarımıza teşekkürü borç bilirim. Hayatımın her anında yanımda olan ve beni bu günlere getirirken her türlü maddi ve manevi fedakarlığı yapan, varlıklarından onur duyduğum kıymetli aileme sonsuz teşekkür ederim.

Dilara Nacar



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxv
SUMMARY	xxvii
1. GİRİŞ	1
2. ÇELİKLER HAKKINDA GENEL BİLGİ	3
2.1. Giriş	3
2.2. Çeliklerin Sınıflandırılması	4
2.2.1. Üretim yöntemlerine göre çelikler	4
2.2.2. Uygulama alanlarına göre çelikler	5
2.2.3. Alaşım durumlarına göre çelikler	5
2.2.4. Temel bileşenlerine göre çelikler	6
2.2.5. Mikro yapılarına göre çelikler	7
2.2.6. Kalite durumlarına göre çelikler	8
2.2.7. Fiziki ve kimyevi açıdan çeliklerin sınıflandırılması	8
2.2.8. Sertleştirme ortamlarına göre çelikler	9
2.3. Sade Karbonlu Çelikler	9
2.3.1. Düşük karbonlu çelikler	9
2.3.2. Orta karbonlu çelikler	10
2.3.3. Yüksek karbonlu çelikler	10
2.4. Alaşımli Çelikler	11
2.5. Yapı Çelikleri	11
2.6. Takım Çelikleri	12
3. ÇELİKLERE UYGULANAN YÜZEY İŞLEMLERİ	15
3.1. Nitrürleme	16
3.1.1. Nitrürleme yöntemleri	17
3.1.2. Nitrürleme sonrası oluşan yapılar	18
3.1.3. Nitrürleme işleminin uygulama alanları	18
4. TERMO-REAKTİF DİFÜZYON PROSESİ	19
4.1. Giriş	19
4.2. Uygulama Yöntemleri	19
4.2.1. Tuz banyosu yöntemi	19
4.2.2. Akışkan yatak yöntemi	20
4.2.3. Kutu sementasyon yöntemi	20
4.3. Kullanılan Altlık Malzemeler	20
4.4. TRD Yöntemindeki Ana Prensipler	21

4.5. Niyobyum (Kolombiyum)	22
4.5.1. Niyobyumun özellikleri.....	25
4.5.1.1. Fiziksel özellikleri	26
4.5.1.2. Kimyasal özellikler	26
4.5.2. Reaksiyonları.....	27
4.5.3. Dünya niyobyum rezervleri.....	27
4.5.4. Niyobyum üretim yöntemi ve teknolojisi	28
4.5.5. Üretim yapan ülkeler ve firmalar	29
4.5.6. Tüketim ve kullanım alanları	29
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	31
5.1. Giriş	31
5.2. Deneylerde Kullanılan Numuneler ve Kimyasal Analizleri.....	31
5.3. Deneylerde Yararlanılan Ekipmanlar ve Cihazlar.....	32
5.3.1. Kaplama fırınları	32
5.3.2. Niyobyum nitrür kaplama potası.....	32
5.4. Deneylerde Kullanılan Numunelerin Hazırlığı	33
5.5. TRD Yöntemiyle Niyobyum Nitrür Kaplama İşlemi	33
5.6. Mikroyapı İncelemeleri	34
5.6.1. Optik mikroskop incelemeleri.....	34
5.6.2. SEM ve elementel analiz.....	35
5.7. X-Işınları Difraksiyon Analizi.....	36
5.8. Sertlik Ölçümleri	37
5.9. Korozyon Testleri.....	37
6. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME.....	39
6.1. Giriş	39
6.2. Mikroyapı İncelemeleri	40
6.3. X Işınları Difraksiyon Analizi	43
6.4. SEM-EDS Analizleri ile Kaplama Tabakalarının İncelenmesi	48
6.5. Sertlik Ölçümleri	50
6.6. Kaplamaların Korozyon Özellikleri	63
6.6.1. Tafel ekstrapolasyon (TP) incelemeleri	63
6.6.2. EIS incelemeleri	70
6.6.3. Korozyon sonrası mikroyapı incelemesi ve elementel analiz	76
7. DENEYSEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	95
7.1. Giriş	95
KAYNAKLAR.....	99
ÖZGEÇMİŞ	103

KISALTMALAR

AISI	: Amerikan Çelik Endüstri Formu
EDS	: Enerji Dağılım Spektrometresi
E_{kor}	: Korozyon potansiyeli
I_{kor}	: Korozyon Akımı
MAP	: Haritalama
NbN	: Niyobyum Nitrür
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SEM-EDS	: Noktasal Analiz
TRD	: Termo-reaktif Difüzyon
XRD	: X Işınları Spektrum Analizi



SİMGELER

Nb	: Niyobyum elementi
N	: Azot elementi
Na	: Sodyum elementi
Cl	: Klor elementi
H	: Hidrojen elementi
mV	: Minivolt
mm	: Milimetre
°C	: Sıcaklık
α Fe	: Alfa demir
M	: Molar
P	: Fosfor elementi
B	: Bor elementi
μm	: Mikrometre
V	: Volt
mg	: Miligram
sn	: saniye



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Örnek sade karbonlu çeliklerin teknik özellikleri [27].	6
Tablo 2.2. Orta karbonlu çeliklerin kimyasal bileşimleri.....	10
Tablo 2.3. Karbon oranı yüksek olan çeliklerin kimyasal bileşimleri.....	10
Tablo 4.1. TRD yöntemi ile kaplanan çeliklerin kullanım alanları.	23
Tablo 4.2. Dünya niyobyum rezervleri.....	28
Tablo 4.3. Ferro niyobyum kimyasal bileşimin özellikleri	29
Tablo 5.1. AISI M2, AISI 1010, AISI 4140 çeliklerinin spektral analizi.	32
Tablo 6.1. Çelik yüzeylerinde oluşturulan NbN esaslı kaplamaların tabaka kalınlığı değerleri	43
Tablo 6.2. Çelik yüzeylerinde oluşturulan NbN esaslı tabakaların difüzyon derinliği değerleri	43
Tablo 6.3. NaCl ortamında elde edilen tafel eğrilerinden hesaplanan değerler.	64
Tablo 6.4. 1M H ₃ PO ₄ ortamında elde edilen tafel eğrilerinden hesaplanan sonuçlar.	66
Tablo 6.5. 1M H ₃ BO ₃ ortamında elde edilen tafel eğrilerinden hesaplanan sonuçlar.	68



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1. Kaplama işlemi sonucunda, temel malzemenin yüzeyinde bir kaplama tabakasının meydana gelmesi.....	15
Şekil 3.2. Fe-N denge diyagramı	16
Şekil 4.1. Kaplama ve sertlik ilişkisi.	22
Şekil 4.2. Saf ferro-niyobyumdan elde edilen levha.....	30
Şekil 5.1. a) Nitrüleme fırını b) Niyobyum nitrür kaplama fırını.....	32
Şekil 5.2. Termo-Reaktif Difüzyon yöntemi ile gerçekleştirilen NbN kaplama potasının şematik görünümü (ölçü birimi: mm).....	33
Şekil 5.3. Deneylerde kullanılan numunenin boyutları (ölçü birimi: mm).....	33
Şekil 5.4. NbN kaplama potasındaki malzeme ve banyo bileşenlerinin şeması.	34
Şekil 5.5. Nikon LV150N marka optik mikroskop.....	35
Şekil 5.6. JEOL JSM – 6060 marka taramalı elektron mikroskobu.	36
Şekil 5.7. Rigaku D/Max marka x-ışınları difraksiyon analiz cihazı.....	36
Şekil 5.8. Leica marka sertlik ölçüm cihazı ve iz görüntüsü	37
Şekil 5.9. Gamry marka korozyon test ünitesi ve yardımcı elemanlar	38
Şekil 6.1. a) Nitrürlenmiş b) Niyobyum nitrür kaplanan AISI 1010 çeliğinin mikroyapı görüntüleri	40
Şekil 6.2. a) Nitrürlenmiş b) Niyobyum nitrür kaplanan AISI 1010 çeliğinin SEM mikroyapı görüntüleri.....	41
Şekil 6.3. a) Nitrürlenmiş b) Niyobyum nitrür kaplanan AISI 4140 çeliğinin mikroyapı görüntüleri	41
Şekil 6.4. a) Nitrürlenmiş b) Niyobyum nitrür kaplanan AISI 4140 çeliğinin SEM mikroyapı görüntüleri.....	41
Şekil 6.5. a) Nitrürlenmiş b) Niyobyum nitrür kaplanan AISI M2 çeliğinin mikroyapı görüntüleri	42
Şekil 6.6. a) Nitrürlenmiş b) Niyobyum nitrür kaplanan AISI M2 çeliğinin SEM mikroyapı görüntüleri	42
Şekil 6.7. Nitrürlenmiş AISI 1010 çeliğinin x- ışını difraksiyon paterni.....	44
Şekil 6.8. Nitrürlenmiş AISI 4140 çeliğinin x- ışını difraksiyon paterni.....	45
Şekil 6.9. Nitrürlenmiş AISI M2 çeliğinin x- ışını difraksiyon paterni.	45
Şekil 6.10. NbN kaplanmış AISI 1010 çeliğinin x- ışını difraksiyon paterni.....	46

Şekil 6.11. NbN kaplanmış AISI 4140 çeliğinin x- ışını difraksiyon paterni.	47
Şekil 6.12. NbN kaplanmış AISI M2 çeliğinin x- ışını difraksiyon paterni.	47
Şekil 6.13. Nitrürlenmiş AISI 1010 çeliğinin SEM-EDS görüntüleri.	51
Şekil 6.14. Nitrürlenmiş AISI 1010 çeliğinin SEM, MAP ve çizgisel analiz görüntüleri.	52
Şekil 6.15. Nitrürlenmiş AISI 4140 çeliğinin SEM-EDS görüntüleri.	53
Şekil 6.16. Nitrürlenmiş AISI 4140 çeliğinin SEM, MAP ve çizgisel analiz görüntüleri.	54
Şekil 6.17. Nitrürlenmiş AISI M2 çeliğinin SEM - EDS görüntüleri.	55
Şekil 6.18. Nitrürlenmiş AISI M2 çeliğinin SEM, MAP ve çizgisel analiz görüntüleri.	56
Şekil 6.19. NbN kaplanmış AISI 1010 çeliğinin SEM - EDS görüntüleri.	57
Şekil 6.20. NbN kaplanmış AISI 1010 çeliğinin SEM, MAP ve çizgisel analiz görüntüleri.	58
Şekil 6.21. NbN kaplanmış AISI 4140 çeliğinin SEM-EDS görüntüleri.	59
Şekil 6.22. NbN kaplanmış AISI 4140 çeliğinin SEM, MAP ve çizgisel analiz görüntüleri.	60
Şekil 6.23. NbN kaplanmış AISI M2 çeliğinin SEM-EDS görüntüleri.	61
Şekil 6.24. NbN kaplanmış AISI M2 çeliğinin SEM, MAP ve çizgisel analiz görüntüleri.	62
Şekil 6.25. AISI 1010, AISI 4140 ve AISI M2 çeliğinin sırasıyla işlem görmemiş yüzeyinden kaplama- matris ara yüzeyinden ve NbN kaplama yüzeyinden alınan sertlik değerleri.	63
Şekil 6.26. Nitrürlenmiş, NbN kaplanmış ve AISI 1010 çeliğinin 0,5 M NaCl ortamında Tafel eğrileri.	65
Şekil 6.27. Nitrürlenmiş, NbN kaplanmış ve AISI 4140 çeliğinin 0,5 M NaCl ortamında Tafel eğrileri.	65
Şekil 6.28. Nitrürlenmiş, NbN kaplanmış ve AISI M2 çeliğinin 0,5 M NaCl ortamında Tafel eğrileri.	66
Şekil 6.29. Nitrürlenmiş, NbN kaplanmış ve AISI 1010 çeliğinin 1 M H ₃ PO ₄ ortamında Tafel eğrileri.	67
Şekil 6.30. Nitrürlenmiş, NbN kaplanmış ve AISI 4140 çeliğinin 1 M H ₃ PO ₄ ortamında Tafel eğrileri.	67
Şekil 6.31. Nitrürlenmiş, NbN kaplanmış ve AISI M2 çeliğinin 1 M H ₃ PO ₄ ortamında Tafel eğrileri.	68
Şekil 6.32. Nitrürlenmiş, NbN kaplanmış ve AISI 1010 çeliğinin 1 M H ₃ BO ₃ ortamında Tafel eğrileri.	69
Şekil 6.33. Nitrürlenmiş, NbN kaplanmış ve AISI 4140 çeliğinin 1 M H ₃ BO ₃ ortamında Tafel eğrileri.	69

Şekil 6.34. Nitrürlenmiş, NbN kaplanmış ve AISI M2 çeliğinin 1 M H ₃ BO ₃ ortamında Tafel eğrileri.....	70
Şekil 6.35. Nitrürlenmiş NbN kaplanmış ve AISI 1010 çeliğinin 0,5 M NaCl ortamında Nyquist eğrileri.	71
Şekil 6.36. Nitrürlenmiş NbN kaplanmış ve AISI 4140 çeliğinin 0,5 M NaCl ortamında Nyquist eğrileri.	72
Şekil 6.37. Nitrürlenmiş NbN kaplanmış ve AISI M2 çeliğinin 0,5 M NaCl ortamında Nyquist eğrileri.	72
Şekil 6.38. Nitrürlenmiş, NbN kaplanmış ve AISI 1010 çeliğinin 1 M H ₃ PO ₄ ortamında Nyquist eğrileri.	73
Şekil 6.39. Nitrürlenmiş, NbN kaplanmış ve AISI 4140 çeliğinin 1 M H ₃ PO ₄ ortamında Nyquist eğrileri	73
Şekil 6.40. 1 Nitrürlenmiş, NbN kaplanmış ve AISI M2 çeliğinin 1 M H ₃ PO ₄ ortamında Nyquist eğrileri.	74
Şekil 6.41. Nitrürlenmiş, NbN kaplanmış ve AISI 1010 çeliğinin 1 M H ₃ BO ₃ ortamında Nyquist eğrileri.	74
Şekil 6.42. Nitrürlenmiş, NbN kaplanmış ve AISI 4140 çeliğinin 1 M H ₃ BO ₃ ortamında Nyquist eğrileri.	75
Şekil 6.43. Nitrürlenmiş, NbN kaplanmış ve AISI M2 çeliğinin 1 M H ₃ BO ₃ ortamında Nyquist eğrileri.	75
Şekil 6.44. Nitrürlenmiş AISI 1010 çeliğinin korozyon öncesi SEM ve EDS görüntüleri	76
Şekil 6.45. NbN kaplanmış AISI 1010 çeliğinin korozyon öncesi SEM ve EDS görüntüleri	77
Şekil 6.46. Nitrürlenmiş AISI 4140 çeliğinin korozyon öncesi SEM ve EDS görüntüleri	77
Şekil 6.47. NbN kaplanmış AISI 4140 çeliğinin korozyon öncesi SEM ve EDS görüntüleri	78
Şekil 6.48. Nitrürlenmiş AISI M2 çeliğinin korozyon öncesi SEM ve EDS görüntüleri	78
Şekil 6.49. NbN kaplanmış AISI M2 çeliğinin korozyon öncesi SEM ve EDS görüntüleri	79
Şekil 6.50. AISI 1010 çeliğinin NaCl ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.	80
Şekil 6.51. Nitrürlenmiş AISI 1010 çeliğinin NaCl ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.....	80
Şekil 6.52. NbN kaplanmış AISI 1010 çeliğinin NaCl ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.....	81
Şekil 6.53. AISI 4140 çeliğinin NaCl ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.	81
Şekil 6.54. Nitrürlenmiş AISI 4140 çeliğinin NaCl ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.....	82

Şekil 6.55. NbN kaplanmış AISI 4140 çeliğinin NaCl ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.....	82
Şekil 6.56. AISI M2 çeliğinin NaCl ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.	83
Şekil 6.57. Nitrürlenmiş AISI M2 çeliğinin NaCl ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.	83
Şekil 6.58. NbN kaplanmış AISI M2 çeliğinin NaCl ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.....	84
Şekil 6.59. AISI 1010 çeliğinin H ₃ BO ₃ ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.	85
Şekil 6.60. Nitrürlenmiş AISI 1010 çeliğinin H ₃ BO ₃ ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.....	85
Şekil 6.61. NbN kaplanmış AISI 1010 H ₃ BO ₃ ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.....	86
Şekil 6.62. AISI 4140 çeliğinin H ₃ BO ₃ ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.	86
Şekil 6.63. Nitrürlenmiş AISI 4140 çeliğinin H ₃ BO ₃ ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.....	87
Şekil 6.64. NbN kaplanmış AISI4140 H ₃ BO ₃ ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.....	87
Şekil 6.65. AISI M2 çeliğinin H ₃ BO ₃ ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.	88
Şekil 6.66. Nitrürlenmiş AISI M2 çeliğinin H ₃ BO ₃ ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.....	88
Şekil 6.67. NbN kaplanmış AISI M2 H ₃ BO ₃ ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.....	89
Şekil 6.68. AISI 1010 çeliğinin H ₃ PO ₄ ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.	90
Şekil 6.69. Nitrürlenmiş AISI 1010 çeliğinin H ₃ PO ₄ ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.....	90
Şekil 6.70. NbN kaplanmış AISI 1010 H ₃ PO ₄ ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.....	91
Şekil 6.71. AISI 4140 çeliğinin H ₃ PO ₄ ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.	91
Şekil 6.72. Nitrürlenmiş AISI 4140 çeliğinin H ₃ PO ₄ ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.....	92
Şekil 6.73. NbN kaplanmış AISI 4140 H ₃ PO ₄ ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.....	92
Şekil 6.74. AISI M2 çeliğinin H ₃ PO ₄ ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.	93
Şekil 6.75. Nitrürlenmiş AISI M2 çeliğinin H ₃ PO ₄ ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.....	93

Şekil 6.76. NbN kaplanmış AISI M2 H ₃ PO ₄ ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.....	94
---	----





TERMO-REAKTİF DİFÜZYON TEKNİĞİ İLE ÇELİKLERİN NbN KAPLANMASI VE ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Bu çalışma kapsamında gerçekleşen deneylerde AISI 1010, AISI 4140, AISI M2 çeliklerinin yüzeylerine termo-reaktif difüzyon yönteminden yararlanarak NbN kaplama işlemi uygulanmıştır. Çeliklerin yüzeylerinde NbN kaplamalar elde etmek amacı ile ilk olarak çelik yüzeylerinde azotça zengin bir tabaka elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda AISI 1010, AISI 4140, AISI M2 çelikleri nitrasyon işlemine tabi tutulmuştur. (530° C de 10 saat). Nitrasyon işleminin ardından çelik yüzeylerine termo reaktif difüzyon yöntemi ile niyobyum kaplanmıştır. Niyobyum nitrür kaplama işlemi 1000° C’de 2 saat süre ile katı ortamda gerçekleşmiştir. Niyobyum nitrür kaplama için yararlanılan kutu sementasyon yönteminin katı ortamı içerisinde; ferro-niyobyum, amonyum klorür, alümina ve naftalin yer almaktadır. Nitrasyonlama işleminin ardından gerçekleşen niyobyum nitrür kaplama işlemi tamamlandıktan sonra üç çelik yüzeyde de NbN kaplama tabakaları elde edilmiştir. Termo-reaktif difüzyon yönteminden yararlanarak elde edilen kaplama yüzeylerinin yapısal karakterizasyonları ve faz analizleri araştırılmıştır. Bu araştırma kapsamında optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM), SEM-EDS, MAP, çizgisel analiz ve X- ışınları paternlerinden yararlanılmıştır. Bu deneyler kapsamında kaplama tabakasının varlığı, kalınlığı, homojenizasyonu, difüzyon derinliği verilerine ulaşılmıştır. Trd yöntemi ile kaplanmış, nitrürlenmiş çelikler ayrı ayrı bakalite alınmış ardından metalografik teknikler ile hazırlanan çelikler %3 nital yardımı ile dağlanarak yüzey morfolojileri ortaya çıkartılıp optik mikroskop yardımı ile kaplamalar incelenmiştir. İncelemelerimizde kaplama işlemine tabi tutulmuş farklı çelik türlerinin (AISI 4140, AISI 1010, AISI M2) yüzeylerinde homojen ve süreklilik arz eden bir tabaka olduğu tespit edilmiştir. Kaplama tabakası en kalın ölçülen ve difüzyon derinliği en derin seviyede gözlemlenen çelik AISI M2 çeliği olarak tespit edilmiştir. AISI M2 çeliğinin içerisinde bulunan alaşım elementleri kaplama tabakasının daha fazla difüze olmasında etkili olmuştur. Nitrürlenmiş ve NbN kaplanmış AISI 1010, AISI 4140 ve AISI M2 çeliklerinin elementel haritalandırmasında tüm çeliklerin kaplama tabakaları ve kaplama yüzeylerinin homojen olduğu görülmektedir. Nitrürlenmiş çeliklerde yüzey yüksek oranda azot içermektedir. Aynı zamanda niyobyum kaplanmış tüm çeliklerin elementel haritalandırmasında yüzeyde niyobyum çok yüksek oranda bulunurken yüzeyden matrise inildikçe nitrür oranı artmaktadır.

NbN kaplama tabakasının mekanik özelliklerindeki gelişimi gözlemlemek amacı ile sertlik testleri yapılmıştır. NbN kaplanmış AISI 1010, AISI M2, AISI 4140 çeliklerinin yüzeylerinde oluşan kaplama tabakalarının, arayüzey matrisinin ve ana malzeme matrisin sertlik ölçümleri vikers sertlik ucu kullanılarak 15 gr yük altında ölçülmüştür. Termo-reaktif difüzyon işlemi ile NbN kaplanmış çelikler içinde en sert kaplama tabakasına sahip çelikler sırası ile AISI M2, AISI 4140 ve AISI 1010 çelikleri olarak belirlenmiştir. AISI M2 çeliğinin en yüksek sertlik değerine sahip olmasını başlıca

nedeninin, çelik yüzeyinde oluşan M2 çeliğinin alaşım karbürlerinden (NbN, Nb₂CN) kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çelik yüzeylerine uygulanan NbN kaplama tabakalarının, korozyon davranışlarında yarattığı gelişimin gözlemlenmesi amacı ile her üç çelik türü için de saf, nitrürlü ve niyobyum nitrür kaplanmış numunelere ayrı ayrı Gamry marka potansiyostat-galvanostat cihazı kullanılarak korozyon testleri yapılmıştır. Yapılan bu testler üç elektrot tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yardımcı elektrot olarak görev alması adına grafit, referans elektrot olarak görev alması adına ise kalomel kullanılmıştır. Korozyona tabi tutulan alan 0,2874 cm² olarak belirlenmiştir. Deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş olup korozi ortam olarak 0,5 M NaCl, 1 M H₃BO₃, 1 M H₃PO₄ çözeltileri kullanılmıştır. Bu deneyler sonucu tafel ekstrapolasyon (TP) ve elektrokimyasal empedans spektrometresi (EIS) olarak iki farklı eğri elde edilmiştir. Elde edilen eğrilerden korozyonun sahip olduğu akımını (I_{kor}), korozyonun sahip olduğu potansiyeli (E_{kor}) ve korozyonun sahip olduğu hızı değerleri tespit edilmiştir. Test sonucunda oluşan grafikler her bir ortam ve çelik türü için aynı grafik üzerinde gösterilmiş ve bu sayede korozyon gelişiminin gözlemlenmesi daha kolay olmuştur. Bu parametreler doğrultusunda elde edilen tafel grafiklerinin yardımı ile korozyonun sahip olduğu akımını (I_{kor}), korozyonun sahip olduğu potansiyel (E_{kor}) ve korozyon hızı değerleri Gamry Ins firmasının Echem Analyst isimli programından yararlanılarak hesaplanmıştır.

Alternatif akım yöntemlerinden olan EIS yöntemi ile 1 Hz ile 300000 Hz frekans aralığında ve 10 mV rms alternatif voltaj parametrelerinde korozyon testlerin gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen testler ile elde edilen gerçek empedans ve sanal empedans değerleri arasında oluşturulan Nyquist kavislerinin gözlemlenen çapları korozyonun etkisine maruz kalan NbN tabakaların korozyon direnci hakkında değerlendirme yapılmasını sağlamaktadır. Elde edilen kavislerin çap genişliklerinin yüksek olması çeliklerin korozyon direncinin yüksek olduğunu göstermektedir. Geniş çapa sahip eğriler malzemelerin korozyon direnci yüksek olduğunu göstermektedir. Bu veriler göz önünde tutularak NbN kaplama uygulanan AISI 4140, AISI 1010 ve AISI M2 metallerini üç ortam için de (0,5 M NaCl, 1 M H₃BO₃, 1 M H₃PO₄) en yüksek korozyon dayanımına sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Korozyon deneylerinin gerçekleşmesinin ardından korozyonun gerçekleştiği korozi bölgede oluşan elementlerin ve korozyona uğramış bölgenin mikroyapısının incelenmesi amacı ile taramalı elektron mikroskobu yardımı ile SEM ve EDS analizleri gerçekleştirilmiştir.

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile hem yüzey mikro yapıları incelenirken aynı zamanda elementel analiz yapılarak korozyon sonrası yüzeydeki element varlıkları değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler sonucunda işlem görmemiş çelik malzemelerin nitrürlenmiş ve NbN kaplanmış çeliklere göre daha fazla korozyona uğradığı ve yüzeylerinde yüksek orana demir oksit bulunduğu gözlemlenmiştir. NbN kaplanmış yüzeylerde ise korozyonun çok daha yavaş ilerlediği gözlemlenmiştir. Yapılan çalışma sonucu NbN kaplanan 3 çelik türü (AISI 1010, AISI4140, AISIM2) içinde korozyon dayanımında, mekanik özelliklerinde gelişim gözlemlenmiştir.

INVESTIGATION OF NbN COATING AND PROPERTIES OF STEELS BY THERMO-REACTIVE DIFFUSION TECHNIQUE

SUMMARY

Surface engineering endeavors, undertaken with the objective of enhancing the longevity and performance of steel-based materials, have perpetually intrigued humanity. In the pursuit of this objective, a plethora of methods has been devised to augment the characteristics of steel materials. In specific cases, these methods may not induce any chemical composition changes on the surface of steel materials, yet in others, observable alterations in chemical composition manifest on these surfaces.

In instances where studies induce chemical composition changes on the surfaces of steel-based materials, the result is the observation of the formation of a surface layer distinct from the base material. The ramifications of corrosion damages in steel materials can give rise to persistent and/or performance-reducing disadvantages. In our endeavor to mitigate these drawbacks, we have implemented a coating process on our steels. This application aims to eliminate the adverse effects associated with corrosion damages, contributing to the overall improvement of our steel materials.

Within the framework of this study, experiments were conducted, NbN coating was applied to the surfaces of AISI 1010, AISI 4140, and AISI M2 steels using the thermo-reactive diffusion method. The initial objective was to obtain nitrogen-rich layers on steel surfaces to achieve NbN coatings. For this purpose, AISI 1010, AISI 4140, and AISI M2 steels were subjected to the nitriding process (at 530-530°C for 10 hour). Following the nitriding process, niobium was coated on the steel surfaces using the thermo-reactive diffusion method. The niobizing process took place in a solid environment at 1000°C for 2 hours, utilizing the box cementation method, which includes ferro-niobium, ammonium chloride, alumina, and naphthalene. After the niobizing process following the nitriding process, NbN coating layers were obtained on the surfaces of all three steels. The structural characterizations and phase analyses of the coating surfaces obtained using the thermo-reactive diffusion method were investigated.

An array of analytical instruments, including an optical microscope and scanning electron microscope (SEM), SEM-EDS, MAP, line analysis, and X-ray patterns, were employed for this research. Within the scope of these experiments, data on the presence, thickness, homogenization, and diffusion depth of the coating layer were obtained. Steel samples subjected to both coating and nitriding processes were separately taken for each, followed by metallographic techniques. The steels were etched with 3% nital, and surface morphologies were revealed, examining the coatings under an optical microscope. Our examinations revealed a homogeneous and continuous layer on the surfaces of different steel types subjected to the coating process (AISI 4140, AISI 1010, AISI M2).

The steel with the thickest coating layer and the deepest diffusion depth was identified as AISI M2 steel. The alloy elements within AISI M2 steel were effective in greater

diffusion of the coating layer. In the mapping of nitrided and NbN-coated AISI 1010, AISI 4140, and AISI M2 steels, all steels exhibited homogeneous coating layers and surfaces. Nitrided steels had a high nitrogen content on the surface. Additionally, in the mapping of all niobium-coated steels, niobium was found in high amounts on the surface, and as one descended from the surface to the matrix, the nitride ratio increased.

To observe the development of mechanical properties in the mechanical properties of the NbN coating layer, hardness tests were conducted. The hardness measurements of the coating layers, interface matrix, and main material matrix of NbN-coated AISI 1010, AISI M2, and AISI 4140 steels were measured under a 15 gr load using a Vickers hardness indenter. Among the NbN-coated steels, the steel with the hardest coating layer was determined to be AISI M2, followed by AISI 4140 and AISI 1010 steels. The main reason for the highest hardness value of AISI M2 steel is thought to be the alloy carbides (NbN, Nb₂CN) formed on the steel surface.

To observe the development of corrosion behavior caused by NbN coating layers on steel surfaces, corrosion tests were conducted separately for each of the three steel types: pure, nitrided, and niobium nitride-coated samples using a Gamry potentiostat-galvanostat device. These tests were performed using three-electrode technique with graphite as the auxiliary electrode and kalomel as the reference electrode.

The area subjected to corrosion was determined as 0.2874 cm². The experiments were carried out at room temperature, and corrosive environments included 0.5 M NaCl, 1 M H₃BO₃, and 1 M H₃PO₄ solutions. As a result of these experiments, two different curves were obtained, Tafel extrapolation (TP) and electrochemical impedance spectroscopy (EIS).

The corrosion current (*I*_{kor}), corrosion potential (*E*_{kor}), and corrosion rate values were determined from these curves. The graphs obtained from the tests were shown on the same graph for each environment and steel type, making it easier to observe the progression of corrosion. Using these parameters, the corrosion current (*I*_{kor}), corrosion potential (*E*_{kor}), and corrosion rate values were calculated using the Gamry Echem Analyst program.

Corrosion tests were carried out using the EIS method, one of the alternative current methods, in the frequency range of 1 Hz to 300,000 Hz and 10 mV rms alternative voltage parameters. The Nyquist curves created between the real impedance and virtual impedance values obtained from the tests provide insight into the corrosion resistance of the NbN layers exposed to corrosion. The wide diameters of the curves indicate high corrosion resistance of the steels. Considering these data, it was observed that AISI 1010, AISI 4140, and AISI M2 steels coated with NbN have the highest corrosion resistance in all three environments (0.5 M NaCl, 1 M H₃BO₃, 1 M H₃PO₄).

After the corrosion experiments, SEM and EDS analyses were performed using scanning electron microscopy to examine the microstructure of the elements formed in the corrosive region and the corroded region.

While surface microstructures were examined with scanning electron microscopy (SEM), elemental analysis was performed to evaluate the presence of elements on the surface after corrosion. As a result of the evaluations, it was observed that untreated steel materials underwent more corrosion compared to nitrided and NbN-coated steels, and a high proportion of iron oxide was found on their surfaces. In contrast, on NbN-coated surfaces, corrosion progressed much more slowly. The study concluded that among the three steel types coated with NbN (AISI 1010, AISI 4140, AISI M2),

improvements were observed in corrosion resistance and mechanical properties. The developments observed on the coating surface of the steels have been examined and explained.





1. GİRİŞ

Çelik temelli materyallerin kullanım sürelerini ve etkinliklerini artırmak amacıyla gerçekleştirilen yüzey mühendisliği çalışmaları, insanların dikkatini her zaman çekmiştir. Bu bağlamda, çelik malzemelerin özelliklerini iyileştirmek için birçok farklı metod geliştirilmiştir. Elde edilen yöntemlerin bazı örneklerinde çelik temelli malzemenin yüzeyinde herhangi bir kimyasal bileşim değişikliği olmazken, diğer örneklerde ise bu yüzeylerde kimyasal bileşim değişikliği gözlemlenmektedir. Yüzeyde kimyasal bileşim değişikliğine neden olan çalışmalarda, çelik malzemenin yüzeyinde ana malzemedan farklı bir tabaka oluşumu gözlemlenir [1].

Çelik materyallerde korozyonun sebep olduğu kalıcı ve/veya performans düşüren birçok olumsuz etki ortaya çıkabilir. Bu olumsuzluklar, zaman zaman malzeme rezervlerinin azalmasıyla sonuçlanırken diğer durumlarda, sistemin içinde zarar gören bileşenler nedeniyle zaman ve maddi kayıplara yol açabilir, bu da çeşitli olumsuz sonuçlara yol açabilir. Bu tür olumsuzlukların önüne geçmek için malzeme yüzeylerine, difüzyon, fiziksel ve kimyasal çökertme yöntemleriyle yüzeysel kaplamalar uygulanmaya başlanmış ve çelik malzemelerin yüzeyinde korozyon gibi durumlara karşı dayanıklı, sert, yüksek toklukta yüzey kaplamaları elde edilmiştir [2,3].

Çelik temelli malzemelerin kullanım sürelerini ve kullanılabilirlik verimlerini artırmada Termo-Reaktif Difüzyon yöntemi (TRD), en etkili yöntemlerden biridir. Bu araştırmada, AISI 1010, AISI 4140, AISI M2 çeliklerinin nitrasyon ve TRD yöntemleri kullanılarak yüzeyinde homojen bir Niyobyum Nitrür (NbN) kaplaması elde edilmiş ve bu kaplamanın çeşitli ortamlarda korozyon direnci, sertlik değişimi ve yüzeydeki diğer değişimler detaylı olarak incelenmiştir.



2. ÇELİKLER HAKKINDA GENEL BİLGİ

2.1. Giriş

Çelik materyaller, doğal hammadde olan demir madeni, koklaşabilir kömür ve atık giderici gibi unsurlardan türetilir. Bu hammaddeler, yüksek fırın gibi tesislerde kullanılarak ham demir üretimine dönüştürülür. Ham demir üretiminden sonra, çelik üretimi için Çelikhane-Siemens Martin ve oksijen konverterleri gibi tesisler kullanılır. Bu aşamada ham çelik üretilir. Son olarak, haddehaneler gibi tesislerde ham çelik, son çelik ürünlerine dönüştürülür [4]. Ayrıca, çelik üretimi sırasında hurda malzeme kullanımı da yaygındır. Bu hurda malzeme, yarı entegre tesislerde elektrik ark fırınları kullanılarak sünger demir üretiliyor. Demir-Karbon alaşımları genellikle %2 karbon içerir ve bu süreçlerin sonucunda elde edilirler [5].

Çelik ürünleri, sadece kimyasal bileşimleri değil, aynı zamanda farklı şekillendirme teknikleri kullanılarak elde edilen çeşitli ürünlerdir. Bu yöntemler arasında dövme, derin çekme, ekstrüzyon, haddeleme, kaynak birleştirme, döküm ve talaş kaldırma gibi çeşitli işlemler bulunur. Bu farklı işlemlerle çelik, çeşitli şekillere dönüşür. Bu geometriler arasında külçeler, farklı kesitlerde çubuklar, profiller, teller, teneke ve boru gibi çeşitli ürünler yer alır [6]. Ayrıca, bu çelik ürünler çeşitli ısı işlemlere tabi tutularak farklı yapılar kazanır. Bu farklı yapılar, inşaat sektöründe, makine imalatında, madeni eşya üretiminde, ulaşım araçları imalatında, madencilik ve kimya sektörlerinde üretim, depolama, taşıma işlemleri için kullanılır [7]. Bunun yanı sıra, çelik ürünleri inşaat, otomotiv, makine imalatı, elektrikli ev aletleri üretimi, gemi yapımı, ulaşım araçlarının üretimi, enerji sektörü, madencilik, kimya endüstrisi ve daha birçok endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılır [8].

Çeliklerin kullanım alanları, hem kimyasal bileşimi (karbon, diğer alaşım elementleri ve istenmeyen elementlerinin mevcudiyeti ve miktarı) hem de üretim süreçleri (ham haliyle veya nihai ürün haline gelene kadar geçirdiği aşamalar) tarafından belirlenen temel özelliklere dayandığı için, çeliklerin sınıflandırılması ve standardizasyonu oldukça geniş bir şekilde ele alınmalı ve ayrıntılı bir şekilde incelenmelidir [9].

2.2. Çeliklerin Sınıflandırılması

Çeliklerin daha iyi anlaşılması ve detaylı bir şekilde incelenebilmesi için, çeşitli sınıflandırmalar yapılmaktadır. Bu sınıflandırmalar, çeliklerin ortak özelliklerini dikkate alarak gerçekleştirilmektedir. Bu sayede, çeliklerin farklı tipleri ve özellikleri daha kolay bir şekilde tanımlanabilir ve incelenebilir. Sınıflandırmalar, çeliklerin bileşimi, yapıları, kullanım alanları veya üretim yöntemleri gibi faktörlere dayanarak yapılabilir. Bu şekilde, çelikler hakkında daha kapsamlı bilgi edinmek ve farklı çelik türlerini ayırt etmek mümkün olur [9].

2.2.1. Üretim yöntemlerine göre çelikler

- a) **Bassemer ve Thomas çelikleri:** Bassemer ve Thomas yöntemleri, yüksek fırınlar kullanılarak ham demirin çelik haline dönüştürülmesini sağlar. Bu yöntemlerde demir, oksijenle temas ettirilerek karbon ve diğer istenmeyen maddeler giderilir. Sonuç olarak, temizlenmiş ve karbon oranı ayarlanmış çelik elde edilir [10].
- b) **Siemens-Martin çelikleri:** Siemens-Martin yöntemi, Thomas çeliklerinden farklı olarak, oksijen konverteri yerine Siemens-Martin fırınları kullanılarak çelik üretimini gerçekleştirir. Bu yöntemde, hurda çelik ve demir cevheri kullanılır. Siemens-Martin çelikleri genellikle orta karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerdir [11].
- c) **Elektrik ark ve elektrik endüksiyon çelikleri:** Elektrik ark ve elektrik endüksiyon fırınları, elektrik enerjisi kullanarak çelik üretimini gerçekleştirir. Elektrik ark fırınlarında hurda çelik eritilirken, elektrik endüksiyon fırınlarında elektromanyetik indüksiyon prensibiyle ısı üretilir. Bu yöntemler, özellikle hurda çeliklerin geri dönüşümünde kullanılır ve çeşitli çelik türlerini üretebilir.
- d) **Pota çelikleri:** Pota çelikleri, elektrokimyasal süreçler kullanılarak üretilen özel çeliklerdir. Bu yöntemde, çelik eritme işlemi, elektrolitik bir pota içinde gerçekleştirilir. Pota çelikleri, yüksek saflıkta ve özel alaşımlı çelikler olarak kullanılır [12].
- e) **Oksijenli konverter çelikleri:** Oksijenli konverter yöntemi, yüksek fırınlarda üretilen ham çeliğin, oksijenin kontrol edilerek enjekte edildiği bir süreçtir. Bu yöntemde oksijen, karbonu oksitlerken diğer istenmeyen elementleri de uzaklaştırır. Oksijenli konverter çelikleri genellikle yüksek karbonlu çeliklerdir [13].

- f) **Vakum elikleri:** Vakum elikleri, vakum altında üretilen özel elik türleridir. Vakum ortamında gerçekleştirilen işlemlerle çeliklerin saflığı artırılır ve istenilen özellikler elde edilir. Bu elikler, yüksek dayanıklılık, korozyon direnci ve mkemmел menevişlenme özellikleri gibi avantajlara sahiptir.

2.2.2. Uygulama alanlarına göre elikler

Bugün imalat sanayisinde imal edilen çelikler, genellikle belirli bir amaç için üretildikleri için, kullanımları belli işlerle sınırlı olabilir. Bu bağlamda, sadece önemli niteliklere sahip olan kullanımlardan bahsedilecektir [14].

- a) **Yapı elikleri:** Yapı elikleri, inşaat sektöründe kullanılan ve yapıların taşıyıcı elemanları olarak görev yapan çeliklerdir. Genellikle yüksek mukavemet, dayanıklılık ve esneklik özellikleriyle ne çıkarlar.
- b) **Takım yapım işleri:** Takım yapım işleri için kullanılan çelikler, kesme, delme, şekillendirme gibi işlemlerde kullanılan takımların yapımında kullanılır. Bu elikler sert ve aşınmaya dayanıklı olmalıdır.
- c) **Soğuk ve sıcak işlerde:** Soğuk iş: Soğuk iş çelikleri, düşük sıcaklıklarda şekillendirme işlemlerinde kullanılan elik türleridir. Soğuk haddeleme, çekme gibi işlemlerle şekil verilebilirler.
- d) **Hızlı kesme işlerinde kullanılacak elikler:** Hızlı kesme çelikleri, yüksek hızlı kesme işlemlerinde kullanılan çeliklerdir. Bu elikler, dayanıklılık, sıcaklık direnci ve aşınmaya karşı yüksek performans sağlayacak özelliklere sahip olmalıdır.
- e) **Yay yapımında kullanılacak elikler:** Yay yapımında kullanılan çelikler, esneklik ve dayanıklılık özelliklerine sahip olmalıdır. Bu elikler yayların şekillendirilmesi ve gerilmesi sırasında enerji depolama ve geri verme yeteneği sağlarlar.
- f) **Yüksek sıcaklıkların bulunduğu ortamlarda kullanılacak elikler:** Yüksek sıcaklıktaki ortamlarda çalıştırılan çelikler, yüksek sıcaklık dayanımı ve oksidasyona karşı dirençli özelliklere sahip olmalıdır. Örneğin, fırınlar, kazanlar ve egzoz sistemleri gibi uygulamalarda kullanılırlar [15].

2.2.3. Alaşım durumlarına göre elikler

Demir elementi dışında başka bir element içermeyen çelikler alaşımsız olarak adlandırılır. Ancak bu, demirin tek başına bulunduğu anlamına gelmez. Tüm eliklerde

karbon elementi de demirle birlikte yer alır. Eğer başka bir element de yapıya katılırsa, bu durumda alaşımlı çeliklerden bahsedilir [16].

- a) **Sade karbonlu çelikler**, sadece karbon ve demir elementlerinden oluşan ve diğer alaşımlar içermeyen çelik türleridir. Bu çelikler, karbon oranına göre düşük, orta ve yüksek karbonlu olarak sınıflandırılır.

Tablo 2.1. Örnek sade karbonlu çeliklerin teknik özellikleri [27].

AISI NUMARASI	Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Süneklik (% Uzama)
1010	326	181	28
1020	381	204	25
1040	606-779	431-586	34-18
1095	760-1280	511-835	27-11

- b) **Düşük ve orta alaşımlı çelikler:** Alaşım elementleri toplamı %5'ten az olan çeliklerdir. Bu çelikler, sertleşme kabiliyetleri, korozyon direnci ve ısı dayanımı gibi özellikleri geliştirmek için silikon, manganez, krom, molibden, nikel gibi elementler içerir [17].
- c) **Yüksek alaşımlı çelikler**, alaşım elementleri toplamı %5'ten fazla olan çeliklerdir⁴. Bu çeliklerin en önemli iki grubu takım çelikleri ve paslanmaz çeliklerdir. Takım çelikleri, kesme, delme ve şekillendirme gibi ağır işlemlerde kullanılırken, paslanmaz çelikler korozyona karşı yüksek direnç gösterir.

2.2.4. Temel bileşenlerine göre çelikler

Bu isimlendirmede çeliğin bileşiminde en yüksek yoğunluğa sahip olan elemente göre isimlendirme yapılır.

- a) **Karbonlu çelikler:** Karbonlu çelikler, çeliğin ana bileşenini karbonun oluşturduğu ve karbon miktarının mekanik özellikleri belirlediği çelik türleridir.
- b) **Manganezli çelikler:** Manganezli çelikler, çelikte mangan elementinin eklenmesiyle oluşturulan ve manganın mekanik özellikleri geliştiren çelik türleridir.
- c) **Kromlu çelikler:** Kromlu çelikler, çelikte krom elementinin bulunduğu ve kromun oksidasyona karşı direnç sağlayarak çelikleri paslanmaya karşı koruyan çelik türleridir.

- d) Nikeli çelikler:** Nikel çelikler, çelikte nikel elementinin eklenmesiyle oluşturulan ve nikelin mekanik dayanıklılığı artıran çelik türleridir.
- e) Krom Nikel çelikler:** Krom Nikel çelikler, çelikte hem krom hem de nikel elementlerinin bulunduğu ve hem paslanmaya karşı direnç sağlayan hem de mekanik dayanıklılığı artıran çelik türleridir.
- f) Volframlı çelikler:** Volframlı çelikler, çeliğe volfram elementinin eklenmesiyle oluşturulan ve volframın yüksek sıcaklık dayanıklılığı sağlayan çelik türleridir.
- g) Vanadyumlu çelikler:** Vanadyumlu çelikler, çelikte vanadyum elementinin bulunduğu ve vanadyumun mekanik özellikleri geliştiren çelik türleridir.

2.2.5. Mikro yapılarına göre çelikler

Çelikler, mikro yapılarına bağlı olarak farklı sınıflandırmalara tabi tutulabilirler. Mikro yapı, çelikteki tane boyutu, tane sınırları ve fazların düzeni gibi mikroskop altında gözlemlenebilen özellikleri ifade eder.

- a) Ferrit ağırlıklı çelik:** Ferrit ağırlıklı çelikler, ferrit adı verilen bir mikro yapıya sahiptir. Düşük karbon içeriğine sahiptirler ve genellikle yüksek korozyon direnci gerektiren uygulamalarda kullanılırlar.
- b) Ferritik ve Perlitik çelikler:** Bu çelikler hem ferrit hem de perlit mikro yapılarını içerir. Ferritik ve perlitik çelikler hem korozyon direnci hem de mekanik dayanıklılık gerektiren uygulamalarda tercih edilir.
- c) Perlitik çelikler:** Perlitik çelikler, perlite adı verilen bir mikro yapıya sahiptir. Karbon içeriği orta seviyede olan bu çelikler, iyi mukavemet ve tokluk özelliklerine sahiptir ve yaygın olarak kullanılır.
- d) Östenitik çelikler:** Östenit çelikler, östenit adı verilen bir mikro yapıya sahiptir. Yüksek karbon içeriğine sahiptirler ve mükemmel tokluk, mukavemet ve sertlik özellikleri sunarlar. Sıcak işleme ile elde edilirler.
- e) Martenzitik çelikler:** Martenzitik çelikler, martenzit adı verilen bir mikro yapıya sahiptir. Yüksek karbon içeriğine sahip olup, sert ve dayanıklıdır. Sertleştirme işlemi ile elde edilirler.
- f) Ledeburitik çelikler:** Ledeburitik çelikler, ledeburit adı verilen bir mikro yapıya sahiptir. Karbon ve demir karbürlerinin bir karışımıdır. Genellikle yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren uygulamalarda kullanılır.

- g) Beynitik çelikler:** Beynitik çelikler, beynit adı verilen bir mikro yapıya sahiptir. Yüksek karbon içeriğine sahiptirler ve mükemmel sertlik ve tokluk özelliklerine sahiptirler. İyi aşınma direnci sunarlar ve kesici aletler gibi uygulamalarda tercih edilirler [19].

2.2.6. Kalite durumlarına göre çelikler

Çelikleri kalite durumlarına göre sınıflandırmak, çeliklerin özelliklerini ve kullanım amaçlarını daha iyi anlamak için önemlidir. Çeliklerin yaygın olarak kabul edilen kalite durumlarına göre sınıflandırılması:

- a) Kütle çelikleri:** Kütle çelikleri, genellikle inşaat, otomotiv, gemi yapımı gibi alanlarda kullanılırlar.
- b) Kalite çelikleri:** Kalite çelikleri, yüksek mukavemet, sertlik, tokluk ve diğer özel özelliklere sahip olan özel amaçlı çelik türleridir. Özel uygulamalarda, hassas parçaların üretiminde veya yüksek performans gerektiren sektörlerde kullanılırlar.
- c) Soy (asal) çelikler:** Soy (asal) çelikler, çeliğin ana bileşenini oluşturan elementin, çelik özelliklerini belirleyen en önemli element olduğu çelik türleridir. Bu çeliklerde ana element, çeliğin adını ve karakteristik özelliklerini belirler [20].

2.2.7. Fiziki ve kimyevi açıdan çeliklerin sınıflandırılması

Çelikleri fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre sınıflandırmak, kullanılan materyalin özelliklerini daha iyi anlamak ve belirli uygulamalara uygun seçimler yapmak için önemlidir. Çeliklerin fiziksel ve kimyasal durumlarına göre sınıflandırması şöyledir:

- a) Isıya dirençli çelikler:** Isıya dirençli çelikler, yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında mekanik özelliklerini koruyabilen ve termal genleşme ve oksidasyona karşı dirençli olan çelik türleridir.
- b) Manyetik çelikler:** Manyetik çelikler, manyetik alan oluşturma ve manyetik özellikleri kullanma amacıyla tasarlanmış çelik türleridir. Elektrik motorları, transformatörler gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar.
- c) Korozyona dayanıklı çelikler:** Korozyona dayanıklı çelikler, paslanmaya ve diğer çevresel etkilere karşı yüksek direnç gösteren çelik türleridir. Bu çelikler genellikle suya, nemli ortamlara veya kimyasal maddelere maruz kalacak yapılar için tercih edilirler.

- d) Paslanmaz çelikler:** Paslanmaz çelikler, korozyona dayanıklılık sağlayan özel alaşımlara sahip çelik türleridir. Paslanmaz çelikler genellikle hijyenik ve dekoratif uygulamalarda, gıda işleme ekipmanlarında, cerrahi aletlerde ve kimyasal endüstride kullanılırlar [21].

2.2.8. Sertleştirme ortamlarına göre çelikler

Çelikler, mekanik özelliklerini artırmak ve dayanıklılıklarını iyileştirmek için sertleştirme işlemine tabi tutulurlar. Bu sertleştirme işlemi, farklı sertleştirme ortamları ve yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilebilir. Çeliklerin sertleştirme ortamlarına göre sınıflandırılması, hangi yöntemin kullanılacağını belirlemek için önemlidir.

- a) Su çeliği:** Su çeliği, su ortamlarında kullanılan ve suya maruz kaldığında korozyona karşı dirençli olan çelik türüdür. Genellikle gemi yapımı, su boruları, deniz ekipmanları gibi uygulamalarda tercih edilir.
- b) Yağ çeliği:** Yağ çeliği, yağlı ortamlarda kullanılan ve yağa maruz kaldığında oksidasyona ve aşınmaya karşı dayanıklı olan çelik türüdür. Bu çelikler genellikle makine parçaları, dişliler, rulmanlar gibi yağlama gerektiren uygulamalarda kullanılır.
- c) Hava çeliği:** Hava çeliği, atmosferik koşullara maruz kaldığında korozyona karşı dirençli olan çelik türüdür. Bu çelikler genellikle yapısal ve mimari uygulamalarda kullanılır, örneğin köprüler, binalar, otomotiv parçaları gibi alanlarda tercih edilir [22].

2.3. Sade Karbonlu Çelikler

Bu tanımda, sadece karbon elementiyle birlikte demirin ana alaşım elementi olduğu ancak sınırlar dahilinde diğer alaşım elementlerinin de bulunabildiği çelikler ifade edilmektedir [16].

2.3.1. Düşük karbonlu çelikler

Bu gruba, karbon içeriği %0 ile %0,20 arasında olan çelikler dahil edilebilir. Bu çelikler, mekanik özellikler göz önünde bulundurularak genellikle "yumuşak çelikler" olarak tanınır. Dünya çelik üretiminin büyük bir bölümünü oluşturan çelikler arasında yer alan düşük karbonlu çelikler, ısıtma işlem uygulandığında yeterli sertliği elde etme konusunda zorlanabilirler.

2.3.2. Orta karbonlu çelikler

Bu kategoriye dahil olan çelikler, binde 20-50 aralığında karbon içeren çeliklerdir. Karbon içeriğine bağlı olarak orta düzeyde mekanik karakteristiklere sahiptirler. Bu çelik türü, hareketli makine endüstrisinde en yaygın kullanılan sınıftır. Bu grup çeliklerin belirgin özelliklerinden biri, uygun bir ısıtma işlemle yeterli derecede sertleştirilebilmeleridir [14].

Tablo 2.2. Orta karbonlu çeliklerin kimyasal bileşimleri.

Element	% Kimyasal Bileşim
Karbon	0,2 – 0,5
Manganez	0,6 – 0,9
Silisyum	0,15 – 0,3
Fosfor	0,4 max
Kükürt	0,05 max

- Mil çelikleri, karbon içeriği %0,35 ile %0,45 arasında olan çeliklerdir. Mil ve dingil yapımında kullanılırlar. Genel dövme çelikleri ise karbon içeriği %0,25 ile %0,35 arasında olan çeliklerdir [23].
- Aşınmaya dirençli çelikler, karbon içeriği %0,45 ile %0,55 arasında olan çeliklerdir ve ray tekerleği, silindir ve pres kalıplarının yapımında kullanılırlar [24].

2.3.3. Yüksek karbonlu çelikler

%0.5'den daha yüksek karbon içeren çeliklerdir. Doğal olarak yüksek mukavemetli ve düşük süneklik özelliklerine sahip olan çeliklerdir. Isıl işlem uygulamasıyla fevkalade yüksek sertlik kazanabilirler. Bu nedenle aşınmaya dayanıklı ve kesici özelliklere sahip olabilirler [16].

Tablo 2.3. Karbon oranı yüksek olan çeliklerin kimyasal bileşimleri.

Element	% Kimyasal Bileşim
Karbon	0,5'den fazla
Manganez	0,7-1
Silisyum	0,15 – 0,3
Fosfor	0,4 max

Alaşım içermeyen çelikler olan sade karbonlu çelikler, çeliğin temel elementlerinin dışında ekstra element içermeyen çeşitlerdir. Bu elikler, yapı ve takım çelikleri olarak iki ana grupta incelenir [25].

2.4. Alaşımlı elikler

Alaşım elikleri, çeliklere belirli sınırların ötesinde alaşım elementleri ekleyerek özel özellikler kazandıran elik türleridir. Bu elementler arasında krom, nikel, volfram, molibden gibi farklı alaşım elementleri bulunabilir. Bu elikler, çeşitli uygulamalara göre tasarlanır ve kullanılır. Örneğin, kromlu çelikler korozyona karşı dayanıklılığı artırırken, nikel çelikler darbe dayanımını güçlendirebilir. Her bir alaşım çeliği farklı özelliklere sahiptir ve mikro yapılarına, kimyasal bileşimlerine ve uygulama alanlarına göre sınıflandırılır [23]. Toplam alaşım elementinin ve/veya elementlerinin %5'den düşük olanlar, az alaşımlı çeliklerdir. Alaşım elementi ve/veya elementlerinin toplamı %5'den fazla olanlar ise yüksek alaşımlı çeliklerdir.

2.5. Yapı elikleri

a) Normal yapı elikleri

Stahl (St) şeklinde ifade edilen çelikler, karbon içeriği 0,1 ile 0,8 arasında değişen ve çekme dayanımı değeriyle belirtilen çeliklerdir [25]

b) Islah elikleri

İçerdiği karbonun oranı %0,2 ile %0,8 arasında değişen çelikler, fosfor ve kükürt miktarı düşürölerek üretilir. C30, C40, Ck45 gibi çeliklerde karbon miktarı yüzde olarak ifade edilir (örneğin C30, %0,30 karbon içerir). Islah edilmiş çelikler, özellikle karbon içeriği ve kimyasal kompozisyonları nedeniyle sertleştirme işlemi için elverişli olan çeliklerdir. Bu süreç neticesinde belirli bir çekme mukavemeti ve yüksek elastikiyet özellikleri kazanılır. Islah elikleri, çeşitli kullanım sahalarına sahiptir ve makine üretiminde, motor parçalarında, dövme malzemelerde, vida, somun ve eksantriklerde, krank millerinde, akslarda, kontrol ve itici sistem parçalarında, piston kollarında, çeşitli şaftlarda, dişlilerde gibi birçok bileşenin üretiminde kullanılır. Bu nedenle, inşaat ve alaşım içermeyen çeliklerin ardından en büyük üretimi ve kullanımı olan elik türüdür. Sertleştirme işlemi, elik parçanın östenit fazındaki sıcaklığa kadar ısıtılması ve ardından uygun bir ortamda hızlı bir şekilde soğutulması gerektirir.

Sertleştirme için su, tuzlu banyolar, yağ çözeltileri, yağ ve hava gibi değişik ortamlar kullanılabilir [24,25].

c) Sementasyon çelikleri

Karbon oranı %0,02 ile %0,25 arasında değişen çelikler, karbon difüzyonuyla yüzeylerine katı, sıvı ve gaz ortamda karbon emdirilen çeliklerdir (C10, C15, C40). Yüzeyi sert ve aşınmaya karşı dirençli, iç yapısı ise görece yumuşak ve tok olan bileşenlerin üretiminde tercih edilen malzemelerden biri olan sementasyon çelikleri, genellikle karbon oranı düşük, yüksek alaşımlı veya alaşımlı çeliklerden oluşur. Bu özelliklere ulaşmak için sementasyon çeliklerine karbon nüfuz ettirilir. Sementasyon çelikleri, dişli dişlilerden makineli parçalara, piston pinlerinden zincir dişlilerine ve tamburlarına, disklerden kılavuz yataklarına, rulmanlı yataklardan merdanelere, ölçüm ve denetim araçlarından orta ila yüksek mukavemet gerektiren parçalara kadar birçok bileşenin üretiminde kullanılır. Ayrıca, soğuk dövme veya sıcak damıtma işlemleriyle şekillendirilen parçalar ve kesici takımlar da sementasyon çeliklerinden imal edilebilir. Parçanın son şekli belirlendikten sonra uygulanan sementasyon prosedürü, işlem kolaylığı sunar. İstenmeyen sertleşme bölgeleri özel bir kaplama ile muhafaza edilebilir. Sementasyon işlemi sonrasında iç kısımların yumuşaklığı korunur ve çarpılmalar azalır. İç bölgeler kolayca işlenebilir. Sementasyon çelikleri, yüzeyde aynı sertliği elde edebilen yüksek karbonlu çeliklere göre daha ekonomik bir alternatif sunar. Sementasyon işlemi, düşük karbonlu çelik parçalarının yüzeyine karbon emdirme işlemi olarak bilinir [25].

2.6. Takım Çelikleri

Kesici uç olarak takım tezgahlarında kullanılan çelikler, karbon içeriği %0,8 ile %1,5 arasında değişen türlerdir. Bu çelikler, talaşlı veya talaşsız üretim süreçlerinde, kesme, dövme ve sıkıştırma gibi yöntemlerle işlenerek yüksek kalitede sonuçlar elde edilmesini sağlarlar. Takım çelikleri özellikle soğuk işlem gerektiren aletlerin yapımında tercih edilir ve talaşlı ile talaşsız üretimde geniş bir kullanım yelpazesi sunarlar [25].

a) Soğuk iş takım çelikleri

Takım üretiminde sıklıkla kullanılan çelikler, genellikle 200°C'nin altındaki yüzey sıcaklıklarında çalışabilen türlerdir. Hem talaşlı hem de talaşsız üretim süreçlerinde

geniş bir kullanım alanı bulurlar. Soğuk işleme uygun takım çelikleri şu işlemler için tercih edilir; kesme, delme, zımbalama, biçme, baskı, presleme, soğuk ezme, soğuk püskürtme ve soğuk şekillendirme işlemlerinde kullanılan soğuk iş takım çelikleri, Amerikan çelik endüstrisi standartlarına uygun bir şekilde imal edilen AISI serisine ait W1, L3, D3, A2, D6, D1, S2, S1, L6, W1 ve deneylerde kullanılan AISI D2 çeliğinden oluşmaktadır [26].

b) Sıcak iş takım çelikleri

Çoğunlukla 200°C'nin üzerindeki yüzey sıcaklığına maruz kalan ve sürekli olarak 300°C ile 600°C arasındaki ısıya tabi tutulan takımlar için sıcak işlem çelikleri mevcuttur. Sıcak işlem çeliklerinin uygulama alanları şu şekildedir:

- Kalıplama makinelerinde
 - Kalıplar
 - Metal kamlar ve pres silindirleri
 - Çıkarma parçaları, tutucular, iticiler vb.
- Kalıp ve boru preslerinde
 - İç ve ara yüzüklerde
 - Pres kalıplarında
 - Zimbalar ve başlıklarda
 - Yardımcı takımlarda
- Profil pres takımlarında
 - Hafif metal işleme için
 - Ağır metal işleme için
- Dövme kalıplarında
 - Kalıp gövdelerinde
 - Kalıp yardımcı parçalarında

Yüksek sıcaklık koşullarında kullanılan sıcak işlem çelikleri, isimlerinden de anlaşılacağı gibi yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılık sergileyen ve şekillerini

muhafaza eden özelliklere sahiptirler. Bu nitelikleri kazandıran alaşım elementleri arasında tungsten, molibden ve vanadyum yer alır. Sıcak işlem çelikleri, ayrıca nikelin tokluğunu artırarak özelliklerini iyileştirirler ve sıcak aşınma ile sıcaklık dalgalanmalarına karşı dayanıklılık gösterirler. Amerikan çelik endüstrisi normları kapsamında üretilen H serisi 11, 13, 10, 21, 12 gibi çelikler, sıcak iş takım çelikleri grubuna dahil edilen çelikler arasındadır [24].

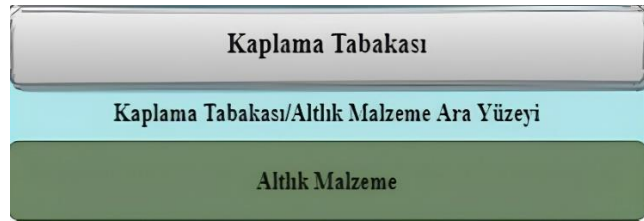
c) Yüksek hız takım çelikleri

Hızlı kesme çelikleri, aynı zamanda hava koşullarında çalışabilen çelikler olarak da bilinir ve bu, özel alaşımların eklenmesi ve ısıtılma işlemleriyle yüksek sertlik, ısıya dayanıklılık ve aşınma direnci elde edilen yüksek alaşımli takım çeliklerinin bir türüdür. Diğer takım çeliklerine göre daha yüksek kesme hızlarında talaşlı üretim işlemlerinde kullanılırlar. Bu çeliklerin en dikkat çekici özelliği yüksek sıcaklıklarda dayanıklı olmalarıdır ve bu özellikleri sayesinde yüksek kesme hızlarında uzun süre dayanabilirler. Bu nedenle, genellikle talaşlı üretimin gerçekleştirildiği yerlerde tercih edilirler. Metal kesme araçları, haddeleme bıçakları ve soğuk şekillendirme takımları gibi matkap benzeri takım çeliklerinden oluşur. Bu sınıflandırma, takım çeliklerini en iyi şekilde kategorize etme yöntemidir ve genellikle karbon içeriği (0,2 ila 2,3 arasında değişen oranlarda) veya alaşım içeriği (sadece orta ve yüksek alaşımli takım çelikleri değil, aynı zamanda alaşımsız takım çelikleri de çeşitli çelik türleri) gibi faktörlere dayanmaz. Kısacası, takım çeliklerinin sınıflandırılması, her bir çelin belirli bir amacı olan farklı özelliklere sahip olması gerektiği gerçeğini yansıtır.

3. ÇELİKLERE UYGULANAN YÜZEY İŞLEMLERİ

Metal bazlı materyallerin, malzeme ve çevre arasındaki etkileşimlerden kaynaklanabilecek yapısal değişiklikleri sınırlama veya tamamen engelleme amacı taşıyan tekniklerden biri, çelik yüzeylerin ikincil bir metal ile kaplanmasını içerir. Yüzey kaplama işlemleri, çelik temelli malzemelerin bir veya daha fazla özelliğini geliştirmek veya iyileştirmek için kullanılabilir. Kaplama işleminden sonra, istenen sonuçlara göre çeşitli kaplama yöntemleri seçilebilir. Bu kaplama tabakası, malzeme ve çevre arasındaki etkileşimde en yakın konumda bulunur. Çelik bazlı materyallerin hangi koşullarda, nerede ve hangi yöntemlerle kullanılacağına ek olarak, alt tabaka malzemesinin türü ve ekonomik faktörler de göz önünde bulundurularak kaplama yöntemi belirlenir [9].

Malzemenin korunması ve kullanılabilirlik verimini artırmak amacıyla kaplama teknikleri sıklıkla tercih edilir. Kaplama kalitesini istenilen düzeyde tutmak için bazı kritik unsurlar vardır. Kaplama prosedürü, seçilen alt tabaka malzemesine uygulandığı için iş parçası, kaplama-alt tabaka arayüzü ve alt tabaka olmak üzere üç farklı bölüm olarak değerlendirilebilir. Bu üç farklı tabakanın temsili bir gösterimi Şekil 3.1'de bulunmaktadır. Kaplama işlemleri sonucunda elde edilen sonuçlardan en üst düzeyde verim alınması için kaplama malzemesinin yüksek yapışma yeteneğine sahip olması gereklidir. Kaplama işlemlerinin malzeme, çevre ve kaplama-malzeme arayüzünde meydana geldiği için bu etkileşimlere özel bir özen gösterilmesi gerekmektedir [14].

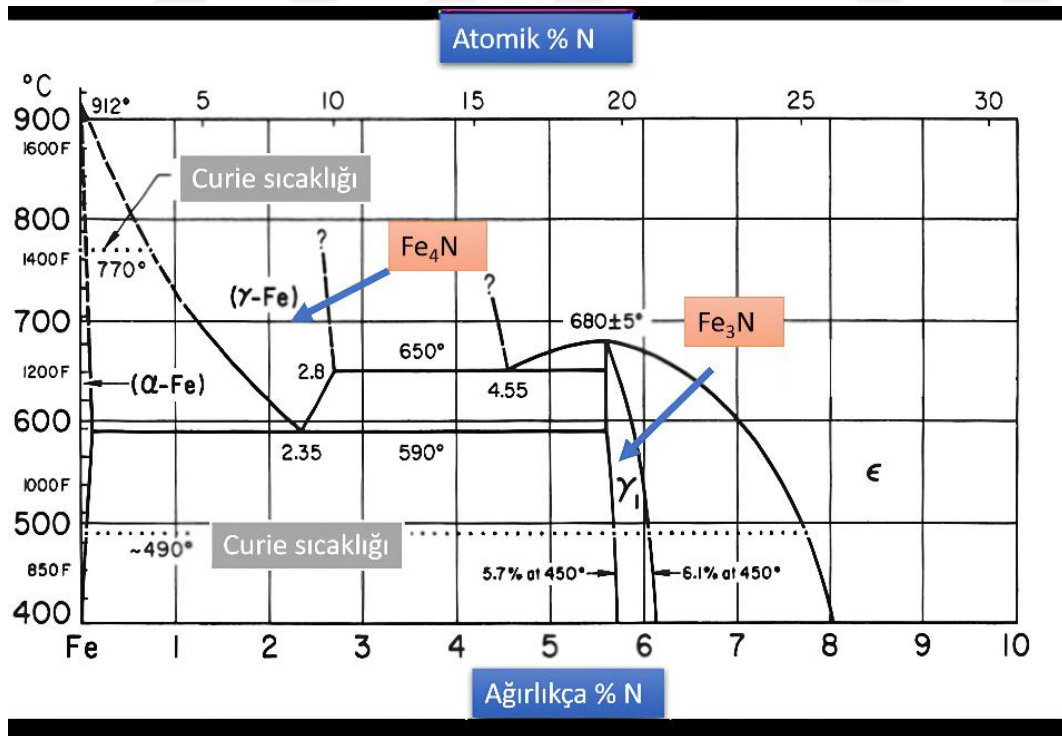


Şekil 3.1. Kaplama işlemi sonucunda, temel malzemenin yüzeyinde bir kaplama tabakasının meydana gelmesi

3.1. Nitrürleme

Nitrürleme işlemi, çelik materyalin yüzeyindeki ferrit faz alanında, genellikle 480 °C ila 650 °C sıcaklıkları aralığında, azot elementinin difüzyonu ile meydana gelir. Borlama, karbürleme ve kromlama gibi tekniklerle kıyaslandığında, nitrürleme işleminde işlem sıcaklığı ve süresi daha düşüktür ve ısıtıl işlem fırınının çalışma koşulları ve standartları kolayca kontrol edilebilir. Bu, nitrürlemenin diğer yüzey sertleştirme metotlarının önüne geçmesine olanak tanır [16].

Nitrürleme işlemi, alt tabaka malzemenin korozyon, aşınma ve yapışma gibi özelliklerini geliştirirken, çelik yüzeyinde 900-1200 HV sertlikte bir kaplama tabakası elde edilebilir. Nitrür yapıcı elementler, alt tabaka malzemesinin yapılarına ve çelik alaşım elementlerine katkı sağlarlar ve nitrürleme işlemi sırasında difüzyon hızını arttırmırlar. Bu özel işlem, gaz atmosferinin, sıcaklığının ve süresinin hassas bir şekilde kontrol edilebildiği özel fırınlarda gerçekleştirilir. Çelik materyallere nitrürleme işlemi uygulanmadan önce, demir-azot denge diyagramı Şekil 3.2'de ayrıntılı olarak gözden geçirilmelidir. Azot içeriği %0.1 olduğunda, azotun demir içindeki difüzyonu zor olduğundan alfa-demir oluşurken, azot içeriği arttıkça Fe_4N ve Fe_3N yapıları meydana gelir [23].



Şekil 3.2. Fe-N denge diyagramı

3.1.1. Nitrürleme yöntemleri

Nitrürleme işlemi, gaz ortamında nitrürleme, toz ortamında nitrürleme, tuz banyosuyla nitrürleme ve plazma (iyon) nitrürleme gibi çeşitli yöntemlerle çeşitli çelik malzeme sınıflarına kolaylıkla uygulanabilir [24].

a) Gaz nitrürleme

Gaz nitrürleme, alt tabaka malzemesinin yüzeyinde azot difüzyonunun gerçekleştiği bir yüzey işlemidir. Bu işlem, amonyak, hidrojen, azot ve/veya karbon monoksit gaz ortamında 450°C ile 600°C sıcaklık aralığında uygulanır. İşlem sırasında çelik malzemeler, fırına yerleştirilir ve kontrollü bir şekilde ısıtılır, ardından azotun çelik yüzeyine difüzyonunu sağlamak için yine kontrollü bir şekilde soğutulur. Kaplama verimliliği, işlem süresi, sıcaklığı ve gaz bileşimi gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir. Kaplama işlemi sonucunda alt tabaka malzemesinin yüzeyinde nitrür bazlı kaplama tabakaları oluşur. Gaz nitrürleme, azotun difüzyonu için uzun süreler gerektirebilmesi ve sistem maliyetinin yüksek olmasına rağmen, güvenli işlem parametrelerine sahip olması sebebi ile en yaygın uygulanan yöntemlerdendir [25].

b) Sıvı nitrürleme

Sıvı nitrürleme, çelik yüzeyine azotun difüzyonu ile gerçekleşen bir yüzey işlemidir ve genellikle siyanür ve siyanat içeren tuz ortamında 500°C ila 600°C sıcaklık aralığında uygulanır. Ancak tuz ortamının yüksek ısı iletkenliği, bu yöntemin kontrollü ısıtma koşullarında uygulanmasını zorlaştırabilir. Bu sorunu önlemek için çelik malzemenin uzun süreler boyunca bu ortamda bulundurulmaması gerekmektedir, aksi takdirde ısı çatlaklar ve deformasyonlar oluşabilir. Bu yöntemde kaplama işleminin ardından hızlı su soğutma işlemleri uygulanarak, ana malzemeye kıyasla daha yüksek aşınma direncine sahip kaplama tabakaları elde edilir [26].

c) Plazma iyon nitrürleme

Plazma nitrürleme, malzeme yüzeylerinde 300-600°C sıcaklıklarda gerçekleşen bir yüzey işlemidir ve plazma ortamında uygulanır. Bu yöntemle elde edilen kaplama tabakası, iki katmandan oluşur: beyaz tabaka ve difüzyon tabakası. Beyaz tabakanın kalınlığı, gaz karışımlarına ve kaplama öncesi yüzey temizleme prosedürlerine bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Hidrojen gazının artması, azotun çeliğin iç bölgelerine daha fazla nüfuz etmesine yol açar ve beyaz tabakanın miktarını azaltır. Kaplamaların verimliliğini artırmak için farklı gazlar kullanılabilir [27].

Diğer nitrürleme yöntemlerine kıyasla, bu teknik kısa sürelerde ve düşük işlem sürelerinde oldukça etkili sonuçlar sunan bir yöntemdir. Kaplama tabakalarından elde edilen verim, özenle uygulanan yüzey temizleme Genellikle plastik ürünler üreten ve işleyen makine silindirlerinin yüzey sertleştirme işlemlerinde, plastik kalıp üretim makineleri ve dişli parçaların üretiminde kullanılır [29].

3.1.2. Nitrürleme sonrası oluşan yapılar

Nitrürleme işlemi sonucunda, çelik malzemenin kaplanması, işlem süresi, sıcaklık, fırın koşulları ve kullanılan gazların karışımına bağlı olarak kimyasal bileşimi üzerinde değişiklikler meydana gelir. Bu değişiklikler, farklı difüzyon bölgeleri ve kaplama tabakalarının oluşmasına neden olabilir. Bu bölgeleri genellikle yüksek azot içeriğine sahip beyaz tabaka, difüzyon bölgesi ve matris bölgesi olarak isimlendirebiliriz [30].

Beyaz tabaka olarak adlandırılan bölge, plastik şekil değiştirme yeteneği çok az olan bir bölgedir. Bu katmanın sertliği fazla olmasına rağmen, plastik şekil değiştirme yeteneğinin zayıf olması sebebiyle nitrürleme işleminden sonra çok kalın oluşması istenmez. Beyaz katmanın kalınlığı, kaplama ortamının koşulları, süresinin uzunluğu ve temizlik işlemleriyle küçültülebilir. Azotun çelik yüzeyinin iç kısımlarına kadar yayıldığı bölge ise yayılma bölgesi olarak isimlendirilir. Yayılma bölgesinin başlangıç noktalarında azot yayılması çok yüksek iken, alt bölgelere doğru karbon elementinin miktarına bağlı olarak azotun yayılması güçleşir ve sonunda azotun yayılmadığı matris bölgesine erişilir [31].

3.1.3. Nitrürleme işleminin uygulama alanları

Çelik malzemelerin dayanıklılığını artırmak ve sert yüzeyler elde etmek amacıyla kullanılan bir yüzey işlemi olan nitrürleme, aşınma ve korozyon nedeniyle oluşan hasarları önlemeye yöneliktir. Bu işlem, azotun yayılmasını hızlandırabilen ve alaşım elementleri açısından zengin olan çelik türlerine kolayca uygulanabilir. Ancak, karbon ile azot arasındaki etkileşim sınırlı olduğundan, alaşım içermeyen çelik tiplerinde uygulanabilirlik kısıtlıdır. Nitrürleme, genellikle sürekli yüklenmeye maruz kalan makine dişlileri, çarklar, miller ve yüksek korozyon-aşınma direnci gerektiren takım çeliklerinde sıklıkla tercih edilmektedir [32].

4. TERMO-REAKTİF DİFÜZYON PROSESİ

4.1. Giriş

Termo-reaktif difüzyon (TRD) işlemi, çelik materyallerin yüzeylerini dayanıklı ve aşınmaya karşı dirençli hale getirmek amacıyla karbür, nitrür ve karbo-nitrür, borür tabakalarının oluşturulduğu bir prosedürü temsil eder. TRD sürecinde, çelik baz malzemesinde bulunan karbon ve azot(nitrürlü çelik), vanadyum, niyobyum, tantal, krom benzeri karbür/nitrür oluşturan elementlerle birleşerek tabaka oluşumu sağlamak amacıyla yayılırlar. Bu yayılan karbon, azot biriktikleri yüzey tabakasında karbür/nitrür oluşturan oluşumu sağlayan elementlerle birlikte etkileşime girer ve sonuç olarak metalurjik olarak bağlı karbür/ nitrür kaplamalar elde edilmiş olur. Bu işlem sayesinde malzemenin yüzeyinde 5-15µm kalınlığında kaplamalar elde edilebilir. Termo-reaktif difüzyon (TRD) yöntemi, geleneksel yüzey sertleştirme yöntemlerinden farklıdır. Geleneksel yöntemlerde karbon ve azot, temel malzemenin yüzeyine dışarıdan yayılarak sertleştirme amaçlanırken, TRD işlemi sırasında temel malzemenin yüzeyinde kaplama tabakasının oluşumu gerçekleşir. TRD yöntemi, konvansiyonel difüzyon metoduyla benzerlik göstermese de kaplama tabakası yine temel malzemenin yüzeyinde oluşur [27].

4.2. Uygulama Yöntemleri

Bu yöntem üç farklı şekilde uygulanabilir. İşlemin gerçekleşeceği ortama göre uygulanacak yöntemin ismi farklılık göstermektedir. Bu yöntemler şunlardır:

- Tuz banyosu yöntemi
- Akışkan yatak yöntemi ve
- Kutu sementasyon yöntemidir [28].

4.2.1. Tuz banyosu yöntemi

TRD tekniğinde çelik bileşenler, çarpılmaları azaltmak ve süreyi kısaltmak için 500° ila 700°C arası bir ısıda tutulur. Daha sonra, hazırlanmış olan elektrot tipi tuz banyosu ya da gazlı ısıtmalı fırında erimiş boraks, karbür veya nitrür oluşturan elementler ve bor karbür, alüminyum gibi indirgeyici ilaveler içeren ortamda 850°C ile 1050°C arası

0,5 ila 10 saat arası bir işlem uygulanır. Banyo ısısı, seçilen altlık malzemenin sertleşme ısısına göre ayarlanır. Tutma süresi, istenilen kaplama kalınlığı ve altlık malzemenin türüne göre belirlenir. Karbür veya nitrür oluşturan elementin katılmasında demir alaşım tozları kullanılabilir [33].

4.2.2. Akışkan yatak yöntemi

Bu teknikte, malzeme bir taşıyıcı akışkan içinde hareket eder; genellikle gaz veya sıvı akışkanlar kullanılarak malzemenin belirli bir konumdan diğerine kontrollü bir şekilde taşınması sağlanır. Akışkan yatak yöntemi, sürtünme azaltma ve homojen karışım elde etme gibi avantajlar sunar, özellikle büyük miktarlardaki toz veya granül formundaki malzemelerin taşınması veya işlenmesi gerektiğinde kullanışlıdır. Gıda, ilaç, kimya, madencilik ve enerji gibi farklı endüstriyel süreçlerde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Öte yandan, akışkan yatakta TRD tekniği için, düzgün yüzeye sahip karbonlu materyal, alümina, karbür/nitrür oluşturan ferro-alaşım tozları ve NH_4Cl aktivatörü kullanılır. Bu malzemeler, belirli bir sıcaklık aralığında akışkanlığın sağlandığı bir ortamda işleme tabi tutulur [28].

4.2.3. Kutu sementasyon yöntemi

Difüzyon yöntemi olarak da adlandırılan kapalı kutu sementasyonu, düşük karbon içeriğine sahip çeliklerin yüzeylerine karbon yayma işlemini içeren bir prosedürdür. Bu teknikte, antik kutu yapıları kullanılmıştır. Bu kutular, karbon kaynağını etkinleştirmek için yüksek sıcaklıkta baryum karbonat gibi katkı maddeleriyle doldurularak CO gazı üretilir. Daha sonra, CO gazındaki karbon atomları hedeflenen malzemenin yüzeyine yayılarak atomik düzeyde birleşir. Günümüzde, kapalı kutu sementasyonu uygulaması büyük ölçüde azalmıştır. Ayrıca, bu yöntemle alüminyum, silisyum, krom ve borlama gibi işlemler de gerçekleştirilebilir [28].

4.3. Kullanılan Altlık Malzemeler

TRD projesinde, içeriğinde karbon bulunduran malzemeler altlık materyali olması adına seçilebilir. Örneğin karbon/karbür kaplamalar bu amaç doğrultusunda tercih edilmektedir. Düşük karbonlu demir ve nikel alaşımları, sementasyon işlemine ve ardından karbür kaplama sürecine tabi tutulabilir. Karbo-nitrür kaplamalar genellikle nitrürlenmiş çeliklere uygulanırken, nitrür kaplamalar nitrür seramiklerinde kullanılabilir. Değişik türde takım çelikleri tipik olarak talaşlı imalat yöntemiyle

şekillendirilirken, hafif ve orta karbon içeren yapı çelikleri genellikle talaşlı imalat süreçlerinde sıkça tercih edilen malzemelerdir. Kaplamanın özellikleri, taban malzemenin kimyasal yapısından farklıdır. Bu nedenle düşük maliyetli ve işlenmesi kolay malzemeler tercih edilir [23].

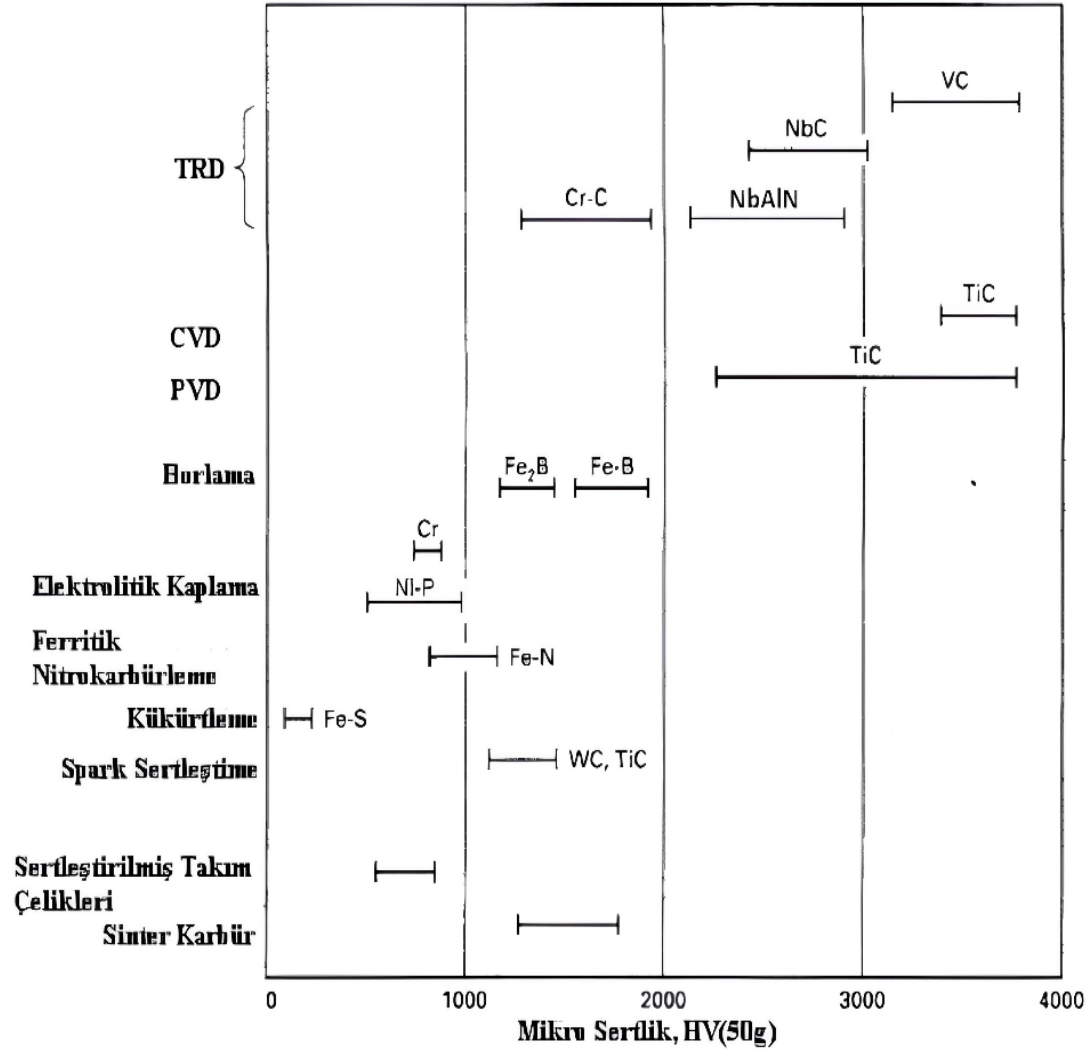
4.4. TRD Yöntemindeki Ana Prensipler

TRD tekniğinde, iş aracının içinde bulunan tozların karışımı üç farklı unsurdan oluşmaktadır. Bu unsurlar şunlardır: katkı elementi malzemesi (örneğin, Fe-Cr veya Fe-V gibi verici malzemeler), bu karışım tozlarının birbirleriyle sinterleşmesini önlemek için inert bir dolgu malzemesi (genellikle Al_2O_3) ve bir aktivatör (çoğunlukla NH_4Cl). Termokimyasal difüzyon yöntemleri gibi TRD işlemi birçok değişkenden etkilenir. Her bir problem çözümü, bu parametrelerin uygun bir şekilde ayarlanmasıyla deneysel çalışmalar sonucunda elde edilir. Aşağıda bu parametreler sıralanmıştır.

- Aktivatör miktarları
- Difüzyonun gerçekleştiği sıcaklığı
- Difüzyonun gerçekleşme süresi
- Verici malzemenin miktarı
- alaşım elementleri karbon içeriği
- Son işlemler (ısıl işlemler)

TRD prosedüründe, tipik olarak kolayca bulunabilen ve ekonomik açıdan avantajlı karışımlar tercih edilir. Ferro alaşımlar, en yüksek oranda kullanılmak üzere seçilir. Ayrıca, daha maliyetli olabilen ancak yüksek saflıkta metal tozlarıyla çalışmak da tercih edilebilir. Karışım bileşenlerinden biri olan aktivatörler de kritiktir. Aktivatörler, izotermal ısıtma sırasında ferro alaşım elementi ile etkileşime girerek uçucu metal halojenürler oluştururlar, böylece aktif bir ortam sağlanır. Farklı halojenür tuzları (örneğin NaF, Cl, MgF, Br, NH_4F vb.) çeşitli aktivatörler olarak kullanılabilir. Aktivatör seçiminde altlık malzemesinin türü ve ferro alaşım elementlerinin kısmi basıncının oluşturacağı aktif gaz ortamı büyük önem taşır. Proses sırasında kullanılan altlık malzemesinin karbon içeriğine bağlı olarak, düşük karbon miktarında metalik kaplamalar elde edilirken, yüksek karbon içeriğinde ise ferro alaşımın türüne bağlı olarak seramik esaslı kaplamalar üretilir. TRD yöntemiyle oluşturulan kaplamalar, altlık malzemenin dayanıklılığını artırmak amacıyla genellikle 800-850°C sıcaklıklarında ısıl işleme tabi tutulur [34]. Şekil 4.1’de en yüksek sertlik değerine

sahip kaplamaların genellikle TRD yöntemi ile elde edilen kaplamalar olduğu görülmektedir. Tablo 4.1'de ise TRD yöntemi ile elde edilen çeliklerin kullanım alanlarına örnekler verilmiştir. TRD kaplamanın kullanım alanının çeşitliliği tablodan anlaşılmaktadır.



Şekil 4.1. Kaplama ve sertlik ilişkisi.

4.5. Niyobyum (Kolombiyum)

Özellikle Amerika Birleşik Devletleri'nde (A.B.D.) columbium olarak da adlandırılan niyobyum, 1949'da Uluslararası Kimya Birliği (International Union of Chemistry) tarafından bu isimle tanımlanmıştır. İsmi, Lydia mitolojisinin kahramanlarından Tantalos'un kızı Niob'dan gelmektedir. Aslında, Nb kimyasal sembolüne sahip olan niyobyum, niobit (ya da columbit ya da tantalit) cevherlerinden elde edilir ve tantaldan ayrılarak ilk kez Alman kimyacı Heinrich Rose (1795-1864) tarafından niyobyum olarak adlandırılmıştır.

Tablo 4.1. TRD yöntemi ile kaplanan çeliklerin kullanım alanları.

Uygulama	Takım veya Makine Parçaları	İlgili Ürünler ve Endüstrideki Yeri
Sac Metal Presleme	Bükme Kalıpları, Çizim Kalıpları, Çeşitli Şekillendirme Kalıpları, Şekillendirme Silindirleri, Kesme Kalıpları, Delik Açma Makineleri, Kesme Bıçakları, Kam Levhaları, Rehber Bloklar, Pilot Pimleri vb. Delikli Zimbalar, Altıgen Zımbalı Kalıplar, Çapraz Oyuk Başlı Vidalar İçin Punçlar, Döner Kepçe Kalıpları, Ekstrüzyon	Otomobil Parçaları, Bisiklet Parçaları, Çeşitli Makine Parçaları, Ev Aletleri vb.
Soğuk Dövme	Zimbaları ve Kalıpları, Sıkışan Zimbalar ve Kalıplar, Ebatlama Zimbaları ve Kalıpları, Ütüleme Punçları Ve Kalıpları, Zimbalar, Zimba Pimleri, Rulo Şekillendirme Rulolar, Kırpma Bıçakları Vb.	Otomobil Parçaları, Bisiklet Parçaları, Cıvata ve Somunlar, Çeşitli Makine Parçaları, vb.
Sıcak Dövme	Pres Döküm Kalıpları, Kapalı Kalıp, Dövme Kalıpları, Çapak Alma Kalıpları, Rulo Şekillendirme Silindirleri, Ekstrüzyon Kalıpları, Kırpma Bıçakları vb.	Otomobil Parçaları, Bisiklet Parçaları, Cıvata ve Somunlar, Çeşitli Makine Parçaları, vb.
Tel İmalatı	Çimentolu Karbürler, Haddeleme Makaralar, Kesme Bıçakları, Çekme Kalıpları, Soyma Kalıpları vb.	Lastik Çelik Telleri, Elektrik Telleri, Telgraf Telleri, Kaynak Telleri, Çeşitli Teller vb.
Tel Şekillendirme	Bükme Kalıpları, Sarım Milleri, Kesme Bıçakları vb.	Kangal Yay, Tel Fırça vb.
Toz Metalürjisi	Sıkıştırma Kalıpları, Merkez Göbekleri, Şekillendirme Kalıpları, Şekillendirilmiş Refrakter Ürünler İçin Kesici Bıçak, Karıştırma Çubukları, Ölçme Ölçüsü İçin Fiş Göstergesi vb.	Çeşitli Toz Metalürjisi Ürünleri, Mıknatıslar, İzolatörler vb.
Alüminyum Ekstrüzyon	Ekstrüzyon Kalıpları, Boru Ekstrüzyon Mafsalları vb.	Kapı Kanalı, Alüminyum Boru
Döküm	Alüminyum ve Çinko Kalıp Dökümleri, Boşluk Eklemeleri, Döküm Burçları, Döküm Yayıcıları, Sıkma Pimleri ve Burçları, Yer Çekimi Döküm Pimleri, Çapak Alma Araçları, Kum Kalıplama İçin Aşınma Parçaları İçin Çekirdek ve Çekirdek Pimleri	Otomobil Parçaları, Bisiklet Parçaları, Çeşitli Makine Parçaları, Ev Aletleri vb.

Tablo 4.1. (Devamı). TRD yöntemi ile kaplanan çeliklerin kullanım alanları.

Plastik Ve Lastik Şekillendirme	Püskürtme Tabancaları, Pelet Bıçakları, Kesme Bıçakları, Enjeksiyon Vidaları, Ekstrüzyon Vidaları, Ekstrüzyon Manşonları, Vidalı Uçlar, Kontrol Halkaları Gibi Çeşitli Kalıplar, Ekstrüzyon Kalıpları, Kalıplama Kalıpları, Çekirdek Pimleri, Çekirdekler, Kalıp Plakaları, Filmler İçin Merdaneler, Geri Dönüşsüz Valfler, Döküm Burçlar, Torpido, Sıcak Şerit Uçlar, Çelik Ekler İçin Kılavuz vb.	Otomobil Parçaları, Bisiklet Parçaları, Çeşitli Makine Parçaları, Ev Aletleri vb.
Kereste İmalatı	Kesici Aletler vb.	
Kağıt İşleme	Parçalayıcı Bıçaklar, Kesme Bıçakları, Makas, Oluklu Mukavva İçin Rulolar Vb.	
Tekstil / Deri İşleme	Kesme Bıçakları, Makas	
Tarım	Pirinç Kesim Bıçakları	
Boru Şekillendirme	Sıkıştırma Parçaları	
Cam Kalıplama	Şişirme İçin Sızdırmazlık Konileri, Cam Şişe İçin Konveyör Parçaları Delme Burçları, Tornalama Merkezleri, Takım Arızalarını Kontrol Etmek İçin Kontak Plakaları, Taşlama Merkezleri, Konumlandırma Parçaları, Destekleme Blokları, Öğütme Taş Tutucuları, Kum Püskürtme Nozulları vb.	
Kesme Ve Öğütme	Sıkma Uçları, Tespit Pimleri, Tel Sarma Kılavuzları, Perçinleme Makinesinin Çeneleri, Ultrasonik Honlama İpuçları, Soket Anahtarları, Kalite İşaretleme Punçları, Sürücü Bitleri Vb.	
Yiyecek Hazırlama	Ekstrüzyon Plakaları, Homojenizatör Parçaları, Bıçaklar	
Otomobil	Makaralı Zincir Bileşenleri, Distribütör Parçaları	Otomobiller, Motorsikletler, Bisikletler
Pompa Elemanları	Kanatlar, Pistonlar, Silindirler, Sprey Nozülleri, Torikoid Pompanın Yan Plakası, Valfler, Nozüller	
Makinalar	Çeşitli Aşınma Parçaları	

Niyobyum ve tantalı niobit cevherlerinden ayırmak oldukça zor ve maliyetlidir. Bu nedenle saf niyobyum, ekonomik olarak ilgi çekmeyen ve nadir kullanılan bir metal olarak kabul edilmiştir. Gaz emme özelliği sayesinde, bu metal özellikle vakum tüp üretiminde kullanılır. En önemli rolü ise çelik ve diğer metallerde bir alaşım elementi olarak görev yapmasıdır; örneğin, bazı alüminyum alaşımlarına tane inceltici olarak eklenir. Niyobyum, Amerika kıtasında Kolombiyum olarak da bilinir. Bu element, doğada kimyasal özellikleri nedeniyle tantalyum ile birlikte bulunur. Ekonomik açıdan önem taşıyan niyobyum ve tantalyum mineralleri niyobit-tantalit ve piroklor-mikrolit grupları olarak adlandırılır. Niyobit-tantalit grubunda demir, mangan, niyobyum ve tantalyum oksitler izomorfiktir, yani aynı kristal yapısına sahiptirler. Grubun genel formülü $[(Fe,Mn)(Nb,Ta_2O_6)]$ 'dir. Eğer bir mineralin Nb_2O_5 içeriği, Ta_2O_5 içeriğinden fazlaysa, bu mineral niyobit (kolumbit) olarak adlandırılır; aksi takdirde tantalit olarak bilinir. Aynı özellikler, piroklor-mikrolit grubu için de geçerlidir. Bu grup, genel formülü $[Ca_2(Nb,Ta)_2O_6(OH,F)]$ taşıyan mineralleri içerir. Eğer bir mineralin Ta_2O_5 içeriği fazlaysa, bu mineral mikrolit olarak adlandırılır; Nb_2O_5 içeriği fazlaysa ise piroklor olarak adlandırılır [35].

4.5.1. Niyobyumun özellikleri

Niyobyum, kimyasal ve fiziksel özellikleri açısından oldukça çeşitli ve ilgi çekici bir metalden oluşur. Sertlik bakımından dikkat çekici bir yapıya sahiptir ve aynı zamanda cilalı ve parlak bir yüzeye sahiptir. Renk olarak genellikle gri veya gümüş beyazdır, bu da estetik bir görünüm kazandırır. Niyobyumun atom ağırlığı 92,906 ve atom numarası 41'dir, ancak radyoaktif olmayan formu atom ağırlığı 93'e sahiptir [36]. Ayrıca, çeşitli radyoaktif izotopları da bulunur ve bu izotopların atom ağırlıkları 89 ila 101 arasında değişir. Yoğunluğu ise $8,4 \text{ g/cm}^3$ 'tür, bu da niyobyumu diğer metallerden ayıran önemli bir özelliktir. Niyobyum, yüksek sıcaklıklarda oksijen, karbon, halojenler, azot, kükürt ve diğer ametallerle reaksiyona girme eğilimindedir. Özellikle 300°C 'nin üzerindeki sıcaklıklarda hidrojen, oksijen, nitrojen ve karbon gibi elementlerle etkileşime girerek sert empüritelerin oluşmasına yol açabilir. Bu tür tepkimeleri önlemek için niyobyum, başka bir metal ile kaplanabilir veya vakum veya inert bir ortamda korunabilir. Niyobyumun dayanıklılık özelliği de dikkate değerdir. Birçok korozyon ortamına karşı dayanıklı olup organik asitlere, sıvı metal ortamlarına ve ergimiş tuz banyolarına karşı direnç gösterir. Niyobyum, korozyon ortamlarda pasif bir oksit filmi oluşturarak korozyona karşı dayanıklılığını artırır [37]. Ancak yüksek

konsantrasyona sahip asit mineralleri içeren ortamlarda, tantala göre daha düşük bir dayanıklılığa sahip olabilir. Ayrıca, niyobyumun çeşitli asit ortamlarına karşı dayanıklı olması da önemlidir. 100°C'nin altındaki sıcaklıklarda, güçlü organik asitlere, hidroflorik asit içeren asitlere (HF), hidroklorik asit (HCl), hidroiyonik asit (HI), hidrobromik asit (HBr), sülfirik asit (H₂SO₄) ve fosforik asit (H₃PO₄) gibi mineral asitlere karşı dayanıklıdır [38]. Bu özellikleri sayesinde niyobyum, birçok endüstriyel uygulamada tercih edilen bir malzemedir ve geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Tüm bu özellikleri bir araya getiren niyobyum, benzersiz özellikleriyle bilimsel araştırmalar, endüstriyel uygulamalar ve teknolojik gelişmeler açısından büyük bir öneme sahiptir.

4.5.1.1. Fiziksel özellikleri

Niyobyum, doğal formunda yumuşak ve esnek bir metaldir. Parlak yüzeyi, platinimsi ya da çelik gibi görünür. Ayrıca, niyobyum oksitlenme ve korozyona karşı oldukça dayanıklıdır, ancak 400°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda oksidasyona eğilimlidir. Niyobyum, demirle tamamen karışabilir özelliğe sahiptir, bu da kaynak ve ısıtma işlemlerinde istikrarlı bir performans sunar. Bu nedenle, Ferro niyobyum olarak bazı paslanmaz çeliklere katkı maddesi olarak kullanılır. Ayrıca, yüksek sıcaklıkta dayanıklı nikel esaslı alaşımların önemli bir bileşenidir ve yüksek mukavemetli yapı çeliklerine eklenerek performanslarını artırır. Niyobyum, alkali metallerin eriyik halinin etkisine karşı dayanıklıdır ve düşük termal nötron tepkime kesiti gibi özelliklere sahiptir, bu nedenle nükleer reaktör çekirdeklerinde yaygın olarak kullanılır. Ayrıca, niyobyumun katılaşma özelliği, sıcak baskı kalıplarının üretiminde kullanılan karbürle birleştiğinde daha da sertleşir böylece darbelere ve yüksek sıcaklıklara karşı daha dayanıklı hale gelir [39]. Tüm bu özellikleri ve kullanım alanları sayesinde, niyobyumun malzeme bilimi ve endüstriyel uygulamalarda önemli bir rol oynadığını söylemek mümkündür.

4.5.1.2. Kimyasal özellikler

Niyobyum, tuzlu çözeltilere karşı olağanüstü korozyon direncine sahiptir. Ancak, 200°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda korozyona karşı hassas hale gelir. Neyse ki, 500°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda korozyon miktarında ani ve hızlı bir değişim gözlenmez. Örneğin, 980°C'de, oksidasyon hızı 430 mm/yıl değerine ulaşır. Ayrıca, yüksek sıcaklıklı sıvı metallerde iyi bir korozyon direnci sergiler [40].

Niyobyumun korozyon direnci, çeşitli ortamlarda kullanılmasını ve endüstriyel uygulamalarda güvenilir bir seçenek olmasını sağlar [41]. Yüksek sıcaklıkta çalışan sistemlerde, niyobyumun korozyona karşı dayanıklılığı sayesinde uzun ömür ve güvenilirlik sağlanır. Bu da niyobyumun metalürji, kimya, enerji ve nükleer endüstriler gibi çeşitli alanlarda tercih edilmesinin bir nedenidir.

Sonuç olarak, niyobyumun korozyon direnci, özellikle yüksek sıcaklık ve tuzlu çözeltiler gibi zorlu koşullar altında bile etkileyici bir performans sergilemesini sağlar. Bu özelliği, niyobyumu birçok endüstriyel uygulamada değerli bir malzeme yapar.

4.5.2. Reaksiyonları

Niyobyum metalinin normal şartlarda havada kararlı kaldığını ifade etmek mümkündür, zira metalin yüzeyini kaplayan ince oksit tabakası, hava ile etkileşimini önler.

a) Su ile reaksiyonu

Normal koşullarda niyobyum metalinin su ile tepkimeye girmemesi beklenir. Ancak, niyobyum metalinin çevresel sıcaklığa bağlı olarak halojenlerle reaksiyona girerek niyobyum halojenürlerini meydana getirdiği gözlemlenir.

b) Asit ile reaksiyonu

Niyobyum, normal oda sıcaklığında asitlerle tepkimeye girmez. Bununla birlikte, hidroflorik asit (HF) veya HF ve nitrik asit (HNO₃) karışımında çözünür.

c) Baz ile reaksiyonu

Niyobyum metali, erimiş alkali maddelere karşı reaktif değildir ve yavaş bir şekilde çözünebilir. Bu özellik, niyobyumun dayanıklılığını ve stabilitesini vurgular, özellikle kimyasal ortamlarda kullanıldığında güvenilir bir malzeme olmasını sağlar. Sonuç olarak, niyobyumun asitlerle ve bazlarla tepkime vermeme özelliği, malzemenin dayanıklılığını ve kullanım çeşitliliğini artırır. Bu da niyobyumun endüstriyel sektörlerde önemli bir role sahip olmasını sağlar.

4.5.3. Dünya niyobyum rezervleri

Niyobyumun büyük bir kısmı, dünya çapında piroklastik ve mikrolit içeren cevher yataklarındaki rezervlerden kaynaklanmaktadır. Geri kalan miktar ise pegmatitlerde ve plaser yataklarında bulunmaktadır. Plaser tipi yataklarda niyobyum, niyobit (kolumbit) ve tantalit olarak bulunmaktadır. Kolayca zenginleştirilebilmesi nedeniyle,

niyobyum konsantresinin plaser tipi yataklardan elde edilmesi tercih edilmektedir. Dünya genelinde niyobyum rezervleri, ülkelere göre farklılıklar göstermektedir [42].

Tablo 4.2. Dünya niyobyum rezervleri.

Ülkeler	Rezervleri (ton)
Brezilya	16000000
Kanada	1600000
Amerika Birleşik Devletleri	210000
Toplam	17000000

4.5.4. Niyobyum üretim yöntemi ve teknolojisi

Niyobyum, özellikle özel çeliklerin üretiminde yaygın bir şekilde kullanılan ferro-niyobyum ile öne çıkar. Niyobyum minerali, ilk olarak alkali bir çözelti ile ardından hidroflorik asit yanmasıyla çözeltiden çıkarılır. Tantal, sıvı-sıvı ekstraksiyon yöntemi kullanılarak bu çözeltiden ayrıştırılır. Bu işlemde, tantal tuzu metil izobütil keton (MIBK, 4-metil pentan-2-on) ile ekstrakte edilirken, niyobyum çözeltide kalır. Hidroflorik asit içeren çözelti, MIBK çözeltisi ile ekstrakte edilerek organik bir çözelti elde edilir ve daha sonra bu çözeltideki niyobyum okside dönüştürülür. Niyobyumun saf metalik formu, karbon veya sodyum kullanılarak indirgenerek elde edilir. [43].

Zenginleştirme süreci sonucunda elde edilen konsantreler, ferro-niyobyum üretiminde alümino-termik reaksiyonlar kullanılarak değerlendirilir. Elde edilen ferro-alaşım, yaklaşık olarak %40-60 niyobyum ve %20-25 tantal içeren bir bileşime sahiptir. Ayrıca, tantal üretimi sırasında geriye kalan çözeltiden potasyum fluotantalatın kristalleşmesinden sonra niyobyum elde edilebilir. Tantal tamamen çözeltiden uzaklaştırıldıktan sonra, HCl eklenerek niyobyumun pentoksit formunda çökmesi sağlanır. Niyobyum metalinin üretimi için, niyobyum pentoksit niyobyum karbür ile karıştırılır, preslenir ve sonunda niyobyum metalini toz haline dönüştürene kadar vakum altında ısıtılır.

Tablo 4.3. Ferro niyobyum kimyasal bileşimin özellikleri

Malzeme Tanımı	Metalik Niyobyum ve Demir Alaşımı
Kullanım Alanı	Niyobyum Alaşımlandırma
Kimyasal Özellikleri	Nb %65.2, S %0.056, Si % 0.43, Al %1.59, P % 0.116
Yoğunluk	8,1 gr/cm ³
Ergime Sıcaklığı	1550° C

4.5.5. Üretim yapan ülkeler ve firmalar

Niyobyum üretiminin büyük bir bölümü, Brezilya ve Kanada'da bulunan üç farklı madende gerçekleştirilir. Bu madenlerin ikisi Brezilya'da yer alırken, biri de Kanada'dadır [44]. Kolumbit kaynaklı niyobyum üretimi, zaman içinde azalmıştır. Brezilya'daki Pitinga madeni hala kolumbit üretimine devam etmektedir ve bu yatak, niyobyum, tantalum ve kalay üretimi için kullanılır. Paranapanema şirketi tarafından işletilen bu maden, elde edilen konsantrelerin San Paulo'daki işleme tesislerine taşındığı bir merkez olarak faaliyet gösterir. Niyobyum üretimi için başlangıçta konsantreler üretilir ve ardından nihai ürünler elde edilir [45].

4.5.6. Tüketim ve kullanım alanları

Niyobyum (Nb), güçlü paslanmaz çeliklerin üretiminde sıkça kullanılan bir elementtir. Bu alaşımlar, sadece güçlü değil aynı zamanda boru hatlarının inşasında gerekli diğer özelliklere de sahiptir. Ayrıca, nükleer teknolojide termal nötronlara karşı düşük yutma kesiti nedeniyle kullanılır [46]. Özellikle Gemini uzay araçlarının yapısal bileşenlerinde, Space Shuttle Programı Uzay mekiklerinin bazı bileşenlerinde, Mars keşif rovers'larının yapısal bileşenlerinde niyobyum kullanılmıştır [47]. NbZr alaşımından yapılan süper iletken teller, güçlü manyetik alanlarda bile iletkenliği sürdürebilme özelliğine sahiptir ve güçlü ve dayanıklı mıknatısların yapımında kullanılır. Ayrıca, kuyumculuk sektöründe de geniş bir kullanım alanına sahiptir. Niyobyum, nükleer reaktörlerde kullanılan paslanmaz çelik alaşımlarının yanı sıra jet ve füzelerin, kesici aletlerin ve boru hatlarının yapımında da önemlidir. Çelik endüstrisi, hemen hemen tüm demir alaşımlarının üretiminde niyobyumun %90'ını kullanır. Ferro-niyobyum, HSLA çelikleri, paslanmaz çelikler, düşük alaşımlı çelikler ve süper alaşımlar gibi dört ana çelik türünün üretiminde yaygın olarak kullanılır. HSLA çelikleri, ferro-niyobyumun en büyük tüketicisidir ve niyobyum içeriği

genellikle %0,35 ila %0,1 arasında değişir. Ayrıca, niyobyum karbür, kesici aletlerin ve ekipmanların yapımında kullanılan en sert maddelerden biridir. Uzay, havacılık, nükleer, elektronik vb. endüstriyel sektörler, niyobyum metalinden ve niyobyum esaslı alaşımlardan giderek daha fazla faydalanmaktadır [48]. Niyobyum birçok alanda kullanım alanı bulmaktadır. Bunlardan biri olan levha Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Saf ferro-niyobyumdan elde edilen levha.

Niyobyum, birçok endüstriyel sektörde geniş bir uygulama yelpazesi bulunan önemli bir elementtir. Gaz emme kabiliyeti sayesinde, özellikle vakum tüplerinin üretiminde hayati bir rol oynar. Bu tür tüpler, elektronik cihazlar ve iletişim sistemlerinin vazgeçilmez bileşenlerindendir ve niyobyumun gaz emme yeteneği, bu tüplerin içindeki hava basıncını düşürerek daha verimli bir çalışma sağlar. Aynı şekilde, paslanmaz çelik üretiminde niyobyumun önemi büyüktür; yüksek sıcaklıklarda korozyonu engelleme kabiliyeti sayesinde paslanmaz çeliklerin hazırlanmasında kullanılır ve eklenmesi, krom çeliklerini daha işlenebilir hale getirirken dayanıklılıklarını artırır. Süper iletkenlik özelliği, niyobyumun zirkonyum ve niyobyum-kalay gibi alaşımlarının elektronik, nükleer ve havacılık endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmasını mümkün kılar [49]. Niyobyumun bileşikleri, özellikle karbon bileşiği, kesici takımların ve ekipmanlarının üretiminde son derece sert malzemeler olarak kullanılır. Geniş kullanım alanları ve özel özellikleri sayesinde niyobyum, birçok endüstriyel sektörde kritik bir rol oynamaktadır ve devam eden araştırma ve geliştirme çalışmaları, niyobyumun özelliklerinin daha da geliştirilmesini ve yeni uygulama alanlarının keşfedilmesini desteklemektedir [50].

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Giriş

Yapılan çalışmada, TRD yönteminden yararlanarak içerisinde belirli miktarlarda alaşım elementleri ihtiva eden AISI 1010, AISI M2 ve AISI 4140 çelik malzemeler altlık olarak kullanılarak bu altlıkların yüzeylerine NbN kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Altlık olarak kullanılan çelikler 530°C’ de nitrasyon işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem bir saat süre ile uygulanmıştır. Nitrasyon işlemine tabi tutulan bu çeliklerin yüzeylerine 1000°C’de iki saat süreyle TRD yöntemi ile niyobyum nitrür kaplama işlemi uygulanmıştır. Niyobyum nitrür kaplanan çelik yüzeylerinin mikroyapıları, faz analizleri, mekanik ve korozyon özellikleri incelenmiştir.

5.2. Deneylerde Kullanılan Numuneler ve Kimyasal Analizleri

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda AISI 4140, AISI 1010 ve AISI M2 çelikleri altlık malzeme olarak kullanılmıştır. AISI 1010 çeliği karbon bakımından fakir bir çelik türüdür. AISI 1010 çeliği genellikle konstrüksiyon uygulamalarında kendine kullanım alanı bulmaktadır ve ek olarak diğer endüstriyel alanlarda da kullanım alanları mevcuttur. Deneyde kullanılan diğer altlık türü olan AISI 4140 çeliği ise karbon oranı orta iken düşük alaşım oranına sahip çelik grubuna dahil olmakla birlikte mukavemet gerektiren sanayi parçalarında (mil, dişli, pim vb.) kullanımı oldukça yaygındır. Kesici/delici takımlarda kullanımı oldukça yaygın olan AISI M2 çeliği ise bir yüksek hız takım çeliği grubuna dahildir [51] ve deneysel çalışmalarda kullanılan diğer altlık malzemesidir.

Altlık malzeme olarak kullanılan çeliklerin kimyasal bileşim analizleri Thermo-Jarrel ASH-BAIRD Corp DV-6S 3063A marka spektral analiz cihazı yardımı ile gerçekleştirilmiş olup Tablo 5.1’ de verilmiştir.

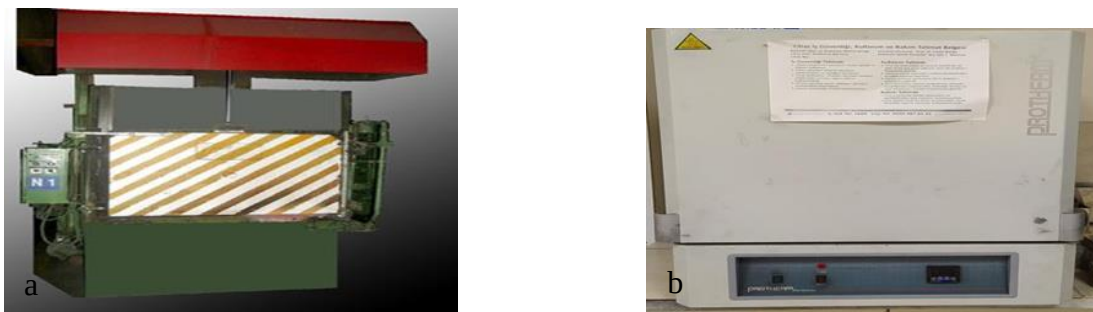
Tablo 5.1. AISI M2, AISI 1010, AISI 4140 çeliklerinin spektral analizi.

Çeliğin Cinsi	Kimyasal Bileşimi (% Ağırlıkça)									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	W	V
AISI 1010	0,12	0,11	0,05	0,003	0,023	0,012	0,029	0,02	-	-
AISI 4140	0,40	0,19	0,79	0,009	0,013	0,89	0,80	0,16	0,02	0,01
AISI M2	0,71	0,47	0,27	0,038	0,025	3,45	0,12	3,45	14,77	1,55

5.3. Deneylerde Yararlanılan Ekipmanlar ve Cihazlar

5.3.1. Kaplama fırınları

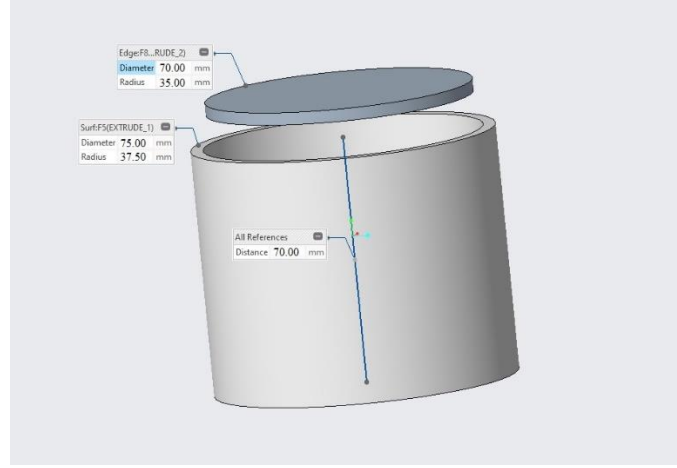
TRD yönteminde gaz çıkışlarının fazla yoğun olması nedeni ile atmosfere açık fırınlar kullanılmaktadır. Deneysel çalışmamızda TRD yöntemi ile kaplama işlemi Protherm Furnaces firmasının atmosfere açık plf serisi fırın kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 1250°C plf serisi olarak adlandırılan fırınlar 1250°C kadar ısıtma kapasitesine sahiptir. Ayrıca bu tip fırınlar, yapılacak işlemle için önden yüklemeli kolay kullanım sunan bir fırın tipine sahiplerdir. Kaplama işlemleri tuğla ve fiber yalıtım elemanlarının kullanıldığı ve $\pm 1^\circ\text{C}$ hassasiyetle çalışan elektrik dirençli fırında gerçekleştirilmiştir. Niyobyum nitrür kaplama işlemi öncesinde gerçekleştirilen nitrürleme Alper ısıtma işlem firmasında gerçekleştirilmiş olup Şekil 5.1’de kaplama proseslerin yapıldığı fırınların görüntüsü verilmektedir.



Şekil 5.1. a) Nitrürleme fırını b) Niyobyum nitrür kaplama fırını

5.3.2. Niyobyum nitrür kaplama potası

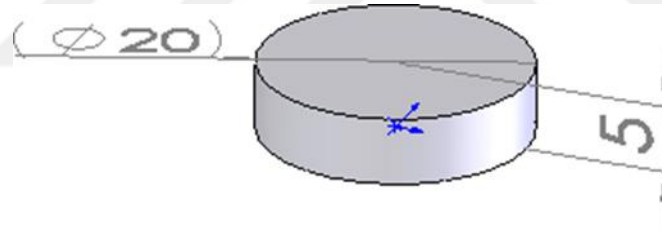
TRD yöntemi kullanılarak yapılacak niyobyum nitrür kaplama işlemi için sanayiden kolaylıkla temin edilebilecek olan 70x35 mm ebatlarında paslanmaz çelik silindir kutular (Şekil 5.2) kullanılmıştır. Paslanmaz çelik kutular yüksek sıcaklığa olan dayanımı ve yüksek ısı iletkenliği dolayısı ile tercih edilmiştir.



Şekil 5.2. Termo-Reaktif Difüzyon yöntemi ile gerçekleştirilen NbN kaplama potasının şematik görünümü (ölçü birimi: mm)

5.4. Deneylerde Kullanılan Numunelerin Hazırlığı

Deneylerde altlık malzeme olarak kullanılan AISI M2, AISI 1010 ve AISI 4140 çelikleri 20 mm çap ve 5 mm kalınlığında kesilmiştir (Şekil 5.3). Kaplama işlemleri öncesinde çeliklerin yüzeyleri metalografik olarak 60-120-180-240-360-600-800-1200 mesh'lik zımparalar kullanılarak hazırlanmıştır.

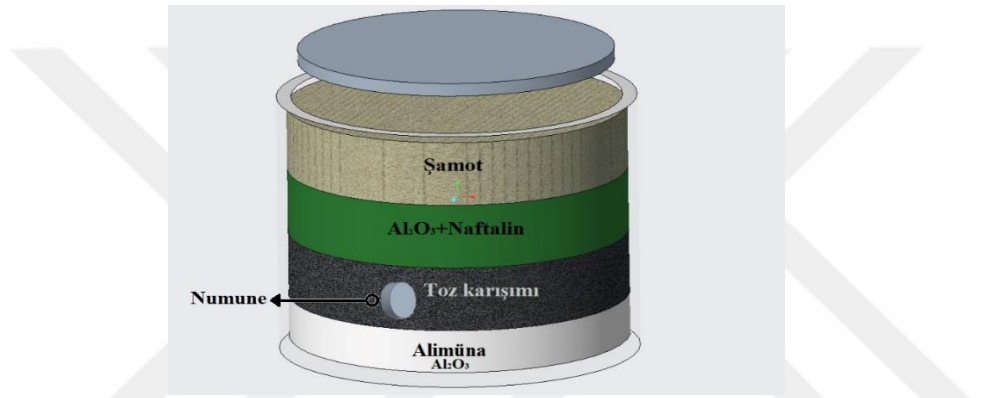


Şekil 5.3. Deneylerde kullanılan numunenin boyutları (ölçü birimi: mm)

5.5. TRD Yöntemiyle Niyobyum Nitrür Kaplama İşlemi

Yüzeyleri temizlenen ve akabinde 530°C' de bir saat süreyle nitrürleme işlemine tutulan AISI 1010, AISI 4140, AISI M2 çelikleri termo-reaktif difüzyon işlemine tabi tutulmuştur. Termo-reaktif difüzyon işlemi 1000°C sıcaklıkta 2 saat bekletmek suretiyle yapılmış ve bu işlem sonucu niyobyum nitrür kaplama gerçekleştirilmiştir. Niyobyum nitrür kaplama işleminin gerçekleştirilmesinde hazırlanan toz banyosunda ferro-niyobyum (75 µm elek altı), Al₂O₃ (100 µm elek altı), amonyum klorür (NH₄Cl) ve naftalin kullanılmıştır. Burada naftalin ortamdaki kalıntı oksijenin ortamdan uzaklaştırılması için kullanılırken amonyum klorür aktivatör olarak kullanılmıştır. Amonyum klorürün aktivatör olarak kullanılması aynı zamanda ferro-niyobyum tozlarının sinterlenmesini engellemiştir [52]. Alümina TRD yönteminde inert dolgu

malzemesi olarak görev almaktadır. Aynı zamanda toz banyosunda bulunan ferro-niyobyum kaplanmak istenen malzemelerin niyobyum kaynağı olmuştur. Kaplama banyosunu hazırlamak amacı ile alümina, naftalin, amonyum klorür, ferro-niyobyum hammaddeleri belirlenen oranlarda hesaplanarak hassas terazi yardımı ile tartılmış ve tartılan bu karışımlar bir kap içerisinde homojen olarak karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Kaplama işlemi için metalografik olarak hazırlanan numuneler, belirli oranlarda karıştırılarak hazırlanan toz hammaddeler, kaplama öncesinde temizliği yapılan potaya yerleştirilmiştir. Niyobyum nitrür kaplama işlemi sırasında kullanılan toz banyo karışımı ve deney çeliklerinin kutu içerisindeki şematik gösterimi Şekil 5.4’de görülmektedir.



Şekil 5.4. NbN kaplama potasındaki malzeme ve banyo bileşenlerinin şeması.

Tozlar yerleştirildikten sonra en üst katmanlarına konulan şamot çamuruna gaz çıkışı olabilmesi adına ince bir tel yardımı ile delikler açılmıştır. Ardından çelik kaplama potasının kapağı kapatılarak pota niyobyum nitrür kaplama işlemine hazır hale getirilmiştir. Her kaplama işlemi için numuneler farklı potalarda hazırlanarak niyobyum nitrür kaplama işlemi 1000°C’de 2 saat süre ile gerçekleştirilmiş ve ardından potalar atmosferik ortamda kontrollü soğumaya tabi tutulmuştur.

5.6. Mikroyapı İncelemeleri

5.6.1. Optik mikroskop incelemeleri

530°C’de 10 saat süre ile nitrürlenene ve 1000°C’de 2 saat süre ile niyobyumlanarak kaplanan AISI 4140, AISI M2 ve AISI 1010 çelikleri mikroyapı incelemeleri için 25 bar basınç ve 150°C sıcaklıkta bakalite alınmıştır. Daha sonra 60, 120, 180, 240, 400, 500, 600, 800, 100, 1200, 2400 gridlik zımparalarla temizlenen çelik yüzeyleri 0,3 µm boyutuna sahip alümina solüsyonu kullanılarak parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Parlatma işlemi sonrası yüzeylerde oluşan kaplama tabakası ve mikroyapıyı daha net

bir biçimde görebilmek için dağlama işlemi yapılmıştır. Bu işlem yapılırken %3 nital solüsyondan yararlanılmıştır ve kaplama tabakaları ortaya çıkarılmıştır. Mikroyapı incelemelerinde Nikon LV150N marka mikroskop kullanılmıştır. Kaplama kalınlıkları ölçümleri için optik mikroskop bünyesinde bulunan paket program destekli mikrometre kullanılmış olup tüm yüzeylerden çok sayıda ölçüm gerçekleştirilerek ortalaması alınmıştır. Şekil 5.5’de nitrürlenmiş ve niyobyumlanmış kaplama tabakaların mikroyapı görüntülerinin alınmasında ve kalınlıklarının ölçümünde kullanılan optik mikroskop cihazı görülmektedir.



Şekil 5.5. Nikon LV150N marka optik mikroskop

5.6.2. SEM ve elementel analiz

Nitrüleme ve termo-reaktif difüzyon yöntemiyle oluşturulan NbN kaplamaların daha detaylı mikroyapı incelemeleri JEOL JSM – 6060 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) (Şekil 5.6) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda bu cihazda nitrürlenmiş, niyobyum nitrür kaplanmış ve korozyon testi sonrası yüzeylerin elementel analizleri SEM cihazına entegre edilmiş Enerji Dağılım Spektrometresi (EDS) yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kaplama yapılan tüm çelik numunelerin MAP incelenmesi yapılmış ve elementlerin yoğun olarak bulunduğu bölgeler tespit edilmiştir.



Şekil 5.6. JEOL JSM – 6060 marka taramalı elektron mikroskobu.

5.7. X-Işınları Difraksiyon Analizi

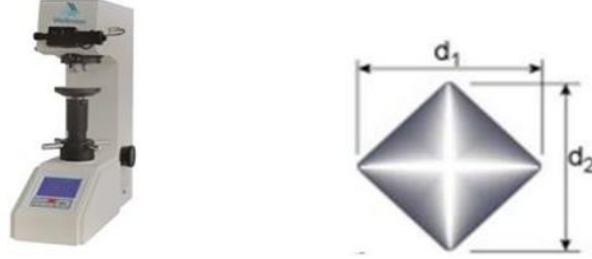
Kaplama yüzeylerinde oluşan ayrı ayrı her bir kristal fazın kendisine ait bir atomik dizilimi mevcuttur. X-ışınları difraksiyon analizi mevcut olan bu kristal fazların kırılmasına dayanan ve bu kırılma sonucu fazların tayin edilmesine yarayan bir faz analiz yöntemidir [54]. Bu analiz yönteminde Cu gibi hedef elementlerden elde edilen foton demeti analiz edilecek malzeme üzerine gönderilir ve hedef malzeme yüzeyindeki fazların yüzeyindeki kristal kafes yapılarında difraksiyona uğrayarak kendine özgü difraksiyon patenleri oluşturur. Farklı çelik türlerinde gerçekleştirdiğimiz kaplama işlemleri sonucunda elde ettiğimiz fazların tespiti için Şekil 5.7’de görülen Rigaku D/Max 20200/PC marka XRD cihazı kullanılmıştır. Kullanılan bu cihazda analiz edilecek yüzeye gönderilen ışın $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,5408\text{\AA}$) dalga boyuna sahiptir. Analiz sonucu elde edilen difraksiyon paternlerinin çözümlenmesinde X’PERT HIGH SCORE paket programı kullanılmıştır.



Şekil 5.7. Rigaku D/Max marka x-ışınları difraksiyon analiz cihazı.

5.8. Sertlik Ölçümleri

530°C sıcakta 10 saat süre ile nitrürlenmiş ve 1000°C’de 2 saat termo-reaktif difüzyon yöntemi ile NbN kaplanmış olan AISI 4140, AISI 1010 ve AISI M2 çeliklerinin yüzeylerinde oluşturulan kaplamaların sertlik ölçümleri Leica marka (Şekil 5.8) vickers uçlu sertlik cihazı kullanılarak 15 gr yük altında gerçekleştirilmiştir.



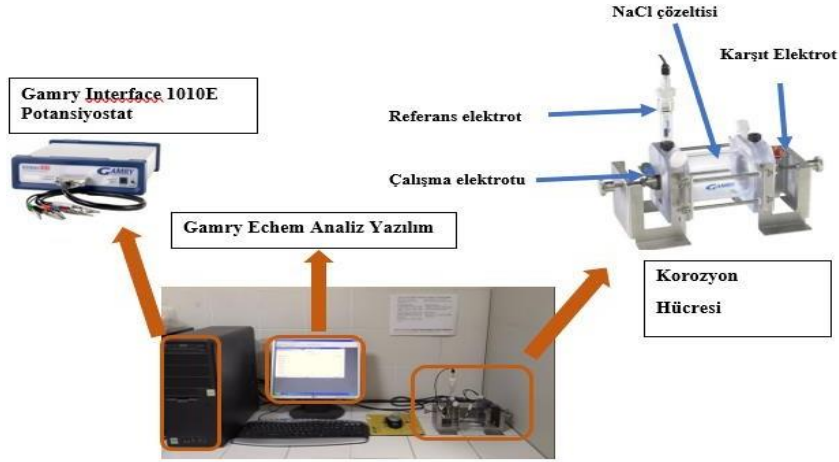
Şekil 5.8. Leica marka sertlik ölçüm cihazı ve iz görüntüsü

5.9. Korozyon Testleri

Çözelti ortamında metal malzemelerin elektrokimyasal şartlar oluşturularak uğradıkları korozyon elektrokimyasal korozyon olarak adlandırılmaktadır. Bu korozyon türünde anot ve katot bileşenler bulunmaktadır ve bu bileşenler arası anotta yükseltgenme, katotta indirgenme reaksiyonları oluşarak elektron alışverişi gerçekleşir. TRD yöntemi ile 1000°C’de 2 saat NbN kaplanmış, nitrürlenmiş ve altlık numunelerin korozyon deneyleri 0,5M NaCl, 1M H₃BO₃ ve 1M H₃PO₄ çözelti ortamında gerçekleşmiştir.

Korozyon deneyine başlamadan önce numune yüzeyleri kalıntılardan arındırmak amacı ile C₂H₆O (etonol) yardımı ile temizlenmiş ardından kurutulmuştur. Korozyon ortamı olarak hazırlanan 0,5M NaCl, 1M H₃BO₃ ve 1M H₃PO₄ çözeltiler korozyona uğrayacak numunenin bağlandığı korozyon hücresine doldurularak hücre deneye hazır hale getirilmiştir.

Korozyon testlerinin yapılması için kullanılan cihaz Gamry firmasına ait potansiyostat/galvanstat korozyon test cihazı ve hücresidir (Şekil 5.9). Testlerde referans elektrot olarak kalomel kullanılırken, karşıt elektrot için ise grafit plakadan yararlanılmıştır. Korozyon testleri 0,2874 cm² yüzey alanına sahip kaplanmış çeliklerin çözelti içerisinde tutulması sureti ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.9. Gamry marka korozyon test ünitesi ve yardımcı elemanlar

Korozyon deneyleri, doğrusal akım yöntemi ve alternatif akım yöntemi kullanılarak 2 farklı şekilde yapılmıştır. Doğrusal akım kullanılarak yapılan deney Tafel ekstrapolasyon (TP) olarak adlandırılırken alternatif akım yöntemi kullanarak gerçekleştirilen deneyler de elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) olarak adlandırılmaktadır [53]. Tafel ekstrapolasyon yönteminde, tafel eğrilerinin elde edilmesi için (-1) V başlangıç ve (+1,5) V bitiş aralığında 2 mV/s tarama hızında testler gerçekleştirilmiş ve ardından bu çalışma numuneler 1-300000 Hz frekans aralığında ve 10 mV rms alternatif voltaj parametrelerinde teste tabi tutulmuştur. Bu test sonucu elde edilen nyquist eğrilerinin çap genişliği ile korozyon direnci doğru orantılı olduğu bilinmektedir. Elde edilen eğrinin çapı ne kadar geniş ise korozyon direnci o kadar yüksektir [55]. Korozyon işlemine tabi tutulan tüm numunelerin korozyon sonrası yüzey değişiminin incelenmesi amacı ile taramalı elektron mikroskobundan (SEM) yararlanılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile hem yüzey mikro yapıları incelenirken aynı zamanda elementel analizleri yapılmıştır.

6. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME

6.1. Giriş

Çalışmada altlık olarak kullanılan AISI 4140, AISI M2 ve AISI 1010 çeliklerinin yüzeyinde TRD yöntemiyle NbN tabakaları oluşturulmaya çalışılmıştır. Bunun için öncelikle çelik altlıkların yüzeyleri metalografik olarak hazırlanmıştır. Kaplama işlemine hazır hale gelen çelikler önce 530 °C’de nitrüleme fırınında 10 saat süre ile azot difüzyonuna maruz bırakılarak nitrülenmiştir. Nitrülenen çelik malzemeler termo-reaktif difüzyon işlemi için hazırlanan ve içerisinde belli oranlarda ferro-niobyum, amonyum klorür (NH_4Cl), alümina (Al_2O_3) ve naftalinin bulunduğu banyoya yerleştirilerek 1000 °C’de termo-reaktif difüzyon yöntemi ile 2 saat süre ile niobyum kaplama işlemine maruz bırakılmıştır. Bu iki yüzey işleminin sırasıyla uygulanması üzerine niobyum nitrür kaplamalar elde edilmiştir.

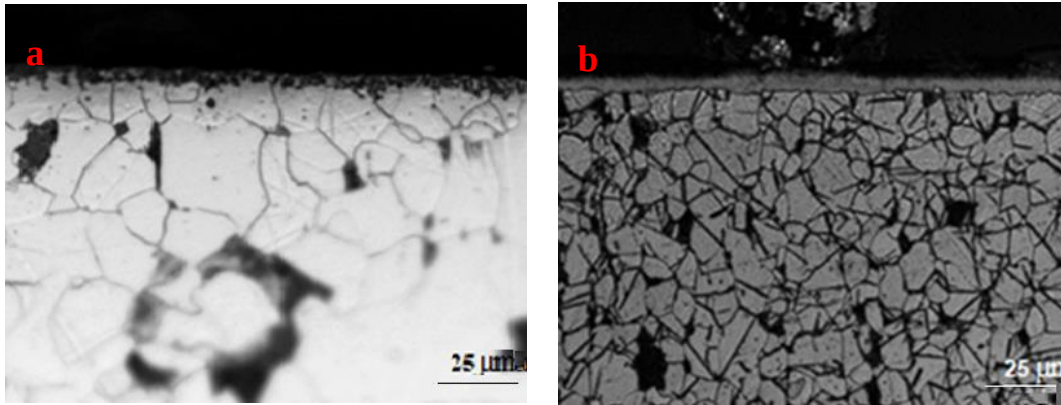
Termo-reaktif difüzyon tekniği ile yüzey kaplamaları yapılan çeliklerin mikroyapılarının incelenmesi amacı ile klasik metalografi yöntemler kullanarak hazırlanmasının ardından optik mikroskop ve SEM ile mikroyapı ve SEM-EDS analizleri yapılmıştır. Aynı zamanda nitrülenmiş ve NbN esaslı tabakaların faz analizlerini yapmak amacı ile x-ışınları difraksiyon analizleri gerçekleştirilmiş ve x-ışını paternleri elde edilmiştir. Çeliklerin yüzeyinde oluşturulan kaplama tabakalarının sertliğindeki değişimini/gelişimini belirlemek amacı ile kaplama yüzeylerine 15gr yük altında vickers indentasyon tekniği uygulanmıştır.

TRD yöntemi ile niobyum nitrür kaplanmış, nitrülenmiş ve altlık numuneler için ayrı ayrı üç farklı ortamda korozyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu üç ortam 1M fosforik asit, 1M borik asit, 0,5M sodyum klorür olarak belirlenmiştir. Bu üç çözelti ortamında gerçekleşen korozyon deneyleri Tafel ekstrapolasyon (TP) ve Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) olmak üzere iki yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Korozyon testleri sonrası tafel ekstrapolasyon yöntemi ile korozyon akımı (I_{kor}), korozyon potansiyeli (E_{kor}) ve korozyon hızı değerleri tespit edilerek korozyon davranışları incelenmiş ve yorumlanmıştır. EIS deneylerinin sonuçlarında Nyquist eğrileri elde edilmiştir. Korozyon deneyleri sonrası yüzeylerin

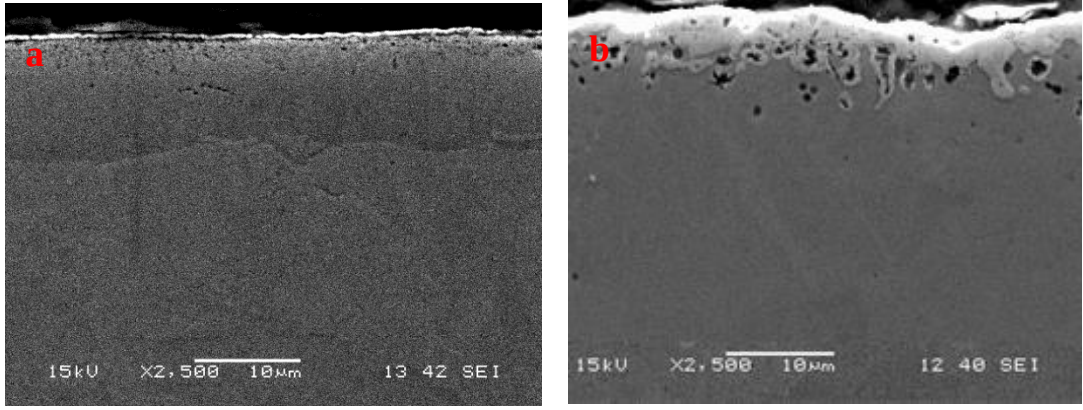
mikro yapısını incelemek ve elementleri tayin etmek amacı ile taramalı elektron mikroskobu yardımı ile SEM-EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan testler ve analiz sonuçları aşağıda detaylı olarak verilerek irdelenmiştir.

6.2. Mikroyapı İncelemeleri

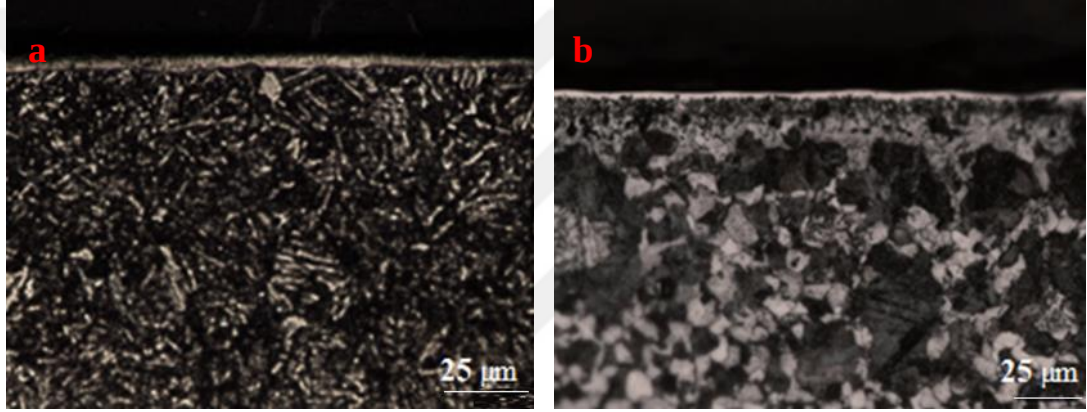
TRD yöntemi ile NbN kaplanmış ve nitrürlenmiş çelikler ayrı ayrı bakalite alınmış ardından metalografik teknikler ile hazırlanarak, %3 nital yardımı ile dağlanmış ve yüzey morfolojileri ortaya çıkarılarak optik mikroskop yardımı ile yüzey morfolojileri incelenmiştir. Şekil 6.1 ve Şekil 6.6' da sırasıyla 1000°C'de NbN kaplanmış ve 530 °C'de nitrürlenmiş AISI 1010, AISI 4140 ve AISI M2 çeliklerinin çeliğinin mikroyapısı görülmektedir Niyobyum nitrür kaplanan ve nitrürlenmiş çeliklerde kaplama ve altlık tabaka yüzeyleri renk farkı sayesinde açık bir şekilde ayırt edilebilmektedir. İncelemelerde kaplama işlemine tabi tutulmuş farklı çelik türlerinin yüzeylerinde homojen ve süreklilik arz eden bir tabaka olduğu tespit edilmiştir. Çeliklerin kimyasal bileşiminde yer alan alaşım elementleri miktarı arttıkça yüzeyde oluşan NbN esaslı kaplama tabakalarında altlık-tabaka ara yüzey morfolojilerinin iğnesel/kolonsal (girinti-çıkıntılı) yapıya doğru artış eğiliminde olduğu görülmektedir. Alaşım elementi oranı düşük olan AISI 1010 çeliğinde düz bir ara yüzey görülürken alaşım elementi yüksek olan AISI M2 takım çeliğinde ara yüzey iğnesel/kolonsal bir yapı sergilemektedir.



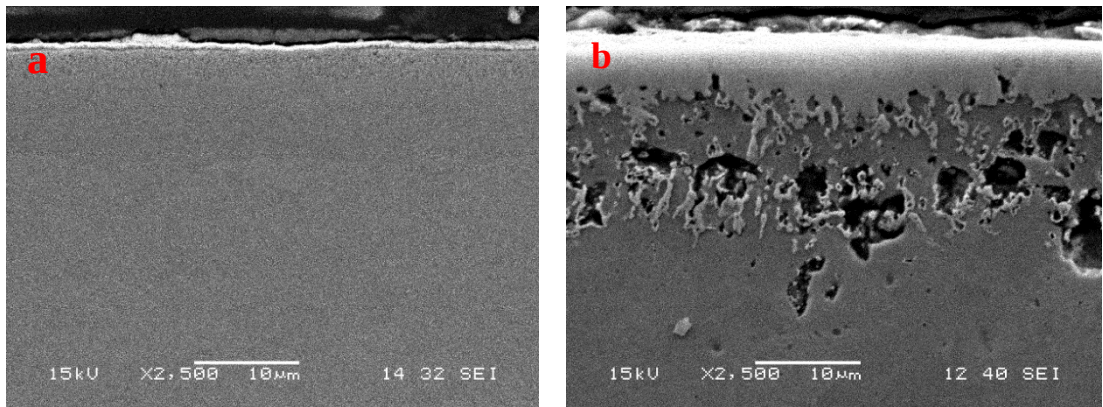
Şekil 6.1. a) Nitrürlenmiş b) Niyobyum nitrür kaplanan AISI 1010 çeliğinin mikroyapı görüntüleri



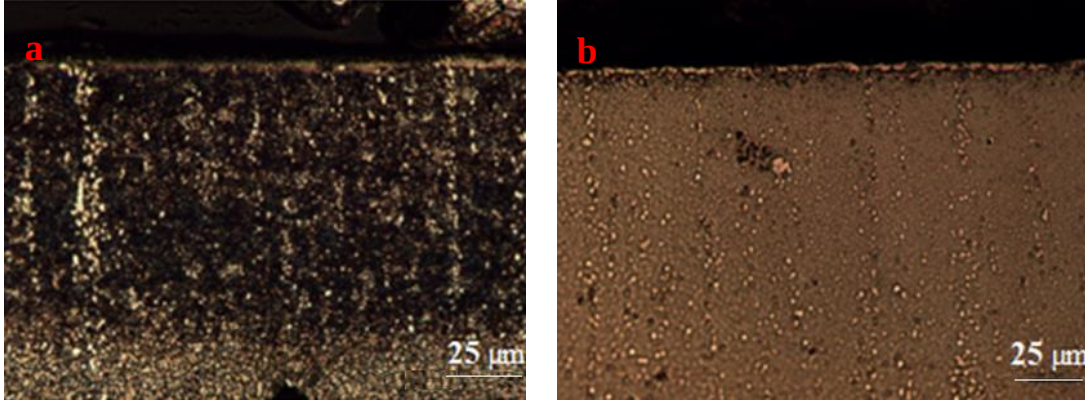
Şekil 6.2. a) Nitrürlenmiş b) Niyobyum nitrid kaplanan AISI 1010 çeliğinin SEM mikroyapı görüntüleri



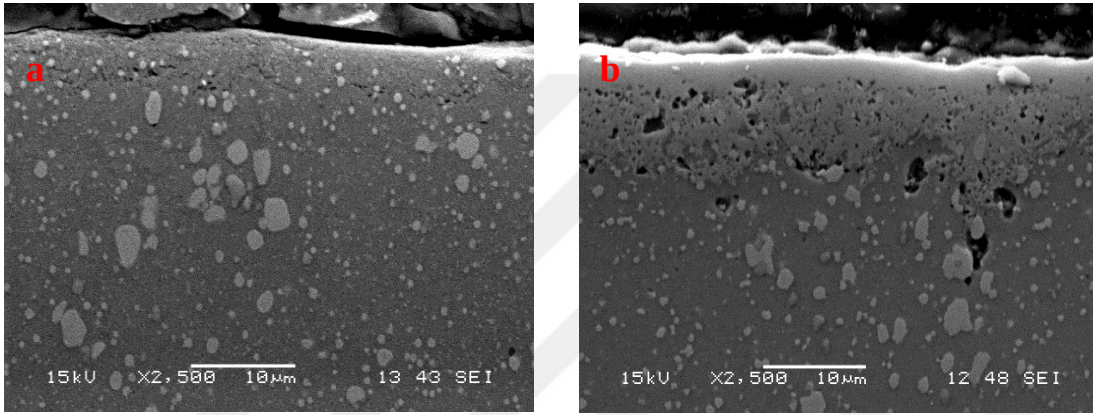
Şekil 6.3. a) Nitrürlenmiş b) Niyobyum nitrid kaplanan AISI 4140 çeliğinin mikroyapı görüntüleri



Şekil 6.4. a) Nitrürlenmiş b) Niyobyum nitrid kaplanan AISI 4140 çeliğinin SEM mikroyapı görüntüleri



Şekil 6.5. a) Nitrürlenmiş b) Niyobyum nitrür kaplanan AISI M2 çeliğinin mikroyapı görüntüleri



Şekil 6.6. a) Nitrürlenmiş b) Niyobyum nitrür kaplanan AISI M2 çeliğinin SEM mikro yapı görüntüleri

Tüm numunelerin SEM ve optik mikroskoptan alınan mikroyapı görüntülerinde görüldüğü gibi niyobyum nitrür kaplanmış numunenin kaplama kalınlığı ve difüzyon derinliği çelik bileşiminde yer alan alaşım elementi miktarının artışına bağlı olarak artış göstermektedir. Tüm niyobyum nitrür kaplanmış numunelerde kaplama tabakasının altında bir difüzyon tabakası görülmektedir. Girintili yapıda olan bu difüzyon tabakası oluşan bağ yapısının difüzyon bağı şeklinde olduğunu ve kaplamanın daha sağlam bir şekilde tutunma gerçekleştirdiğini göstermektedir.

Tablo 6.1 ve Tablo 6.2’de AISI 1010, AISI 4140 ve AISI M2 çeliklerinin yüzeyinde oluşan NbN esaslı tabakaların difüzyon derinliği ve tabaka kalınlığı değerleri verilmiştir. Bu veriler göz önünde bulundurulduğunda AISI M2 çeliğinin yüzeyinde oluşan kaplama tabakasının 9,5 µm olarak tespit edilmiştir ve en yüksek değerde tabakaya sahip olduğu belirlenmiştir. Aynı şekilde AISI 4140 çeliğinin yüzeyinde 9,08 µm ve AISI 1010 çeliğinin yüzeyinde ise 4,09 µm olarak tabaka kalınlıkları tespit edilmiştir. Tablo 6.2’de görüldüğü üzere 18,7 µm difüzyon derinliği ile en yüksek

difüzyon derinliğine sahip olan katman AISI M2 çeliğinde iken 15,1 μm ile AISI 4140 çeliğinde 15,1 μm ve AISI 1010 çeliğinde 12,44 μm difüzyon derinliği ölçülmüştür.

Difüzyonun tüm çelik türlerinde girintili yapıda oluşması kaplamanın sağlam bir şekilde yüzeylere tutunduğunu göstermektedir. Gerçekleştirilen niyobyumlama işlemi sonrasında, kaplanan çelik türünün içerdiği alaşım element oranının artmasına bağlı olarak kaplama tabakası kalınlığının arttığı görüntülenen mikroyapılarda açıkça görülmektedir.

Tablo 6.1. Çelik yüzeylerinde oluşturulan NbN esaslı kaplamaların tabaka kalınlığı değerleri

Kaplama Kalınlığı, μm	
AISI 1010	$4,09 \pm 1,5$
AISI 4140	$9,08 \pm 1,2$
AISI M2	$9,5 \pm 3,13$

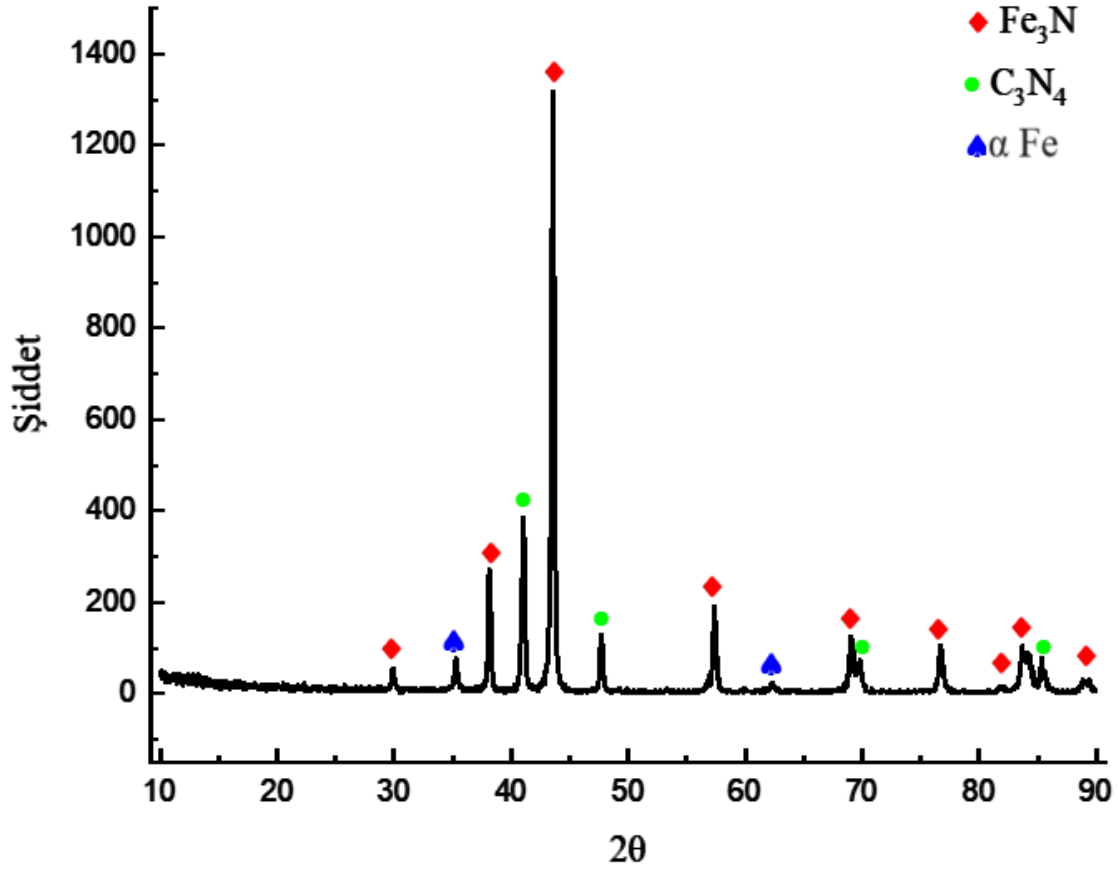
Tablo 6.2. Çelik yüzeylerinde oluşturulan NbN esaslı tabakaların difüzyon derinliği değerleri

Difüzyon Derinliği, μm	
AISI 1010	$12,44 \pm 2,8$
AISI 4140	$15,1 \pm 3,01$
AISI M2	$18,7 \pm 3,6$

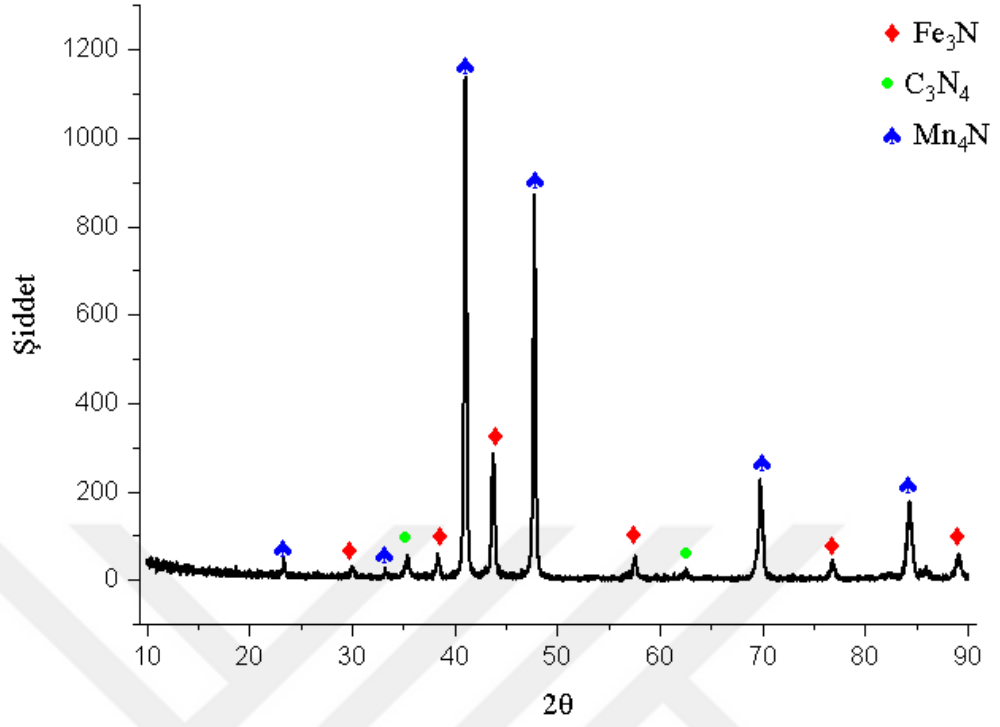
6.3. X Işınları Difraksiyon Analizi

İki kademeli yüzey işlemine tabi tutularak çelik yüzeylerinde oluşturulan NbN esaslı kaplama tabakasındaki mevcut fazları belirlemek amacı ile x-ışınları difraktometresi analizi yapılmıştır. 530°C’de 10 saat süre ile nitrürlenmiş AISI 1010, AISI 4140 ve AISI M2 çeliklerinin yüzeyinde Fe_3N , C_3N_4 , VC, Mn_4N fazlarından oluşan nitrür esaslı katmanın oluştuğu, 1000°C’de 2 saat süre ile niyobyumlanmış çeliklerin yüzeyinde elde edilen kaplama tabakasının ise NbN, Nb_2CN , $\text{Fe}_3\text{Nb}_3\text{C}$ fazlarını ihtiva ettiği belirlenmiştir. Şekil 6.7’de görüldüğü üzere AISI 1010 çeliğinde 530°C de 10 saat nitrürlenmesi ile elde edilen yüzeyde Fe_3N fazı hakimdir ve bununla birlikte C_3N_4 ve $\alpha\text{-Fe}$ fazları bulunmaktadır, yine aynı yöntem kullanılarak kaplama işlemine tabi tutulan AISI 4140 (Şekil 6.8) çeliğinde ise Fe_3N fazının yoğun olduğu bununla birlikte

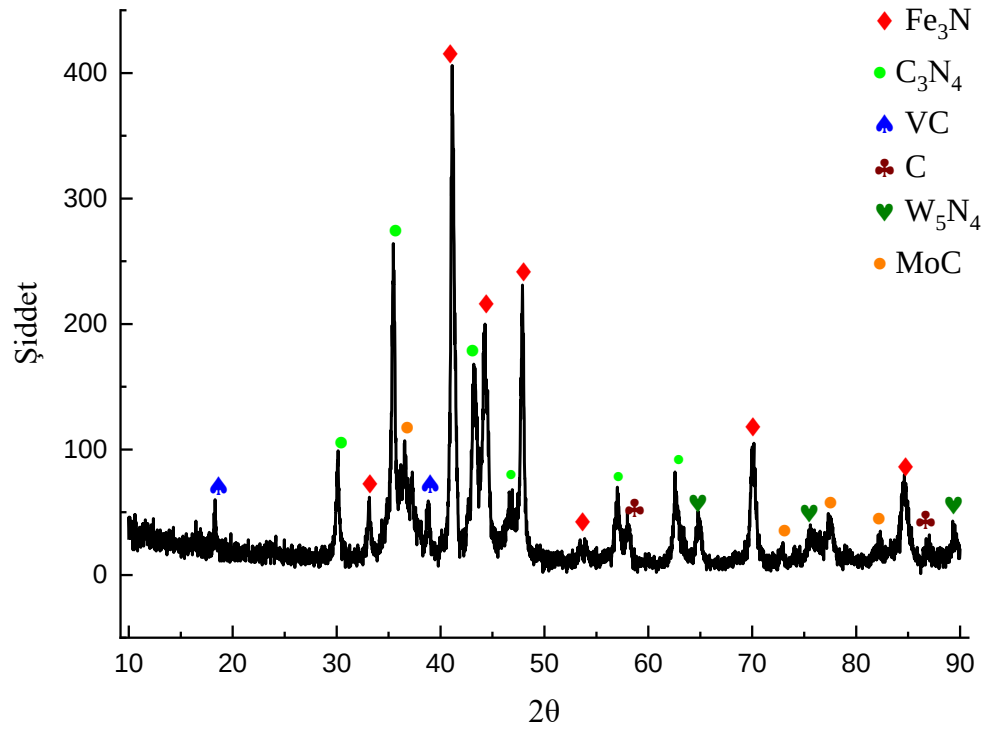
C_3N_4 , Mn_4N fazının bulunduğunu görmekteyiz. Şekil 6.9’ da ise yoğun pik veren faz olarak Fe_3N görülürken bununla birlikte C_3N_4 , VC, W_5N_4 , C ve MoC fazları görülmektedir Şekil 6.10 - Şekil 6.12 öncelikle $530^\circ C$ ’de 10 saat süre ile nitrürlenmiş ve ardından $1000^\circ C$ ’de 2 saat süreyle niyobyumlanmış çeliklerin x-ışınları difraksiyon paternlerini göstermektedir.



Şekil 6.7. Nitrürlenmiş AISI 1010 çeliğinin x- ışını difraksiyon paterni.

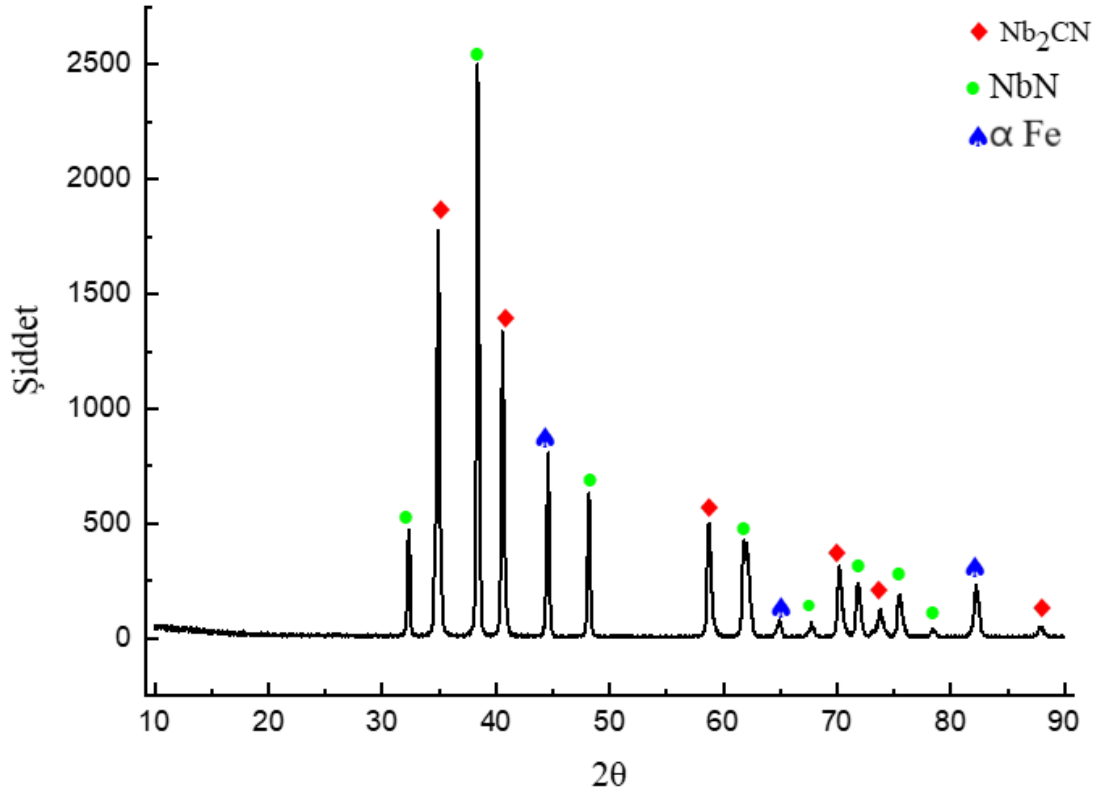


Şekil 6.8. Nitrülenmiş AISI 4140 çeliğinin x- ışını difraksiyon paterni.

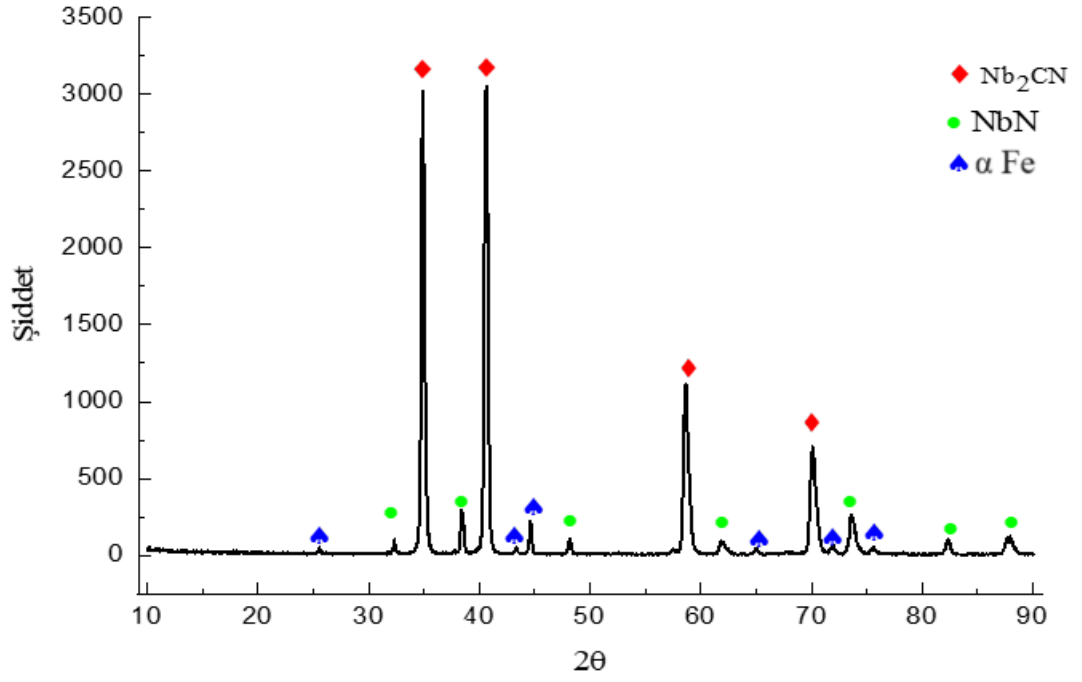


Şekil 6.9. Nitrülenmiş AISI M2 çeliğinin x- ışını difraksiyon paterni.

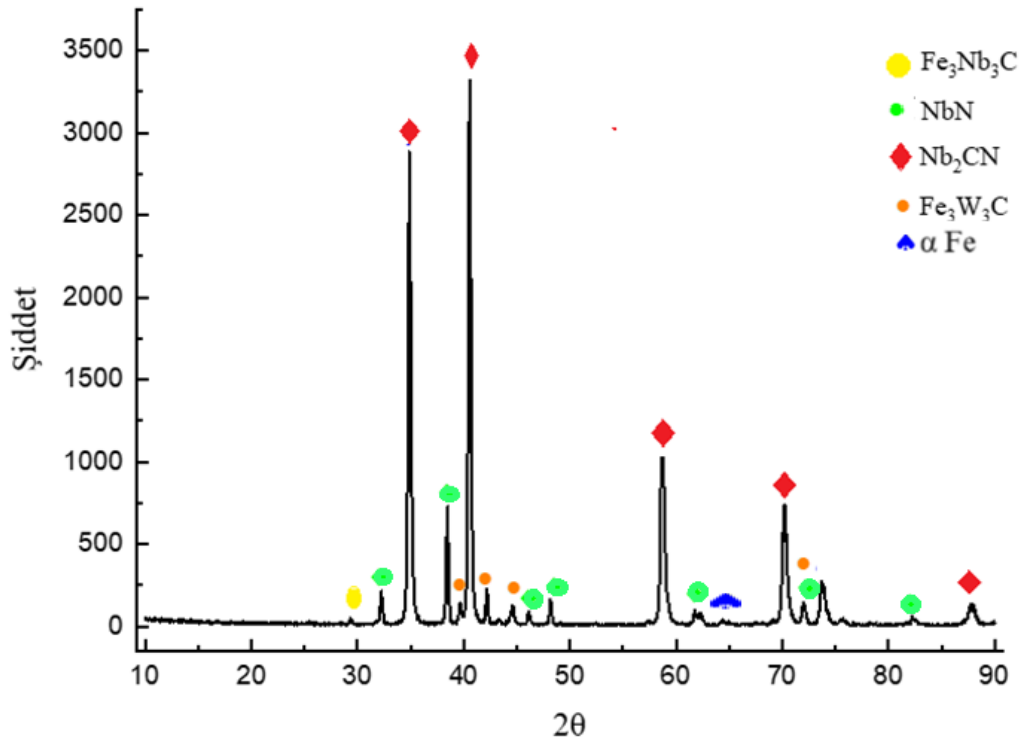
Şekil 6.10 – Şekil 6.12’de verilen x- ışını difraksiyon paternlerinden anlaşılacağı gibi her çelik türünün içerdiği elementlere bağlı olarak yüzeylerde farklı fazlar oluşmuştur. Şekil 6.10’da görüldüğü üzere AISI 1010 çeliğinde 1000°C de TRD yöntemi ile niyobyumlama ile elde edilen yüzeyde NbN fazı hakimdir, bununla birlikte kaplama yüzeyinde Nb₂CN ve α -Fe fazı da görülmektedir. Aynı yöntem kullanılarak kaplama işlemine tabi tutulan AISI 4140 (Şekil 6.11) çeliğinde ise Nb₂CN fazının yoğun olduğu, bununla birlikte NbN ve α Fe fazının bulunduğu tespit edilmiştir. Aynı şekilde Şekil 6.12’de AISI M2 çeliğinin yüzeyinde oluşan kaplama tabakasında yoğun pik veren faz Nb₂CN görülürken bununla birlikte NbN, Fe₃Nb₃C, Fe₃W₃C ve α -Fe fazları da görülmektedir. Bu farklı fazların oluşumu çelik türlerinin ihtiva ettiği alaşım elementleri ile ilgilidir.



Şekil 6.10. NbN kaplanmış AISI 1010 çeliğinin x- ışını difraksiyon paterni.



Şekil 6.11. NbN kaplanmış AISI 4140 çeliğinin x- ışını difraksiyon paterni.



Şekil 6.12. NbN kaplanmış AISI M2 çeliğinin x- ışını difraksiyon paterni.

6.4. SEM-EDS Analizleri ile Kaplama Tabakalarının İncelenmesi

530°C’de 10 saat süre ile nitrürleme işlemine tabi tutulmuş ve ardından 1000°C’de TRD yöntemi ile niyobyum nitrür kaplanmış çeliklerin yüzeylerinde oluşan tabakaların incelenmesi amacı ile SEM ve EDS analizleri yapılmıştır. Numuneler öncelikle metalografik olarak hazırlanmanın (bakalite alma, zımpara, parlatma v.b.) akabinde yüzeylerinin mikroyapıları ile taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak görüntülenmiştir. Bu yöntem geri saçılan elektronlar (back scattered electrons) (BES) yardımı ile uygulanmıştır. BES elektron türü elastik çarpışmalar sonucunda mikroyapı görüntüsü oluşturan elektron mikroskobu uygulamasıdır. Bu elektron türünün seçilmesinde ki ana etmen bileşim kontrastının yüksek olması kaynaklı istenilen görüntülerin net bir şekilde elde edilebilmesidir [56].

Kaplanan çeliklerin yüzeylerinde oluşan elementleri belirlemek amacı ile yine taramalı elektron mikroskobuna bağlı EDS analiz cihazı kullanılmıştır. EDS, enerji dağılım spektrometresi olarak adlandırılır. EDS incelemeleri kaplama bölgesi, kaplama-matris ara yüzeyi ve matris bölgesinde yapılmıştır. Nitrürlenmiş ve niyobyumlanmış çeliklerin yüzeylerinde SEM-EDS ile çizgi analizleri ve elementel haritalandırma (MAP) yapılmış ve sonuçları aşağıda verilmiştir.

Mikroyapı görüntülerinde kaplama tabakası, kaplama-matris ara yüzeyi, matris olmak üzere üç ayrı bölgeden EDS analizi alınmıştır. Elde edilen tüm görüntülerde kaplama tabakasının varlığı görülmektedir. Kaplama tabakası homojen bir şekilde dağılmıştır. Aynı zamanda kaplama yapısının girintili bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Bu yapı bize kaplamanın sağlam olduğunu ve difüzyonun derin olduğunu göstermektedir.

Ayrıca yapılan MAP ve çizgisel analizlerde, kaplamaların difüzyon ettiği bölgeler net bir şekilde görülmektedir. Sadece nitrürlenmiş çeliklerde en üst tabakada N yoğun olarak bulunmaktadır ve MAP görüntülerine bakıldığında difüzyonun derinleştiği gözlenmektedir. Nitrürlemenin akabinde NbN kaplama tabakası elde etmek amacı ile termo-reaktif difüzyon yöntemi ile iki saat süreyle kaplama potasında 1000°C sıcaklığa maruz kalan çeliklerde ise en üst tabakada oluşan niyobyum nitrür tabakaları görülmektedir. Yine oluşan kaplama tabakası girintili-çıkıntılı/kolonsal bir yapıya sahiptir.

Şekil 6.13’de verilen nitrürlenmiş AISI 1010 çeliğinin SEM görüntüsü ve EDS analizlerine bakıldığında yoğunlukla Fe ve N piklerini görülmekte ve noktasal olarak

kaplama matrisinden başlayarak altlık tabakaya kadar alınan EDS analizlerinde nitrür tabakasının derinliğini ve varlığı görülmektedir. Bunun yanı sıra Şekil 6.14’de verilen çizgisel analiz ve MAP görüntülerinde kaplamadaki nitrür yoğunluğunun kaplama matrisinden uzaklaştıkça azaldığı ve demir elementinin varlığının tersi yönde artış gösterdiği gözlenmiştir.

Şekil 6.15’de nitrürlenmiş AISI 4140 çeliğinin SEM görüntüsü ve beraberinde çizgisel olarak kaplama tabakasından matrise kadar alınan EDS analizleri görülmektedir. İncelemelerde Fe, N elementlerinin yanında Mo ve Cr elementlerinin varlığı tespit edilmiş olup bu elementler (Mo ve Cr) altlık malzemelerin bileşiminden kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte Şekil 6.16’da verilen çizgisel analiz ve MAP görüntülerinde; kaplama yüzeyi yoğun olarak N ihtiva ederken kaplama tabakasından matrise doğru N elementi varlığının azalması ile birlikte Fe elementinin varlığının arttığı gözlemlenmiştir.

Şekil 6.17’de verilen nitrürlenmiş AISI M2 çeliğinin SEM ve EDS analizlerine incelendiğinde kaplama tabakasinda Fe ve N pikleri yoğun olarak görülürken altlık malzemeye doğru inildikçe C, W, V, Mo gibi alaşım elementleri yoğunlaşmıştır. Bu elementler çeliğin sahip olduğu alaşım elementleridir. Şekil 6.18’de gösterilen çizgisel analiz ve MAP görüntüleri incelendiğinde yine yüzeyden altlık malzemeye inildikçe N elementinin varlığının azaldığı ve Fe elementinin varlığının arttığı görülmektedir. Aynı şekilde çizgi analiz sonuçlarında yer yer öbek halinde yoğun şekilde konumlanmış Mo ve W elementlerinin varlığı görülmektedir.

TRD yöntemi ile NbN kaplanmış AISI 1010 çeliğinin SEM - EDS analizlerinde (Şekil 6.19) yoğunlukla Nb ve N ve bu piklerin yanı sıra Fe pikleri görülmektedir. Bu incelemede kaplama tabakası-altlık malzeme kolaylıkla ayıt edilmekte olup Şekil 6.20’de verilen çizgisel analiz ve MAP görüntülerinde de görüldüğü üzere kaplama tabakasındaki niyobyum yoğunluğunun matrise doğru azaldığı ve demir elementinin varlığının ise artış göstermektedir. Bununla birlikte kaplama tabakasinda N ve Nb elementlerinin varlığı NbN oluşumunu teyit etmektedir.

Benzer şekilde Şekil 6.21’de AISI 4140 çeliğinin yüzeyinden belirli bir derinliğe kadar Nb, N, Fe elementlerinin varlığı NbN esaslı kaplama tabakasının oluştuğunu, matraste çelik bileşiminden gelen Mo ve Cr elementlerinin varlığı EDS analizleri ile açık bir şekilde ortaya konulmuştur. Bununla birlikte Şekil 6.22’de verilen çizgisel analiz ve

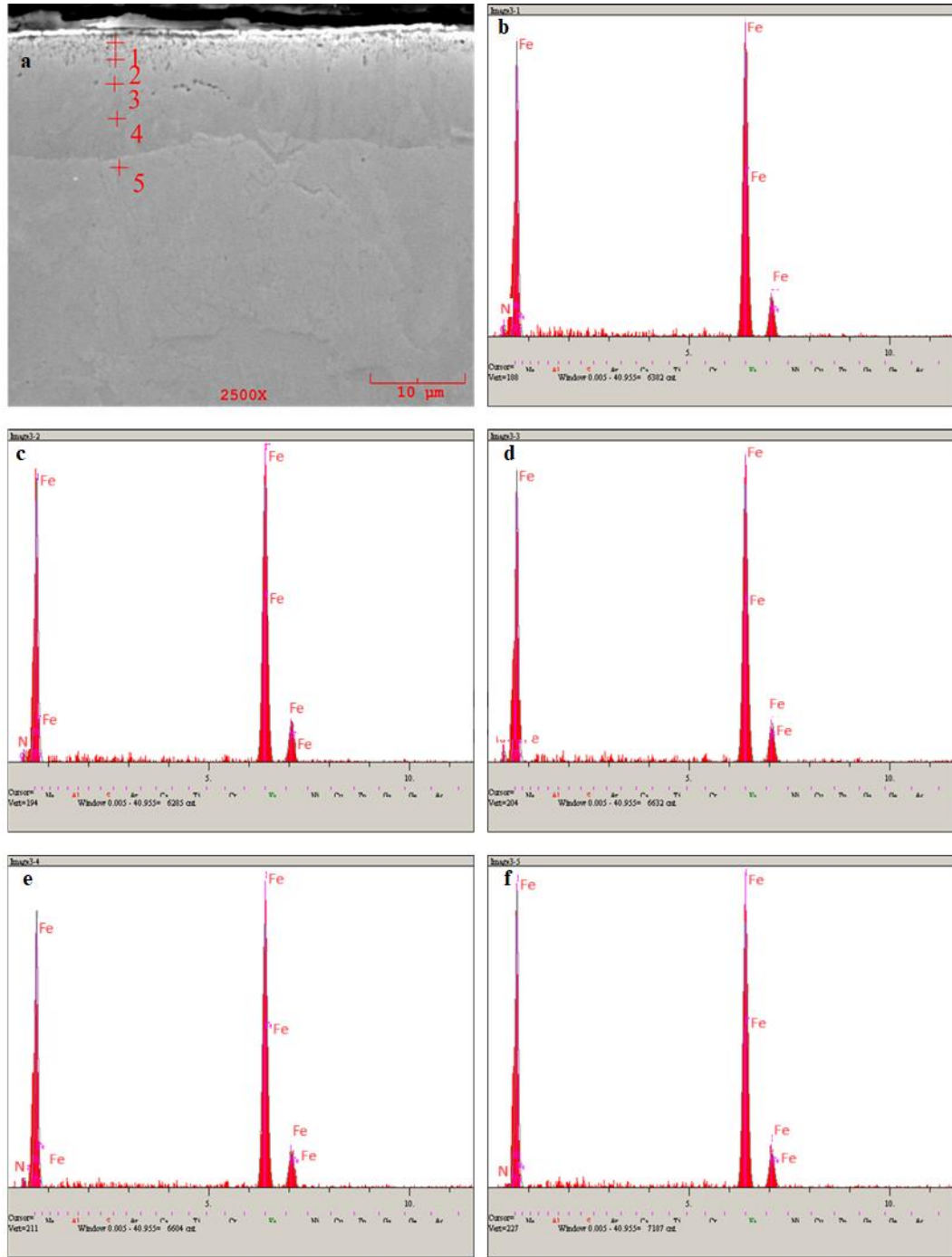
MAP görüntülerinde de kaplama tabakasında Nb yoğunluğu, çizgisel analizde matrise doğru Nb varlığının azalması ile birlikte Fe elementinin artması kaplama tabakasının niteliğini ortaya koymaktadır. Ayrıca N elementinin Nb elementi ile birlikte görülmesi ve kaplama tabakasının NbN esaslı olduğunu teyit etmektedir. Aynı durum Şekil 6.23 ve Şekil 6.24'te sırasıyla verilmiş olan yüzeyinde NbN esaslı kaplamanın oluşturulduğu AISI M2 çeliğinin SEM-EDS incelemeleri, çizgisel analiz ve MAP görüntülerinin analizleri için de geçerlidir. Yani, kaplama tabakasında Nb ve N piklerinin, altlık malzemede çelik bileşiminde bulunan Fe, C, W, V, Mo gibi elementlerinin varlığı yoğunlaşmaktadır. Aynı şekilde yüzeyden matrise inildikçe azalan Fe varlığıyla birlikte Nb ve N varlığının azaldığı ancak bu elementlerin difüzyon derinliğinin diğer çeliklere nazaran daha yüksek oranda olduğu görülmektedir.

6.5. Sertlik Ölçümleri

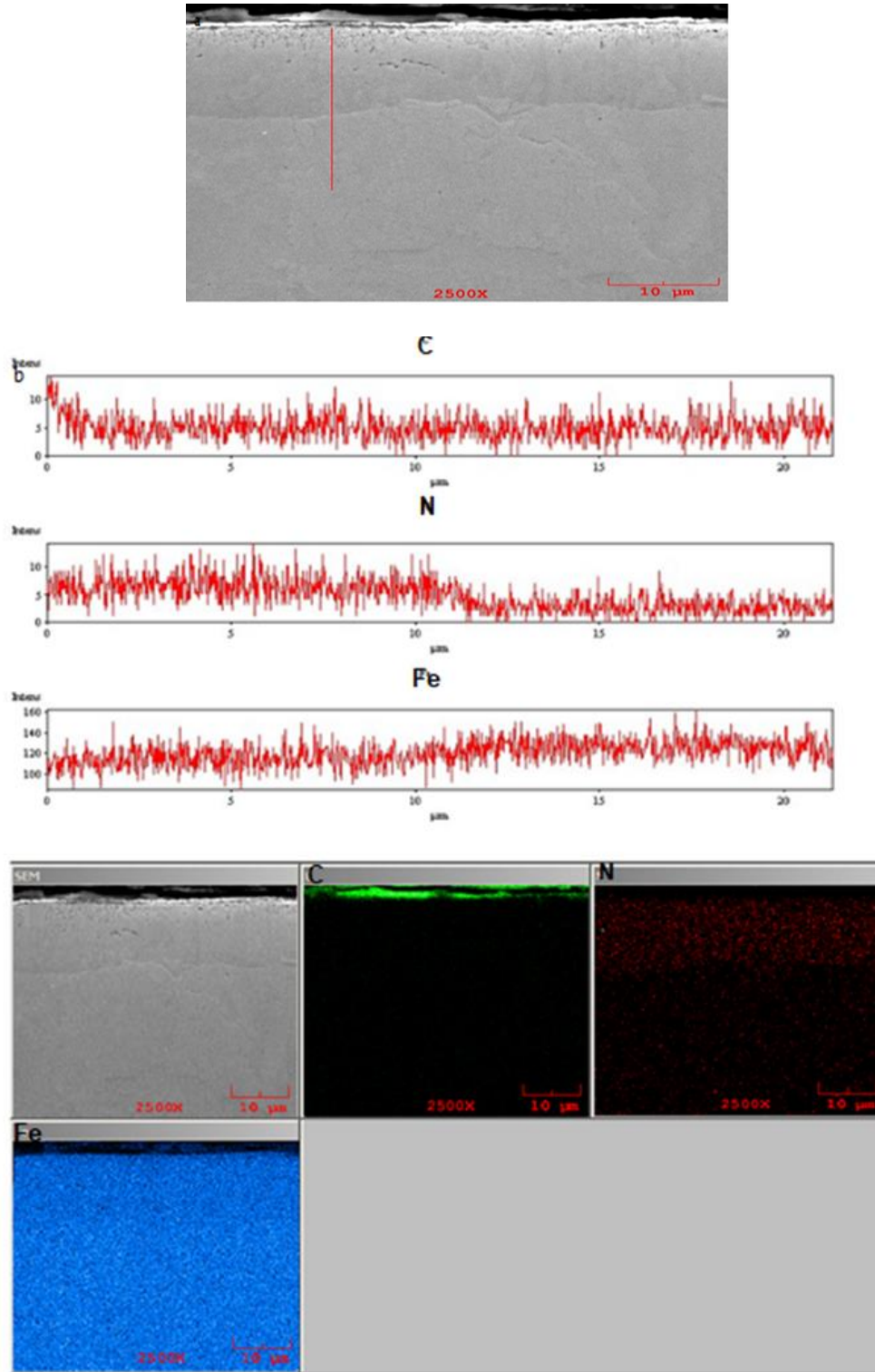
Nitrürlenmiş ve niyobyumlanmış AISI 1010, AISI 4140, AISI M2 çeliklerinin yüzeylerinde oluşan kaplama tabakalarının, kaplama/matris arayüzeyinin (difüzyon bölgesinin) ve matrisin sertlik ölçümleri vikers sertlik ucu kullanılarak 15 gr yük altında ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında AISI 1010, AISI 4140 ve AISI M2 çeliği içinde kaplama tabakasında elde edilen sertlik değerleri en yüksek vikers değerine sahiptir.

Çelikler kendi aralarında matris arayüzey ve kaplama bölgesi sertlikleri bakımından karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonrası çelik matrislerinde sertlik değerleri karşılaştırıldığında en düşük sertlik değeri sırası ile AISI 1010 (200 HV_{0,015}), AISI 4140 (328 HV_{0,015}) ve AISI M2 (623 HV_{0,015})'dir. Kaplama matris arayüzünden alınan sertlik değerleri karşılaştırıldığında ise en düşük sertlik değeri sırası ile AISI 1010 (596 HV_{0,015}), AISI M2 (884 HV_{0,015}) ve AISI 4140 (998 HV_{0,015}) olarak ölçülmüştür.

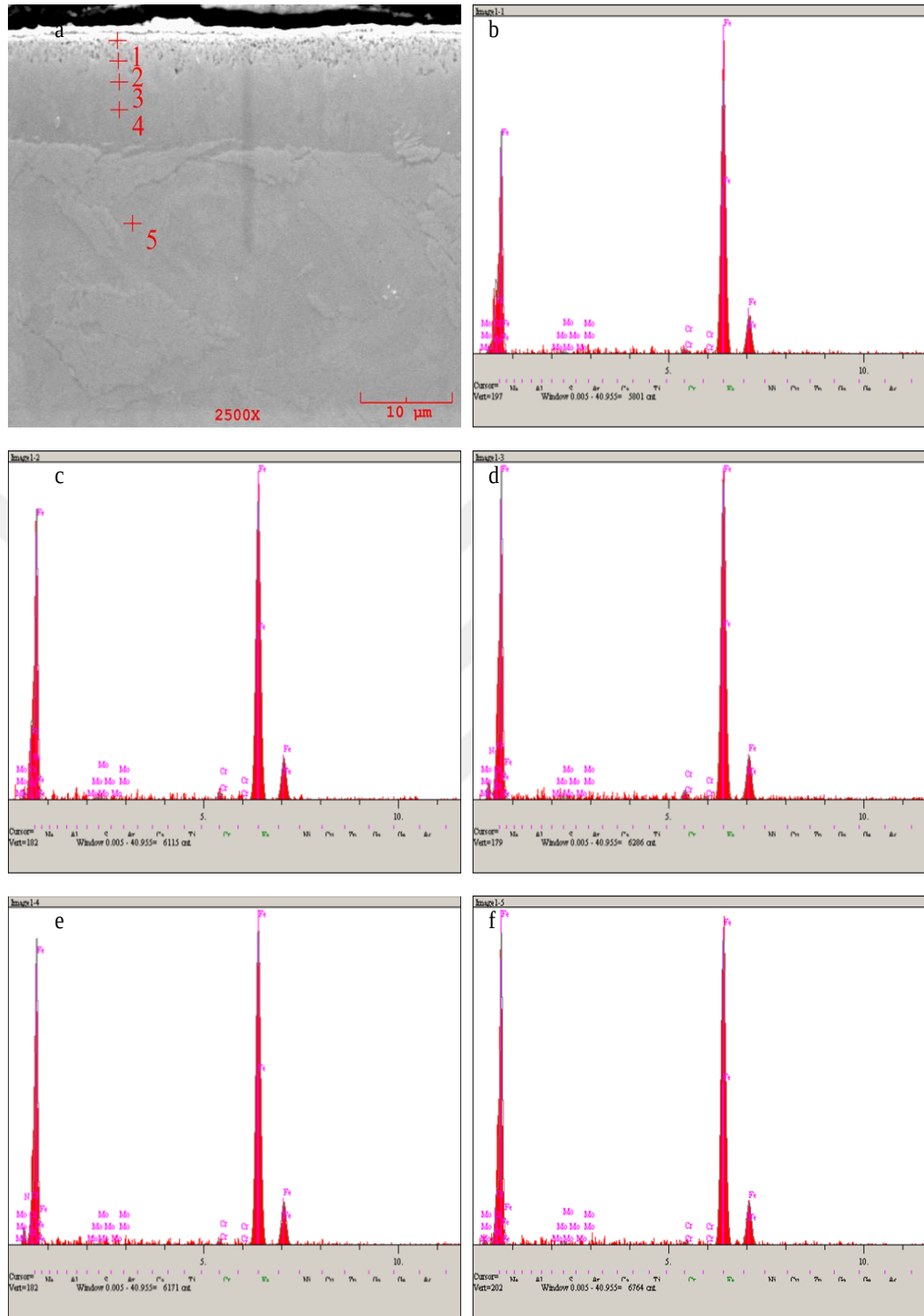
Termo-reaktif difüzyon işlemi ile NbN kaplanmış çelikler içinde en sert kaplama tabakasına sahip çelikler sırası ile AISI M2 (1661 HV_{0,015}), AISI 4140 (1570 HV_{0,015}) ve AISI 1010 (1360 HV_{0,015}) olarak belirlenmiştir. AISI M2 çeliğinin en yüksek sertlik değerine sahip olmasını başlıca nedeninin çelik yüzeyinde oluşan niyobyum nitrür ve Nb₂CN ve M2 çeliğinin ihtiva ettiği alaşım karbürlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu durum x-ışını difraksiyon analizleriyle de teyit edilmektedir.



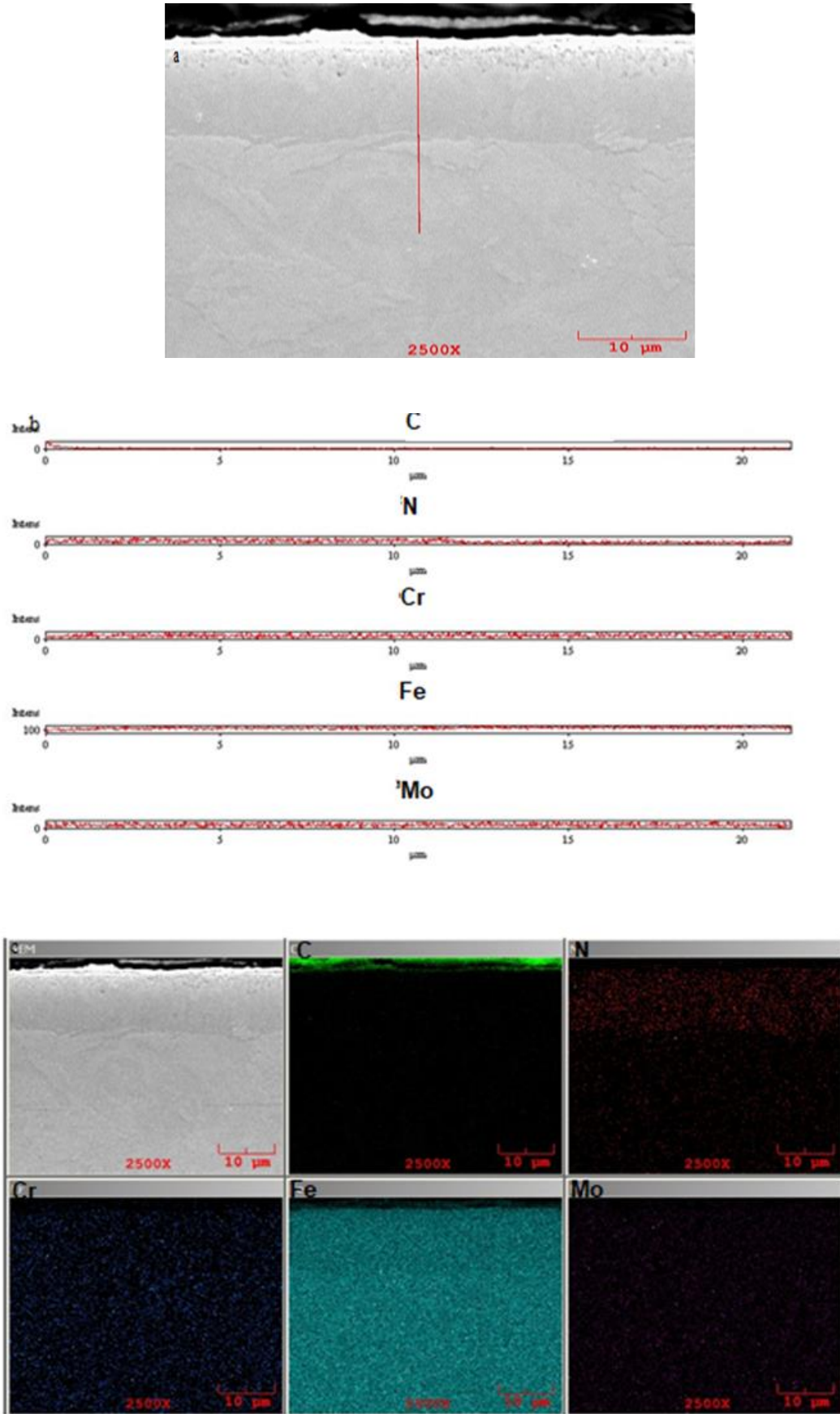
Şekil 6.13. Nitrürlenmiş AISI 1010 çeliğinin SEM-EDS görüntüleri.



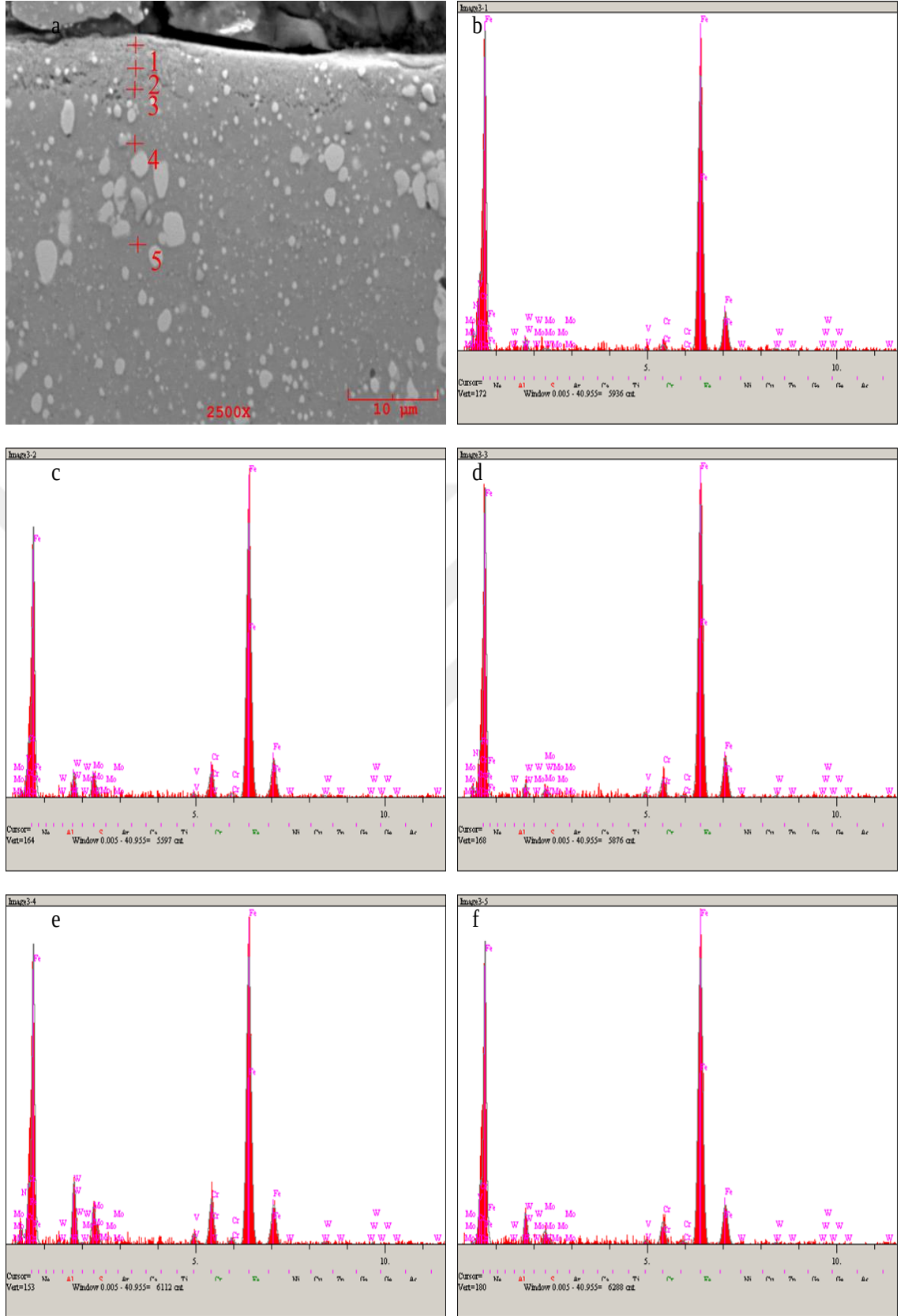
Şekil 6.14. Nitrürlenmiş AISI 1010 çeliğinin SEM, MAP ve çizgisel analiz görüntüleri.



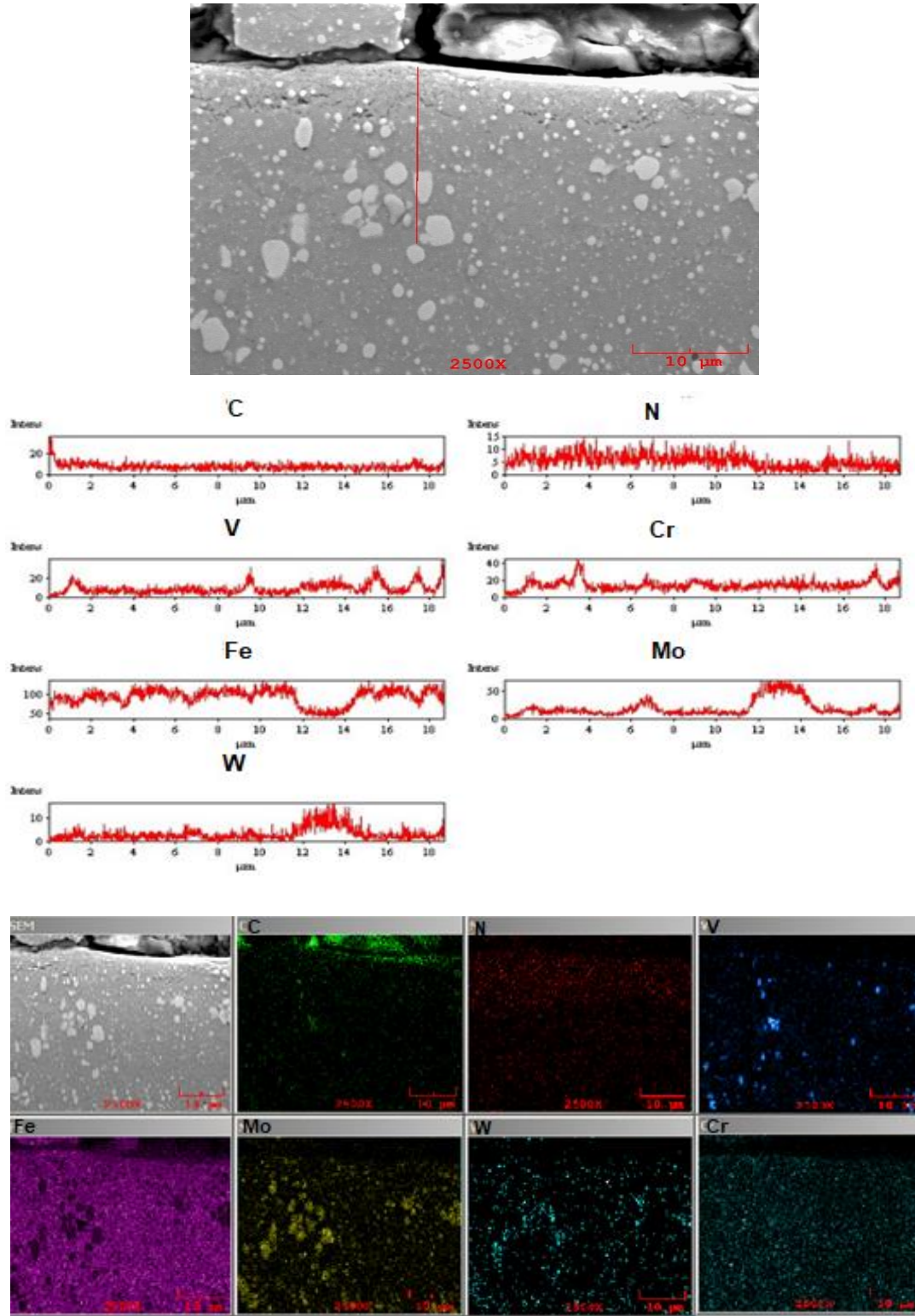
Şekil 6.15. Nitrülenmiş AISI 4140 çeliğinin SEM-EDS görüntüleri.



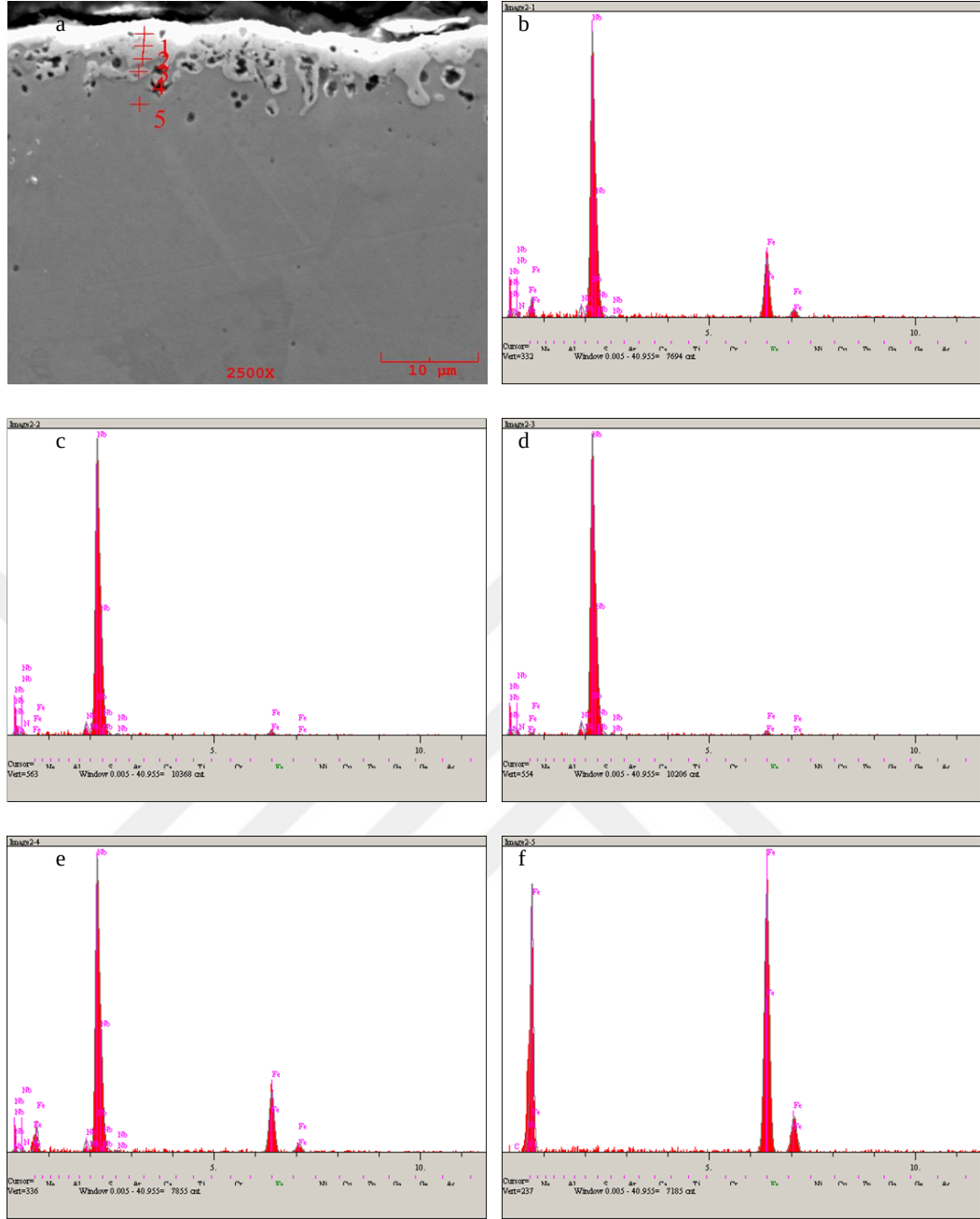
Şekil 6.7. Nitrürlenmiş AISI 4140 çeliğinin SEM, MAP ve çizgisel analiz görüntüleri.



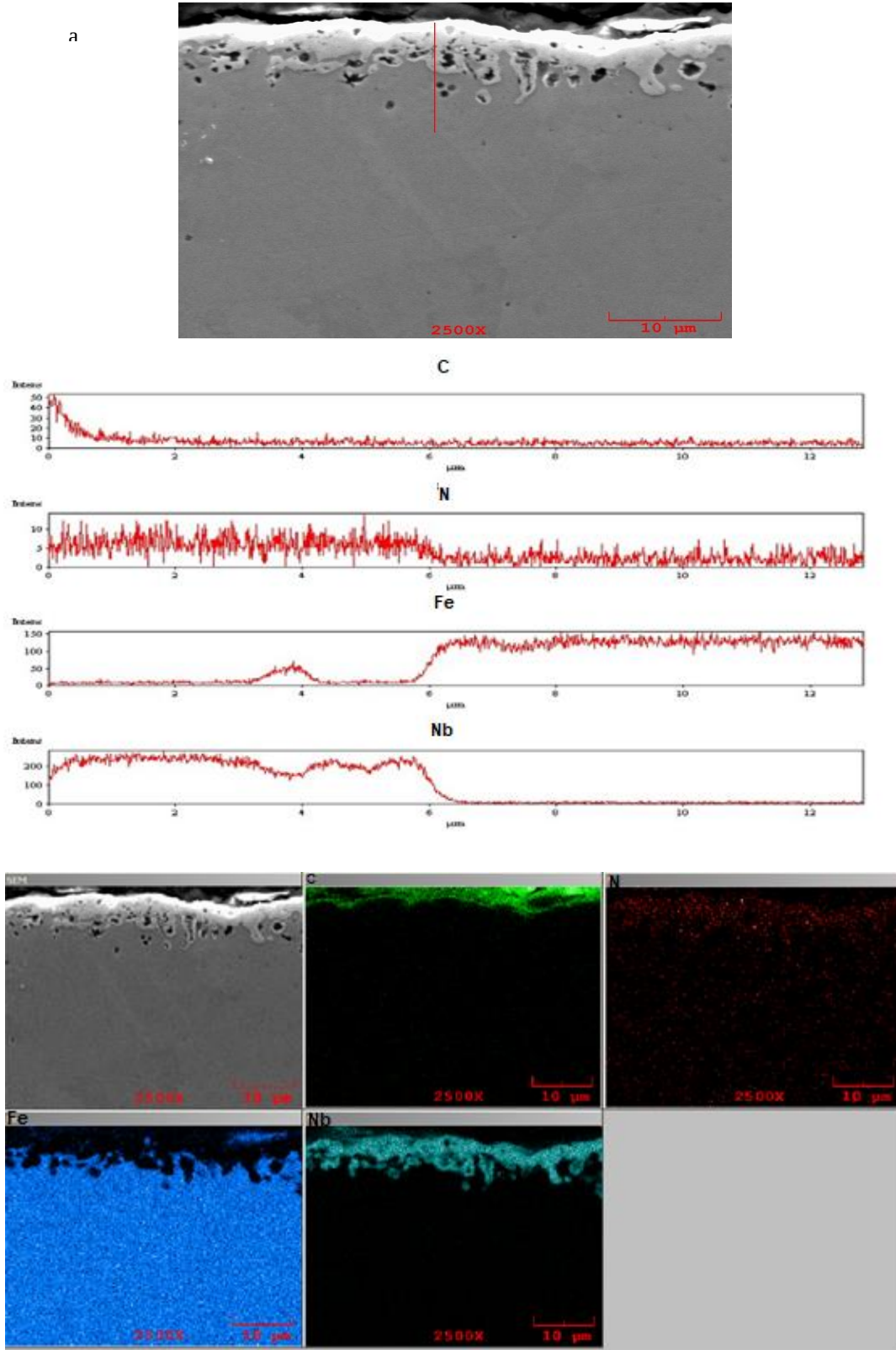
Şekil 6.8. Nitrülenmiş AISI M2 çeliğinin SEM - EDS görüntüleri.



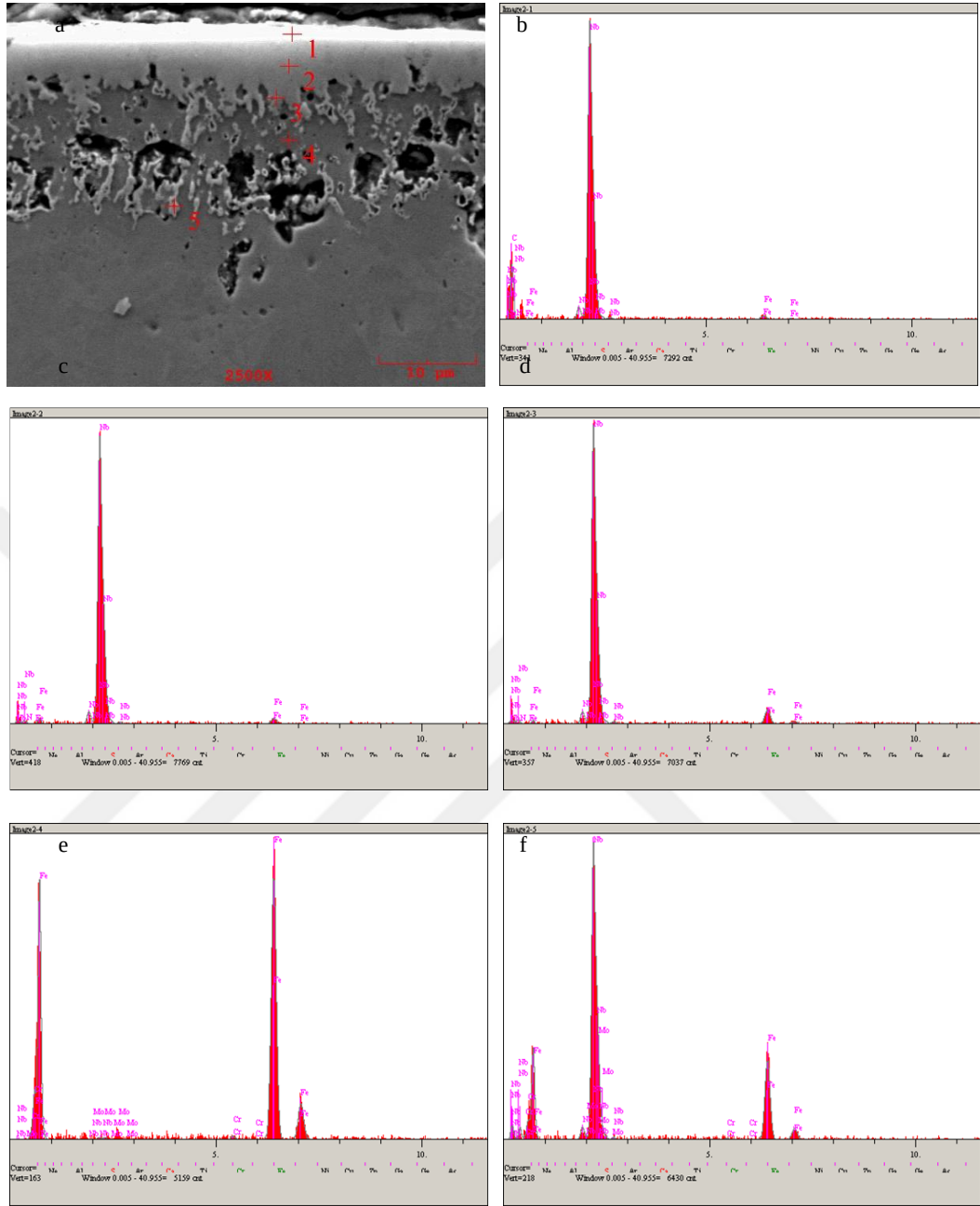
Şekil 6.9. Nitrürlenmiş AISI M2 çeliğinin SEM, MAP ve çizgisel analiz görüntüleri.



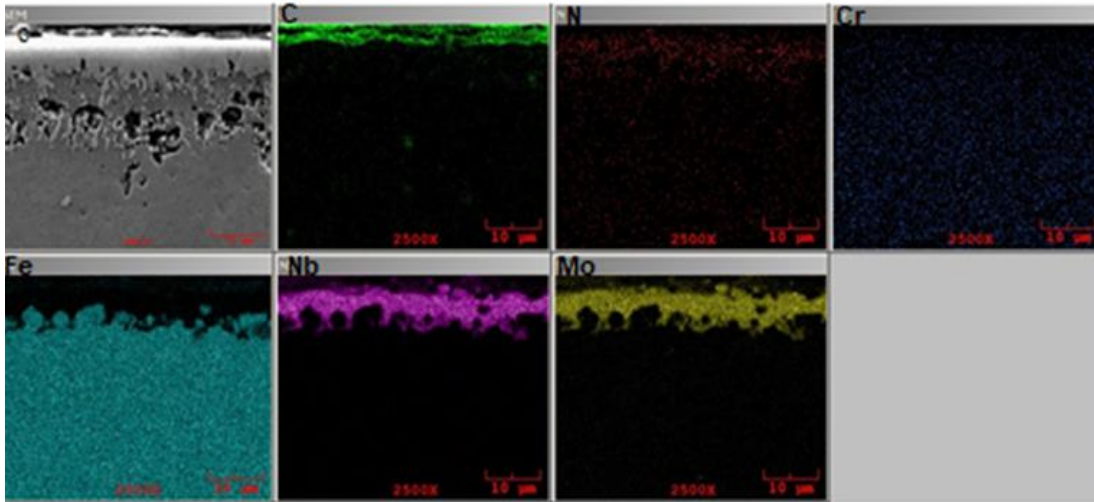
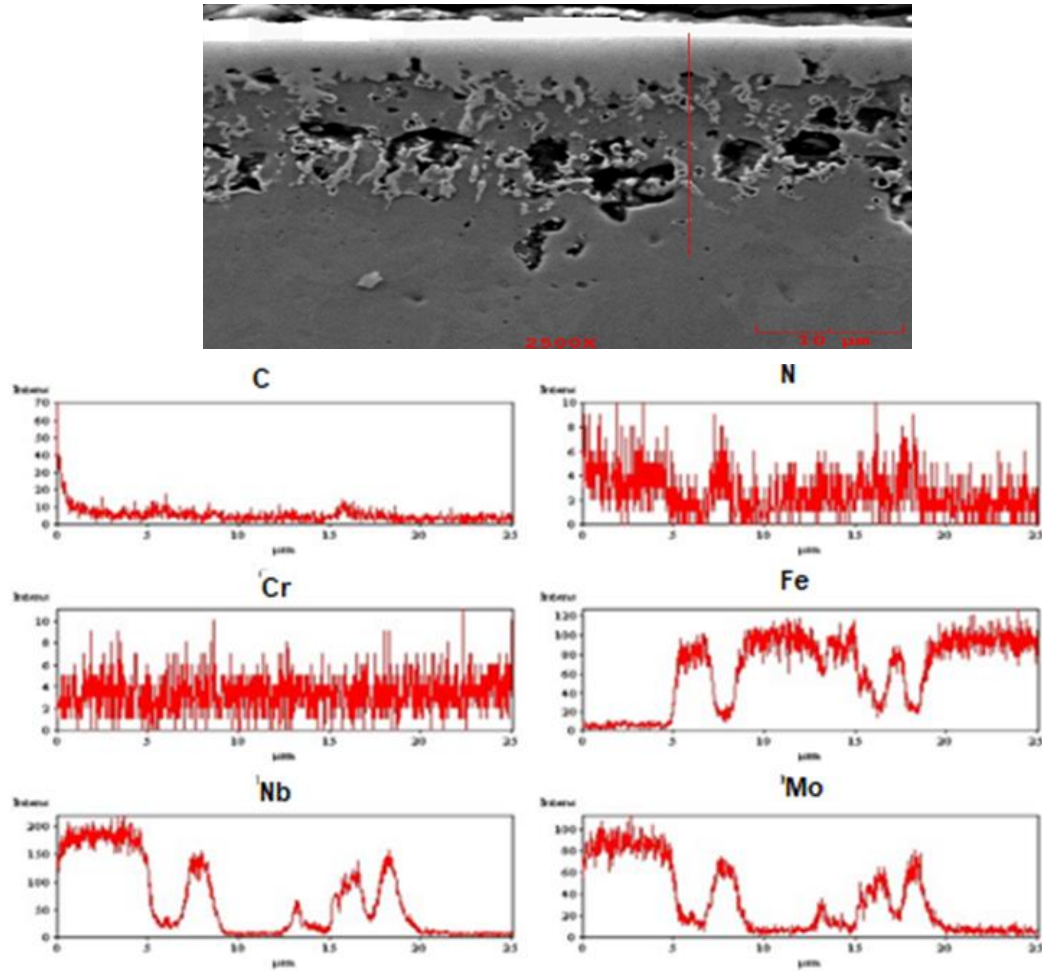
Şekil 6.10. NbN kaplanmış AISI 1010 çeliğinin SEM - EDS görüntüleri.



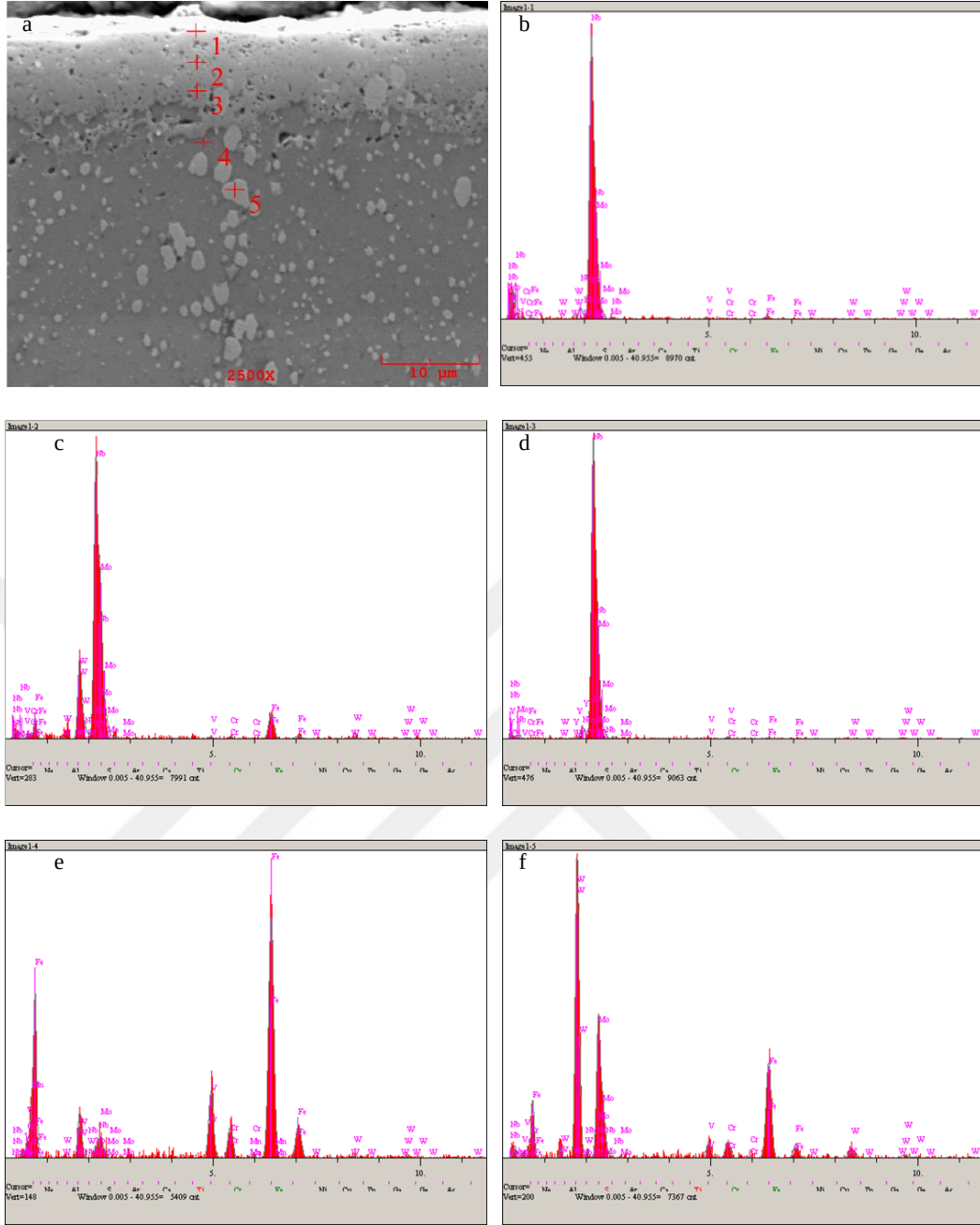
Şekil 6.11. NbN kaplanmış AISI 1010 çeliğinin SEM, MAP ve çizgisel analiz görüntüleri.



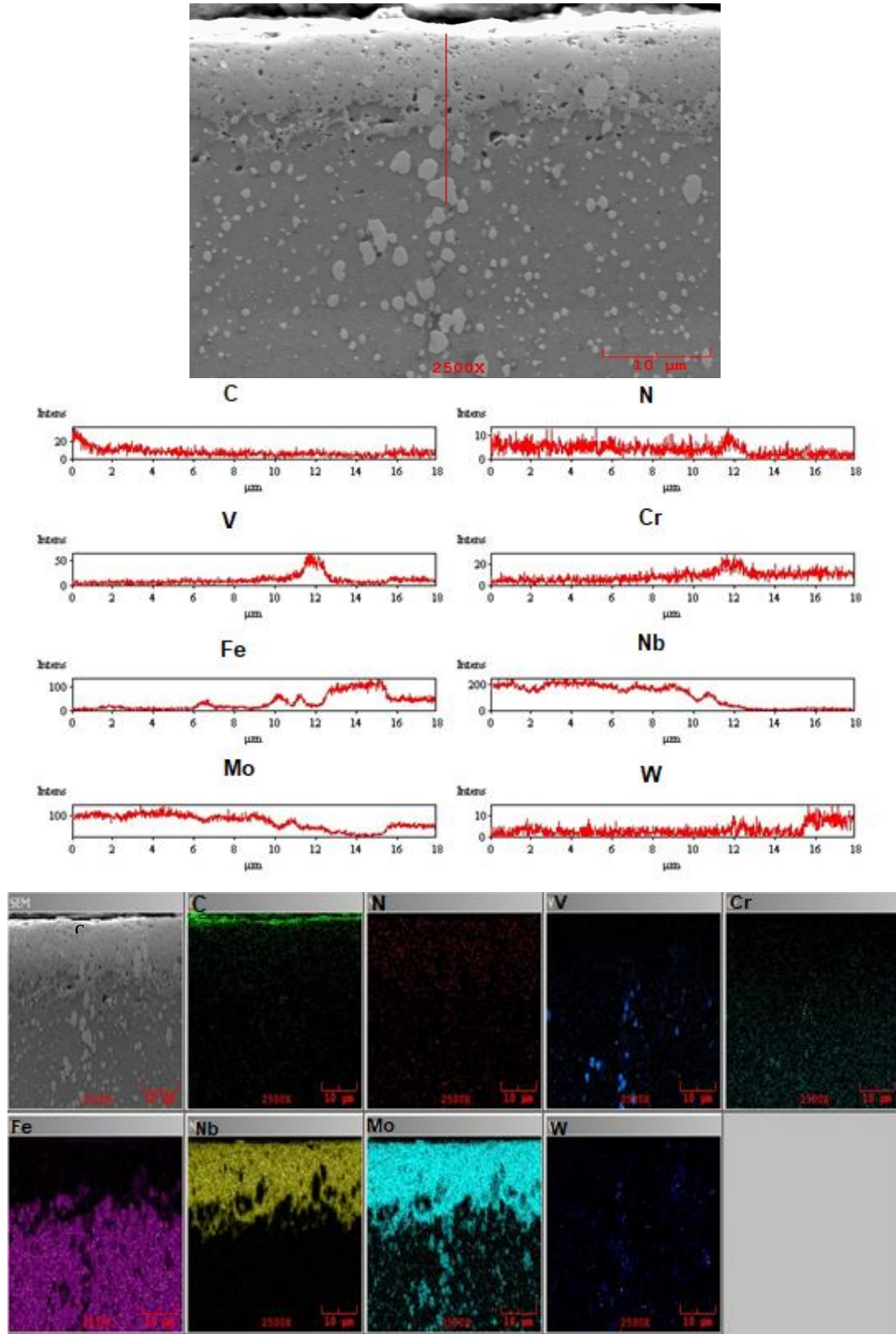
Şekil 6.21. NbN kaplanmış AISI 4140 çeliğinin SEM-EDS görüntüleri.



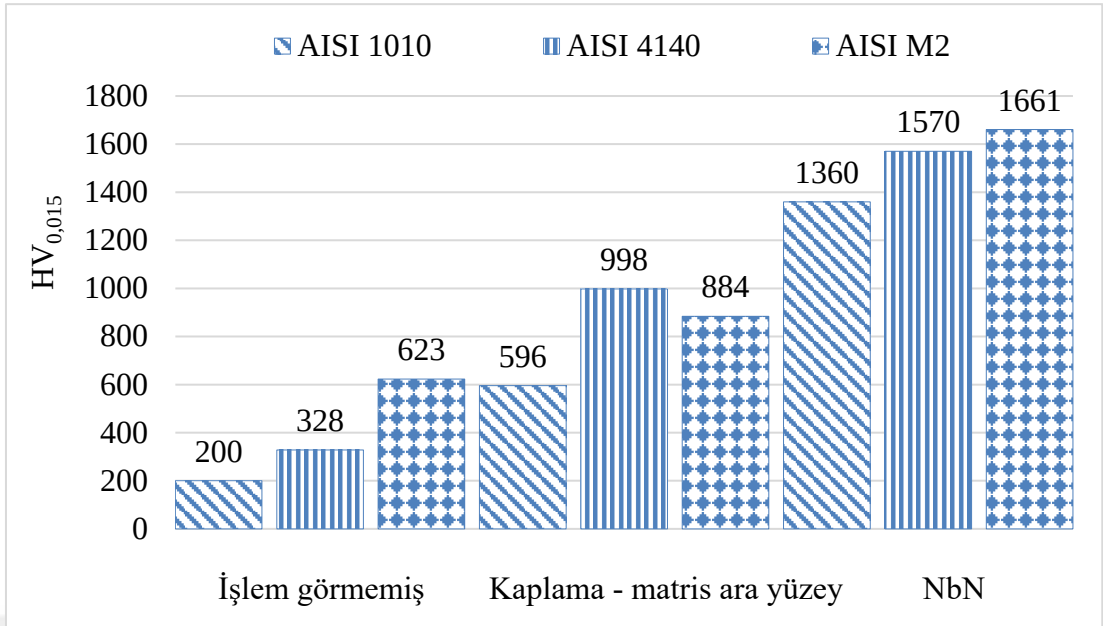
Şekil 6.12. NbN kaplanmış AISI 4140 çeliğinin SEM, MAP ve çizgisel analiz görüntüleri.



Şekil 6.23. NbN kaplanmış AISI M2 çeliğinin SEM-EDS görüntüleri.



Şekil 6.24 NbN kaplanmış AISI M2 çeliğinin SEM, MAP ve çizgisel analiz görüntüleri.



Şekil 6.25. AISI 1010, AISI 4140 ve AISI M2 çeliğinin sırasıyla işlem görmemiş yüzeyinden kaplama- matris ara yüzeyinden ve NbN kaplama yüzeyinden alınan sertlik değerleri.

6.6. Kaplamaların Korozyon Özellikleri

TRD yöntemi kullanarak oluşturulan kaplama tabakalarının korozyon davranışlarını belirlemek amacı ile Gamry marka potansiyostat-galvanostat cihazı kullanılarak testler yapılmıştır. Yapılan testler üç elektrot tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yardımcı elektrot olarak grafit kullanılırken referans elektrot olarak kalomel tercih edilmiştir. Korozyona tabi tutulan alan $0,2874 \text{ cm}^2$ 'dir, geriye kalan alanlar izole edilerek korunmuştur. Deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Korozi ortamı olarak $0,5 \text{ M NaCl}$, $1 \text{ M H}_3\text{BO}_3$, $1 \text{ M H}_3\text{PO}_4$ çözeltileri kullanılmıştır. Bu deneyler sonucu tafel ekstrapolasyon (TP) ve elektrokimyasal empedans spektrometresi (EIS) olarak iki farklı eğri elde edilmiştir.

6.6.1. Tafel ekstrapolasyon (TP) incelemeleri

Çalışmada kullanılan tafel ekstrapolasyon yönteminde akım (i)-potansiyel (E) eğrileri (Tafel) elde edilmesinde $-1,5 \text{ V}$ başlangıç ve $+1 \text{ V}$ bitiş aralığında mV/s tarama hızında testler yapılmıştır. Bu parametreler doğrultusunda elde edilen tafel grafiklerinin yardımı ile korozyon akımı (I_{kor}), korozyon potansiyeli (E_{kor}) ve korozyon hızı değerleri Gamry Echem Analyst programı kullanılarak hesaplanmıştır ve elde edilen veriler Tablo 6.3-Tablo 6.5'te verilmiştir.

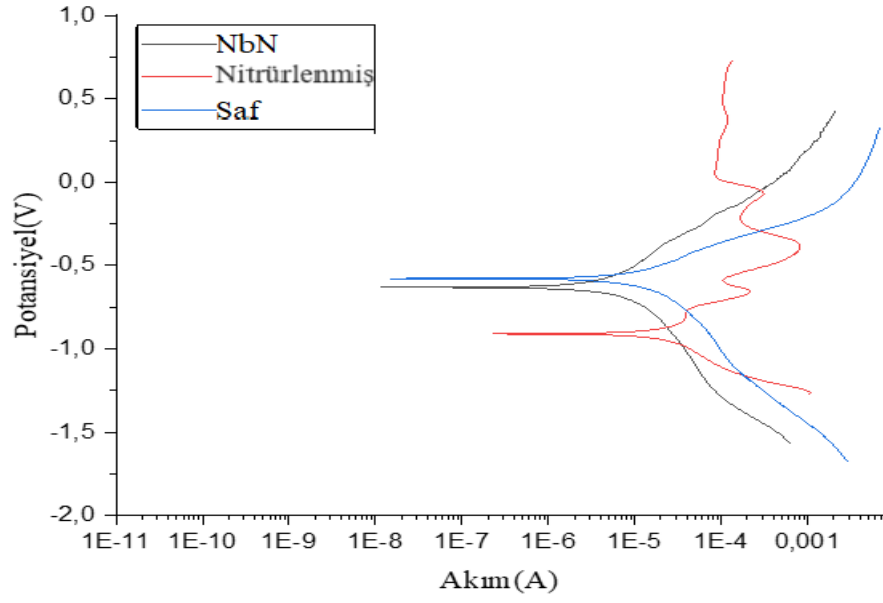
Tafel eğrilerinden korozyon deneyleri sonucu oluşan anodik ve katodik reaksiyon eğrilerine çizilen lineer teğetlerin kesiştiği noktadaki akım ve potansiyel değerleri, sırası ile korozyon akımını (I_{kor}) ve korozyon potansiyelini (E_{kor}) vermektedir. Tafel eğrilerinin yorumlanmasında elde edilen korozyon akımı (I_{kor}), korozyon potansiyeli (E_{kor}) değerleri kullanılmıştır. Elde edilen E_{kor} değerinin sıfıra yakınlığı ve I_{kor} değerinin küçülmesi malzemenin korozyon direncinin yüksek olduğunu göstergesidir.

Tafel eğrilerinden elde edilen E_{kor} ve I_{kor} değerleri korozyon hızının hesaplanmasında önemli bir paya sahiptir.

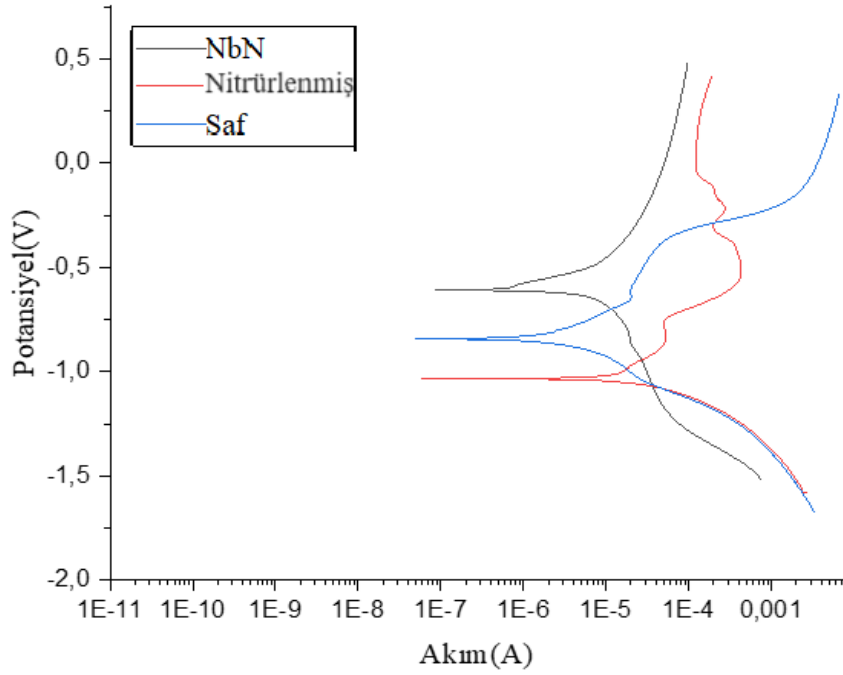
Tablo 6.3 te 0,5 M NaCl ortamında korozyona uğramış nitrürlenmiş, NbN kaplanmış ve altlık malzemelerin I_{kor} , E_{kor} ve korozyon hızı değerleri verilmiştir. Elde edilen değerler kıyaslandığında; NbN kaplanmış numunelerin, nitrürlenmiş ve altlık çeliklere nazaran korozyona daha dirençli oldukları görülmektedir.

Tablo 6.3. NaCl ortamında elde edilen tafel eğrilerinden hesaplanan değerler.

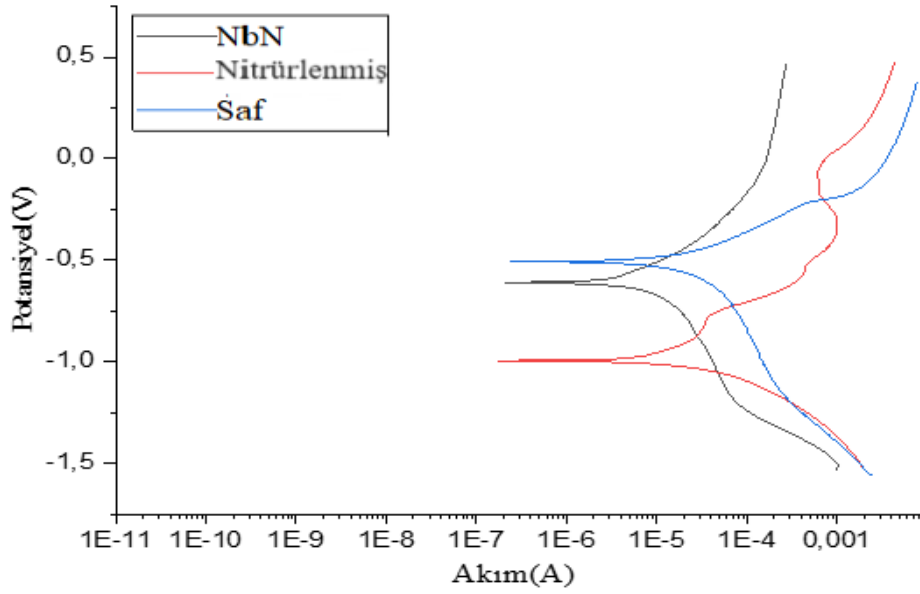
	$E_{kor}(mV)$	$I_{kor}(\mu A)$	Korozyon Hızı(mpy)
AISI 1010	-910	16,9	23,5
Nitrürlenmiş AISI 1010	-578	12,73	18,44
NbN Kaplanmış AISI 1010	-631	8,07	11,68
AISI 4140	-842	4,25	6,15
Nitrürlenmiş AISI 4140	1030	2,96	4,28
NbN Kaplanmış AISI 4140	-608	1,8	2,61
AISI M2	-507	10,61	15,37
Nitrürlenmiş AISI M2	-995	8,35	12,47
NbN Kaplanmış AISI M2	-610	8,03	12,08



Şekil 6.26. Nitrürlenmiş, NbN kaplanmış ve AISI 1010 çeliğinin 0,5 M NaCl ortamında Tafel eğrileri



Şekil 6.27. Nitrürlenmiş, NbN kaplanmış ve AISI 4140 çeliğinin 0,5 M NaCl ortamında Tafel eğrileri

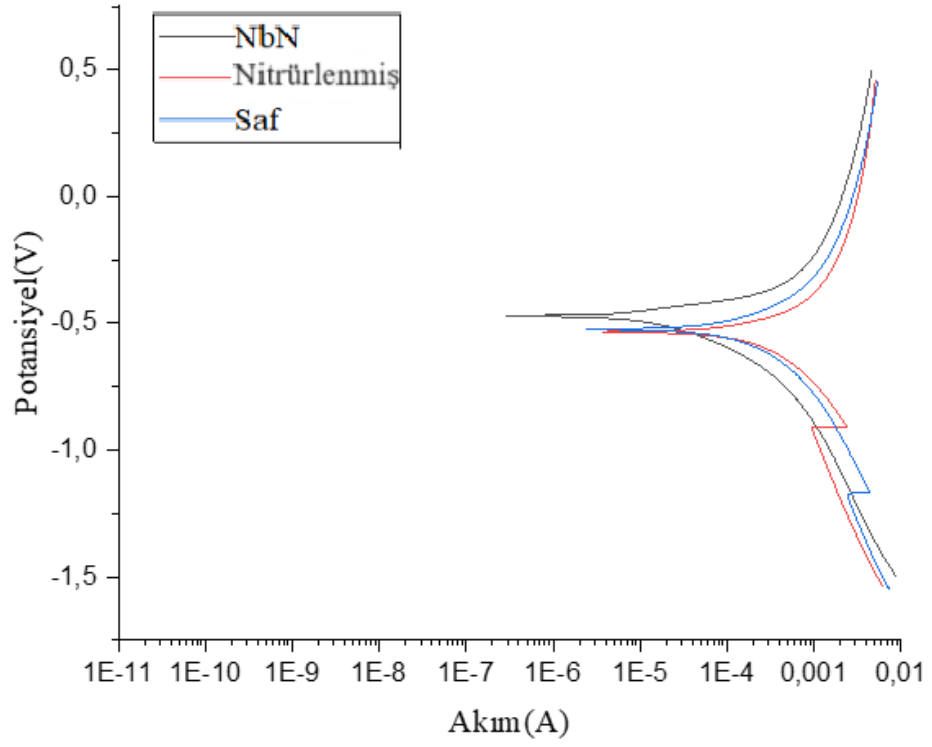


Şekil 6.28. Nitrürlenmiş, NbN kaplanmış ve AISI M2 çeliğinin 0,5 M NaCl ortamında Tafel eğrileri

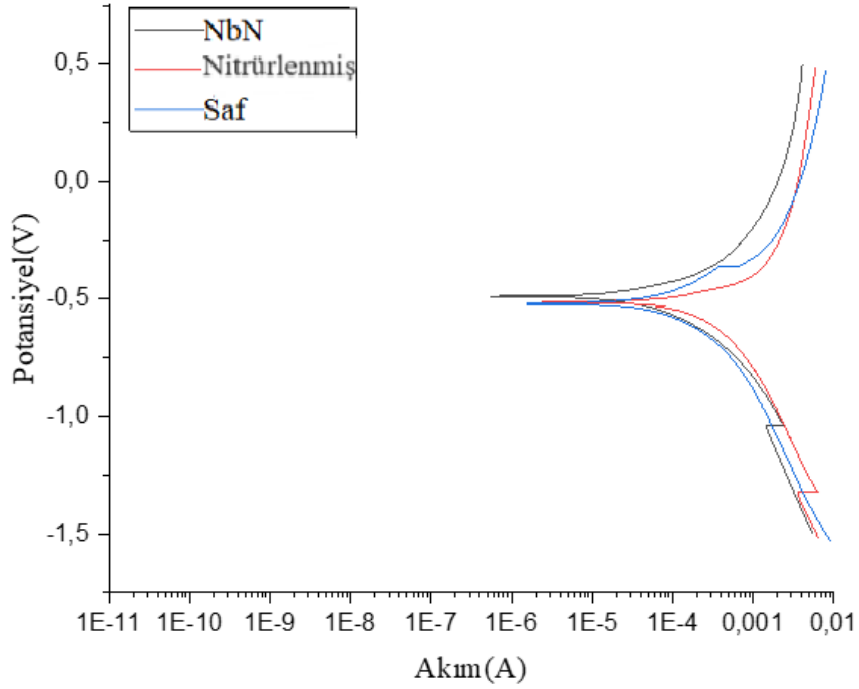
Tablo 6.4'te 1M H₃PO₄ ortamında korozyona uğramış nitrürlenmiş, NbN kaplanmış ve işlem görmemiş altlık AISI 1010, AISI 4140 ve AISI M2 çeliklerinin korozyonun sahip olduğu akımını (I_{kor}), korozyonun sahip olduğu potansiyel (E_{kor}) ve korozyon hızı değerleri tabloda verilmiştir. Tablodan anlaşıldığı gibi NbN kaplanmış numuneler korozyona, nitrürlenmiş ve saf hallerine göre daha dayanıklıdır.

Tablo 6.4. 1M H₃PO₄ ortamında elde edilen tafel eğrilerinden hesaplanan sonuçlar.

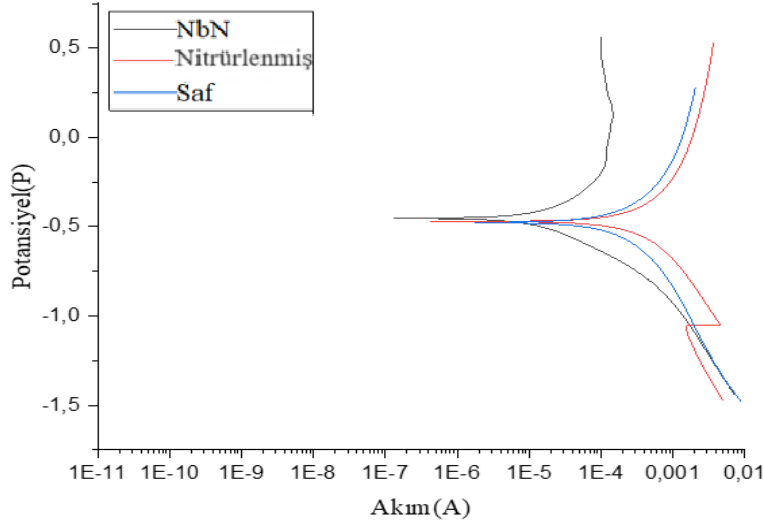
Numuneler	$E_{kor}(mV)$	$I_{kor}(\mu A)$	Korozyon Hızı(mpy)
AISI 1010	-534	168	243,33
Nitrürlenmiş AISI 1010	-524	155	224,23
NbN Kaplanmış AISI 1010	-471	10,08	14,57
AISI 4140	-518	148,66	214,76
Nitrürlenmiş AISI 4140	-516	101,86	148,3
NbN Kaplanmış AISI 4140	-488	32,23	46,6
AISI M2	-477	341	493,46
Nitrürlenmiş AISI M2	-473	315,33	456,5
NbN Kaplanmış AISI M2	-453	19,33	28,55



Şekil 6.29. Nitrürlenmiş, NbN kaplanmış ve AISI 1010 çeliğinin 1 M H_3PO_4 ortamında Tafel eğrileri.



Şekil 6.30. Nitrürlenmiş, NbN kaplanmış ve AISI 4140 çeliğinin 1 M H_3PO_4 ortamında Tafel eğrileri.

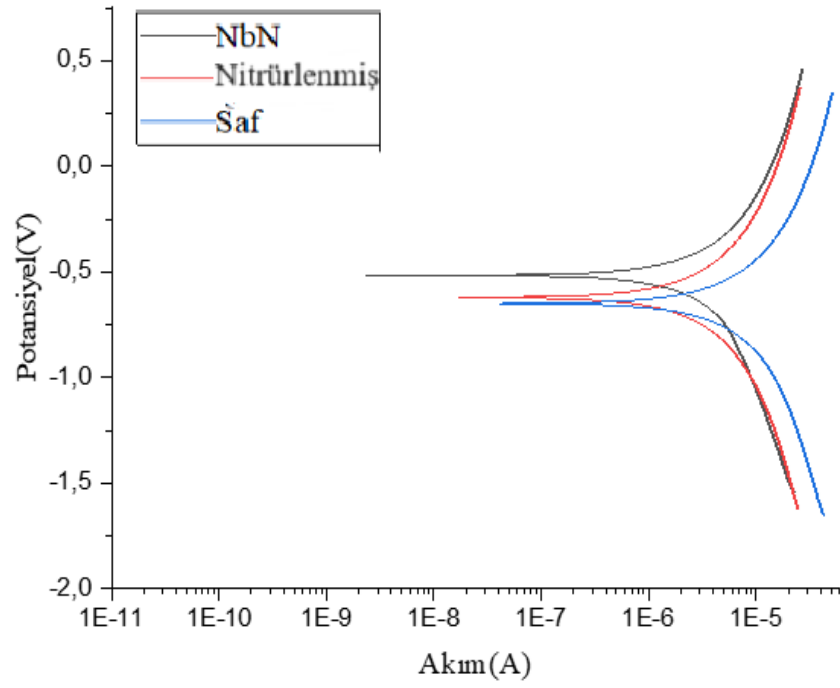


Şekil 6.31. Nitrürlenmiş, NbN kaplanmış ve AISI M2 çeliğinin 1 M H₃PO₄ ortamında Tafel eğrileri.

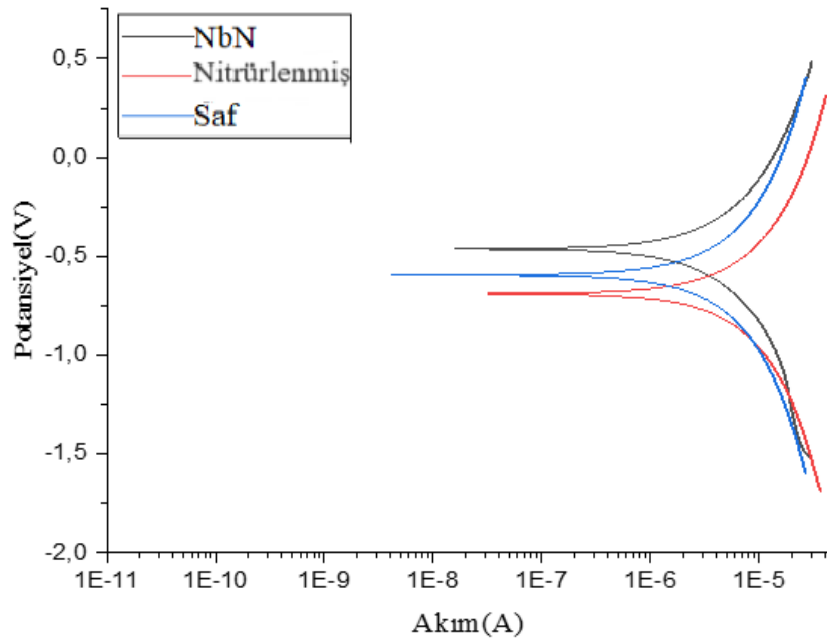
Tablo 6.5'te 1M H₃BO₃ ortamında korozyona uğramış nitrürlenmiş, NbN kaplanmış ve işlem görmemiş altlık AISI 1010, AISI 4140 ve AISI M2 çeliklerinin korozyonun sahip olduğu akımını (I_{kor}), korozyonun sahip olduğu potansiyel (E_{kor}) ve korozyon hızı değerleri tabloda verilmiştir. Tablodan anlaşıldığı gibi NbN kaplanmış numuneler korozyona, nitrürlenmiş ve saf hallerine göre daha dayanıklıdır.

Tablo 6.5. 1M H₃BO₃ ortamında elde edilen tafel eğrilerinden hesaplanan sonuçlar.

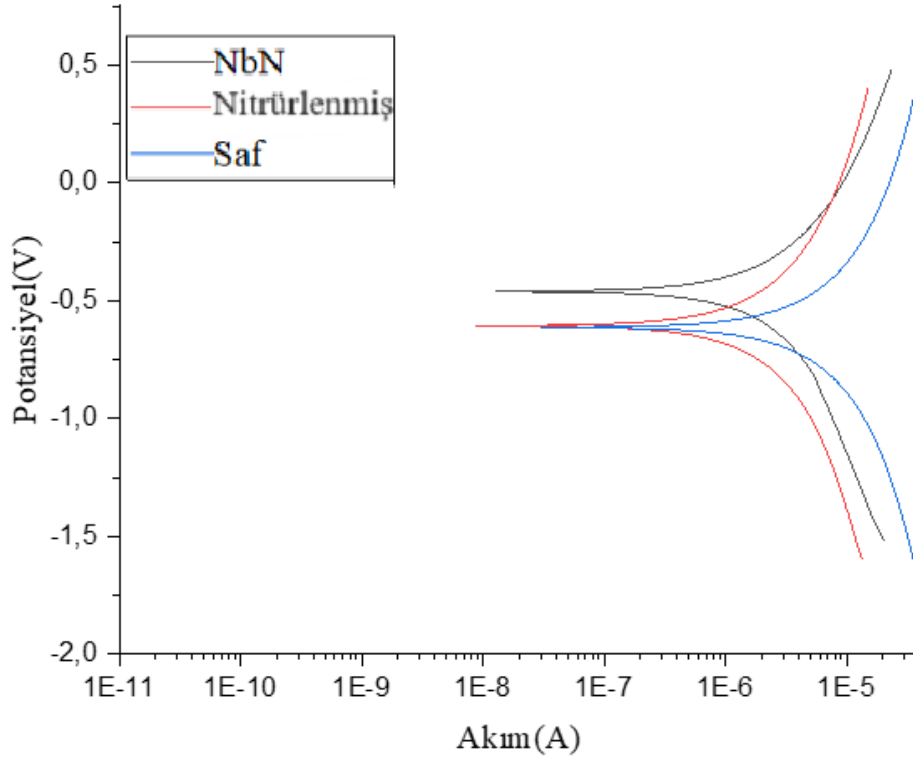
Numuneler	$E_{kor}(mV)$	$I_{kor}(\mu A)$	Korozyon Hızı(mpy)
AISI 1010	-649	8,26	9,92
Nitrürlenmiş AISI 1010	-621	5,45	7,89
NbN Kaplanmış AISI 1010	-516	5,29	7,66
AISI 4140	-594	8,60	12,44
Nitrürlenmiş AISI 4140	-689	7,97	11,52
NbN Kaplanmış AISI 4140	-462	6,67	9,65
AISI M2	-613	36,43	52,78
Nitrürlenmiş AISI M2	-606	4	5,78
NbN Kaplanmış AISI M2	-460	3,76	5,44



Şekil 6.32. Nitrürlenmiş, NbN kaplanmış ve AISI 1010 çeliğinin 1 M H_3BO_3 ortamında Tafel eğrileri.



Şekil 6.33. Nitrürlenmiş, NbN kaplanmış ve AISI 4140 çeliğinin 1 M H_3BO_3 ortamında Tafel eğrileri.



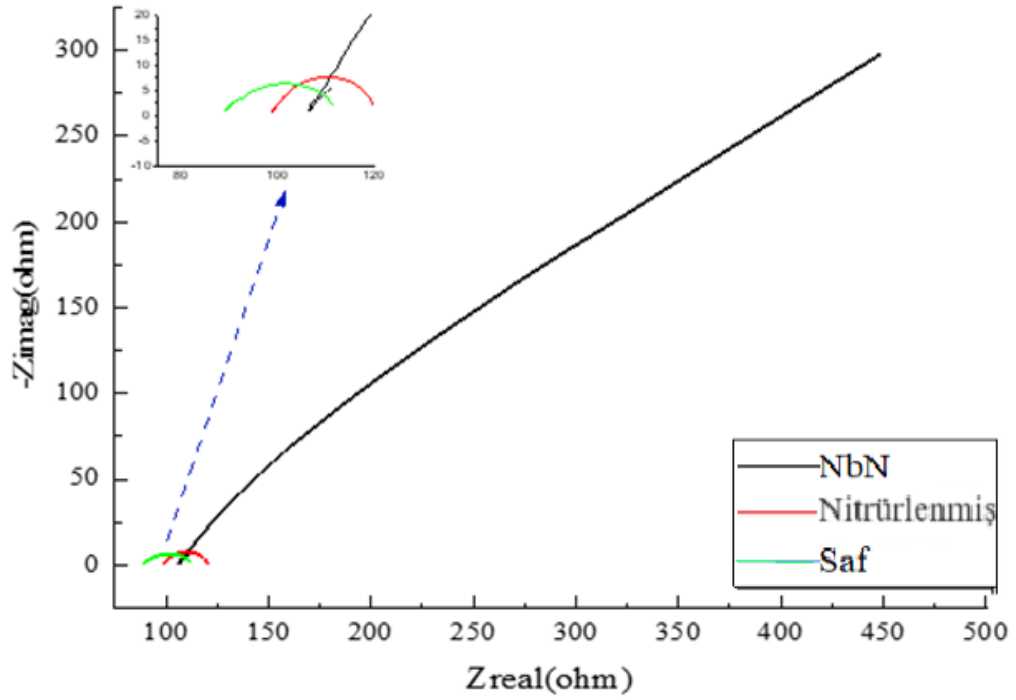
Şekil 6.34. Nitrürlenmiş, NbN kaplanmış ve AISI M2 çeliğinin 1 M H₃BO₃ ortamında Tafel eğrileri.

6.6.2. EIS incelemeleri

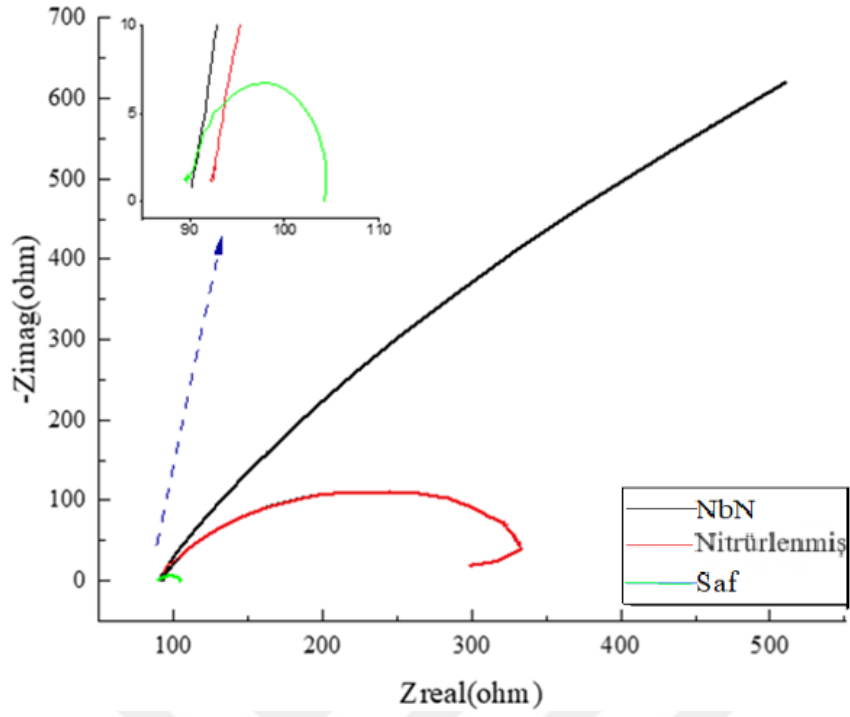
Alternatif akım yöntemlerinden olan EIS yöntemi ile 1 Hz ile 300000 Hz frekans aralığında ve 10 mV rms alternatif voltaj parametrelerinde korozyon testleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen testler ile elde edilen gerçek empedans ve sanal empedans değerleri arasında oluşturulan Nyquist eğrilerinin sahip olduğu çaplar korozyona maruz kalan NbN tabakalarının korozyon direnci hakkında yorum yapılmasına olanak sağlamaktadır. Test sonucu elde edilen bu eğrilerinin çapının büyük olması çeliklerin korozyon direncinin yüksek olduğunu göstermektedir. Aşağıda 530°C’de nitrürlenmiş 1000°C’de NbN kaplanmış ve işlem görmemiş çeliklerin Nyquist eğrileri verilmiştir. Eğrilerin çaplarının dar veya geniş olması malzemenin korozyona davranışı hakkında bilgi vermektedir Geniş çapa sahip eğriler malzemelerin korozyon direnci yüksek olduğunu göstermektedir.

Aşağıda verilen Nyquist eğrilerine bakıldığında 0,5 M NaCl, 1 M H₃PO₄, 1M H₃BO₃ olan üç farklı korozyon ortamında NbN kaplı numunelerin korozyon dirençlerinin yüksek olduğu görülmektedir. NbN kaplanmış çelikler kendi aralarında korozyon

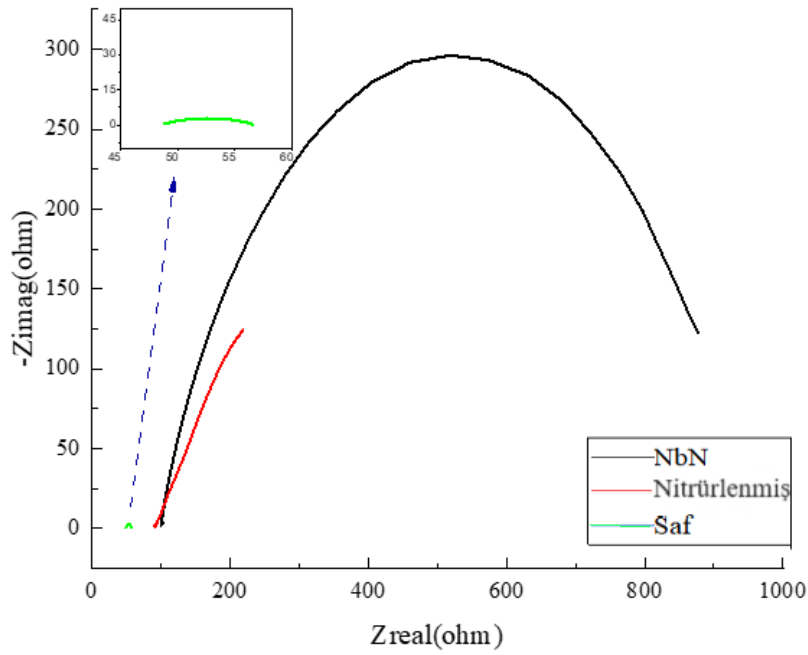
direnci bakımından karşılaştırıldığında NaCl ortamında en yüksek dirence sahip çelikler sırası ile AISI M2, AISI 4140 ve AISI 1010 olarak görülmektedir. 1 M H_3PO_4 ortamında çelikler korozyon direnci bakımından karşılaştırılmak istenirse en yüksek dirence sahip çelikler sırası ile AISI M2, AISI 1010 ve AISI 4140 olarak gözlemlenmiştir. 1 M H_3BO_4 ortamında uygulanan testler neticesinde alınan grafikler incelediğinde en yüksek korozyon direnci gösteren çelikler sırası ile AISI M2, AISI 4140 ve AISI 1010 olarak belirlenmiştir.



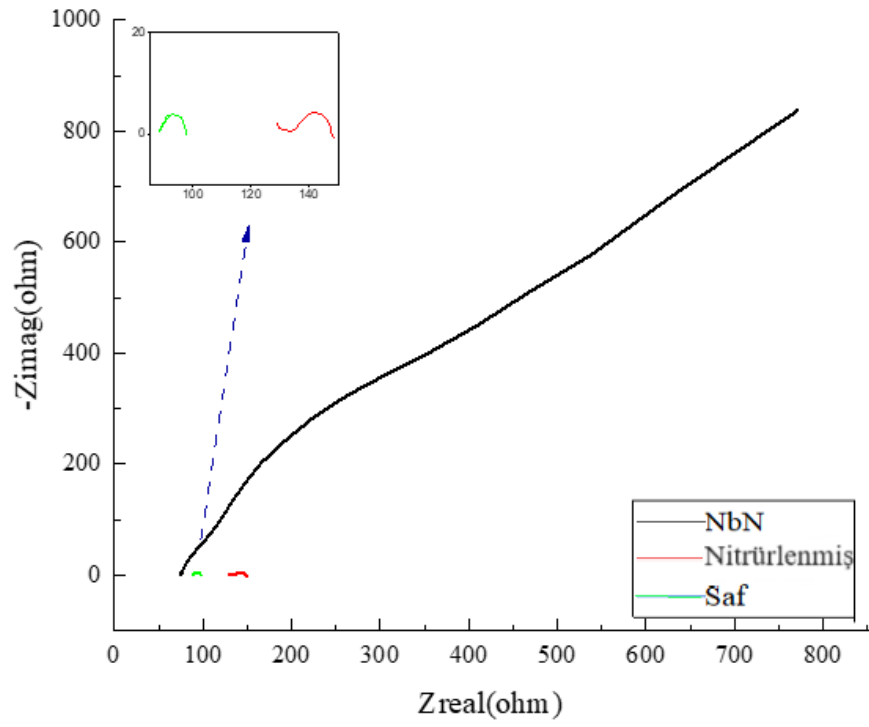
Şekil 6.35. Nitrülenmiş NbN kaplanmış ve AISI 1010 çeliğinin 0,5 M NaCl ortamında Nyquist eğrileri.



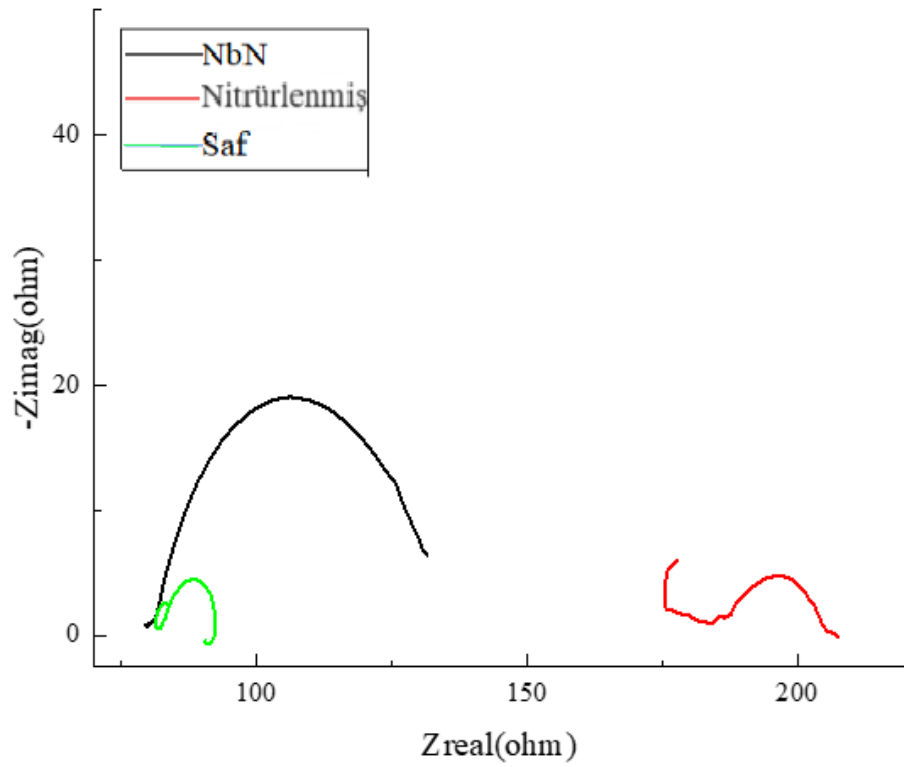
Şekil 6.36. Nitrürlenmiş NbN kaplanmış ve AISI 4140 çeliğinin 0,5 M NaCl ortamında Nyquist eğrileri.



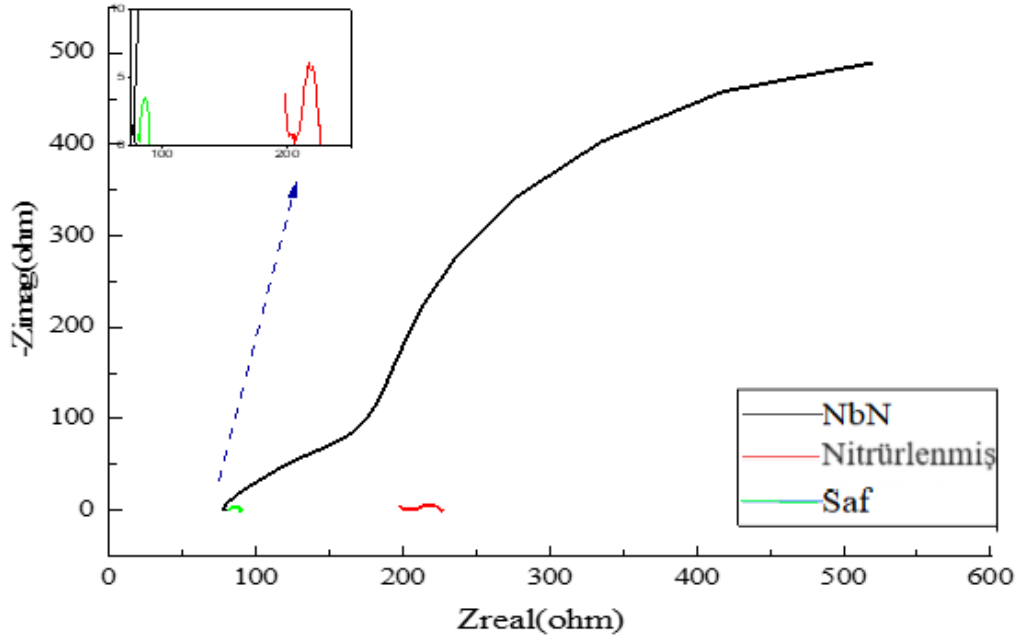
Şekil 6.37. Nitrürlenmiş NbN kaplanmış ve AISI M2 çeliğinin 0,5 M NaCl ortamında Nyquist eğrileri.



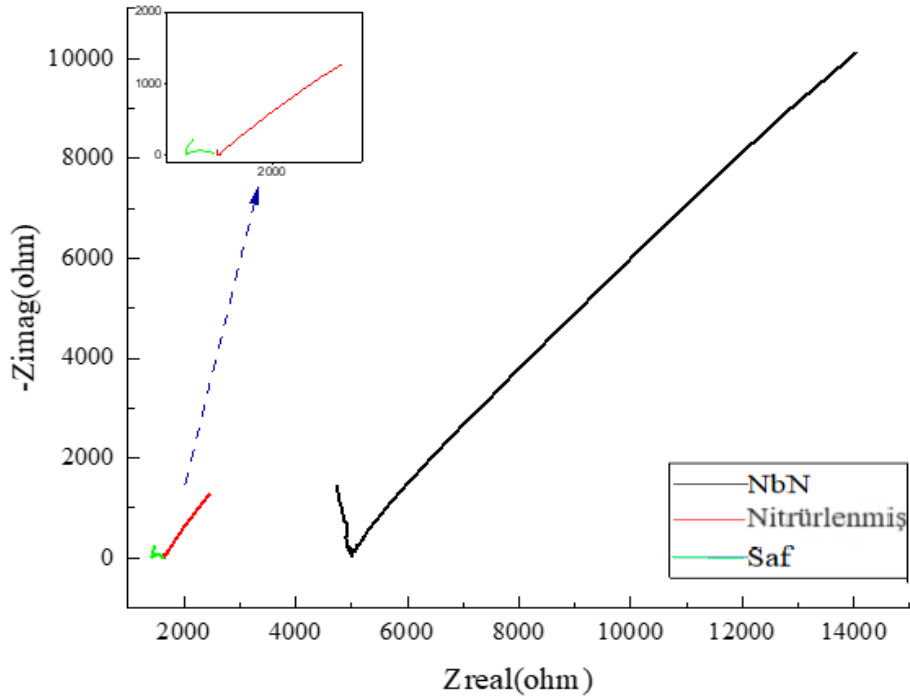
Şekil 6.38. Nitrürlenmiş, NbN kaplanmış ve AISI 1010 çeliğinin 1 M H_3PO_4 ortamında Nyquist eğrileri.



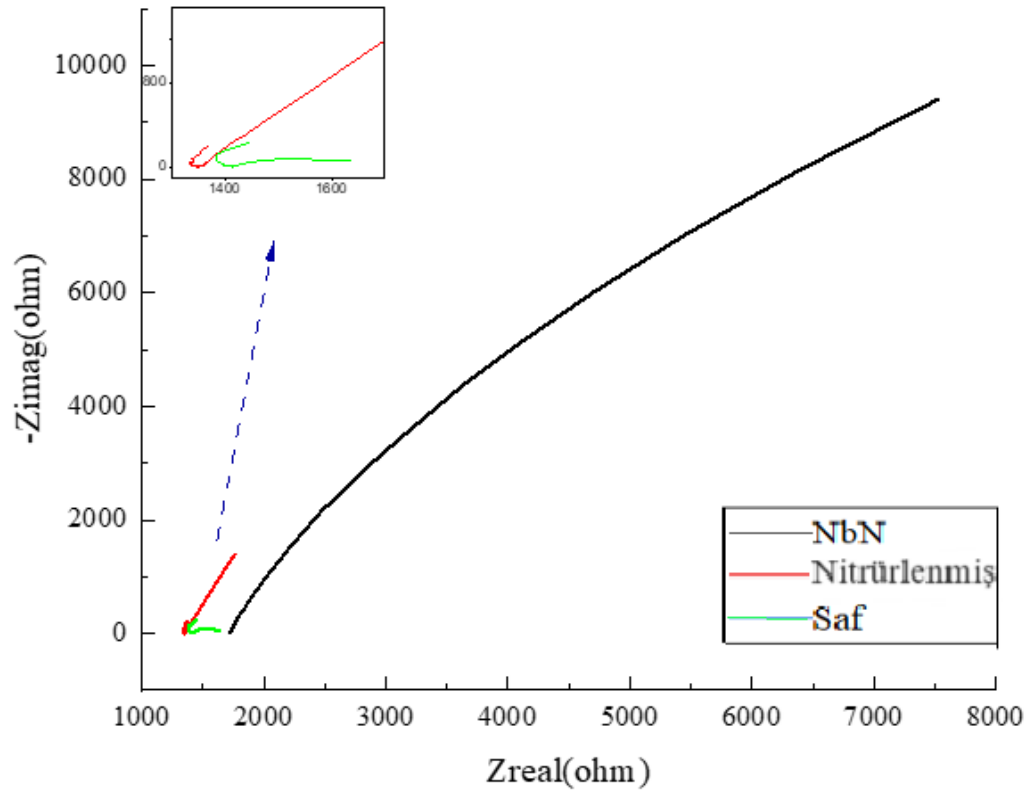
Şekil 6.39. Nitrürlenmiş, NbN kaplanmış ve AISI 4140 çeliğinin 1 M H_3PO_4 ortamında Nyquist eğrileri



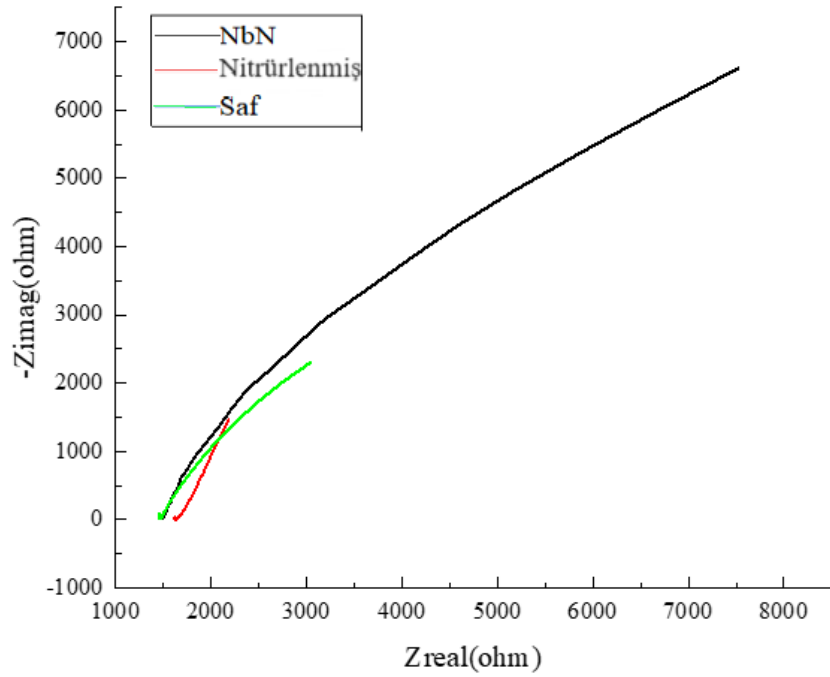
Şekil 6.40. 1 Nitrürlenmiş, NbN kaplanmış ve AISI M2 çeliğinin 1 M H_3PO_4 ortamında Nyquist eğrileri.



Şekil 6.41. Nitrürlenmiş, NbN kaplanmış ve AISI 1010 çeliğinin 1 M H_3BO_3 ortamında Nyquist eğrileri.



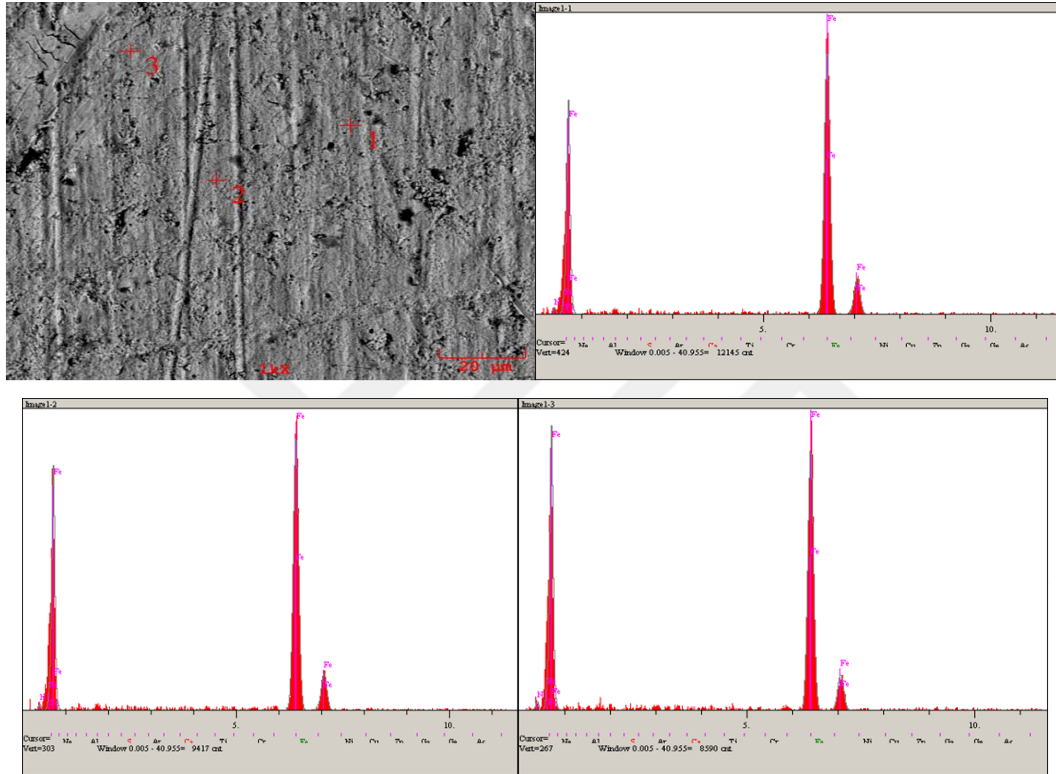
Şekil 6.42. Nitrürlenmiş, NbN kaplanmış ve AISI 4140 çeliğinin 1 M H_3BO_3 ortamında Nyquist eğrileri.



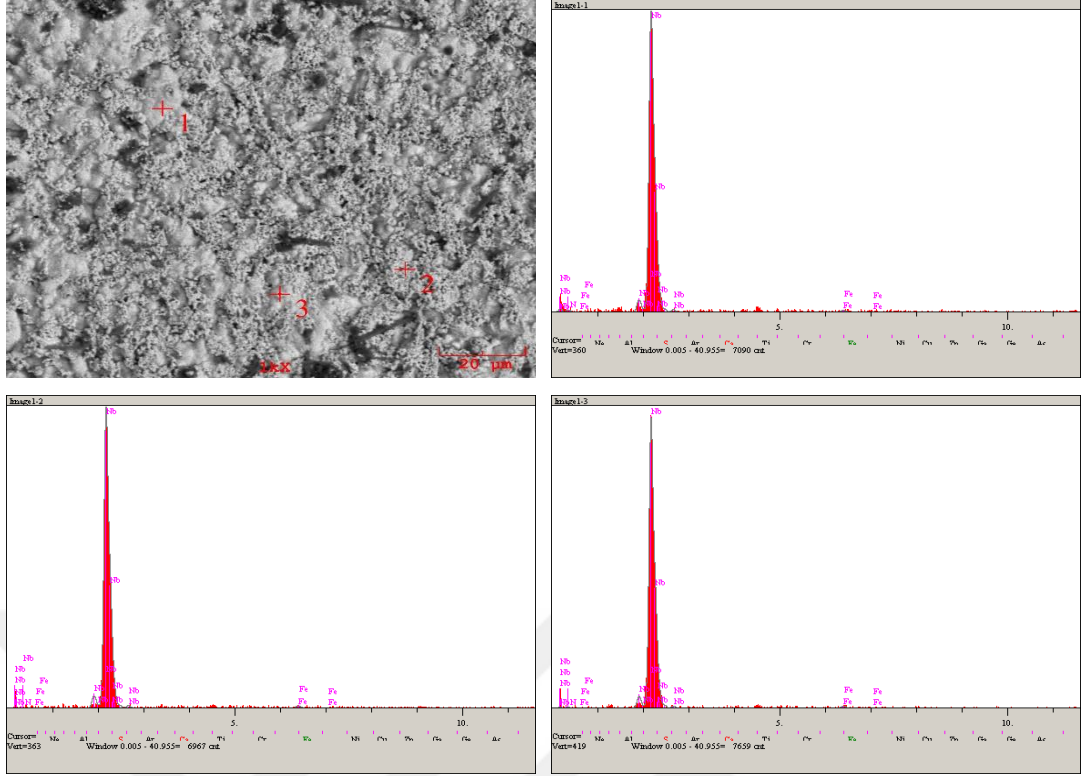
Şekil 6.43. Nitrürlenmiş, NbN kaplanmış ve AISI M2 çeliğinin 1 M H_3BO_3 ortamında Nyquist eğrileri.

6.6.3. Korozyon sonrası mikroyapı incelemesi ve elementel analiz

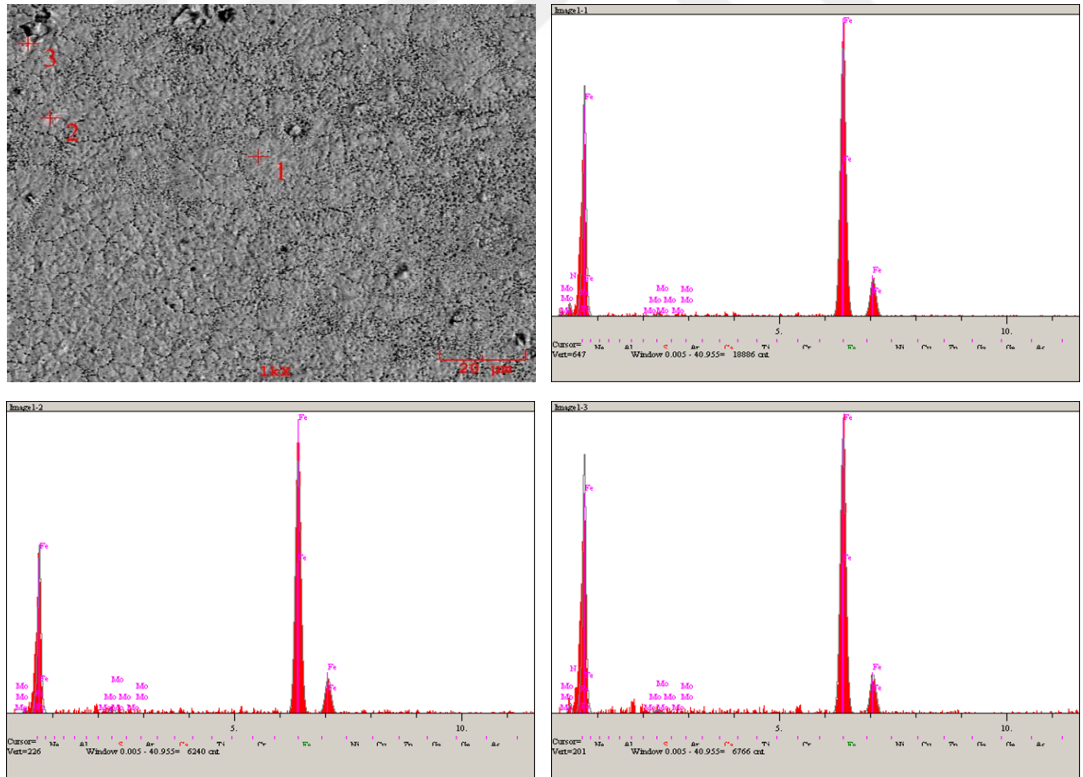
Korozyon deneylerinin gerçekleştirilmesinin ardından korozyonun olduğu korozif bölgede oluşan elementlerin ve korozyona uğramış bölgenin mikroyapısının incelenmesi amacı ile taramalı elektron mikroskobu yardımı ile SEM ve EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. Korozyon çözeltisi olarak 0,5 M NaCl, 1M H₃BO₃, 1M H₃PO₄ kullanılmıştır. Her bir ortam ve numune için alınan SEM ve EDS analizleri aşağıda Şekil 6.44-6.76’da verilmiştir.



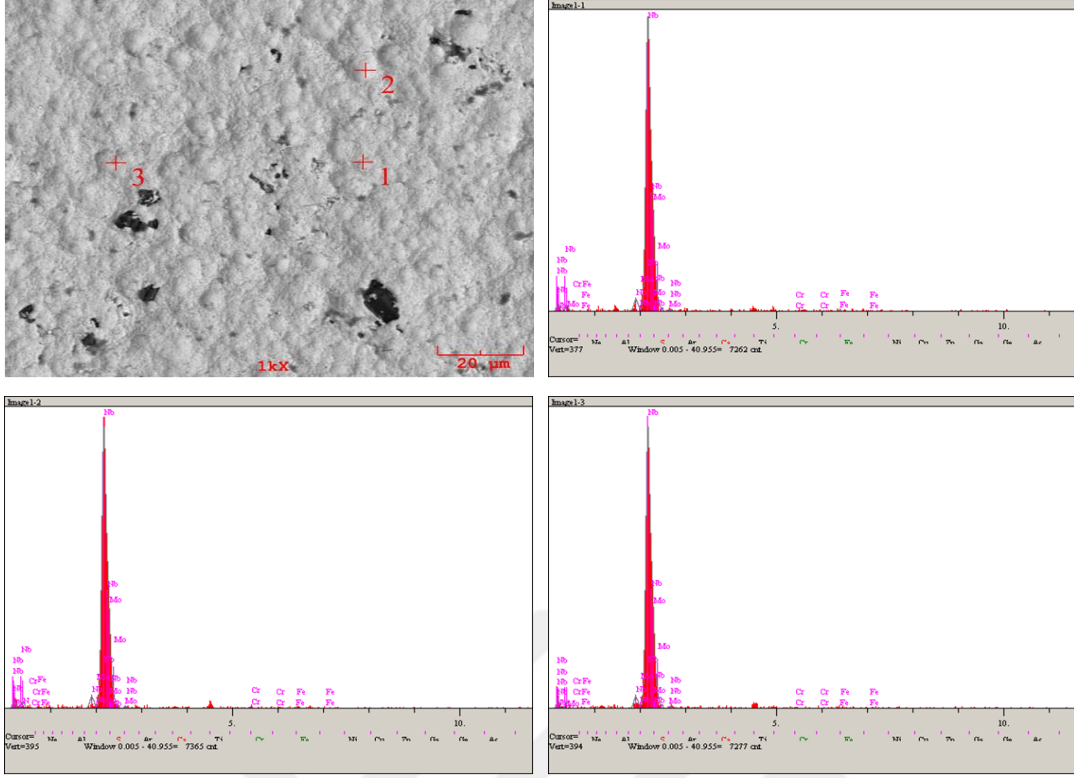
Şekil 6.44. Nitrürlenmiş AISI 1010 çeliğinin korozyon öncesi SEM ve EDS görüntüleri



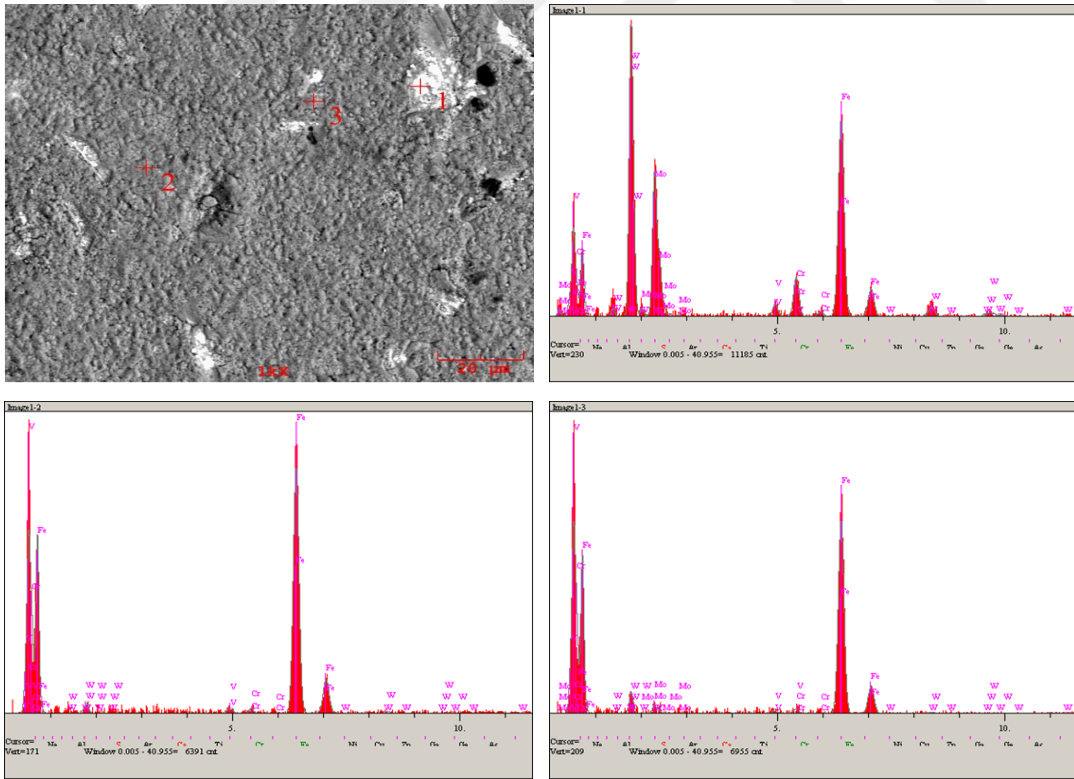
Şekil 6.45. NbN kaplanmış AISI 1010 çeliğinin korozyon öncesi SEM ve EDS görüntüleri



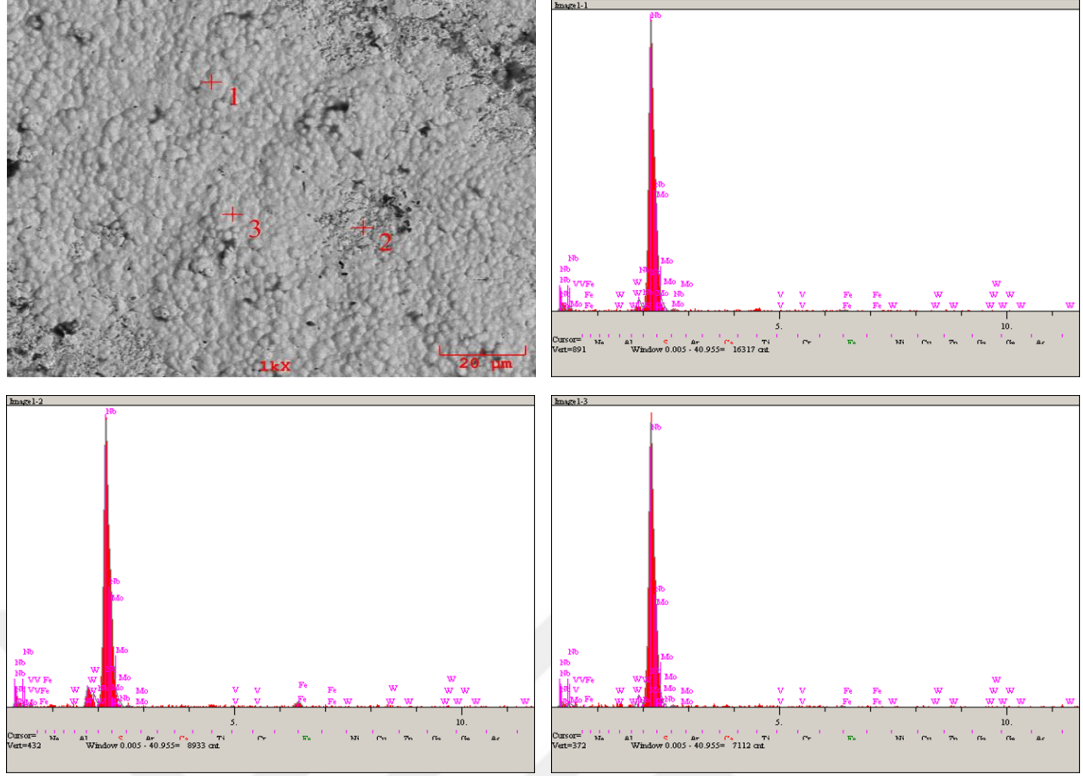
Şekil 6.46. Nitrürlenmiş AISI 4140 çeliğinin korozyon öncesi SEM ve EDS görüntüleri



Şekil 6.47. NbN kaplanmış AISI 4140 çeliğinin korozyon öncesi SEM ve EDS görüntüleri



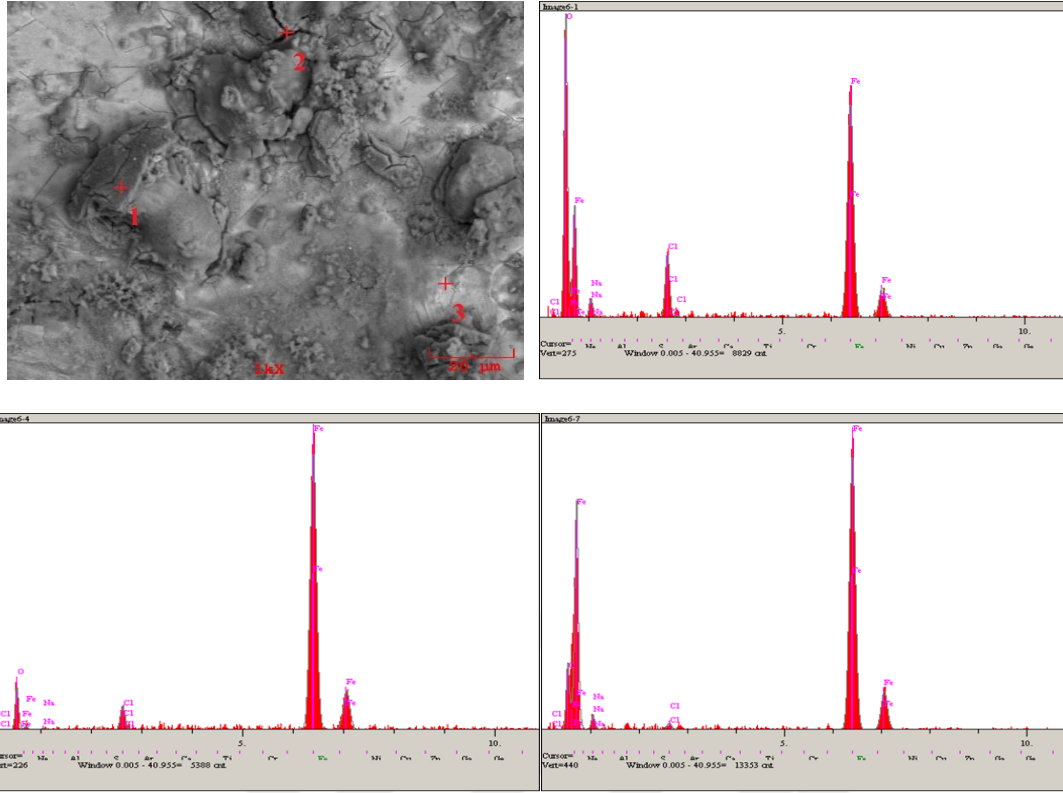
Şekil 6.48. Nitrürlenmiş AISI M2 çeliğinin korozyon öncesi SEM ve EDS görüntüleri



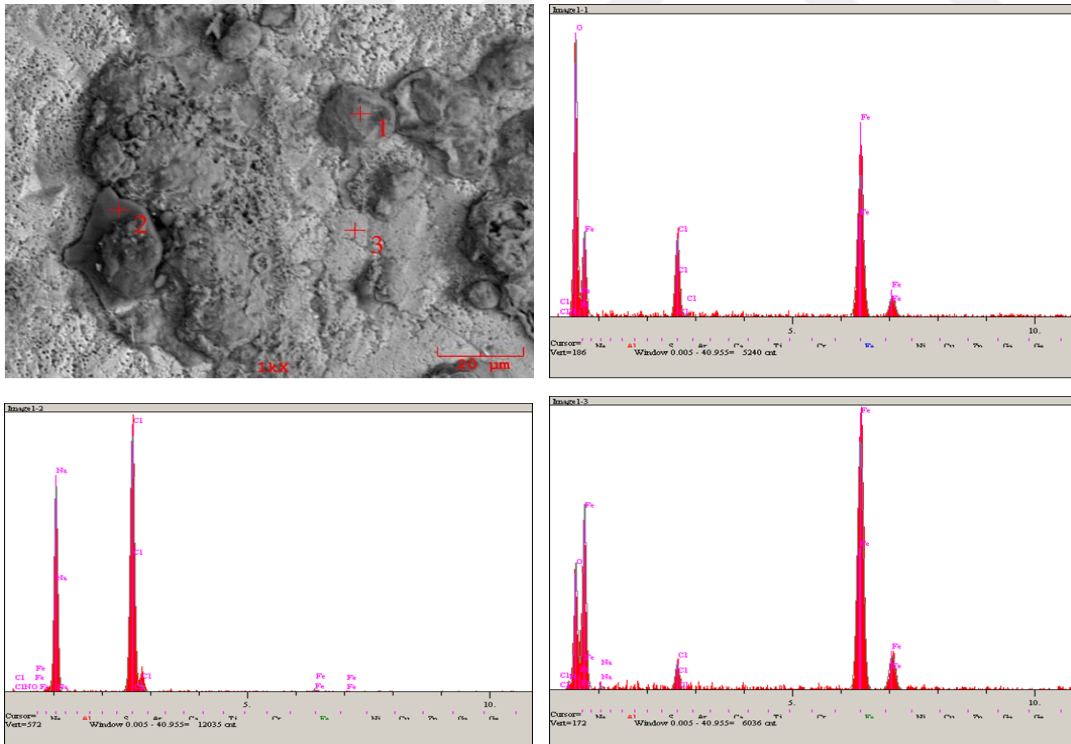
Şekil 6.49. NbN kaplanmış AISI M2 çeliğinin korozyon öncesi SEM ve EDS görüntüleri

TRD yöntemi ile NbN kaplanan ve nitrürlenmiş çeliklerin yüzeylerinden korozyon deneyi öncesi SEM ve EDS analizleri alınmıştır. SEM görüntülerinde NbN kaplama işlemine tabi tutulmuş her üç çelik numune AISI 1010, AISI 4140, AISI M2 çeliklerinin yüzeyinde oluşan NbN kaplamanın varlığı ve kaplamanın yoğunlukla homojen olduğu gözlemlenmiştir. EDS analizlerinde ise Nb ve N elementlerinin varlığı görülmektedir. Bu durum bize yüzeyde NbN oluşumunun gerçekleştiğini kanıtlamaktadır. Bunun yanı sıra çeliklerin sahip olduğu alaşım elementleri de EDS analizinde mevcuttur.

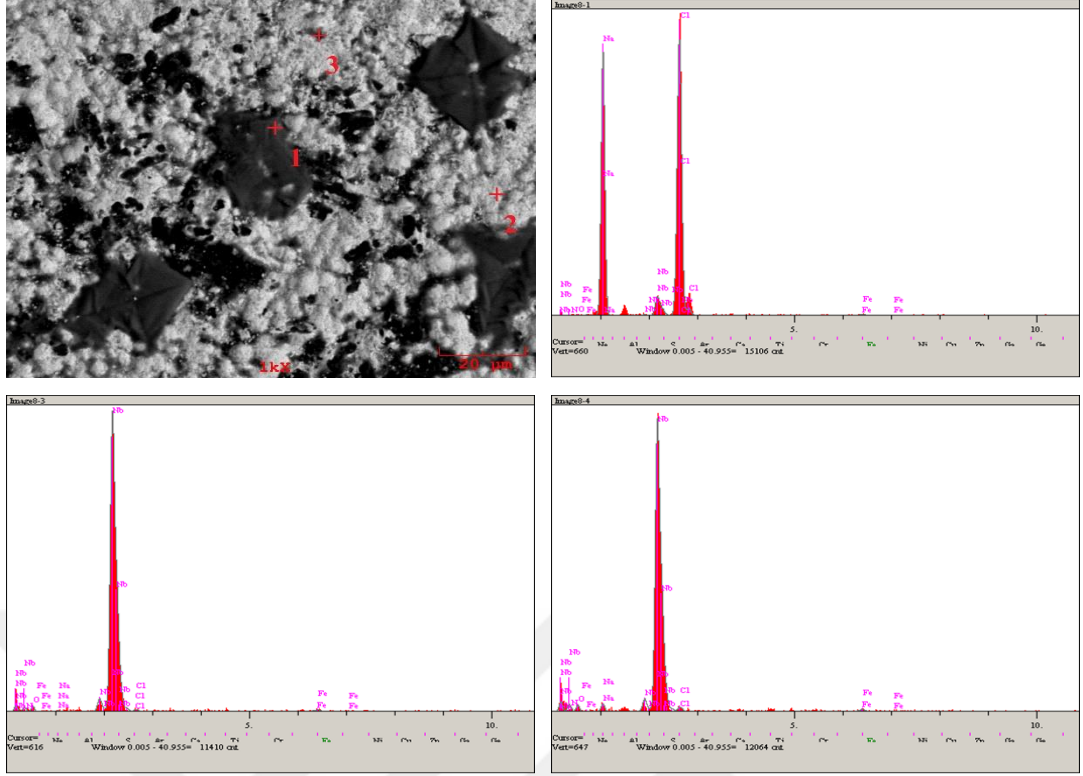
530°C sıcaklıkta 10 saat nitrülenmiş çeliklerin yüzeylerinden alınan SEM ve EDS analizlerinde AISI 1010, AISI 4140, AISI M2 çeliklerinin yüzeyine difüze olan azot görülmektedir. EDS analizlerinde ise N elementlerinin varlığı görülmektedir. Bu durum nitrüleme işleminin gerçekleştiğini ve yüzeyde bir nitrür tabakası oluşturduğunu kanıtlamaktadır.



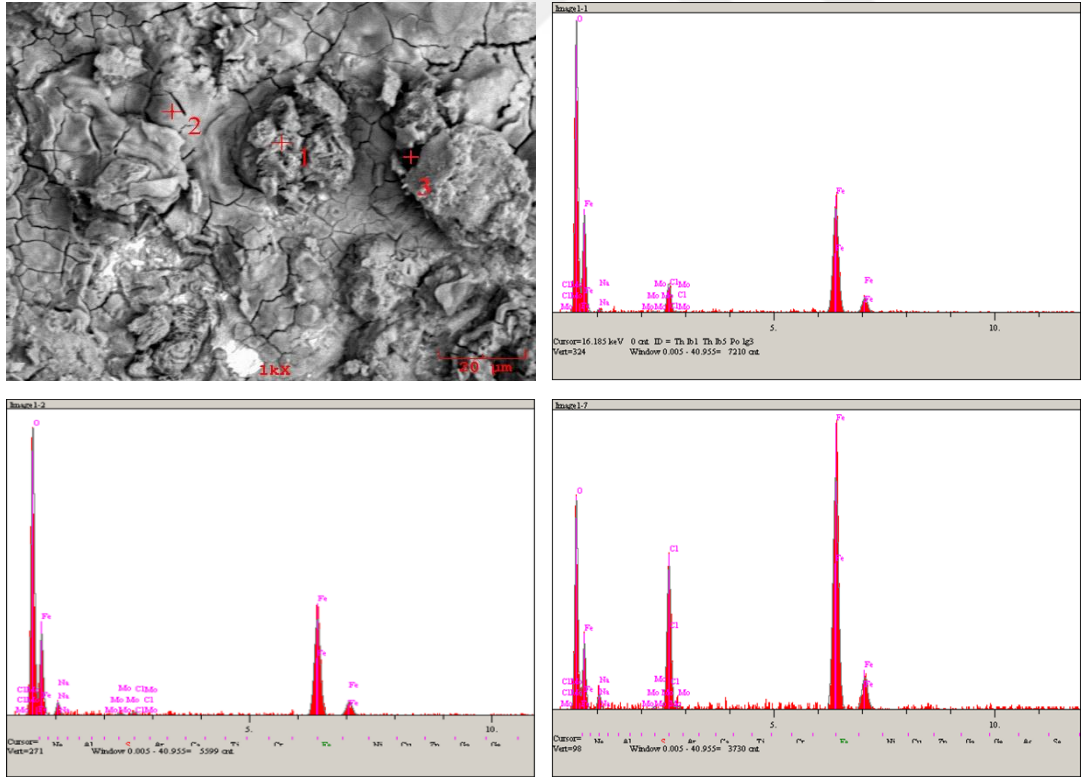
Şekil 6.50. AISI 1010 çeliğinin NaCl ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.



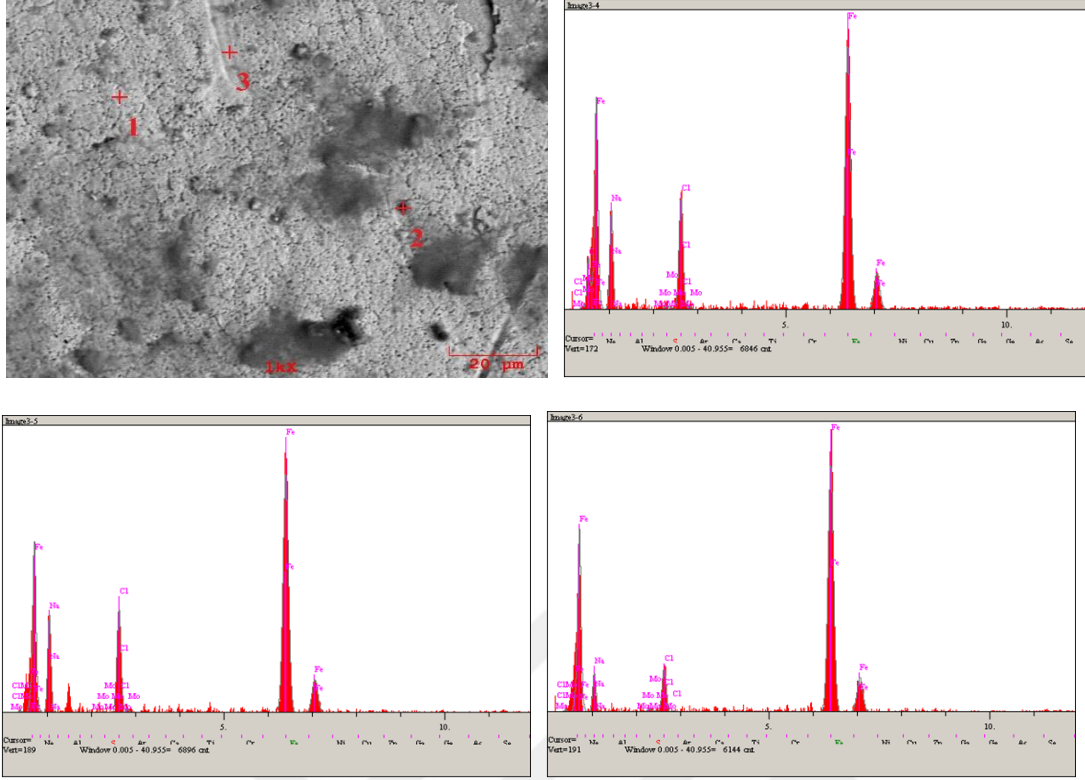
Şekil 6.51. Nitrürlenmiş AISI 1010 çeliğinin NaCl ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.



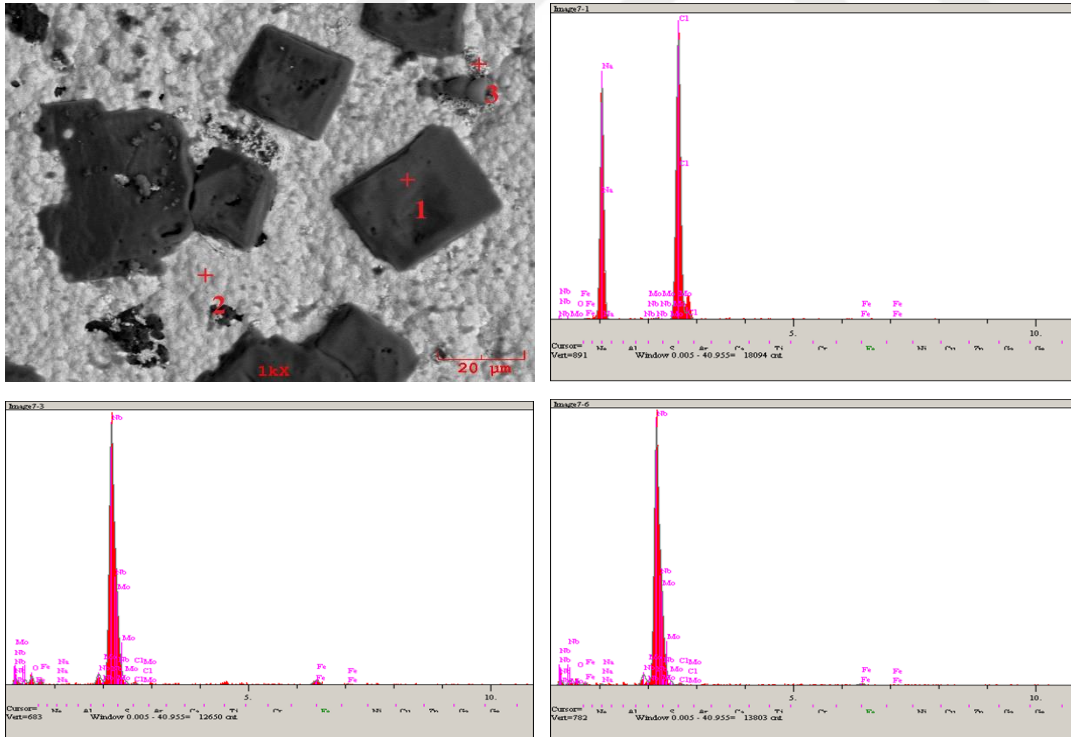
Şekil 6.52. NbN kaplanmış AISI 1010 çeliğinin NaCl ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.



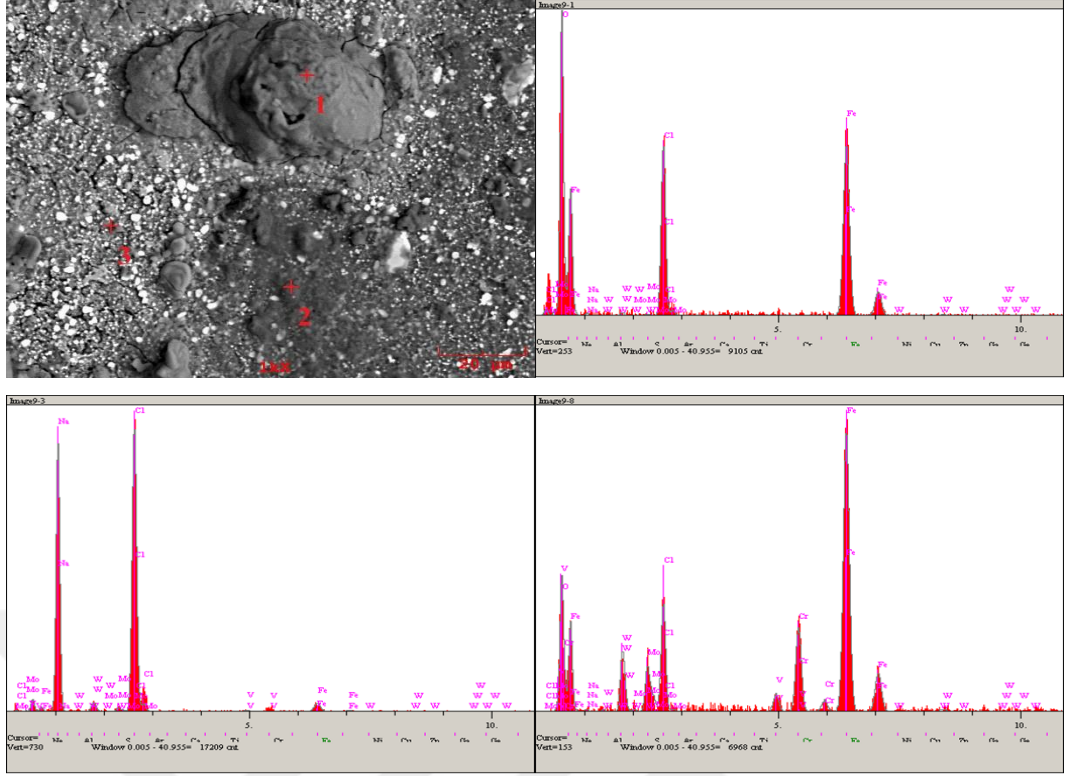
Şekil 6.53. AISI 4140 çeliğinin NaCl ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.



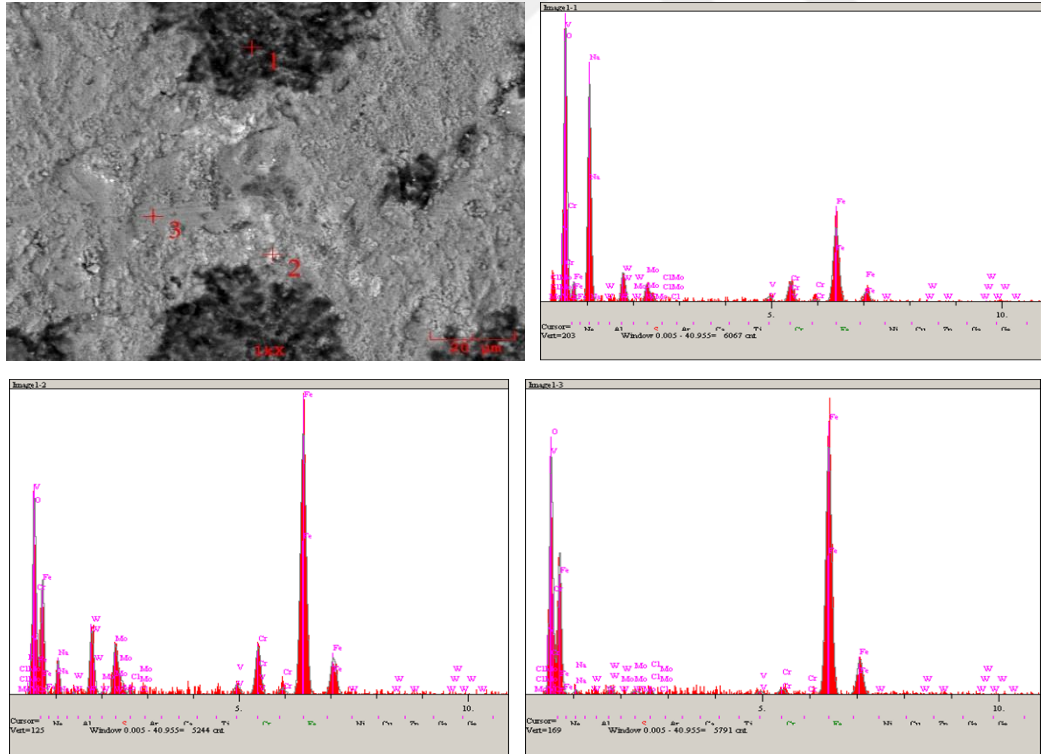
Şekil 6.54. Nitrülenmiş AISI 4140 çeliğinin NaCl ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.



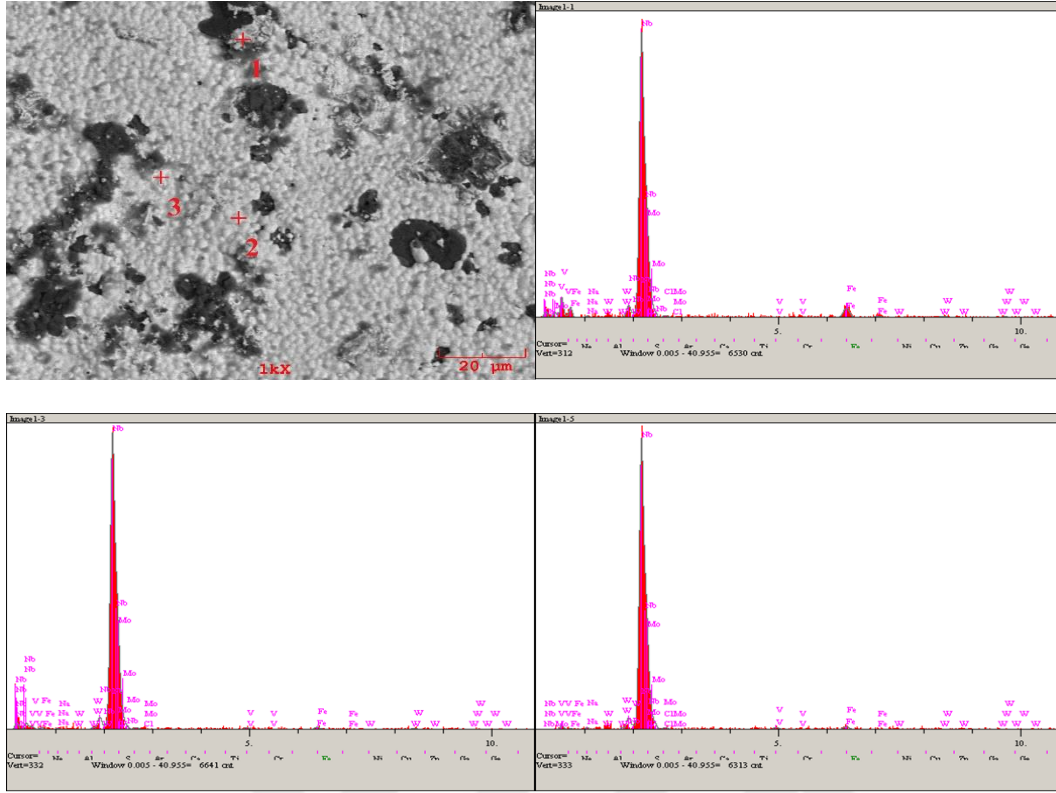
Şekil 6.55. NbN kaplanmış AISI 4140 çeliğinin NaCl ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.



Şekil 6.56. AISI M2 çeliğinin NaCl ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.



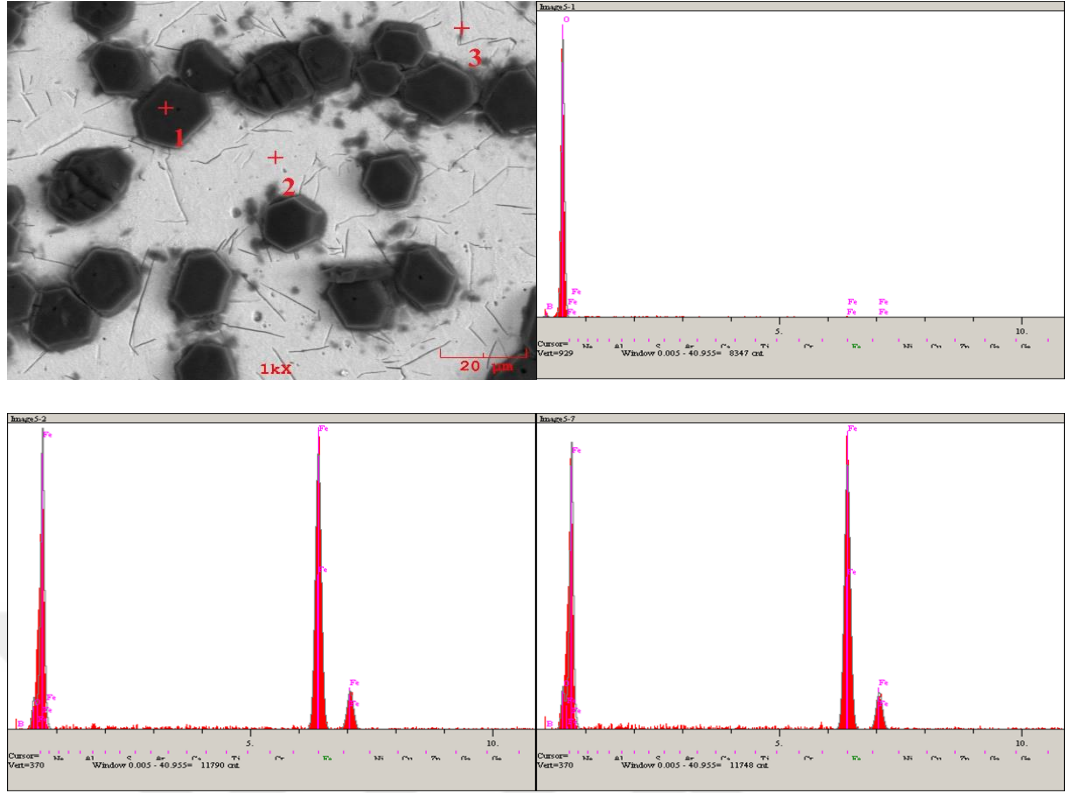
Şekil 6.57. Nitrülenmiş AISI M2 çeliğinin NaCl ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.



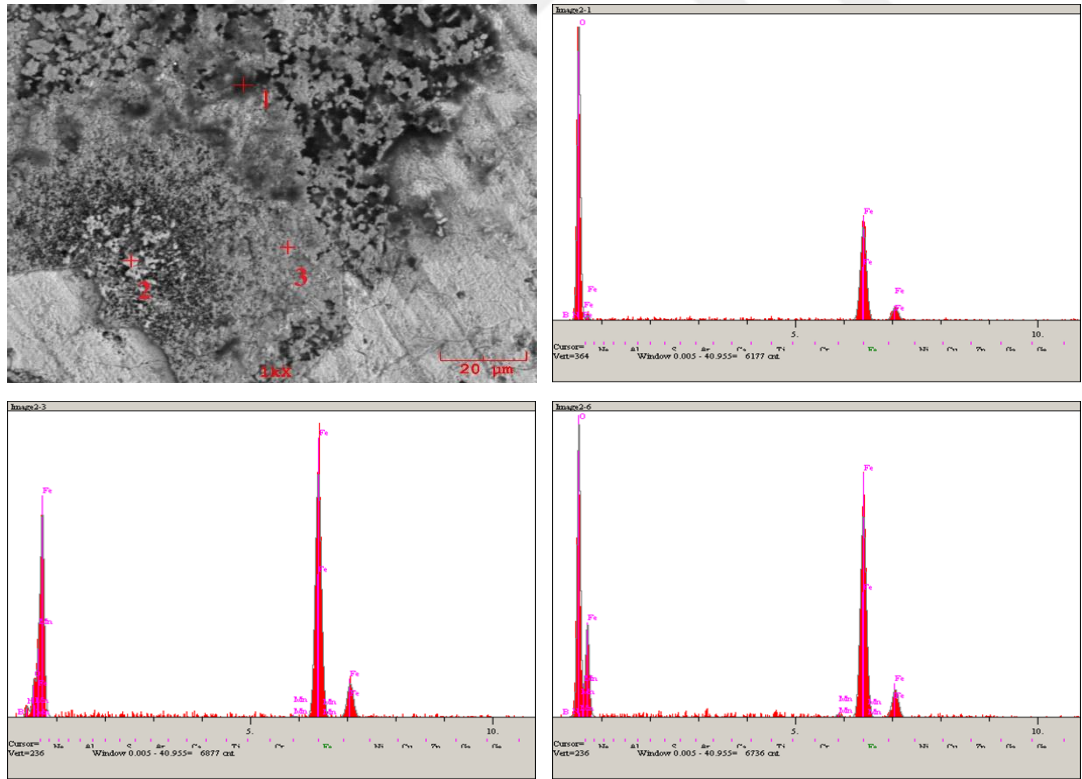
Şekil 6.58. NbN kaplanmış AISI M2 çeliğinin NaCl ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.

Korozyon deneylerinin tamamlanmasının ardından NaCl ortamında korozyona maruz bırakılan bölgelerin mikroyapı incelemesi ve elementel analizler SEM yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda NbN kaplanmış çelik yüzeylerinin nitrürlenmiş ve saf çelik yüzeylerine göre eser miktarda korozyona uğradığı fakat saf çeliklerin çok yüksek oranda korozyona uğradığı gözlemlenmiştir. EDS analizlerinde Fe, O bileşiklerinin varlığı ortamda korozyon olduğunu gösterirken Na ve Cl korozif ortam kaynaklı görülmektedir.

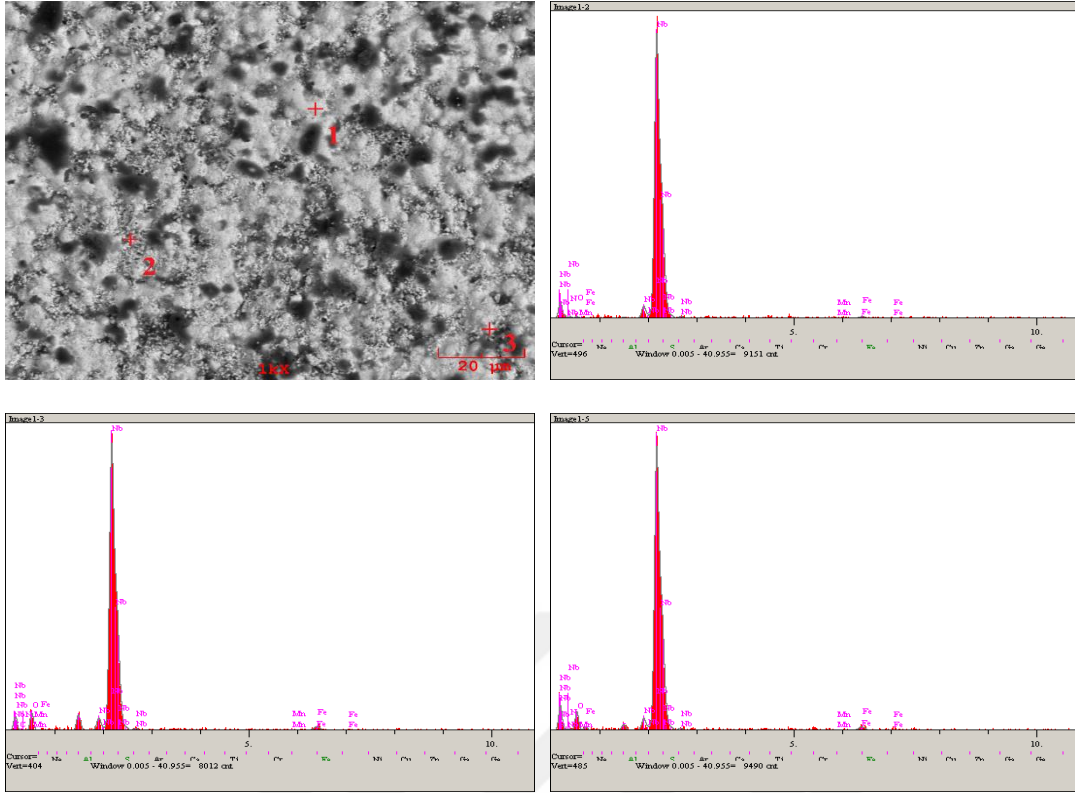
NaCl ortamında korozyona maruz bırakılan kaplama işlemi yapılmamış üç çelik türü içinde tane sınırlarında çatlamlar ve oyuk korozyon çukurları gözlemlenmiştir. Nitrürlenmiş çeliklerde ise korozyon çukurları yine mevcuttur. NbN kaplanmış çeliklerde ise belirgin korozyon hasarı gözlemlenmemiştir.



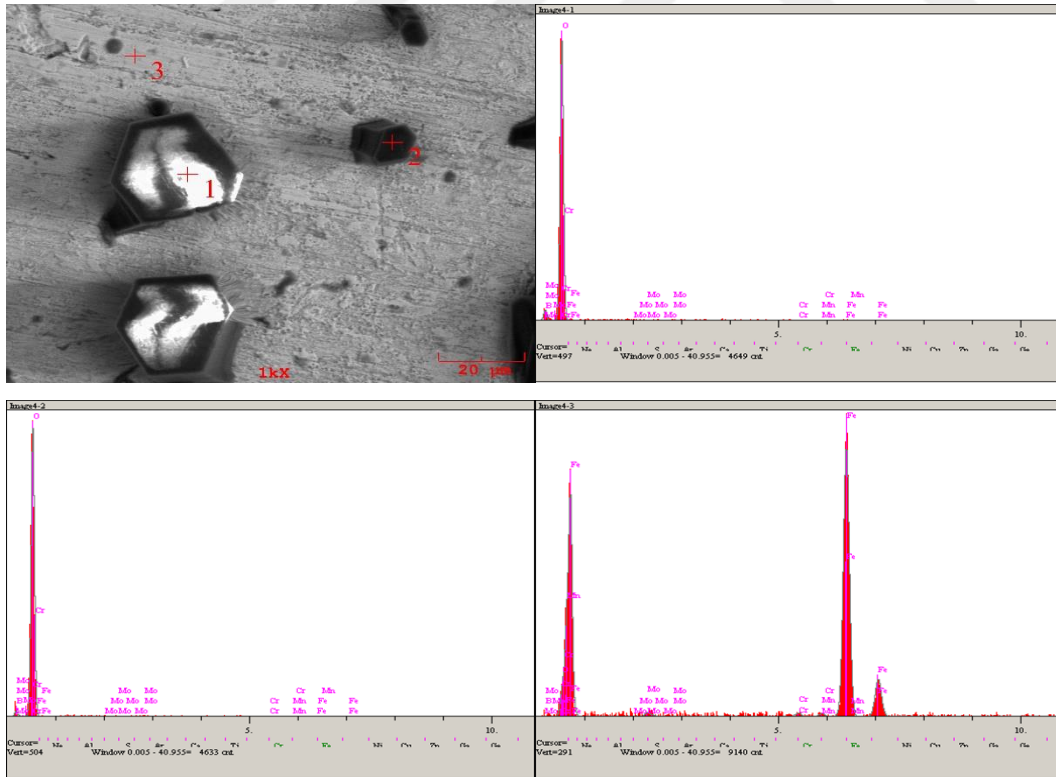
Şekil 6.59. AISI 1010 çeliğinin H_3BO_3 ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.



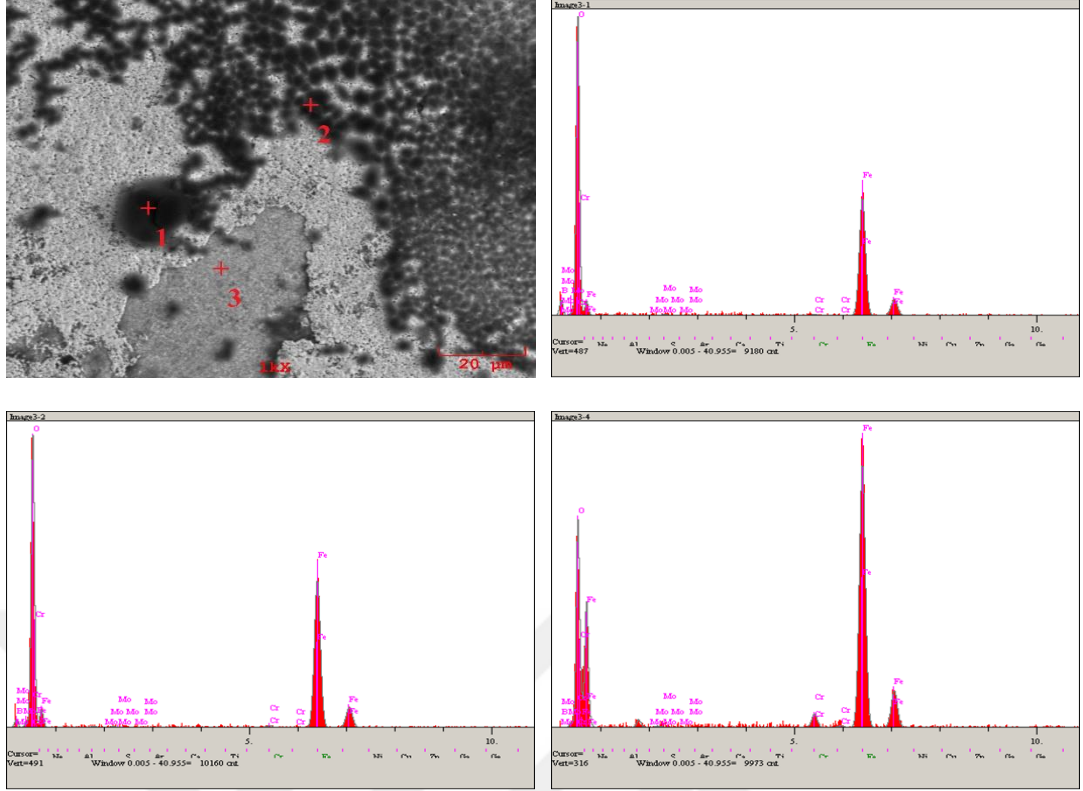
Şekil 6.60. Nitrürlenmiş AISI 1010 çeliğinin H_3BO_3 ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.



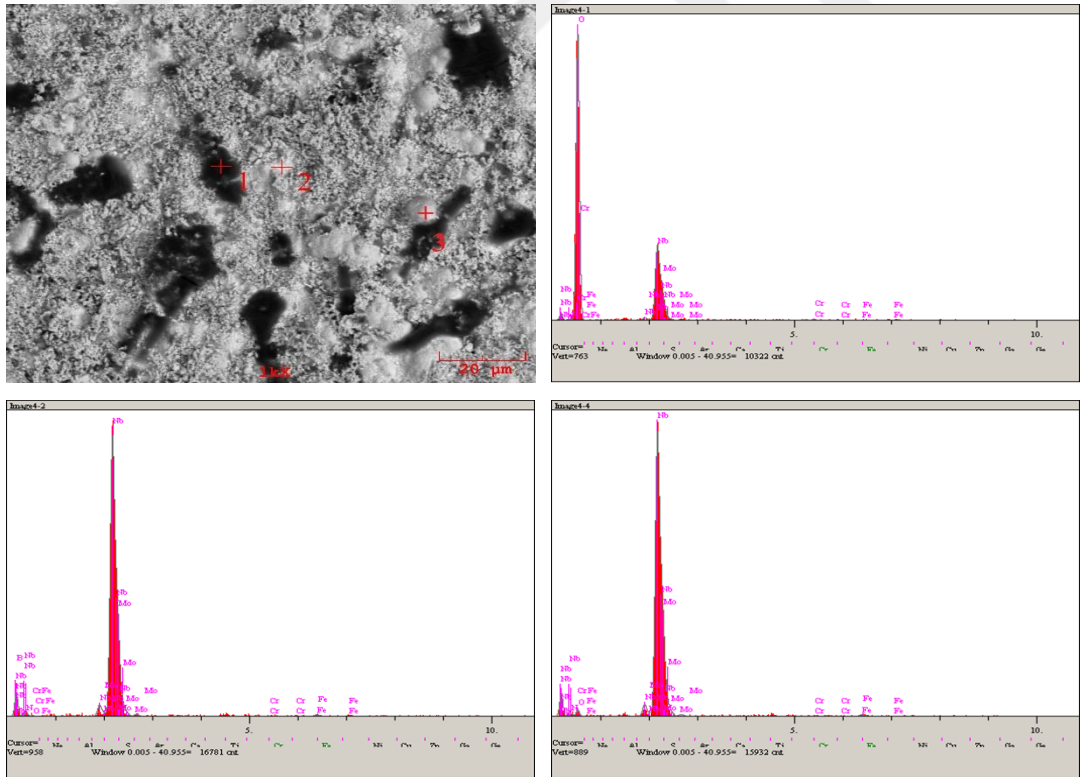
Şekil 6.61. NbN kaplanmış AISI 1010 H₃BO₃ ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.



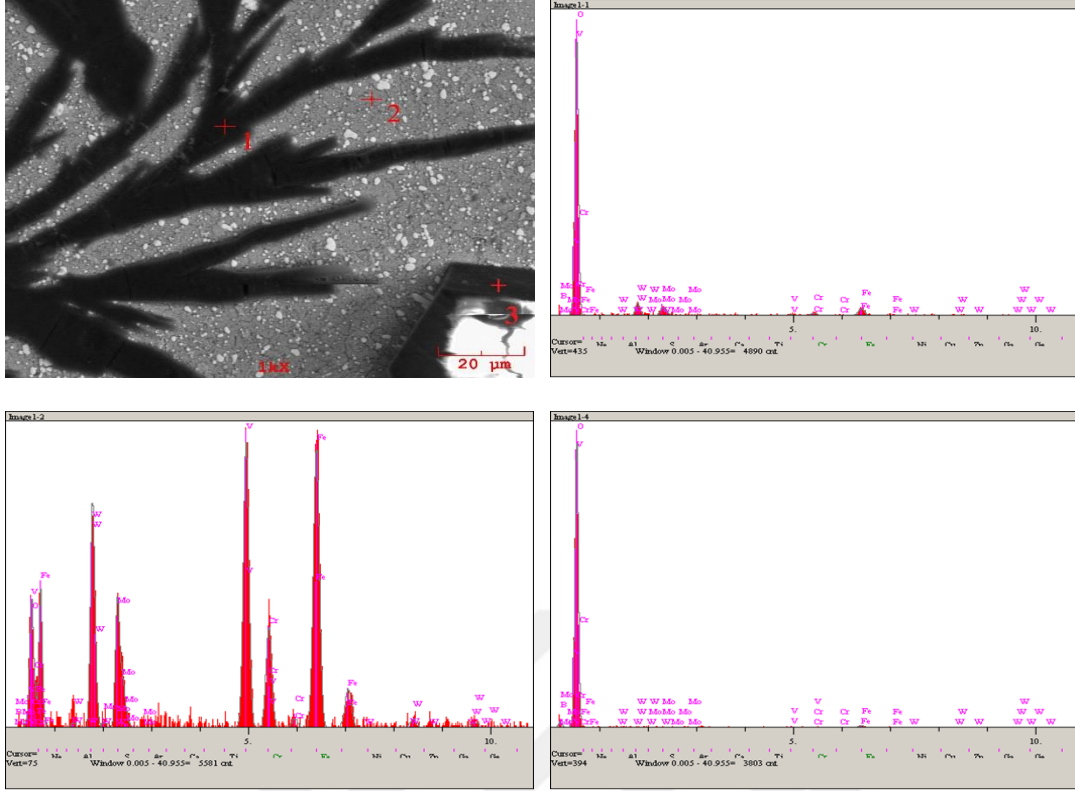
Şekil 6.62. AISI 4140 çeliğinin H₃BO₃ ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.



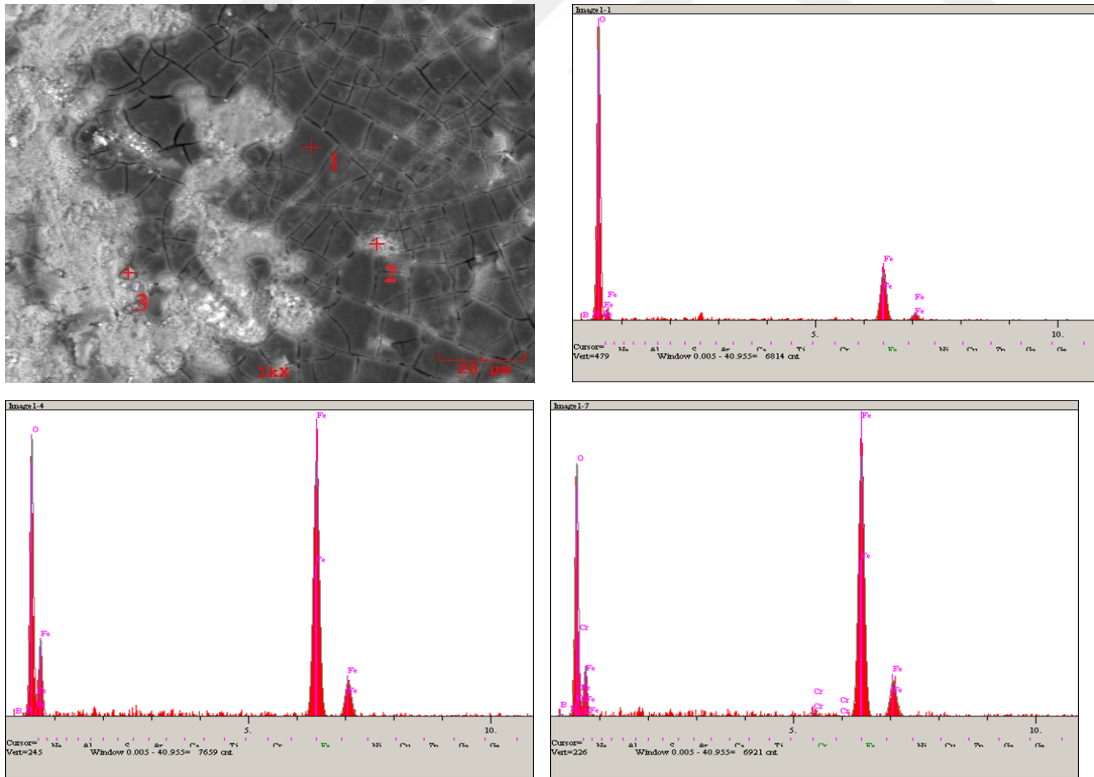
Şekil 6.63. Nitrürlenmiş AISI 4140 çeliğinin H_3BO_3 ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.



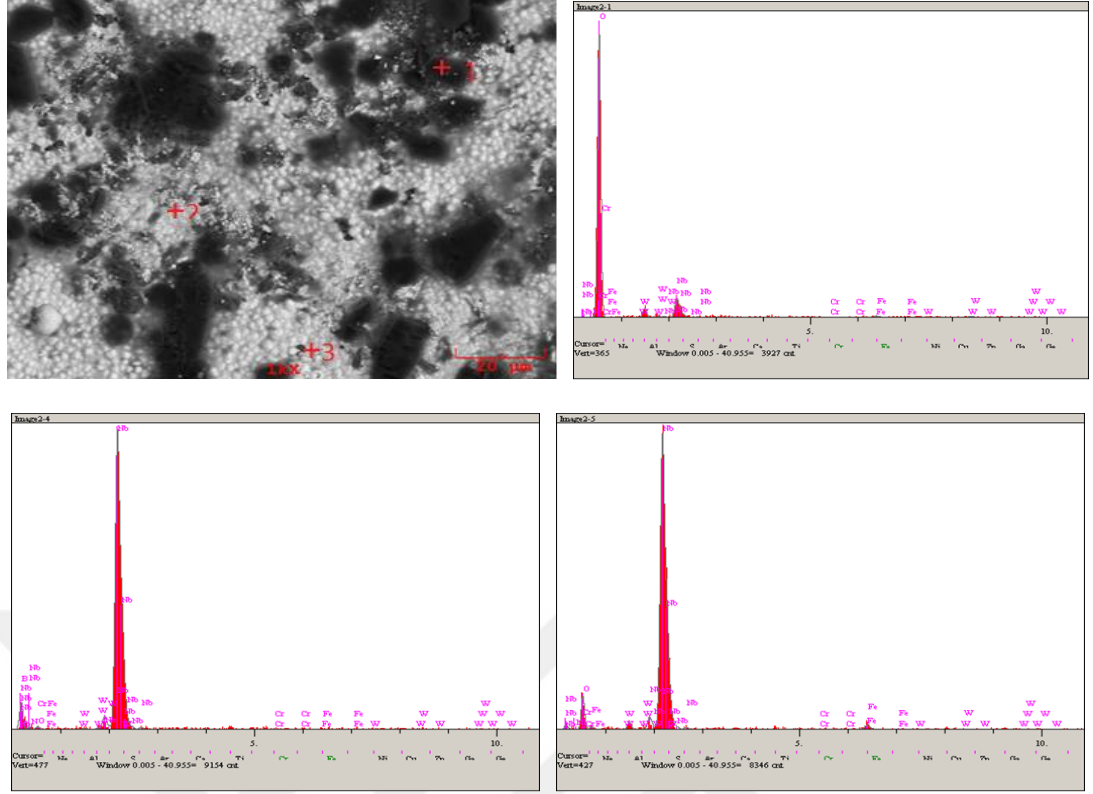
Şekil 6.64. NbN kaplanmış AISI4140 H_3BO_3 ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.



Şekil 6.6135. AISI M2 çeliğinin H_3BO_3 ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.

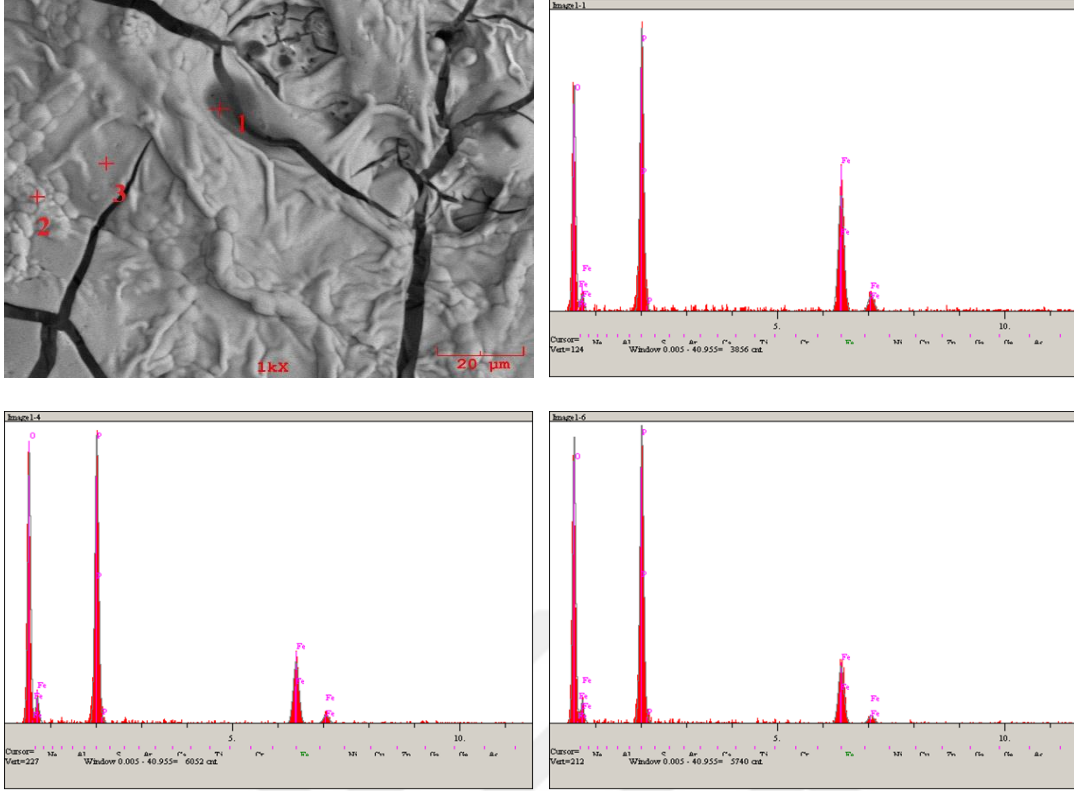


Şekil 6.66. Nitrülenmiş AISI M2 çeliğinin H_3BO_3 ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.

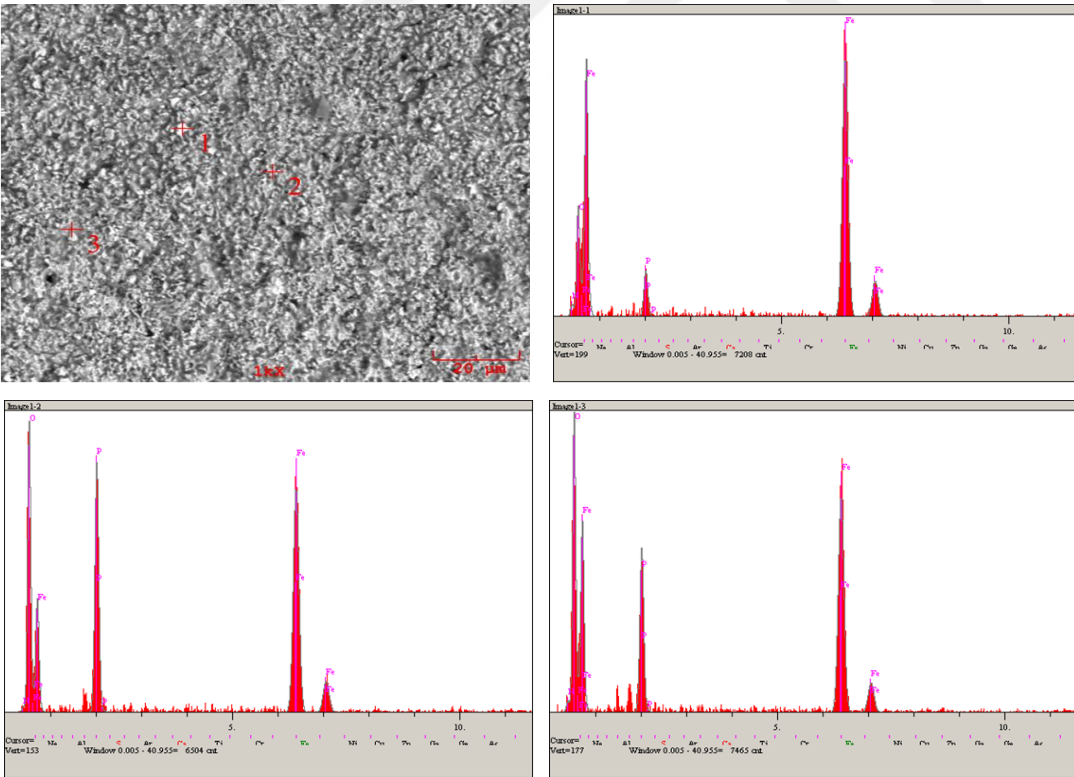


Şekil 6.67. NbN kaplanmış AISI M2 H₃BO₃ ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.

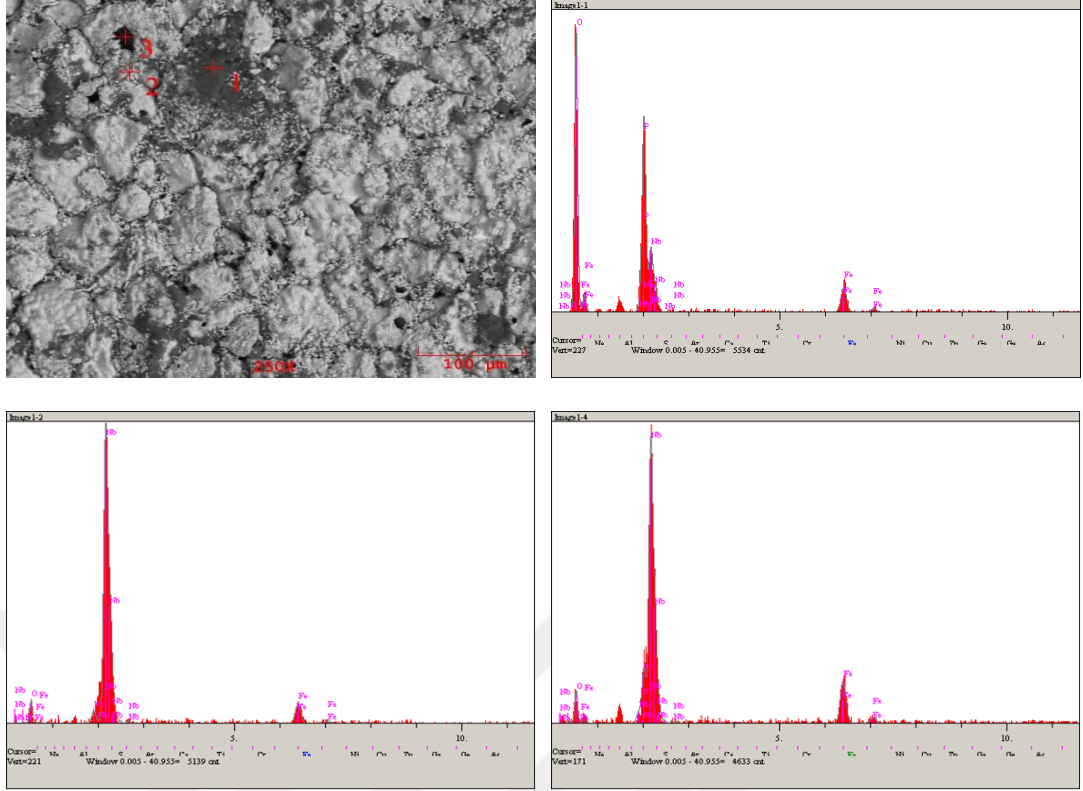
Korozif ortam olarak H₃BO₃ kullanılan korozyon deneylerinin SEM ve EDS incelemeleri sonucunda NbN kaplanmış çelik yüzeylerinin korozyon ortamına maruz kaldığı halde yüzeyinde korozyon bölgeleri görülmemiştir. Korozyon dayanımı karşılaştırıldığında NbN kaplanmış numuneler en dayanıklı çeliklerken, sırası ile nitrürlenmiş ve saf çelikler verilebilir. İşlem uygulanmamış üç çelik türü içinde, EDS analizlerinde Fe, O bileşiklerinin varlığı ortamda korozyon olduğunu gösterirken B varlığı korozif ortam kaynaklı EDS analizlerinde görülmektedir. Kaplama yapılmamış ve H₃BO₃ ortamında korozyona maruz bırakılmış AISI M2 çeliğin SEM görüntülerinde FeO yapıları açıkça görülmektedir ve kaplama işlemine maruz bırakılmamış AISI 1010 ve AISI 4140 çeliklerinde tane sınırlarında çatlamlar belirin ve oyuk tipi korozyon mevcuttur. Nitrürlenmiş çeliklerde ise korozyon çukurları yine SEM görüntülerinde mevcuttur. NbN kaplanmış çeliklerde ise belirgin korozyon hasarı gözlemlenmemiştir.



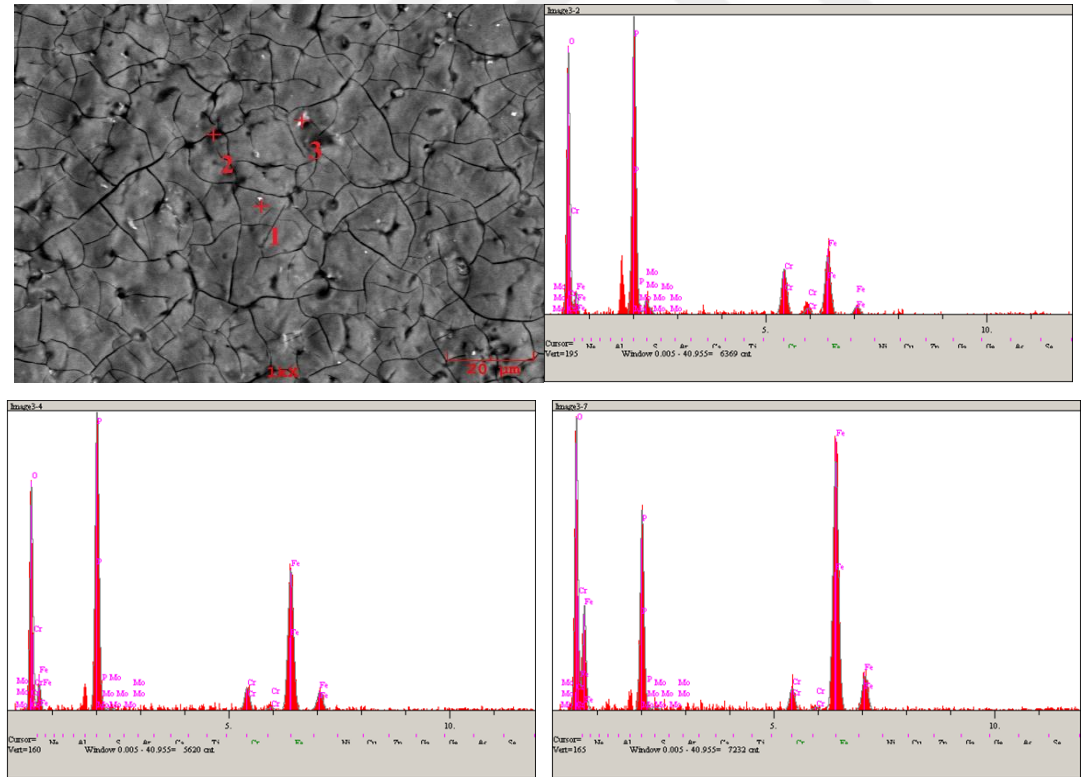
Şekil 6.68. AISI 1010 çeliğinin H_3PO_4 ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.



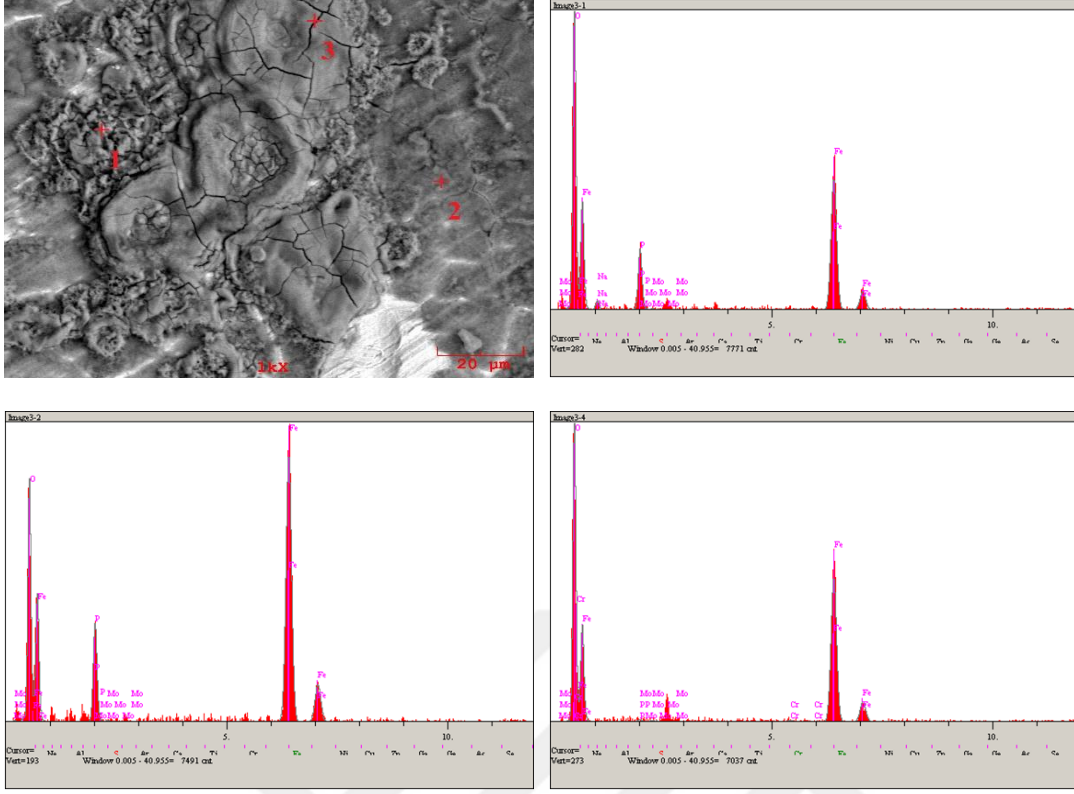
Şekil 6.69. Nitrürlenmiş AISI 1010 çeliğinin H_3PO_4 ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.



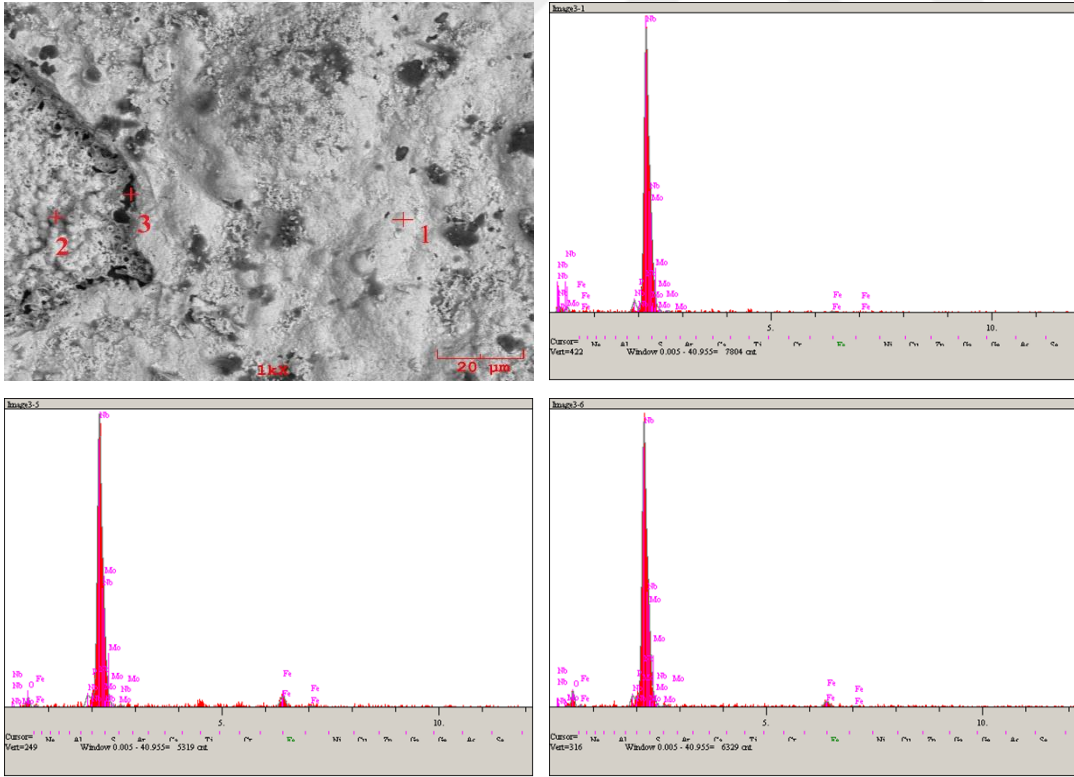
Şekil 6.70. NbN kaplanmış AISI 1010 H_3PO_4 ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.



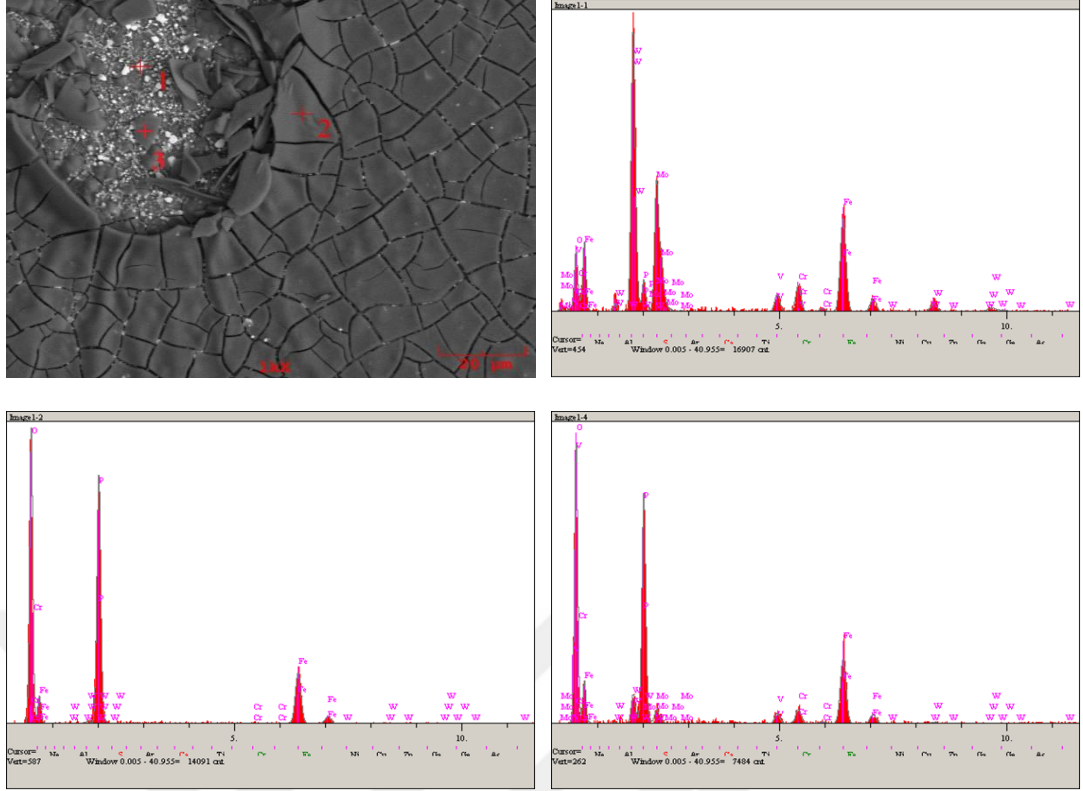
Şekil 6.71. AISI 4140 çeliğinin H_3PO_4 ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.



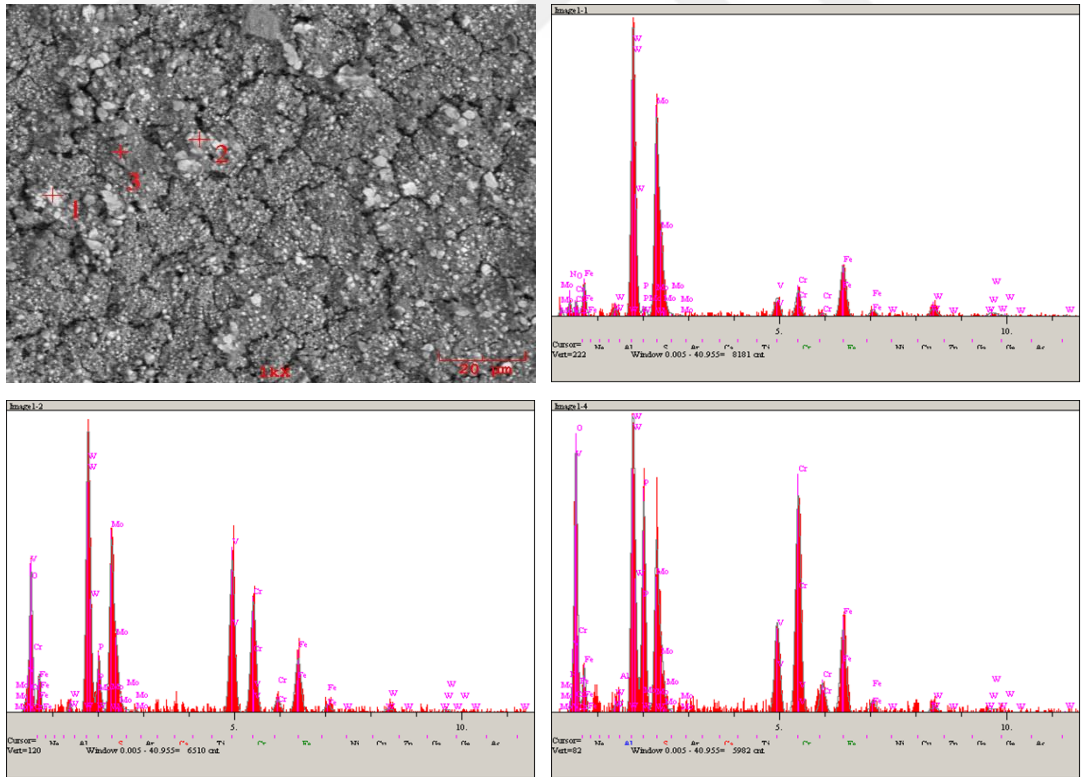
Şekil 6.72. Nitrürlenmiş AISI 4140 çeliğinin H_3PO_4 ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.



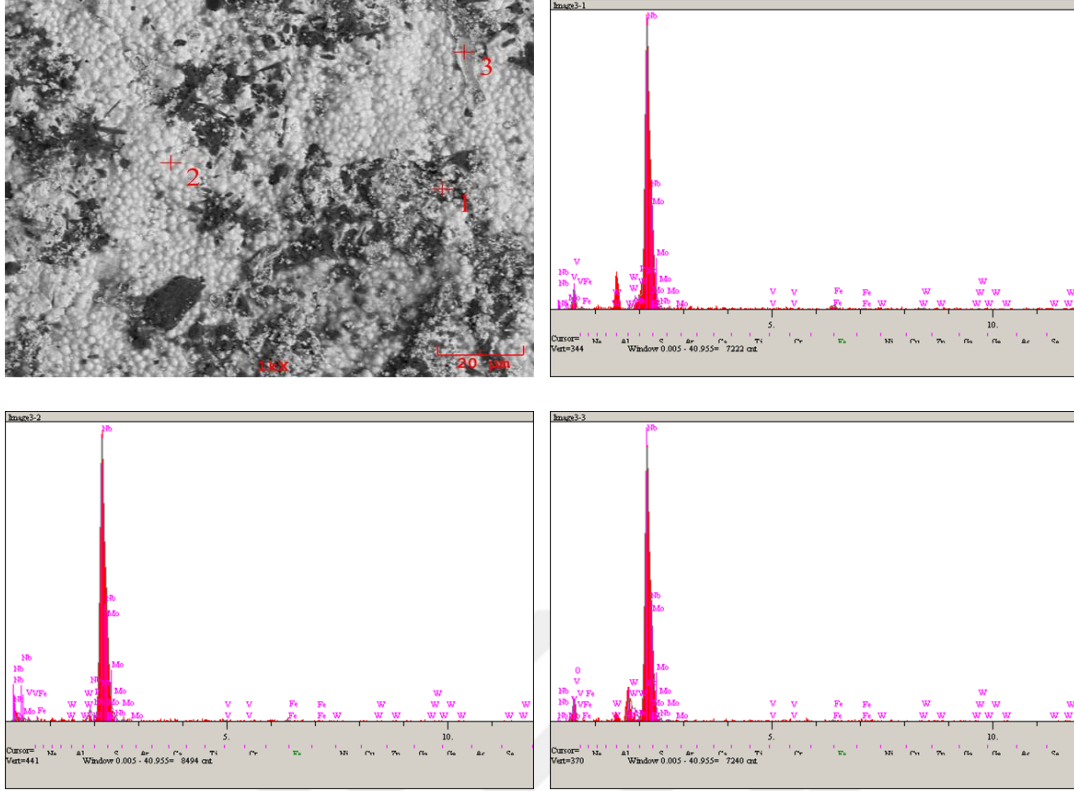
Şekil 6.73. NbN kaplanmış AISI 4140 H_3PO_4 ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.



Şekil 6.74. AISI M2 çeliğinin H₃PO₄ ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.



Şekil 6.75. Nitrürlenmiş AISI M2 çeliğinin H₃PO₄ ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.



Şekil 6.76. NbN kaplanmış AISI M2 H₃PO₄ ortamında korozyonu sonrası SEM ve EDS görüntüleri.

Bir diğer korozif ortam olarak kullandığımız H₃PO₄ ile korozyon deneylerinin tamamlanması sonrası SEM ve EDS incelemeleri gerçekleştirilmiştir. NbN kaplanmış çelik yüzeylerinin korozyon sebebiyle hasar gözlenmezken nitrürlenmiş ve saf çeliklerde korozyon hasarı gözlemlenmiştir. EDS analizlerinde yine Fe, O bileşiklerinin varlığı gözlemlenmiştir ve bu durum ortamda korozyon olduğunu gösterirken P varlığı korozif ortam kaynaklı EDS analizlerinde görülmektedir.

H₃PO₄ ortamında korozyona maruz bırakılan işleme maruz bırakılmamış çeliklerin yüzeylerinde tane sınırlarında çatlamlar ve derin korozyon çukurları gözlemlenmiştir. Kaplama işlemine maruz bırakılmamış M2 çeliğinde korozyon bölgesindeki oyuk belirgin bir şekilde gözükürken NbN kaplanmış AISI M2 çeliğinde korozyon hasarı gözlenmemiştir. Nitrürlenmiş çeliklerde ise korozyon çukurları ve tane sınırlarında çatlamlar yine mevcuttur. NbN kaplanmış çeliklerde ise belirgin korozyon hasarı gözlemlenmemiştir.

NbN kaplanmış, nitrürlenmiş ve işlem uygulanmamış AISI 1010, AISI 4140 ve AISI M2 çelikleri incelendiğinde üç ortam içinde NbN kaplama tabakasının korozyona karşı dirençli bir kaplama tabakası olduğunu görmekteyiz. Korozyon dayanımı sıralanırsa NbN kaplanmış çelikler, nitrürlenmiş çelikler ve işlem görmemiş çelikler olarak sıralamak doğrudur.

7. DENEYSEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Giriş

Çalışma kapsamında gerçekleşen deneylerde AISI 1010, AISI M2 ve AISI 4140 çeliklerinin yüzeylerine TRD yönteminden yararlanarak NbN kaplama işlemi uygulanmıştır. Çeliklerin yüzeylerinde NbN kaplamalar elde etmek amacı ile ilk olarak çelik yüzeylerinde azotça zengin bir tabaka elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda AISI 1010, AISI 4140, AISI M2 çelikleri öncelikle 530°C de 10 saat süreyle nitrürleme işlemine tabi tutulmuş ve yüzeylerinde demir nitrür esaslı katman oluşturulmuştur. Daha sonra termo-reaktif difüzyon yöntemi ile ferro-niyobyum, amonyum klorür, alümina ve naftalin içeren katı ortamda 1000° C’de iki saat süre niyobyumlama yapılarak çelik yüzeylerinde NbN esaslı kaplamalar başarıyla oluşturulmuştur. Çelik yüzeylerinde oluşturulan kaplama tabakalarının özellikleri aşağıda sıralanmıştır;

- 1) TRD yöntemi ile oluşturulan NbN esaslı kaplamaların AISI 1010, AISI 4140 ve AISI M2 çelikleri yüzeylerinde homojen bir şekilde oluştuğu ve yüzeyde süreklilik arz ettiği, optik mikroskop ve SEM yardımı ile gerçekleşen mikroyapı analizlerinde tespit edilmiştir.
- 2) AISI M2 çeliğinin yüzeyinde oluşan kaplama tabakasının 9,5 µm olarak tespit edilmiştir ve en yüksek değere sahiptir. Ardından AISI 4140; 9,08 µm ve AISI 1010; 4,09 µm olarak kalınlıkları tespit edilmiş olup. 18,7 µm difüzyon derinliği ile en yüksek difüzyon derinliğine sahip olan çelik AISI M2 iken 15,1 µm ile AISI 4140 çeliğinde 15,1 µm, AISI 1010 çeliğinde ise 12,44 µm difüzyon derinliği ölçülmüştür. Difüzyonun tüm çelik türlerinde girintili/kolonsal yapıda olması kaplamanın sağlam bir şekilde yüzeylere tutunduğunu göstermektedir.
- 3) 530°C’de 10 saat süre ile nitrürleme işlemine tabi tutulmuş 1000°C’de 2 saat süre ile NbN kaplanmış AISI 1010, AISI 4140, AISI M2 çeliklerinin x-ışınları difraksiyon analizlerinde sırasıyla Fe₃N, C₃N₄, VC, Mn₄N ve NbN, Nb₂CN, Fe₃Nb₃C fazlarından oluştuğu belirlenmiştir.

- 4) Nitr rl nmiş AISI 1010  eliğinin SEM görüntüsü ve EDS analizlerinde yoğunlukla Fe ve N piklerinin varlığı ve noktasal olarak kaplama matrisinden başlayarak altlık tabakaya kadar alınan EDS analizlerinde nitrasyon tabakasının derinliğinin mevcudiyeti gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra yapılan çizgisel analiz ve MAP görüntülerinde nitrürlü kaplamadaki nitrür yoğunluğunun kaplama matrisinden uzaklařıldıķa azaldığı ve demir elementinin varlığının tersi yönde artış gösterdiği gözlenmiştir.
- 5) Nitr rl nmiş AISI 4140  eliğinin SEM görüntüsü ve akabinde noktasal olarak kaplama tabakasından altlık tabaka matrisine kadar alınan EDS analizlerinde Fe, N elementlerinin yanında Mo ve Cr elementleri g r lm ştir. Bu elementler (Mo ve Cr) altlık malzemelerimizin içerisinde alaşım elementi olarak bulunmaktadır. Bununla birlikte kaplama yüzeyi yoğun olarak N ihtiva ederken kaplama matrisinden altlık malzeme matrisine doğru varlığı azalmakla birlikte Fe elementinin arttığı tespit edilmiştir.
- 6) Nitr rl nmiş AISI M2  eliğinin SEM ve EDS analizlerinde kaplama matrisinde Fe ve N pikleri yoğun olarak g r nmekteyken altlık malzeme matrisine inildikçe C, W, V, Mo gibi alaşım elementlerinin yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Aynı şekilde çizgisel analiz ve MAP incelemelerinde Nb ve N elementinin kaplama tabakasında yoğunluk göstermesi yüzeyde NbN tabakasının oluştuğunu teyit etmektedir. Benzer durum AISI 1010  eliğinin SEM-EDS ve MAP elementel dağılım incelemeleri için de geçerlidir.
- 7) Termo-reaktif difüzyon işlemi ile  elik yüzeyinde oluşan en sert NbN esaslı kaplama tabakasının çeliklere göre sıralaması AISI M2, AISI 4140 ve AISI 1010 olarak belirlenmiştir. AISI M2  eliğinin en yüksek sertlik değerine sahip olmasının hem NbN, Nb₂CN fazlarının hem de çeliğin ihtiva ettiği alaşım karbürlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Çelikler kendi aralarında matris arayüzey ve kaplama bölgesi sertlikleri bakımından karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonrası  elik matrislerinde sertlik değerleri karşılaştırıldığında en düşük sertlik değeri sırasın ile AISI 1010 (200 HV_{0,015}), AISI 4140 (328 HV_{0,015}) ve AISI M2 (623 HV_{0,015})'dir. Kaplama matris arayüzünden alınan sertlik değerleri karşılaştırıldığında ise en düşük sertlik değeri sırası ile AISI 1010 (596 HV_{0,015}), AISI M2 (884 HV_{0,015}) ve AISI 4140 (998 HV_{0,015}) olarak  l  lm ştir.

Termo-reaktif difüzyon işlemi ile NbN kaplanmış çelikler içinde en sert kaplama tabakasına sahip çelikler sırası ile AISI M2 (1661 HV_{0,015}), AISI 4140 (1570 HV_{0,015}) ve AISI 1010 (1360 HV_{0,015}) olarak belirlenmiştir. AISI M2 çeliğinin en yüksek sertlik değerine sahip olmasını başlıca nedeninin çelik yüzeyinde oluşan niyobyum nitrür ve Nb₂CN ve M2 çeliğinin ihtiva ettiği alaşım karbürlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu durum x-ışını difraksiyon analizleriyle de teyit edilmektedir.

- 8) TRD yöntemi kullanılarak çelik yüzeylerinde oluşturulan kaplama tabakalarının üç elektrot tekniği kullanılarak 0,5 M NaCl, 1 M H₃BO₃, 1 M H₃PO₄ çözelti ortamlarında gerçekleştirilen korozyon deneyleri sonucunda tafel ekstrapolasyon (TP) ve elektrokimyasal empedans spektrometresi (EIS) olarak iki farklı eğri elde edilmiştir.
- 9) Nyquist eğrilerine bakıldığında 0,5 NaCl, 1 M H₃PO₄, 1M H₃BO₃ olan üç farklı korozyon ortamında NbN kaplı numunelerin korozyon dirençlerinin yüksek olduğu görülmektedir.
- 10) NaCl ortamında korozyona maruz bırakılan kaplama işlemine maruz bırakılmamış çeliklerin yüzeylerinde tane sınırlarında çatlamlar ve oyuk korozyon çukurları gözlemlenmiştir. Nitrürlenmiş çeliklerde ise korozyon çukurları yine mevcuttur. NbN kaplanmış çeliklerde ise belirgin korozyon hasarı gözlemlenmemiştir. EDS analizlerinde Fe, O bileşiklerinin varlığı ortamda korozyon olduğunu gösterirken Na ve Cl korozif ortam kaynaklı EDS analizlerinde görülmektedir.
- 11) Korozif ortam olarak H₃BO₃ kullanılan korozyon deneylerinin SEM ve EDS incelemeleri sonucunda NbN kaplanmış çelik yüzeylerinin en yüksek korozyon dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Korozyon dayanımı karşılaştırıldığında NbN kaplanmış numuneler en dayanıklı çeliklerken, sırası ile nitrürlenmiş ve saf çelikler verilebilir. EDS analizlerinde Fe, O bileşiklerinin varlığı ortamda korozyon olduğunu gösterirken B varlığı korozif ortam kaynaklı EDS analizlerinde görülmüştür.
- 12) Bir diğer korozif ortam olarak kullandığımız H₃PO₄ ile korozyon deneylerinin tamamlanması sonrası SEM ve EDS incelemeleri gerçekleşmiştir. NbN kaplanmış çelik yüzeylerinin korozyon sebepli hasar gözlenmezken nitrürlenmiş ve saf çeliklerde korozyon hasarı gözlemlenmiştir. EDS analizlerinde Fe, O bileşiklerinin varlığı ortamda korozyon olduğunu gösterirken P varlığı korozif ortam kaynaklı EDS analizlerinde görülmektedir.

7.2. Öneriler

- 1) TRD yöntemi ile NbN kaplama prosesinde TRD kaplama süresi değiştirilerek kaplama yüzeylerindeki kaplama kalınlığı artışı ve artış kapsamında korozyon dayanımındaki gelişimler gözlemlenebilir.
- 2) NbN tabakasının elde edilmesi amacı ile farklı sıcaklıklar değerlerinde kaplama işlemi yapılabilir.
- 3) Altlık malzeme değiştirilerek oluşacak kaplama özellikleri incelenebilir.
- 4) NbN kaplamalara sertlik, korozyon deneyleri haricinde aşınma ve oksidasyon testleri uygulanabilir.
- 5) Korozyon deneyinde kullanılan korozif ortam (H_2SO_4 , HCl vb) değiştirilebilir ve korozyon hasarı farklı analizler (anysis programı vs.) kullanılarak detaylı olarak incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] ÖZDEMİR, U., ERTEN, M., “Plazma (İyon) Nitrürleme Yöntemi ve Malzeme Özellikleri Üzerindeki Etkisi” Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi Temmuz 2003 Cilt 1 Sayı 2 (41-48)
- [2] Bhushan, B., Gupta, K. B., Handbook of Tribology, McGraw-Hill, U.S.A,
- [3] ÇELİK, A., ALSARAN, A., KARAKAN, M., “Plazma İle Termokimyasal yüzey işlemleri” Mühendis ve Makina Temmuz 2002-Sayı 510
- [4] Deniz, G. (2004). Termo-reaktif difüzyon (TRD) tekniği ile AISI 1010 ve AISI M2 çeliklerinin titanyum nitrür (TiN) kaplanması (Doctoral dissertation, Sakarya Üniversitesi (Turkey)).
- [5] Hosmani, S. S., Kuppasami, P., Goyal, R. K., Hosmani, S. S., Kuppasami, P., & Goyal, R. K. (2014). Chromizing, carburizing, and duplex Surface Treatment. An Introduction to Surface Alloying of Metals, 89-101.
- [6] Strafford, K. N., & Subramanian, C. (1995). Surface engineering: an enabling technology for manufacturing industry. Journal of Materials processing technology, 53(1-2), 393-403.
- [7] Koch, G., Varney, J., Thompson, N., Moghissi, O., Gould, M., & Payer, J. (2016). International measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study. NACE international, 216, 2-3.
- [8] Davis, J. R. (Ed.). (2002). Surface hardening of steels: understanding the basics. ASM international. 130
- [9] Şen, Ş. "Termokimyasal Borlama İşlemleri ile AISI 4140 ve AISI 4340 Çeliklerinin Yüzey Performanslarının Geliştirilmesi", Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Haziran 1
- [10] Kılınç, B. (2018). Fe-MB esaslı sert yüzey alaşımların çelik yüzeyinde TIG kaynak yöntemiyle oluşturulması ve özelliklerinin incelenmesi (Doctoral dissertation, Sakarya Üniversitesi (Turkey)).
- [11] Aghaie-Khafri, M., & Fazlalipour, F. (2008). Vanadium carbide coatings on die steel deposited by the thermo-reactive diffusion technique. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 69(10), 2465-2470.
- [12] Demirci, A. H. (2004). Malzeme Bilgisi ve Malzeme Muayenesi: Seçilmiş Temel Kavramlar ve Endüstriyel Uygulamalar. 1. Basım, Alfa Yayınevi, Bursa.
- [13] Boyer, H. E., & Gall, T. L. (1985). Metals handbook; desk edition.
- [14] DİKEÇ, F., “Çelik Malzeme Standartları ve Seçimi” Yavuz Kırtasiye Büro Donanımları Tic. Ltd. Şti., Aralık 1987 / İstanbul
- [15] Stoloff, N. S., Liu, C. T., & Deevi, S. C. (2000). Emerging applications of intermetallics. Intermetallics, 8(9-11), 1313-1320.

- [16] Asil Çelik Teknik Yayınlar Serisi", Bölüm 5, s: 4-28 Bölüm 6, s: 4-48, Bölüm 7, s: 1-62, 1982
- [17] Paidar, V. (1997). Mechanical properties of iron-and nickel-base aluminides. *Materials Science and Engineering: A*, 234, 15-21.
- [18] Liu, C. T., George, E. P., Maziasz, P. J., & Schneibel, J. H. (1998). Recent advances in B2 iron aluminide alloys: deformation, fracture and alloy design. *Materials Science and Engineering: A*, 258(1-2), 84-98.
- [19] Xu, L., Cui, Y. Y., Hao, Y. L., & Yang, R. (2006). Growth of intermetallic layer in multi-laminated Ti/Al diffusion couples. *Materials Science and Engineering: A*, 435, 638-647.
- [20] Niewolak, L., Shemet, V., Thomas, C., Lersch, P., Singheiser, L., & Quadakkers, W. J. (2004). Oxidation behaviour of Ag-containing TiAl-based intermetallics. *Intermetallics*, 12(12), 1387-1396.
- [21] Tang, Z., Shemet, V., Niewolak, L., Singheiser, L., & Quadakkers, W. J. (2003). Effect of Cr addition on oxidation behavior of Ti-48Al-2Ag alloys. *Intermetallics*, 11(1), 1-8.
- [22] Westbrook, J. H., & Fleischer, R. L. (Eds.). (1967). *Intermetallic compounds* (Vol. 378). New York: Wiley.
- [23] YILMAZ, A., "Her Derde Deva Hazinemiz Bor", *Bilim ve Teknik Dergisi*, TÜBİTAK, Mayıs 2002, s: 414, s:38-48
- [24] DEMİR DIŞI METALLERİN KAYNAĞI, Burhan Oğuz, OERLIKON Yayını
- [25] AKSELAND, D.R., "Refractory Metarials", *ASTM Handbook*, Volume 9 pp: 324-328, 1994
- [26] GÜVEN, Ş. Y., DELİKANLI, K., & ÖNCEL, E. (2014). AISI 4140 Çeliğine Uygulanan İyon Nitrasyon Yüzey Sertleştirme İşleminin Yorulma Dayanımına Etkisi. *SDU Journal of Technical Sciences*, 4(2), 29-39.
- [27] Aytaç, A., Işık, M. S., Çanakçı, B., Özdemir, T., Aztekin, K., & İpek, H. (2018). AISI 1008, 1040 ve 4140 Çeliklerinde Isıl İşlem, Karbon Oranı ve Alaşım Elementlerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi. *Savunma Bilimleri Dergisi*, 17(2), 1303-6831.
- [28] BUYTOZ, S., & YILMAZ, B. (2019). AISI 4140 Çelik Yüzeyinde Termoreaktif Difüzyon Yöntemiyle Elde Edilen TiC Kaplamasının Mikroyapı Özelliklerinin İncelenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 31(2), 473-480.
- [29] Özdemir, U., & Erten, M. (2003). "Plazma (İyon) Nitrürleme Yöntemi ve Malzeme Özellikleri Üzerindeki Etkisi." *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, Temmuz 2003, Cilt 1, Sayı 2, 41-48.
- [30] DOSSETT, J., *ASM Handbook*, V.4: Heat Treating, OH: ASM International; 1991. p. 376-436.
- [31] Topçu, Ş. (2010). "Farklı Şartlarda Plazma Nitrülenmiş Çeliklerin Aşınma Davranışının Belirlenmesi.", *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa.

- [32] YILMAZ, Uğur. (2016). "Gaz ortamında nitrürleme ve nitrokarbürleme yüzey sertleştirme işlemlerinin aısı 4140, 8550 çeliklerinin aşınma, mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisinin incelenmesi.". Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, MANİSA.
- [33] Ertürk, Şenol (2010). Thermo-kimyasal yöntemle kaplanmış farklı kesici takım malzemelerinin talaşlı işlem kabiliyetinin incelenmesi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü / Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı.
- [34] İPEK, M., "Kutu Sementasyon Yöntemiyle Çelik Yüzeylerin TiC Kaplanması", Yüksek Lisans Tezi, SAÜ Metalurji Mühendisliği Bölümü, Sakarya, 1996.
- [35] Guiyuan Y., "Recent progress and applications of niobium-based nanomaterials and their composites for supercapacitors and hybrid ion capacitors", Sustainable Energy Fuels, 2021,5, 3039-3083
- [36] Sekizinci beş yıllık kalkınma planı madencilik özel ihtisas komisyonu raporu DPT: 2622 - ÖİK: 633 ANKARA 2001
- [37] Nnaemeka Stanislaus Nzeh. (2022). Process Applications and Challenges in Mineral Beneficiation and Recovery of Niobium from Ore Deposits – A Review. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 43(7), 833–864.
- [38] S. SEN, "Termokimyasal Kaplama Teknikleri Ders Notları, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü," Sakarya Üniversitesi, 2006.
- [39] Handbook, A. S. M. (1992). Friction, lubrication, and wear technology. ASM International, Materials Park, Ohio, 18, 127-160.
- [40] Şeşen, F. E., Elektrotermokimyasal, Ç. Y., Oluşumuna, T. D. T., & Etkisi, D. T. Ö. İ. P. (2007). İstanbul Teknik Üniversitesi. Metalürji Mühendisliği Bölümü, Elektrik Ark Fırını ile Çelik Üretimi Ders Notları.
- [41] A. EVCİN, "Kaplama Teknikleri Ders Notları, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Seramik Mühendisliği Bölümü," 2006.
- [42] Holmberg, K., Matthews, A., & Ronkainen, H. (1998). Coatings tribology—contact mechanisms and surface design. Tribology international, 31(1-3), 107-120.
- [43] Mattox, D. M. (2002). Physical vapor deposition (PVD) processes. Metal Finishing, 100, 394-408. 133
- [44] Rashid, H. U., Yu, K., Umar, M. N., Anjum, M. N., Khan, K., Ahmad, N., & Jan, M. T. (2015). Catalyst role in chemical vapor deposition (CVD) process: A review. Rev. Adv. Mater. Sci, 40(3), 235-248.
- [45] Schlesinger, M., & Paunovic, M. (Eds.). (2011). Modern electroplating. John Wiley & Sons.
- [46] Kanani, N. (2004). Electroplating: basic principles, processes and practice. Elsevier.
- [47] Carpio, J., Casado, J. A., Álvarez, J. A., & Gutiérrez-Solana, F. (2009). Environmental factors in failure during structural steel hot-dip galvanizing. Engineering Failure Analysis, 16(2), 585-595.

- [48] Marder, A. R. (2000). The metallurgy of zinc-coated steel. Progress in materials science, 45(3), 191-271.
- [49] Brinker, C. J., & Scherer, G. W. (2013). Sol-gel science: the physics and chemistry of sol-gel processing. Academic press.
- [50] Leblebici, Y., Yüzer, H., & Ömer Faruk, E. (2000). Sol-Jel Metodu ile Mikronaltı İncelikte Alümina Üretimi.
- [51] Karasu, B., Saçkan, İ., & TAPLI, M. (2020). Emayenin Dünü ve Bugünü. ElCezeri, 7(2), 923-939.
- [52] Hardwicke, C. U., & Lau, Y. C. (2013). Advances in thermal spray coatings for gas turbines and energy generation: a review. Journal of Thermal Spray Technology, 22(5), 564-576.
- [53] Arai, T., & Harper, S. (1991). Thermoreactive deposition/diffusion process. ASM International, ASM Handbook., 4, 448-453.
- [54] KARAKAŞ, Y., SOYKAN, H., MAHMUTOĞLU, M., & ASLANOĞLU, Z. (2006). Çelik Yüzeylerin Kaplanması, Erdemir Bilim ve Teknoloji Serisi, Kdz.
- [55] Pye, D. (2003). Practical nitriding and ferritic nitrocarburizing. ASM international.
- [56] Çelik, A., Alsaran, A., & Karakan, M. (2002). Plazma ile termokimyasal yüzey işlemleri. Mühendis ve Makina, 510, 17-21.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Dilara NACAR

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2018, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
- **Yükseklisans** : : 2024, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2018 yılında Sakarya Üniversitesi Dönemsel Başarı Ödülü'nü kazandı.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Termo-Reaktif Difüzyon Tekniği İle Çeliklerin NbN Kaplanması ve Özelliklerinin Araştırılması (6. Uluslararası Mühendislik Bilimleri ve Multidisipliner Yaklaşımlar Kongresi)
- 6th International Congress On Engineering Sciences And Multidisciplinary Approaches, 02-03 December 2023, İstanbul, Türkiye, Termo-Reaktif Difüzyon Tekniği İle Çeliklerin Nbn Kaplanması Ve Özelliklerinin Araştırılması