

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

NİTROKARBÜRİZE EDİLMİŞ 42CrMo4 ÇELİĞİNİN FOSFATLAMA YÜZEY İŞLEMİ SONRASI
İNCE FİLM SERAMİK BOYA KAPLAMASI İŞLEM PARAMETRELERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ
VE İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Burak Berk DAY

EKİM 2025
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**NİTROKARBÜRİZE EDİLMİŞ 42CrMo4 ÇELİĞİNİN FOSFATLAMA YÜZEY İŞLEMİ
SONRASI İNCE FİLM SERAMİK BOYA KAPLAMASI İŞLEM PARAMETRELERİNİN
İYİLEŞTİRİLMESİ VE İNCELENMESİ**

Burak Berk DAY

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"METALURJİ VE MALZEME YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11 / 09 / 2025

Tezin Savunma Tarihi : 13 / 10 / 2025

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Temel VAROL

ORCID : - - -

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

“Nitrokarbürize Edilmiş 42CrMo4 Çeliğinin Fosfatlama Yüzey İşlemi Sonrası İnce Film Seramik Boya Kaplaması İşlem Parametrelerinin İyileştirilmesi ve İncelenmesi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Temel VAROL’a teşekkürü bir borç bilirim. Çalışma boyunca yanımda olup her zaman yardımcı olan çalışma arkadaşlarım, meslektaşlarım Fethi Doğukan ÖMÜR, Furkan ALPTEKİN, Serhatcan Berk AKÇAY teşekkür ederim.

Son olarak, doğduğum günden beri elimi hiç bırakmayan, hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım ve her kararında arkamda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan annem Zeynep DAY ve babam Selim DAY’a, kardeşlerim Yasin Hatemi DAY, Bedirhan Akif DAY ve Bahadır Han DAY’a teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Burak Berk DAY

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Nitrokarbürize Edilmiş 42CrMo4 Çeliğinin Fosfatlama Yüzey İşlemi Sonrası İnce Film Seramik Boya Kaplaması İşlem Parametrelerinin İyileştirilmesi ve İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Temel VAROL’un sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

13/10/2025

Burak Berk DAY

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XV
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XVI
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Çelik Malzemelerin İsimlendirilmesi ve Sınıflandırılması	3
1.2.1. İslah Çelikleri ve Özellikleri	5
1.3. Çeliklere Uygulanan Yüzey İşlemleri	5
1.3.2 Çeliklere Uygulanan Kaplama Yöntemleri.....	15
1.4. Literatür Özeti	21
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	26
2.1. Malzeme ve Deney Materyalleri	27
2.2. Numune Hazırlama Süreçleri	29
2.2.1. Polisaj ve Kumlama Yüzey İşlemleri.....	31
2.2.2. Tuz Nitrokarbürizasyon Isıl İşlemi	32
2.2.3. Fosfat Kaplama Yüzey İşlemi	34
2.2.4. İnce Film Seramik Boya Kaplaması İşlemi	36
2.3. Mikroyapısal İncelemeler.....	41
2.4. Aşınma Testleri	43
2.5. Sertlik İncelemeleri	45
2.6. Mikrosertlik ve Difüzyon Derinliği İncelemeleri.....	45
2.7. Spektral Analiz Test Ölçümleri	46
2.8. Yüzey Pürüzlülüğü Testi	47

2.9. XRD Analizi	48
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	50
3.1 Rockwell Sertlik Testi	50
3.2. Mikroyapı.....	52
3.3. SEM Analizi İncelemeler.....	53
3.4. Aşınma Testi	60
3.5. Vickers Sertlik Ölçüm Testi	95
3.6. Spektral Analiz Testi	98
3.7. Yüzey Pürüzlülüğü Testi	99
3.8. XRD Test Analizi	101
4. SONUÇLAR.....	104
5. ÖNERİLER.....	109
6. KAYNAKLAR	110
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

NİTROKARBÜRİZE EDİLMİŞ 42CrMo4 ÇELİĞİNİN FOSFATLAMA YÜZEY İŞLEMİ SONRASI İNCE FİLM SERAMİK BOYA KAPLAMASI İŞLEM PARAMETRELERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ VE İNCELENMESİ

Burak Berk DAY

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Temel VAROL
2025, 115 Sayfa, 16 Sayfa Ek

Bu çalışma, savunma sanayii uygulamalarında yaygın olarak kullanılan 42CrMo4 çeliği üzerinde gerçekleştirilen çok aşamalı yüzey mühendisliği işlemlerinin etkilerini araştırmayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda, numune materyal olarak 42CrMo4 çeliği tercih edilmiş ve sırasıyla taşlama, vibrasyonlu polisaj, otomasyonlu kumlama gibi yüzey hazırlık işlemleri uygulanmıştır. Takiben, tuz ortamında nitrokarbürizasyon, mangan fosfatlama ve ince film seramik (Cerakote) kaplama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Uygulanan tüm yüzey modifikasyonları sonrasında, numunelere ait mikroyapısal analizler; optik metal mikroskobu, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve mikrosertlik ölçümleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bileşik tabaka kalınlığı, difüzyon derinliği ve yüzey pürüzlülüğü gibi parametreler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışma, özel proseslerin entegrasyonunun malzeme performansı üzerindeki sinerjik etkilerini ortaya koymakta ve savunma sanayii başta olmak üzere ileri mühendislik uygulamaları için önemli bir referans oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler: 42CrMo4 Çeliği, Yüzey Mühendisliği, Nitrokarbürizasyon, Fosfatlama, İnce Film Seramik Kaplama, Savunma Sanayi

Master's Thesis

SUMMARY

IMPROVEMENT AND INVESTIGATION OF PROCESS PARAMETERS FOR THIN-FILM CERAMIC PAINT COATING ON NITROCARBURIZED 42CrMo4 STEEL AFTER PHOSPHATIZATION SURFACE TREATMENT

Burak Berk DAY

Karadeniz Technical University
Institute of Science
Department of Metallurgical and Materials Engineering
Advisor: Prof. Dr. Temel VAROL
2025, 115 Pages, 16 Pages Appendix

This study aims to investigate the effects of multi-stage surface engineering processes performed on 42CrMo4 steel, which is widely used in defense industry applications. In this context, 42CrMo4 steel was selected as the sample material, and surface preparation processes such as grinding, vibratory polishing, and automated sandblasting were applied. Subsequently, nitrocarburization in a salt environment, manganese phosphating, and thin-film ceramic (Cerakote) coating were performed. Following all surface modifications, microstructural analyses of the samples were performed using optical metal microscopy, scanning electron microscopy (SEM), and microhardness measurements. Furthermore, parameters such as compound layer thickness, diffusion depth, and surface roughness were comparatively evaluated. This study demonstrates the synergistic effects of the integration of special processes on material performance and constitutes an important reference for advanced engineering applications, especially in the defense industry.

Keywords: 42CrMo4 Steel, Surface Engineering, Nitrocarburization, Phosphating, Thin Film
Ceramic Coating, Defense Industry

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Çeliklerin Sınıflandırılması (Singh, 2012)	4
Şekil 2. Bileşik Katmanın Sistemik Yapısı (Gramlich et al., 2022).....	10
Şekil 3. Çeşitli malzemelerin bileşik tabakanın kalınlığına etkisi (GmbH).....	11
Şekil 4. İşlem süresine bağlı olarak elde edilebilir bileşik tabaka kalınlığı (GmbH)	11
Şekil 5. Çeşitli çeliklerin toplam nitrürleme derinliğinin işlem süresine göre değişimi (GmbH)	12
Şekil 6. Farklı Malzemelerin Sertlik Davranışı (GmbH).....	12
Şekil 7. Yüzey sertliği ve difüzyon derinliğinin krom içeriğine oranı (GmbH).....	13
Şekil 8. İki farklı namlu malzemesine uygulanan korozyon testi sonucu (Cerakote) ...	19
Şekil 9. Ham mamulden kesilen numaralandırılmış deney test parçaları.....	28
Şekil 10. Taşlama tezgâhı	30
Şekil 11. Lazer markalama cihazı görseli	30
Şekil 12. Vibrasyonlu çapak alma	31
Şekil 13. Otomosyon kumlama makinesi	32
Şekil 14. Nitrokarbürizasyon prosesinin şematik gösterimi	32
Şekil 15. Nitrokarbürizasyon termokimyasal ısıtma işlem hattı.....	34
Şekil 16. Fosfat kaplama proses işleminin şematik gösterimi	35
Şekil 17. Fosfat kaplama yüzey işlem hattı	36
Şekil 18. İnce film seramik kaplama kabini.....	37
Şekil 19. İnce film seramik kaplama sonrası kurlama fırını	38
Şekil 20. Hassas numune kesme cihazı	39
Şekil 21. Sıcak bakalite alma cihazı	40

Şekil 22.	Otomatik zımparalama ve parlatma cihazı	41
Şekil 23.	Metal mikroskobu.....	42
Şekil 24.	Taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazı	42
Şekil 25.	Sürtünme katsayısı ölçüm cihazı	43
Şekil 26.	Rockwell sertlik test cihazı.....	45
Şekil 27.	Mikrosertlik test ölçüm cihazı	46
Şekil 28.	Spektral analiz test cihazı	47
Şekil 29.	Yüzey pürüzlülük test cihazı	48
Şekil 30.	XRD analizi test cihazı	49
Şekil 31.	Rockwell sertlik ölçüm testi	51
Şekil 32.	N1 numunesinin 50x büyütmedeki mikroyapı görüntüsü	52
Şekil 33.	N1 numunesinin 100x büyütmedeki mikroyapı görüntüsü	53
Şekil 34.	N5 numunesinin yüzeyden alınan SEM görüntüsü	55
Şekil 35.	N5 numunesinin kesitten alınan SEM görüntüsü	56
Şekil 36.	N5 Numunesinin kesitten alınan EDS görüntüsü	56
Şekil 37.	N7 numunesinin yüzeyden alınan SEM görüntüsü	57
Şekil 38.	N7 numunesinin kesitten alınan SEM görüntüsü	57
Şekil 39.	N7 Numunesinin kesitten alınan EDS görüntüsü	58
Şekil 40.	N12 numunesinin yüzeyden alınan SEM görüntüsü	58
Şekil 41.	N12 numunesinin kesitten alınan SEM görüntüsü	59
Şekil 42.	N12 Numunesinin kesitten alınan EDS görüntüsü	59
Şekil 43.	N5 Numunesinin 5N kuvvet uygulanarak 500 metre mesafedeki aşınma izi görüntüsü.....	61
Şekil 44.	N5 Numunesinin 5N kuvvet uygulanarak 100 metre mesafedeki aşınma izi görüntüsü.....	61

Şekil 45.	N5 Numunesinin 5N kuvvet uygulanarak 200 metre mesafedeki aşınma izi görüntüsü	62
Şekil 46.	N5 Numunesinin 10N kuvvet uygulanarak 50 metre mesafedeki aşınma izi görüntüsü	62
Şekil 47.	N5 Numunesinin 20N kuvvet uygulanarak 50 metre mesafedeki aşınma izi görüntüsü	63
Şekil 48.	N7 Numunesinin 5N kuvvet uygulanarak 50 metre mesafedeki aşınma izi görüntüsü	65
Şekil 49.	N7 Numunesinin 5N kuvvet uygulanarak 100 metre mesafedeki aşınma izi görüntüsü	65
Şekil 50.	N7 Numunesinin 5N kuvvet uygulanarak 200 metre mesafedeki aşınma izi görüntüsü	66
Şekil 51.	N7 Numunesinin 10N kuvvet uygulanarak 50 metre mesafedeki aşınma izi görüntüsü	66
Şekil 52.	N7 Numunesinin 20N kuvvet uygulanarak 50 metre mesafedeki aşınma izi görüntüsü	67
Şekil 53.	N12 Numunesinin 5N kuvvet uygulanarak 50 metre mesafedeki aşınma izi görüntüsü	68
Şekil 54.	N12 Numunesinin 5N kuvvet uygulanarak 100 metre mesafedeki aşınma izi görüntüsü	69
Şekil 55.	N12 Numunesinin 5N kuvvet uygulanarak 200 metre mesafedeki aşınma izi görüntüsü	69
Şekil 56.	N12 Numunesinin 10N kuvvet uygulanarak 50 metre mesafedeki aşınma izi görüntüsü	70
Şekil 57.	N12 Numunesinin 20N kuvvet uygulanarak 50 metre mesafedeki aşınma izi görüntüsü	70
Şekil 58.	Numunelere göre özgül aşınma karşılaştırılması.....	73
Şekil 59.	Özgül aşınma miktarlarının mesafeye göre değişimi	74
Şekil 60.	N5 numunesinin 50M-10N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü	75
Şekil 61.	N5 numunesinin 50M-10N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü	76

Şekil 62.	N5 numunesinin 50M-20N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü	76
Şekil 63.	N5 numunesinin 50M-20N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü	77
Şekil 64.	N5 numunesinin 50M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü	77
Şekil 65.	N5 numunesinin 50M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü	78
Şekil 66.	N5 numunesinin 100M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü	78
Şekil 67.	N5 numunesinin 100M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü	79
Şekil 68.	N5 numunesinin 200M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü	79
Şekil 69.	N5 numunesinin 200M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü	80
Şekil 70.	N7 numunesinin 50M-10N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü	81
Şekil 71.	N7 numunesinin 50M-10N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü	81
Şekil 72.	N7 numunesinin 50M-20N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü	82
Şekil 73.	N7 numunesinin 50M-20N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü	82
Şekil 74.	N7 numunesinin 50M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü	83
Şekil 75.	N7 numunesinin 50M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü	83
Şekil 76.	N7 numunesinin 100M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü	84
Şekil 77.	N7 numunesinin 100M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü	84

Şekil 78.	N7 numunesinin 200M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü	85
Şekil 79.	N7 numunesinin 200M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü	85
Şekil 80.	N12 numunesinin 50M-10N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü	86
Şekil 81.	N12 numunesinin 50M-10N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü	87
Şekil 82.	N12 numunesinin 50M-20N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü	87
Şekil 83.	N12 numunesinin 50M-20N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü	88
Şekil 84.	N12 numunesinin 50M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü	88
Şekil 85.	N12 numunesinin 50M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü	89
Şekil 86.	N12 numunesinin 100M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü	89
Şekil 87.	N12 numunesinin 100M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü	90
Şekil 88.	N12 numunesinin 200M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü	90
Şekil 89.	N12 numunesinin 200M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü	91
Şekil 90.	5N yük 50M mesafedeki N5, N7 ve N12 numunelerinin aşınma mesafesine karşı sürtünme katsayıları	92
Şekil 91.	5N yük 100M mesafedeki N5, N7 ve N12 numunelerinin aşınma mesafesine karşı sürtünme katsayıları	93
Şekil 92.	5N yük 200M mesafedeki N5, N7 ve N12 numunelerinin aşınma mesafesine karşı sürtünme katsayıları	93
Şekil 93.	10N yük 50M mesafedeki N5, N7 ve N12 numunelerinin aşınma mesafesine karşı sürtünme katsayıları	94

Şekil 94.	20N yük 50M mesafedeki N5, N7 ve N12 numunelerinin aşınma mesafesine karşı sürtünme katsayıları	94
Şekil 95.	Nitrokarbürleşmiş 42CrMo4 çeliğinde çekirdek bölge vickers sertlik ölçümü (319 HV / yaklaşık 32 HRC)	95
Şekil 96.	Nitrokarbürizasyon Sonrası Sertlik Derinlik Profili (42CrMo4 Çeliği - 560°C / 1 Saat	97
Şekil 97.	Nitrokarbürleşmiş 42CrMo4 çeliğinde mikroyapısal sertlik dağılımı ve difüzyon tabaka kalınlığı	97
Şekil 98.	N5 42CrMO4 Çeliği üzerine uygulanan nitrokarbürizasyon sonrası XRD analizi testi grafiği	103
Şekil 99.	N7 42CrMO4 Çeliği üzerine uygulanan nitrokarbürizasyon ve mangan fosfat kaplama sonrası XRD analizi testi grafiği	103
Şekil 100.	N12 42CrMO4 Çeliği üzerine uygulanan nitrokarbürizasyon,mangan fosfat ve cerakote ince film seramik kaplama sonrası XRD analizi testi grafiği	104

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Çok bileşimli fosfatlama çeşitleri	18
Tablo 2. EN10083 standart aralığına göre 42CrMo4 çelik malzemesinin elementel aralığı (%).....	27
Tablo 3. Numunelere göre uygulanan yüzey işlemler	29
Tablo 4. Nitrokarbürizasyon hattında kullanılan kimyasalların ticari adı ve içeriği	33
Tablo 5. Fosfatlama yüzey işlemi hattında kullanılan kimyasalların ticari adı ve kimyasal içeriği.....	34
Tablo 6. İnce film seramik kaplama kimyasalının adı ve içeriği	37
Tablo 7. Numunelere uygulanan aşınma testi koşulları.....	43
Tablo 8. Test numunelerinin sertlik sonuçları.....	51
Tablo 9. Numunelere uygulanan yüzey işlemler	60
Tablo 10. Özgül aşınma miktarları	71
Tablo 11. Difüzyon derinliği mikrosertlik ölçüm sonuçları	98
Tablo 12. Test numunelerinin spektral analiz sonuçları (%).	99
Tablo 13. Prosesler Arasında Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Sonuçları	100

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

NO^{2-}	:Nitrit		
NO^{3-}	:Nitrat		
$^{\circ}\text{C}$	:Santigrat Derece		
μm	:Mikrometre		
CN^-	:Siyanür		
dk	:Dakika		
Fe	:Demir		
N	:Azot		
O	:Oksijen		
Fe_3N_4	:Demir Nitrür		
m	:Metre		
TF1	:Nitrokarbürizasyon Tuz Kimyasalı		
CO_3^{-2}	:Karbonat		
SEM	:Taramalı Elektron Mikroskobu		
DC	:Doğru Akım		
ASPN	:Aktif Ekran Plazma Nitrüleme		
ECR	:Elektron Siklotron Rezonans		
PVD	:Fiziksel Buhar Biriktirme		
CVD	:Kimyasal Buhar Biriktirme		
MAO	:Mikro Ark Oksidasyonu		
XRD	:X-Işını Kırınımı		
QPQ	:Quench	Polish	Quench

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Savunma sektörü artık küresel senaryoya hitap eden ileri bir seviyededir ve ülkeler ayrıca araştırma ve geliştirmeye büyük yatırımlar yaptığı görülmektedir. Dünya çapındaki ülkeler, rakiplerinin önünde kalmak için yıllar boyunca araştırma ve geliştirmeye çok para harcamışlardır. Hafif malzemeler, bileşenlerin mukavemetten ödün vermeden daha hafif olmasını sağladıkları için savunma uygulamalarında kritik öneme sahip oldukları gözlemlenmiştir (Siengchin, 2023). Günümüzün zorlu hizmet koşullarında kullanılan gelişmiş havacılık ve savunma teknolojileri için çok yönlü kaplama malzemelerinin seçimi ve uygulanması oldukça güçtür. Ancak, geleneksel kaplamalar aşırı sıcaklık değişimleri, yoğun yorulma ve sürünme, yüksek vakum ile hızlı hareket gibi etkenlere maruz kaldığında sınırlı mukavemet, düşük esneklik ve dayanıklılık ile zayıf alt tabaka–kaplama yapışması gösterdiği görülmüştür (S et al., 2023). Açık deniz tesisleri, atmosferik, sıçrama, su altı ve çamur bölgeleri gibi çeşitli bölgelerde korozyona eğilimlidir. Bu nedenle, verimsiz ve pahalı olan geleneksel kaplamaların potansiyel yerini alma olarak organik kaplamalar kullanan açık deniz tesislerinin, açık deniz savunma sistemlerin korozyonunun önlenmesine yönelik yüksek bir talep olduğu bilinmektedir (Olajire, 2018). Bir yüzeyin kaplanması iki katlı işlev görebilir; birincisi aşınma, erozyon ve korozyona karşı direnç gibi yüzeye bağlı özellikleri iyileştirmek, diğeri ise sertlik, mukavemet vb. gibi hacim bağımlı özellikleri geliştirmektir ki buna sert yüzey kaplama denir. Kaplanmış bileşenlerin, ekonomik olarak yeterince uzun bir süre boyunca zorlu bir ortamda belirli işlevini yerine getirme yeteneklerine sahip olması beklenir (Saha & Das, 2016).

Kaplamalı ve yüzey mühendisliği uygulanmış bileşenlerin kullanımı artmakta ve bu durum, iyileştirilmiş sertlik değerleri, korozyon ve aşınma direnci ihtiyacıyla yönlendirilmektedir (Fazlalipour et al., 2012). Karbürleme, nitrürleme ve indüksiyon sertleştirme gibi geleneksel prosesler önemli ölçüde iyileştirme olduğu görülmüşken, vakum karbürleme, plazma kürleme ve çeşitli hibrit prosesler gibi daha yeni yaklaşımlar giderek artan bir endüstriyel kabul görmüştür (Jamalabadi, 2025). Nitrürleme ısı işlemini ağırlıklı

olarak çelikte kullanılır, ancak titanyum, alüminyum ve molibden alaşımlarında da kullanılır (Bhaskar & Kudal, 2017).

Nitrokarbürizasyon, yüzey modifikasyon yöntemlerinden biridir. Nitrokarbürleme, düřük sıcaklıkta (450-600°C) veya yüksek sıcaklıkta (750-950°C) karbonitrürleme iřlemiyle, yani termokimyasal iřlemin difüzyon iřlemiyle hazırlanabilir. Düřük sıcaklıktaki iřleme nitrokarbürizasyon da denir. elik yüzeyinin aynı anda hem karbon hem de nitrojenle difüze edilmesini içerdięi bilinmektedir. (Taczała-Warga & Paweła, 2023).

AISI 42CrMo4, sıklıkla nitrürlemeye tabi tutulan bir elik türüdür. Bu elik, yüksek mukavemeti ve düşük maliyetinin yanı sıra yüksek sertleştirilebilirliği, darbe tokluğu ve aşınma direnci nedeniyle otomotiv, kimya ve savunma endüstrilerinde yaygın olarak kullanılır. Nitrrlemeden önce, bu elik tipik olarak ısıl işleme (ıslah su verme sertleştirmesi) tabi tutulur. AISI 42CrMo4 ve benzer elik kalitelerinin ıslah ısıl işlemi amacı, elik parçalarda sert bir yüzey tabakası ve tok bir çekirdek oluşturmak ve nitrürlemeye uygun, nispeten düzgün ve kararlı bir yüzey yapısı oluşturmaktır (Stojanović et al., 2025).

Fosfatlama işlemi, bir metal yüzeyin, alttaki metale bitişik ve oldukça yapışkan, metalden önemli ölçüde daha emici olan, makul derecede sert, elektriksel olarak iletken olmayan, çözünmeyen fosfattan oluşan bir yüzey kaplaması elde etmek için işlenmesi olarak tanımlanabilir. Kaplama, taban metalin yüzeyinin korozyona dayanıklı filmin bir parçası olarak bütünleşmesine neden olan bir topokimyasal reaksiyon sonucu oluşur (Sankara Narayanan, 2005). Manganez fosfat kaplamanın biriktirilmesi, metalin çözünmesi, $Mg(OH)_2$ filminin biriktirilmesi ve son olarak $(Mg/Mn)_3(PO_4)_2$ kaplamasının oluşumu olmak üzere üç aşamada gerçekleştirildiği bilinir. Mg alt tabakasının fosfatlama banyosuna daldırılmasının hemen ardından reaksiyonları gerçekleşir ve bu da OH^- ve Mg^{2+} iyonlarının oluşumu nedeniyle metal yüzeyine yakın bölgelerde çözelti pH'ında bir artışa neden olur. Mn^{2+} ve PO_4^{3-} iyonlarına kıyasla daha fazla Mg^{2+} ve OH^- , metal yüzeyinde bir ara $Mg(OH)_2$ tabakası olarak biriktirilir. Manganez fosfat türlerinin oluşumu banyo sıcaklığına ve pH'a bağlıdır (Hafeez et al., 2020). Uygun bir kaplama yönteminin seçimi, bitmiş ürünün kullanım gereksinimlerine bağlıdır. Örneğin, korozyona karşı maksimum

koruma gerektiren, özellikle de bu tür yüzeylerin kullanım ömrü boyunca aşınmaya ve fiziksel hasara maruz kaldığı çelik yüzeylerde çinko fosfat kaplama tercih edilirken, daha düşük standartların kabul edilebilir olduğu durumlarda hafif bir demir fosfat kaplama yeterli olabildiği de belirlenmiştir. (Ashdown & Lever, 1975).

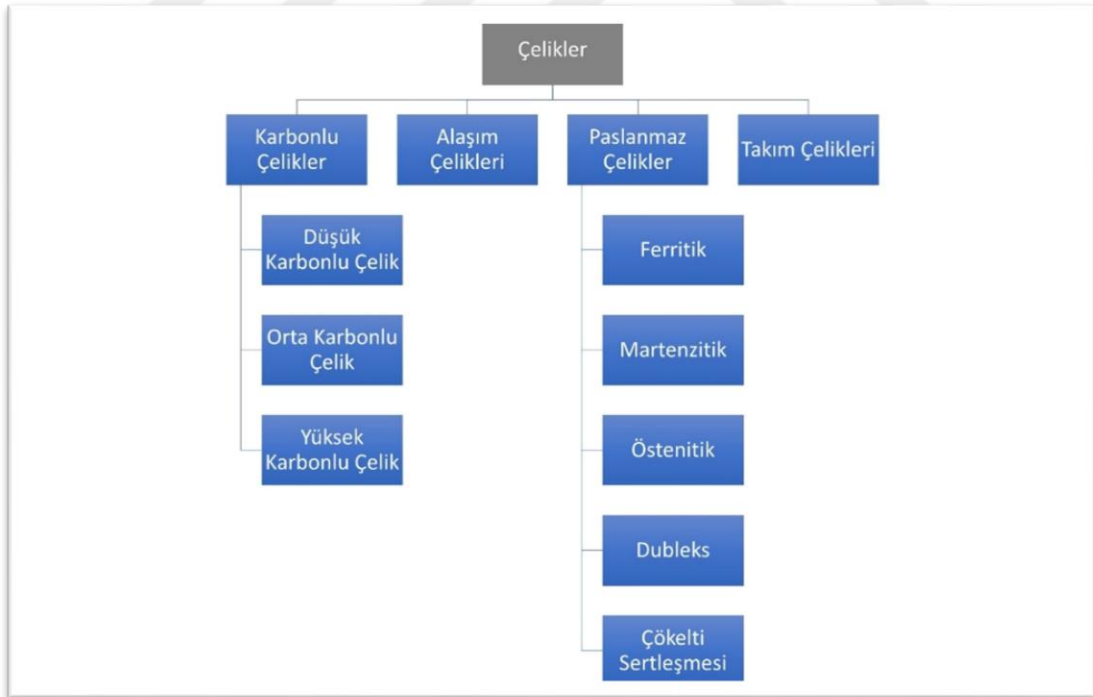
1.2. Çelik Malzemelerin İsimlendirilmesi ve Sınıflandırılması

Çelik, olağanüstü mekanik özellikler, iyi korozyon direnci, bol miktarda bulunabilirlik ve birim kütle başına düşük maliyet sağladığı için dünyada en yaygın kullanılan alaşımdır. Aynı zamanda, alaşım maddelerinin ve üretim prosedürlerinin neredeyse sınırsız kombinasyonları ile belirli mekanik davranışlara göre uyarlanabilir (Hamdy Makhoul & Prado, 2020).

Çeliğin özelliklerini değiştirmenin bir yolu, sade karbon çeliğinde elde edilemeyen özellikler üreten karbon dışındaki alaşım elementleri eklemektir. Çeliği alaşımlamak için kullanılan yaklaşık 20 elementin her biri, mikro yapı ve mikro yapıların değiştiği sıcaklık, tutma süresi ve soğutma oranları üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Ferrit ve östenit arasındaki dönüşüm noktalarını değiştirir, çözelti ve difüzyon oranlarını değiştirir ve karbürler ve nitürler gibi metalik bileşikler oluşturmada diğer elementlerle rekabet eder. Alaşımlamanın ısıtma işlem koşullarını, mikro yapıları ve özellikleri nasıl etkilediğine ilişkin çok miktarda bilimsel bilgi bulunmaktadır. Ek olarak, bilgisayarların yardımıyla mühendislerin alaşımlama, sıcak haddeleme, ısıtma işlem ve soğuk şekillendirme sırasında çeliğin mikro yapılarını ve özelliklerini herhangi bir şekilde tahmin etmelerini sağlayan ilkelerin iyi bir teorik anlayışı vardır.

Alaşımlamanın etkilerine dair iyi bir örnek, iyi kaynaklanabilirliğe sahip yüksek dayanımlı bir çeliğin yapılmasıdır. Bu, yalnızca karbonu güçlendirici olarak kullanarak yapılamaz, çünkü karbon kaynak çevresinde kırılma bölgeleri oluşturur, ancak karbonu düşük tutarak ve nikel veya manganez gibi diğer güçlendirici elementlerden az miktarda ekleyerek yapılabilir. Prensipte, metallerin güçlendirilmesi, kafes yapılarının hareketine karşı direncini artırarak gerçekleştirilir. Dislokasyonlar, metallerin oluşmasını mümkün kılan kristallerin kafeslerindeki bozulmalardır. Nikel gibi elementler ferrit

içinde katı çözeltili halinde tutulduğunda, atomları demir kafeslerine gömülür ve dislokasyonların hareketlerini engeller. Mukavemetteki daha büyük bir artış, çökelme sertleşmesi, belirli elementlerin (örneğin titanyum, niyobyum ve vanadyum) çeliğin soğutulması sırasında ferritte katı çözeltili halinde kalmadığı, bunun yerine ince dağılmış, son derece küçük karbür veya nitrür kristalleri oluşturduğu ve bunların da dislokasyonların akışını etkili bir şekilde kısıtladığı bir durumdur. Ek olarak, bu güçlü karbür veya nitrür oluşturmalarının çoğu küçük tane boyutu üretir, çünkü çökeltileri bir çekirdeklenme etkisine sahiptir ve soğuyan metalin yeniden kristalleşmesi sırasında kristal büyümesini yavaşlatır. Küçük tane boyutu üretmek, tane sınırlarının da dislokasyonların akışını kısıtlaması nedeniyle çeliği güçlendirmenin bir başka yöntemidir (Dossett & Totten, 2013). Çeliklere ait birçok sınıflandırma çeşidi bulunmaktadır. Genel sınıflandırma çeşitlerinden biri olan görsel Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Çeliklerin Sınıflandırılması (Singh, 2012)

1.2.1. Islah Çelikleri ve Özellikleri

Islah edilmiş ve temperlenmiş çelikler, genel olarak %0,15-0,40 C içeriğine sahip düşük alaşımlı geleneksel sınıflar ve %1-12 aralığında Cr, V, Mo vb. gibi güçlü karbür oluşturan elementlerle alaşımlanmış %2 kadar yüksek C içeriğine sahip takım çelikleri olarak sınıflandırılır. Her iki durumda da çelikler, iyileştirilmiş tokluk, mukavemet ve aşınma direnci için sertleştirilmiş/ıslah edilmiş ve temperlenmiş koşullarda kullanılır. C içeriği ve temperleme sıcaklığı, istenen uygulamaya göre optimize edilir. Ancak, yeterli toklukla birlikte yüksek mukavemet/sertlik elde etmek bir zorluktur. Kimya tasarımı, bu sınıfları geliştirmenin önemli parçalarından biridir. Mn, Cr, Mo, B vb. gibi sertleştirilebilirlik elementlerinin makul miktarı, gerekli olan ıslah ısı işlem sertliği elde etmek için eklenirken, bu elementlerin aşırı eklenmesi maliyet açısından etkili olmayacaktır. Söndürmeden önce optimize edilmiş östenit tane boyutu, sertleştirilebilirliğin yanı sıra tokluğun da elde edilmesi için önemlidir (Sahoo et al., 2020).

1.3. Çeliklere Uygulanan Yüzey İşlemleri

Çelik malzemeler yüksek mukavemet, tokluk ve iyi işlenebilirlik sunmasına rağmen, yüzey özellikleri aşınma, korozyon ve oksidasyon gibi agresif servis koşullarına karşı yetersiz olabilir. Bu nedenle, hizmet ömürlerini uzatmak, bakım maliyetlerini azaltmak ve sistem güvenilirliğini artırmak için çelik bileşenlere çeşitli yüzey işleme teknikleri uygulanır (Zhang et al., 2024). Yüzey işlemleri genellikle iki ana gruba ayrılır: termokimyasal prosesler ve kaplama teknolojileri. Termokimyasal prosesler, karbürleme, nitrürleme ve borlama gibi difüzyon tabanlı teknikleri içerir. Örneğin, gaz nitrürleme, çelik yüzeyinde ϵ (Fe_{2-3}N) ve γ' (Fe_4N) fazlarının oluşumuna yol açar, bu da yüzey sertliğini 1000 HV'ye kadar artırabilir ve aşınma ve yorulma direncini önemli ölçüde iyileştirebilir (Kim et al., 2020). Bu yöntemler, dişliler, şaftlar ve yataklar gibi bileşenler için kalıp imalatı, otomotiv ve savunma sanayi gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Rakhit, 2000). Öte yandan, kaplama prosesleri belirgin bir tabaka oluşturarak yüzeye

işlevsel özellikler kazandırmayı amaçlamaktadır. Kimyasal (fosfatlama, akımsız nikel kaplama) ve fiziksel (PVD, CVD) kaplama teknikleri genellikle korozyon direncini ve yüzey estetiğini artırmak için kullanılır. Sert nitrürler ve karbürler gibi Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) kaplamaları, yüksek sıcaklıkta aşınma direncinin kritik olduğu kesici takım uygulamalarında özellikle tercih edilir (Kathrein et al., 2005). Ek olarak, kromatlama, anodize etme ve seramik bazlı kaplamalar çelik yüzeylerin genel performansını iyileştirmek için sıklıkla kullanılır (F. Allen, 2013) Uygun bir yüzey işleminin seçimi çelik sınıfı, servis ortamı, yükleme koşulları ve istenen yüzey özellikleri gibi faktörlere bağlıdır. Mikro yapı, difüzyon derinliği ve kaplama kalınlığı gibi parametreler, işlem sonrası performansta önemli bir rol oynar. Sonuç olarak, yüzey mühendisliği teknikleri çelik bileşenlerin hem mekanik hem de kimyasal dayanıklılığını iyileştirerek mühendislik sistemlerinin operasyonel güvenilirliğini optimize eder (NGAKE & MJALI, 2024).

• Çeliklere Uygulanan Nitrürleme Yüzey İşlemleri

Nitrürleme, çeliklerin yüzeyine nitrojen difüzyonu yoluyla sert, aşınma ve korozyon direncine sahip bir tabaka oluşturmayı hedefleyen kritik bir yüzey işlemidir. Yüzey sertliği, tribolojik dayanım ve yorulma ömrü önemli ölçüde geliştirilir. Örneğin iyon nitrürleme, AISI 4340 çeliğinde et kalınlığına bağlı olarak yorulma dayanımını %50–90 oranında artırmıştır. Ayrıca hem iyon hem de gaz nitrürleme işlemleri, AISI H13 ve DIN 1.2367 takım çeliklerinde mikrosertlik artışı, daha koyu ve kontrollü difüzyon tabakaları ile tribolojik performansa olumlu katkılar göstermiştir (Korkmaz et al., 2022).

• Nitrürleme

Katı malzemeler için kullanılan çoğu yüzey modifikasyon tekniği, malzemelerin genel performansını iyileştirmek için optimize edilmiş yapı ve özellikler üreten çeşitli kimyasal reaksiyonlara dayanır. Ancak, bu tekniklerin yaygın kullanımı sıklıkla ilgili reaksiyon kinetiği tarafından engellenir. Örneğin, nitrürleme, yüzey nitrürleri oluşturmak

için yaygın olarak kullanılan bir kimyasal işlemdir. Bu teknik, sert bir yüzeye (bir Fe-nitrür bileşikleri tabakası) ve sert bir iç kısma sahip benzersiz bir kompozit yapı oluşturduğu için büyük bir endüstriyel ilgi görmektedir, böylece alaşımların ve çeliklerin genel mekanik performansı ve aşınma/korozyon direnci büyük ölçüde iyileştirilebilir. Ancak, gaz nitrürleme işlemleri uzun bir süre (20 ila 80 saat) boyunca yüksek sıcaklıklarda (500 °C) gerçekleştirilir ve birçok malzeme ailesinde alt tabakanın ciddi şekilde bozulmasına neden olabilir. Tanecik inceltme yoluyla yüzey mikro yapısının değiştirilmesi, bir malzeme yüzeyinin kimyasal reaksiyonunu hızlandırmak için kullanılabilecek bir seçenektir (Tong et al., 2003).

• Karbonitrürleme

Karbonitrürleme, çelikler için en yaygın kullanılan yüzey sertleştirme tekniklerinden biridir, çünkü karbonitrürleme üstün mekanik özellik kombinasyonunu sunabilir (Shen et al., 2007). Endüstriyel uygulamalarda karşılaşılan yüzey bütünlüğünün sertleştirilmesinin başlıca yöntemlerinden biri termokimyasal işlemdir. İstenilen yüzey kalitesinin elde edilmesi, bir parçanın işlevsel bakımı için çok önemli bir parametredir. Endüstriyel koşullarda en çok sertleştirilen parçalar şunlardır: matkaplar, vida dişleri ve kalıplar. Endüstriyel tesislerde yaygın bir sorun ise, kullanılan takımların dayanıklılığının nasıl artırılacağıdır. Kesici takımlar ve endüstriyel bıçaklar bir örnek olarak gösterilebilir. Üretim açısından bakıldığında, takım seçimi için temel kriterlerden biri, uygun iyileştirme yollarının seçilmesiyle yüksek seviyesi belirlenebilen operasyonel dayanıklılığıdır. Çeliğin nitrürleme yoluyla termokimyasal işleminin popülerliği, nitrürleme yöntemlerinde dikkate değer bir gelişmeye yol açmıştır (Józwik et al., 2016). Gazlı karbonitrürleme işlemi, mühendislik bileşenlerinin mekanik davranışını iyileştirmek için karbürleme işlemi ve diğer yüzey sertleştirme işlemleriyle birlikte birkaç on yıldır kullanılmaktadır. Gazlı karbonitrürleme işlemi genellikle amonyak ilaveli endotermik olarak türetilmiş bir taşıyıcı gaz içeren karbürleme fırınlarında gerçekleştirilir. İşlem sıcaklığı, karbürlemeden 50 ila 100 °C daha düşük olan 800 ila 900 °C aralığındadır (Slycke & Ericsson, 1981). Karbonitrürleme işlemi, genellikle 700–900 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilir ve çelik

yüzeyine karbon ve azot atomlarının difüzyonunu içerir. Bu difüzyon sonucunda, yüzeyde sert bir bileşik tabakası ve altında difüzyon bölgesi oluşur. İşlem sırasında kullanılan atmosfer genellikle karbon ve azot sağlayıcı gazların (örneğin, metan ve amonyak) karışımından oluşur. Bu gazlar, yüksek sıcaklıkta parçalanarak aktif karbon ve azot atomları oluşturur ve bu atomlar çelik yüzeyine difüze olur.

Karbonitrüleme işlemi sırasında meydana gelen temel reaksiyonlar şunlardır:

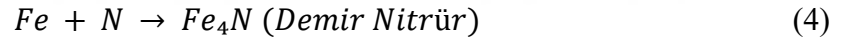
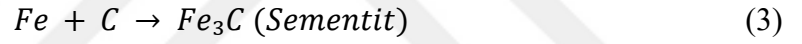
Amonyağın Parçalanması:



Metanın Parçalanması:



Karbon ve Azotun Çelik Yüzeyine Difüzyonu:



Bu reaksiyonlar sonucunda, çelik yüzeyinde sert ve aşınmaya dirençli bir tabaka oluşur (Davis, 2002).

Karbonitrüleme işleminin avantaj ve dezavantajları aşağıda verilmektedir;

Avantajları:

- Yüzey Sertliği: Karbonitrüleme işlemi, çelik yüzeyinin sertliğini artırarak aşınma direncini iyileştirir.
- Düşük Sıcaklık: Diğer yüzey sertleştirme işlemlerine göre daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilir, bu da distorsiyon riskini azaltır.
- Kısa Süre: İşlem süresi nispeten kısadır, bu da üretim verimliliğini artırır.

Dezavantajları:

- Sınırlı Difüzyon Derinliği: Difüzyon derinliği sınırlıdır, bu nedenle çok derin sertleştirme gerektiren uygulamalar için uygun olmayabilir.

- İşlem Kontrolü: İşlem parametrelerinin hassas kontrolü gereklidir; aksi takdirde istenmeyen mikroyapılar oluşabilir (Totten & Howes, 1997).

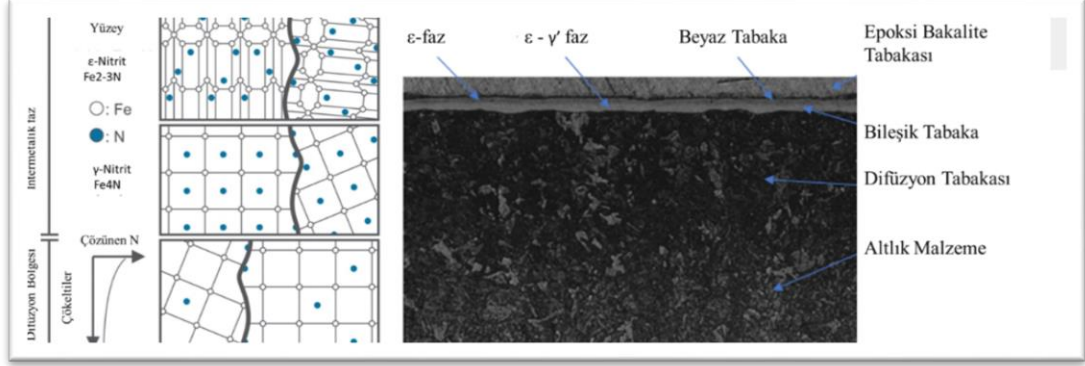
Karbonitrürleme işleminin uygulama alanları ise otomotiv sektöründe dişli çarklar, kam milleri, valf parçaları gibi yüksek aşınma direnci gerektiren yüzey sertleştirilmesinde kullanılır. Otomotiv endüstrisinde ise mil, rulman ve diğer hareketli parçaların yüzey dayanımını artırmak için uygulanır. Takım tezgahlarında ise kesici takımların ve kalıpların yüzey sertliğini artırarak, kullanım ömürlerini uzatır (Davis, 2002). Karbonitrürleme işleminde mikroyapısal etkiler önemli role sahiptir. Çeliklerin mikroyapısında belirgin değişikliklere neden olur. İşlem sonrasında, yüzeyde sert bir bileşik tabakası (karbürler ve nitrürler) ve bunun altında bir difüzyon bölgesi oluşur. Bu mikroyapısal değişiklikler, malzemenin mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirir. Mikroyapısal analizler, karbonitrürleme işleminin yüzeyde ince taneli bir yapı oluşturduğunu ve bu yapının malzemenin sertlik ve aşınma direncini artırdığını göstermektedir (Sun, 2005).

• Nitrokarbürizasyon

Demirli malzemelerin yüzeyini öncelikle azotla ve aynı zamanda az miktarda karbonla zenginleştiren bir termokimyasal işlemdir. Aşınma direncini, korozyon direncini, yorulma mukavemetini, görünümünü iyileştirir ve ekonomiktir, çevre dostudur, çok amaçlıdır. Tuz banyosunda, gaz, plazma ve toz ortamında yapılır. Bir nitrokarbürizasyon prosesindeki işlenmiş bir yüzeyin yapısı;

Bileşik katman bir iş parçasının yüzeyinde, ϵ - demir nitrürden (alaşımli çeliklerde ayrıca özel nitrürlerden) oluşur.

“Difüzyon katmanı, bileşik katmanın altındaki alan, azot, demir kafeste atomik olarak çözülür. Şekil 2’ de bileşik katmanın sistematik yapısı verilmiştir.

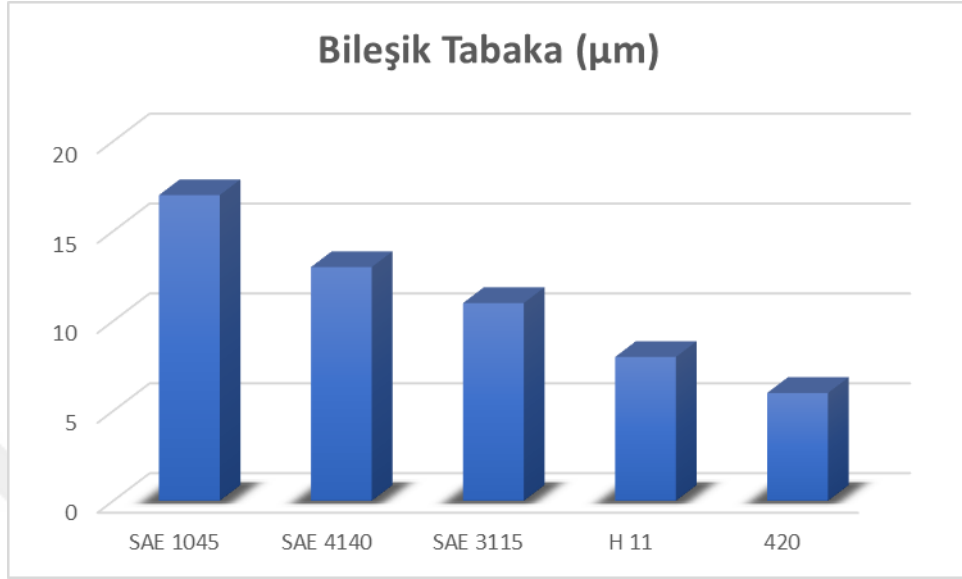


Şekil 2. Bileşik Katmanın Sistemik Yapısı (Gramlich et al., 2022)

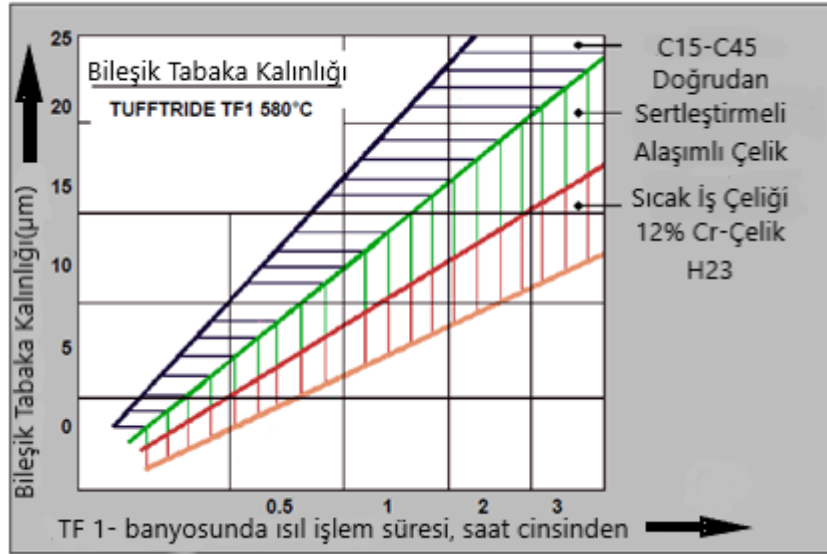
Bileşik tabakanın kalınlığı üzerindeki en önemli etkiler şunlardır:

- Malzeme
- İşlem sıcaklığı
- Banyo kimyası (örn. siyanat içeriği)
- İşlem süresi

Malzemenin bileşiminin etkileri sabit işlem parametreleriyle alaşım elementlerinin artan içeriği, bileşik tabakanın kalınlığında azalma, toplam nitrasyon derinliğinde azalma, yüzey sertliğinde artışa neden olur. Şekil 3'te malzemelerin bileşik tabaka kalınlığına etkisi verilmiştir. Şekil 4'te ise işlem süresine bağlı olarak elde edilebilir bileşik tabaka kalınlığı verilmiştir.



Şekil 3. Çeşitli malzemelerin bileşik tabakanın kalınlığına etkisi (GmbH)

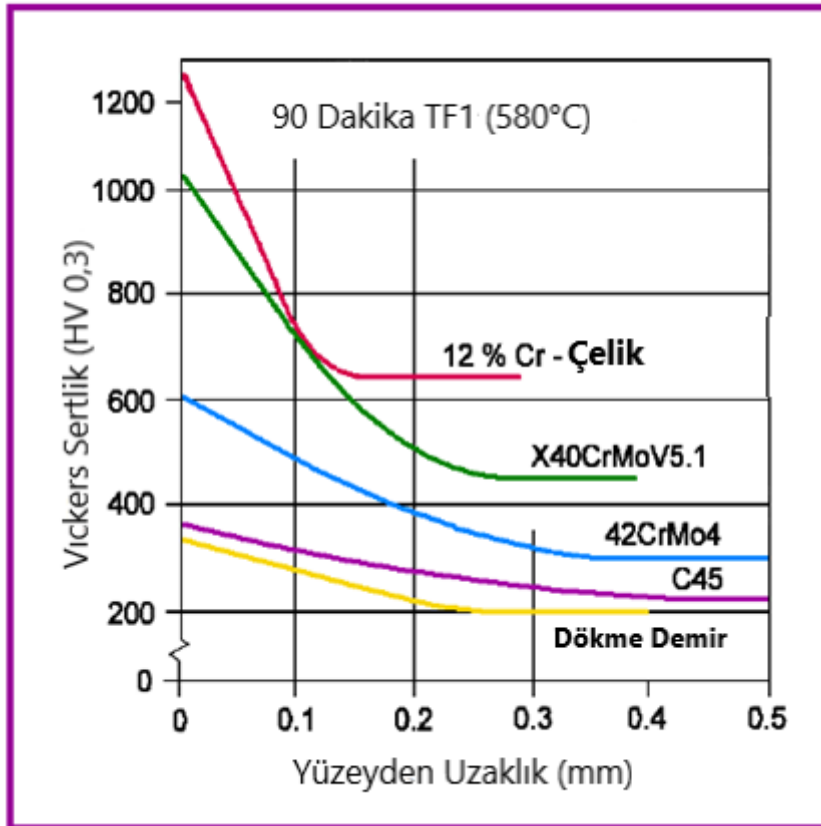


Şekil 4. İşlem süresine bağlı olarak elde edilebilir bileşik tabaka kalınlığı (GmbH)

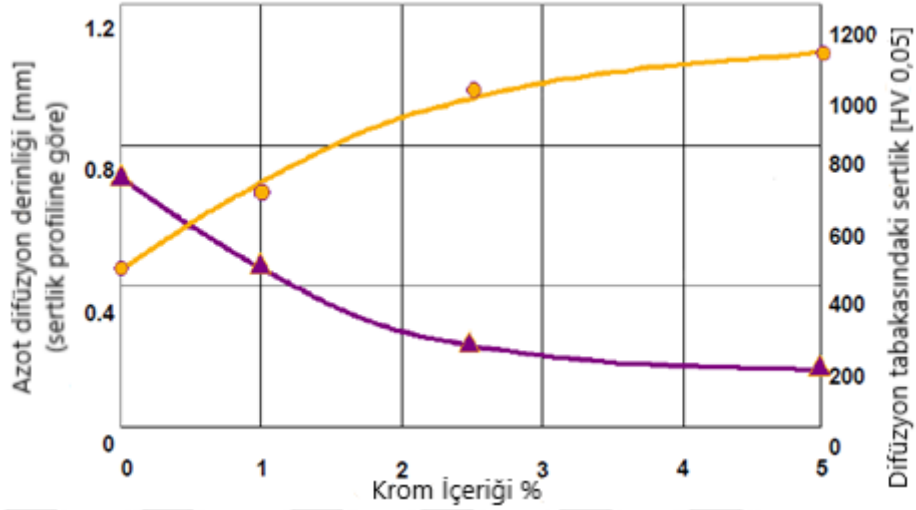
Şekil 5'te verildiği gibi çeliklerin nitrürleme derinliğinin işlem süresine göre değişimi görülmektedir. Şekil 6' da ise 580°C2 de 90 dakika nitrokarbürizasyon uygulanan farklı malzemelerin sertlik davranışları karşılaştırılmıştır. Şekil 7' de yüzey sertliği ve difüzyon derinliğinin krom içeriği oranına göre etkisi gösterilmiştir.



Şekil 5. Çeşitli çeliklerin toplam nitrürleme derinliğinin işlem süresine göre değişimi (GmbH)



Şekil 6. Farklı Malzemelerin Sertlik Davranışı (GmbH)



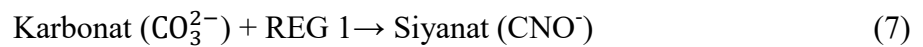
Şekil 7. Yüzey sertliği ve difüzyon derinliğinin krom içeriğine oranı (GmbH)

Tenifer prosesindeki termokimyasal ısıtma işlemi aşamaları ön ısıtma (350-400°C), TF1 banyosunda nitrokarbürleme (genellikle 580°C), soğutma, sıcak ve çalkantılı bir durulama su tankında temizleme aşamalarından geçmektedir. Bu süreçte ön ısıtma ısıtma işleminin nedenleri vardır. Bunlar, yalnızca tamamen kuru bileşenleri nitrokarbürleme banyosuna konulmalıdır. Nitrokarbürleme banyosundaki sıcaklık 1000°F'nin (540°C) altına düşmemelidir, aksi takdirde bileşik tabakasının oluşumunu olumsuz etkiler. Sıcaklık normalde 660-750°F (350-400°C), süre genellikle 30-90 dakika, min. 30 dakika olmalıdır. Çok yüksek bir sıcaklık veya çok uzun bir süre kireçlenmeye yol açabilir. Buda daha düşük nitrürleme kalitesi ve yüksek çamur oluşumuna sebebiyet verir (GmbH).

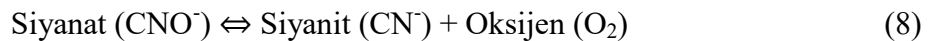
Nitrokarbürizasyon Prosesi:



REG 1 Kimyasalı ile Rejenerasyonu:



Yan Reaksiyon:



Gaz halinde nitrürleme işleminin sıcaklık ve nitrürleme potansiyeli ile tamamen kontrol edilebildiği düşünülmektedir. Ticari olarak kullanılan kontrol sistemlerinin çoğu, nitrojen-demir fazları, sıcaklık ve amonyak ve hidrojenin kısmi basınç oranı arasındaki ilişkiyi gösteren Lehrer Diyagramına dayanmaktadır. Bu, nitrürleme potansiyelini belirlemek için kullanılan ölçüm ekipmanında da yansıtılmaktadır. Lehrer'in faz diyagramı, amonyak ve hidrojenin sabit gaz karışımları ile saf demir tozu arasındaki reaksiyonlardan oluşturulmuştur. Gerçek malzemeler ve gerçek parçalarla uğraşan endüstriyel nitrürleme döngülerinde, sonuçlar genellikle beklentilerle uyuşmamaktadır (Winter et al., 2011).

• Plazma Nitrürleme

Plazma destekli nitrürleme, demirli ve demirsiz malzemelerin aşınma, sertlik ve yorulma direncini iyileştirmek için metalurjik yüzey modifikasyonu için çekici bir yüzey işlemidir. Bu amaçla, doğru akım kızdırma deşarjı ile iyon nitrürleme genellikle çok sayıda malzeme için etkilidir. Ancak, bazı metaller ve alaşımlar için, deşarj parametreleri tarafından yönetilen işleme sıcaklığı çok yüksektir ve plazma reaktivitesinden bağımsız olarak kontrol edilemez. Doğru akım deşarj, termiyonik destekli doğru akım triyot düzenlemeleri, plazma implantasyonu, elektron siklotron rezonans sistemleri ve termiyonik ark deşarjları. (Czerwec et al., 2000). Yeni aktif ekran plazma nitrürleme (ASPN) tekniğinin, geleneksel DC(doğru akım) plazma nitrürleme teknolojisiyle aynı nitrürleme etkilerini elde etmek için düşük alaşımlı çelikler, paslanmaz çelikler, takım çelikleri ve diğer çelikler üzerinde kullanılabileceğini göstermiştir. Önemli olarak, ASPN tekniği, oksitlenmiş yüzeye sahip çelik ve geleneksel bir DC (doğru akım) plazma sistemiyle elde edilemeyen polimerik malzemeler gibi elektriksel olmayan iletken malzemelerin işlenmesine olanak sağlar. Bu genel bakışta sunulan deneysel sonuçlar, püskürtme ve biriktirmenin ASPN'deki azot kütle transferinde önemli roller oynadığını daha da göstermektedir. İstenilen metalurjik tepkiyi elde etmek için, aktif ekran plazma işleme uygulamalarında aktif ekran malzemeleri ve bileşene uygulanan önyargı miktarı dikkate alınmalıdır. İşlem görecektek bileşenler yüzen bir potansiyelle yerleştirilirse, ekran ile bileşen yüzeyi arasındaki mesafe de dikkate alınmalıdır (Li, 2010). Düşük basınçlı, yüksek

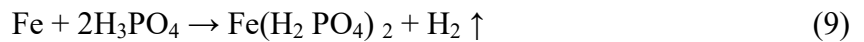
yoğunluklu plazma destekli nitrürleme işlemleri, demirli ve demirsiz malzemelerin aşınma, sertlik ve yorulma direncini iyileştirmek için metalurjik yüzey modifikasyonu için geliştirilmiştir. Bu amaçla, plazma üretimi çoğunlukla nispeten yüksek basınçta (100–1000 Pa) DC kızdırma deşarjları ile sağlanır ve bu teknolojiyle ilişkili temel sınırlamalar vardır. Bununla birlikte, titanyum, alüminyum ve alaşımları gibi umut vadeden demirsiz malzemelerin plazma nitrülenmesi için daha fazla esneklik ve kontrol gereklidir. Bu gereksinimler, termiyonik destekli DC triyot düzenlemeleri (TAT), plazma daldırma iyon implantasyonu (PIII) veya plazma kaynak iyon implantasyonu (PSII), elektron siklotron rezonans (ECR) sistemleri ve termiyonik ark deşarjları (TAD) gibi daha düşük basınçlarda çalışan geliştirilmiş veya yoğunlaştırılmış plazma nitrürleme işlemleriyle karşılanmaktadır (Czerwiec et al., 1998).

1.3.2 Çeliklere Uygulanan Kaplama Yöntemleri

• Fosfat Kaplama Yöntemi

Fosfatlama, demirli ve demir dışı metallerin yüzey işlemi ve sonlandırılması için en yaygın kullanılan metal ön işlem prosesidir. Ekonomikliği, çalışma hızı ve mükemmel korozyon direnci, aşınma direnci, yapışma ve yağlama özellikleri sağlama yeteneği nedeniyle otomobil, proses, savunma sanayi ve cihaz endüstrilerinde önemli bir rol oynar. (Narayanan, 1994).

Fosfatlamanın kimyası tüm geleneksel fosfatlama çözeltileri, esasen banyoda bulunan metal iyonlarının serbest fosforik asit ve birincil fosfatlarını içeren, bir veya daha fazla alkali metal/ağır metal iyonunun seyreltik fosforik asit bazlı çözeltileridir. Fosfatlama çözeltisine bir çelik panel sokulduğunda, banyoda bulunan serbest fosforik asit tarafından substrat üzerinde bulunan mikro anotlarda demir çözünmesinin başlatıldığı bir topokimyasal reaksiyon meydana gelir. Hidrojen evrimi mikro katot bölgelerinde meydana gelir.



Çözünebilir birincil demir fosfatın oluşumu, çözeltideki serbest asit konsantrasyonunun eş zamanlı olarak tükenmesine yol açarak metal/çözelti arayüzünde pH'ın yükselmesine neden olur. pH'daki bu değişim, fosfatlama çözeltisinde bulunan ağır metal iyonlarının çözünür birincil fosfatları ile çözünmeyen üçüncül fosfatları arasındaki hidrolitik dengeyi değiştirir ve çözünmeyen ağır metal üçüncül fosfatlarının hızla dönüşmesine ve birikmesine neden olur. Bir çinko fosfatlama banyosunda bu dengeler şu şekilde gösterilebilir: Tiyoüre sabitleyici, sulu fosfatlama banyosu çözeltilerinin kararlılığını iyileştirir, inhibitör olarak sodyum lignosülfonat ısı transfer yüzeylerinde kabuk oluşturma eğilimini azaltır. Çamur formunun fiziksel yapısını değiştirir. Proses verimliliğini artırır. Metilaminoetoksi silan rehidratasyonu önler hidrofobik ve korozyon önleyici özellikler kazandırır. Heksametafosfat yüzey pürüzlülüğünü azaltır ve tüplerin duvar kalınlığının azalmasıyla emilim derecesini artırır (~%50 uzunluk).



Hidrolizi bastırmak ve mikrokatodik bölgelerde fosfatın etkili bir şekilde birikmesi için ve banyoyu stabil tutmak için belirli bir miktarda serbest fosforik asit mevcut olmalıdır. Birincil ila üçüncül fosfat dengelerindeki kaymayı etkileyen bir diğer faktör de banyonun sıcaklığıdır. Yüksek sıcaklıklar, üçüncül fosfatların daha kısa sürede kolayca çökmesini destekler. Bu nedenle, yüksek sıcaklıklarda çalışan banyolar için daha fazla miktarda fosforik asit gerekir. Buna karşılık, oda sıcaklığında çalıştırılan fosfatlama banyoları durumunda, sürekli çalışma sırasında asitliğin artma olasılığı daha olasıdır ve normalde kaplamayı oluşturan metalin karbonatının (çinko fosfatlama banyosunda $\text{Zn}(\text{CO}_3)_2$) eklenmesiyle nötralize edilir. Bu nedenle, çalışma sıcaklıklarına ve banyodaki bileşenlerin konsantrasyonlarına bağlı olarak, denge koşulunu korumak için serbest fosforik asit içeriği seçilmelidir. Fosforik asidin fazla miktarda kullanılması, kaplamanın oluşumunu geciktirdiği gibi, aşırı metal kaybına da yol açar (Narayanan, 2005). Çekirdekleştirici maddeler, yüzey aktivatörleri ve tane incelticiler ele alınmaktadır. Titanyum, ön durulamada bulunan metalin yarısından fazlasını içermez. Disodyum ortofosfat ve bir titanyum tuzunun aktive edici bileşimi; alkali sitrat ve alkali aminopolikarboksilik asit tuzlarından seçilen bir dengeleyici madde ve 100 ppm veya daha fazla konsantrasyonlarda alkali toprak metal katyonlarına sahip su. Çözeltinin

konsantrasyonu 15-100 g/l ve pH'ı 5-10'dur. Çelik yüzey, fosfat kaplama solüsyonuyla işlemiden önce oksalat kaplaması oluşturmak için oksalat solüsyonuyla işlemiden geçirilir. Fosfatlamadan önce çelik yüzeye çok ince bir çinko tabakası, 0,2-2 g/m², kaplanır. Çinko tabakası, aktif bir çelik yüzeyini açığa çıkararak çinko fosfatlama solüsyonunda hızla çözülür. Temizlikten sonra ve fosfatlamadan hemen önce metal yüzeylerin ani paslanmaya karşı korunması sağlanır. Son temizlik aşamasından sonra, pH'ı 7,5-11 olan az miktarda trietanolamin ve nitrilotriasetik tuz içeren suyla ön durulama kullanılır. Bu son durulamadaki trietanolaminin başka alkilolaminle değiştirilmesi yapılır (Bender et al., 1980).

Siyah rengi nedeniyle, fosfat kaplama lazer ısı işleminden önce bir ön işlem tabakası olarak da kullanılabilir, bu da lazer ısı işlemi sırasında ışık emiliminin verimliliğini de artırır (Li et al., 2004).

Fosfat kimyasal dönüşüm (PCC) teknolojisi, biyomedikal alanda metalik implantların yüzey performansını iyileştirmek için yeni bir yüzey modifikasyon yöntemi olarak tanıtılmıştır. Metal ön işleme için geleneksel olgun bir teknoloji olarak PCC, endüstride yaygın olarak kullanılmıştır. Düşük maliyet, kolay kullanım, hızlı kaplama oluşumu ve düzensiz yüzeylerin işlenmesi için kullanım gibi birçok avantajı nedeniyle biyomedikal metalik implantlara uygulanacak etkili bir araç olarak da araştırılmıştır. PCC kaplama, metalik alt yüzeye sadece korozyon koruması sağlamakla kalmaz, aynı zamanda farklı metalik cihazların biyoyumluluğunu ve osteokondüktivitesini de artırır (Liu et al., 2015).

Çinko fosfat kaplamalar, boyanın altındaki elektrik akımlarını azaltmak ve boya yapışmasını sağlamak için mikro gözenekli bir taban sağlamak üzere koruyucu bir bariyer oluşturmak için yeterince kalındır (2,2–11,6 g/m²) (Niu et al., 2006). Tablo 1'e göre, çok çeşitli fosfatlama bileşimleri mevcuttur.

Tablo 1. Çok bileşimli fosfatlama çeşitleri

NO:	Birim	H ₃ PO ₄	Na ₂ HPO ₄	Zn(NO ₃) ₂	ZnO	NaNO ₂ /NaNO ₃	NaF	NaClO ₃	Diğer
1	g/L	12.43	20.0	5.0		3/1.84	1.0		
2	g/L	27.2			6.8	4.9	1.2		Etanolamin
3	mol/L	0.065		0.102	0.029		0.04	0.028	Organik amid, Amonyak
4	g/L	17.5			3.2	0/2.5	1.7		Sodyum Molibden, tatrik asit
5	g/L	16.8			3.2	0-0.8	1.7		Tatrik Asit, SDS
6	g/L	Ayarlanmış PH	10.0	6.0		4.0/0	2.0		H ₃ PO ₄ ile pH 3.2'ye ayarlandı/Ca(NO ₃) ₂ ile veya Ca(NO ₃) ₂ olmadan.
7	g/L	11.3		12.5	2.2		2.3		H ₂ O ₂ veya alkil fosfat

Kaplama ayrıca AlPO₄, Zn, Zn₂Mg(PO₄)₂ veya MgO, Mg₃PO₄, MgF₂, Zn, ZnO içerebilir. Fosfatlama hem saf çeliklerde, hem alüminyum alaşımlarında hem de magnezyum alaşımlarında etkili bir şekilde gerçekleştirilebilir. Hopeite, toksik olmayan ve korozyon önleyici özellikleri nedeniyle krom dönüşüm kaplamasına alternatif bir kaplama malzemesi olarak kullanılabilir. İyi kristalleşmiş bir hopeite tabakası çinko fosfat çözeltisinde oluşturulabilir, burada ZnO, Zn(NO₃)₂ gibi kaplama maddeleri normalde kullanılır. Tablo 1’de görülebileceği gibi, hopeite tabakasını oluşturmak için çok çeşitli çinko konsantrasyonları kullanılabilir (Phuong et al., 2013).

• İnce Film Kaplama Yöntemleri

İki önde gelen ateşli silah üreticisinin iki namlusu arasında cerakote firması tarafından yapılan bir korozyon testidir. Şekil 8'in altındaki namlu 416 paslanmaz çelik namludur ve fabrikada CVA® tarafından siyah nitrür pas önleme ile işlenmiştir, üst namlu ise yumuşak çeliktir ve fabrikada Traditions™ Performance Firearms tarafından Cerakote seramik kaplama koruması ile tamamlanmıştır. Her iki namlu da ASTM B117 test standartlarına göre %5 tuz konsantrasyonu ile 35°C'ye ayarlanmış bir tuz haznesinin içine yerleştirilmiştir (*Cerakote*).



Şekil 8. İki farklı namlu malzemesine uygulanan korozyon testi sonucu (*Cerakote*)

Kaplama yöntemleri, farklı alanlardaki muazzam uygulama ve ihtiyaç çeşitliliği nedeniyle çok çeşitlidir. Bu işlemler, malzeme mikro yapısı, etkinlik, uygunluk ve dayanıklılık şeklinde birçok farklı sonuca yol açarken birçok farklı çevrimiçi/çevrimdışı parametreden oluşur. Bununla birlikte, kaplama yöntemleri, korozyon ve aşınma korumasının en önemlileri olduğu istenen işlevselliğe göre belirli uygulamalarda faydalıdır (Willmott, 2004). Malzemelerin mekanik özellikleri korozyon süreciyle azalırken, korozyon ürünleri farklı uygulamalarda daha aşırı koroziv bir ortama veya zararlı yan etkilere neden olabilecek farklı formlarda salınır (Klaassen & Amdur, 2013). Kaplama malzemeleri, istenen uygulama için artılarının ve eksilerinin ortaya çıkarılması için araştırılması gereken farklı biriktirme mekanizmalarına sahiptir. Birçok işlem mevcuttur, ancak fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), mikro ark oksidasyonu (MAO), sol-jel, termal sprey ve polimer kaplamalar dahil olmak üzere

yalnızca birkaçı en etkili ve uygulanabilir olanlar arasındadır. Bu yöntemlerin her biri farklı biriktirme yöntemleri, farklı malzemeler, ikinci fazlar, farklı kalınlıklar ve yoğunluklar sundukları için farklı uygulamalar için uygundur. Sonuç olarak, mekanik kararlılık, korozyon özellikleri, biyouyumluluk (biyomedikal uygulamalar için) ve belirli bir kaplama türü için malzeme davranışının iyileştirilmesi dikkatlice değerlendirilmelidir (Thakare et al., 2007). Kaplama işlemleri yukarıda belirtilen faydaları sağlamak için uygulansa da güvenilirliklerini azaltan dezavantajlara sahiptirler. Bu olumsuz etkilerden olumsuz termal etkiler (örneğin, bozulma, çatlak, delaminasyon, vb.), gevşek atmosferik korumanın yıkıcı etkileri (örneğin, inklüzyonların ve kontaminasyonların alt tabakaya nüfuz etmesi) ve kaplama malzemelerinin özellikleri (örneğin, erime noktası, farklı folyo/toz/çubuk formlarında bulunabilirlik, biyouyumluluk, vb.) dikkate alınması gereken en önemli olanlardır. Malzeme seçimi, tüm koruma amaçlarını sağladıkları için başarılı bir kaplamaya sahip olmada anahtar parametredir. Metaller, seramikler ve polimerler dahil olmak üzere birçok farklı malzeme, koruyucu bir tabaka oluşturmak için kullanılabilir (DeMasi-Marcin & Gupta, 1994).

Malzeme bilimi, taş devrinden beri tarihi ve kültürel dönemleri tanımlamıştır. Belki de diğer tüm disiplinlerden daha fazla, teknolojik devrimlerin temeli olmuştur: 19. yüzyıldaki sanayi devrimi, mevcut çelik miktarının, kalitesinin ve farklı türlerinin artması olmadan imkânsız olurdu. Daha yakın zamanlarda, dijital ve telekomünikasyon devrimleri, bir yandan hem toplu halde hem de ince filmler halinde son derece saf malzemeler üretme, diğer yandan da mikron ölçeğinde yapıları manipüle etme ve üretme yeteneğine dayanıyordu. Modern yoğun madde fiziğindeki temel hedeflerden biri, özellikle ince filmler biçiminde, tüm teknolojik uygulama yelpazesi için yeni malzemeler yaratmaktır (Dehghanghadikolaei et al., 2018). Korozi ortamlarda metal bileşenlerin korunması sol-jel kaplamaların en umut verici uygulamalarından biridir. SiO₂, SiO₂-TiO₂ ve ZrO₂ kaplamaların yumuşak çelik, sade karbon ve paslanmaz çeliğin asit saldırısına karşı direncini artırmada etkili olduğu kanıtlanmıştır. Kaplamalar, zorlu ortamlarda termal maruziyete direnmenin yanı sıra, yüksek sıcaklıktaki oksidasyonu azaltmada da etkili olabilir (Di Maggio et al., 1997). Metal alt tabakalar üzerindeki seramik kaplamalar, özellikle termal ve aşınma direnci açısından pratik öneme sahiptir. Termal püskürtme yöntemleriyle üretilen bu

kaplamalar, katılaşmış sıçramalar arasında zayıf arayüzler ve boşluklar ile oldukça kusurlu lamine mikro yapılara sahip olma eğilimindedir. Kaplamaların özelliklerini esas olarak karakterize eden, bu ayrı ayrı zayıf arayüz yapısıdır. Kusurlar kaplama yapısının mukavemetini düşürebilirken, uyumsuzluk gerginliklerini de barındırabilir ve termal yalıtımı iyileştirebilir. Kaplamalar, termal, mekanik veya iç gerilimler altında deformasyon ve kırılmadan kaynaklanan arızaya maruz kalır ve alt tabakanın deformasyon özellikleri arıza moduna katkıda bulunabilir (Sampath, 2009).

İnce filmlerin ve kaplamaların deformasyon davranışının anlaşılması, mikroelettronik ve mekanik için yeni malzemeler geliştirmek ve iyileştirmek için esastır. Ancak, alt mikron kalınlığındaki filmlerin mekanik özelliklerini geleneksel test yöntemleriyle değerlendirmek imkansızdır. Nanoindentasyon tekniğindeki son gelişmeler, mekanik özelliklerin bir nanometre mertebesinde araştırılmasını mümkün kılmıştır ve bu teknikle ince filmlerin deformasyon direncinin doğrudan ölçümü mümkündür. İnce filmlerin girinti kaynaklı deformasyon mekanizmasını araştırmak için bir film-alt tabaka kompozitindeki karmaşık faktörlerle ilgili birçok sorunun üstesinden gelinmesi gerekir (Ohmura & Matsuoka, 2003).

Birçok yapı artık istenen özellikleri ve işlevselliği sağlayacak şekilde bir araya getirilen veya inşa edilen malzemelerin bir kombinasyonunu gerektirir. Bu yapılar, çeşitli malzemelerin transistör ve kapasitör üretmek için birleştirildiği mikroelettronik gibi alanlarda yaygın olmuştur, ancak bu incelemenin odak noktası bu değildir. Cam/seramik, cam/metal, cam-seramik/metal, seramik/metal, seramik/seramik ve metal/metal yapılarıyla karşılaştığımız daha geniş ölçeğe yoğunlaşılır. Cam veya seramik zaten malzemenin yoğun bir tabakası olabilir veya toz halinde olabilir (Calata et al., 2001).

1.4. Literatür Özeti

K. Maruşić ve ark. alaşımsız karbon çeliği yüzeyine, mekanik özellikleri ile korozyon ve aşınma direncini artırmak amacıyla tenifer prosesi esas alınarak tuz banyosunda nitrokarbürleme ve isteğe bağlı olarak sonradan oksidasyon uygulamışlardır. Oluşturulan nitrokarbürlenmiş tabakalar; bileşik tabaka kalınlığı, nitrokarbürleme derinliği

ve yüzey sertliği gibi temel özellikler açısından standartlara uygun şekilde karakterize etmişlerdir. Yüzey modifikasyonunun kalitesi; EDX ve X-ışını difraksiyonu ile kimyasal bileşim analizleri, mikro yapı incelemeleri, yüzey pürüzlülüğü ve topografya analizleri ile detaylandırılmıştır. Korozyon direnci ise %5 NaCl içeren sulu çözeltide, elektrokimyasal polarizasyon yöntemleri ve empedans spektroskopisi kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, işlem görmüş ve işlem görmemiş numunelerin yanı sıra östenitik paslanmaz çeliklerle karşılaştırmalı olarak sunmuşlardır (Marušić et al., 2006).

A286 paslanmaz çeliğinin yüzey özelliklerini iyileştirmeye yönelik Alphonsa ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, malzemenin sertliğini artırırken korozyon direncinden ödün verilmemesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, 350 °C ile 500 °C sıcaklık aralığında ve 4 ile 8 saat süreyle plazma nitrokarbürleme işlemi uygulanmıştır. İşlem sırasında %78 azot, %20 hidrojen ve %2 asetilen gaz karışımı kullanılmış; plazma, 30 kHz frekansa sahip darbeli doğru akım güç kaynağı ile oluşturulmuştur. Uygulama sonucunda, yüzeyde azot ve karbon içeren bir üst tabaka ile sadece karbon içeren bir alt tabakadan oluşan çift katmanlı bir yapı meydana gelmiştir. İşlem görmüş numunelerin mikrosertlik değerleri, özellikle 400 °C ve 450 °C sıcaklıklarında, işlem görmemiş A286 çeliğine göre sırasıyla iki ve üç kat artış göstermiştir. Ayrıca %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde Alphonsa ve arkadaşları tarafından yapılan elektrokimyasal testlerde, 400 °C'de 4 saat süreyle işlem görmüş numunelerin daha yüksek çukurcuk korozyon direnci sergilediği belirlenmiştir. Bu olumlu sonuçlar, yüzeyde oluşan karbon ve azotun katı çözelti şeklinde bulunmasına bağlanmaktadır (Alphonsa et al., 2015).

Jackuet ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, biri alaşımsız (DC 04) diğeri alaşımlı (15CrMoV6) olmak üzere iki farklı çelik türü üzerinde QPQ prosesi ile tuz banyosunda nitrasyon işlemi uygulanmıştır. Her iki çelik türü de 2, 3 ve 8 saatlik farklı nitrasyon sürelerine maruz bırakılmış; son oksidasyon aşamasının süresi ise sabit tutulmuştur. Mikrosertlik ölçümleri, alaşım elementlerinin hem sertlik profili hem de yüzey sertliği üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Her iki çelik için de en yüksek yüzey sertliği değeri, 2 saatlik işlem süresinde elde edilmiştir. XRD analizleri sonucunda, bileşik tabakaların üzerinde Fe₃O₄ fazının bulunduğu ve bu tabakaların ε ve γ' nitritlerinden oluştuğu belirlenmiştir. SEM ile yapılan kesit görüntülemeleri, bileşik tabaka

büyümesinin parabolik bir kinetiğe sahip olduğunu ortaya koymuştur. Tabaka kalınlığı ve yapısı, EDS analizleriyle de doğrulanmıştır. Nitrasyon süresi arttıkça, γ' nitrit içeriği azalırken ε nitriti içeriği artış göstermektedir. Uzun süreli işlemlerde her iki çelik türünün yüzeyinde ağırlıklı olarak ε nitriti ve Fe_3O_4 fazı gözlemlenmiştir. Bu durum, uzun nitrasyon işlemlerinde bileşik tabakanın yapısı açısından ek alaşım elementlerinin gerekli olmadığını göstermektedir (Jacquet et al., 2011).

Li ve arkadaşları tarafında yapılan çalışmada, 17-4PH paslanmaz çeliğinin yüzey mikroyapısı üzerine Quench–Polish–Quench (QPQ) kompleks tuz banyosu ısıtılmasının etkisi araştırılmıştır. Nitrokarbürleme işlemi sonrasında numunenin en dış yüzeyinde parlak bir bileşik bölge ($\varepsilon\text{-Fe}_2(\text{N,C})$) oluşmuş, bu tabakanın altında hafif dağlanmış bir yapıdan oluşan ikinci bölge ($\text{Fe}_3\text{N}/\text{Fe}_4\text{N}/\text{CrN}/\alpha\text{-Fe}$ karışımı) yer almıştır. Post-oksidasyon işlemi uygulanan numunelerde ise yüzeyde ince bir oksit tabakası ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{FeO}$) olduğu, bu tabakanın altında Cr_2N ve $\varepsilon\text{-Fe}_2(\text{N,C})$ karışımından oluşan bir bölge ile en içte $\text{CrN}/\alpha\text{-Fe}$ içeren bir yapı bulunduğu tespit edilmiştir. Post-oksidasyon uygulanmış numunenin en dış yüzeyinde belirgin şekilde yüksek miktarda oksijen tespit edilmiştir. Oksijenin yüzeye yakın bölgelerdeki “itici etkisi” azotun derinliklerde maksimum konsantrasyona ulaşmasına neden olurken, karbonun en yüksek seviyeye ulaşması ise azotun itici etkisine bağlanmıştır. Hem nitrokarbürleme hem de post-oksidasyon işlemi görmüş numunelerde yüzeyde yüksek mikrosertlik değerleri ($>1200 \text{ HV0.1}$) elde edilmiş, bu değer tabaka ile çekirdek arayüzünde ani bir düşüş göstererek ana malzeme sertliğine ulaşmıştır (Li et al., 2008).

M. Fattah ve ark., AISI 4140 düşük alaşımlı çeliğin yüzey korozyon direncini artırmak amacıyla uygulanan ferritik ve östenitik plazma nitrasyon ile plazma nitrokarbürleme işlemleri karşılaştırılmıştır. Plazma nitrasyon için kullanılan gaz karışımı %85 N_2 – %15 H_2 , plazma nitrokarbürleme için ise %85 N_2 – %12 H_2 – %3 CO_2 olarak belirlenmiştir. Her iki işlem de 5 saat süreyle gerçekleştirilmiş olup, ferritik işlem 570°C 'de, östenitik işlem ise 620°C 'de uygulanmıştır. İşlem gören yüzeyler; optik mikroskopi, X-ışını difraksiyonu (XRD) ve %3,5 NaCl çözeltisinde yapılan potansiyodinamik polarizasyon testleri ile incelenmiştir. XRD analiz sonuçları, işlem sıcaklığının 570°C 'den 620°C 'ye çıkarılmasıyla her iki işlemde de ε fazının azaldığını, γ'

fazının ise arttığını göstermiştir. Nitrokarbürleme işlemi, nitrasyon işlemine kıyasla daha fazla miktarda ϵ fazı oluşumuna yol açmıştır. En yüksek ϵ fazı oranı, 570 °C’de ferritik nitrokarbürleme uygulanmış numunede gözlemlenmiştir. En kalın tabaka ise 620 °C’de nitrasyon uygulanmış numunede elde edilmiştir. Potensiyodinamik polarizasyon sonuçları, 570 °C’de uygulanan plazma nitrasyon ve nitrokarbürleme işlemlerinin ardından, yüzeyde oluşan asal nitrür ve karbonitrür fazları sayesinde işlem görmemiş numuneye kıyasla korozyon potansiyelinin arttığını göstermiştir. Ancak işlem sıcaklığı 620 °C’ye çıkarıldığında, ϵ fazının azalması ve daha gözenekli bir bileşik tabaka oluşması nedeniyle korozyon potansiyelinde düşüş gözlemlenmiştir (Hoppe, 1998).

Heydarzadeh ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, AISI 4140 çeliğinin farklı sıcaklıklarda plazma nitrokarbürleme işlemi sonrası aşınma davranışı incelenmiştir. Plazma nitrokarbürleme işlemi 530 °C, 570 °C ve 630 °C sıcaklıklarında, %80 N₂, %17 H₂ ve %3 CO₂ gaz karışımı atmosferinde 5 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. İşlem görmüş numuneler; X-ışını difraksiyonu (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), yüzey pürüzlülüğü ve mikrosertlik yöntemleriyle karakterize edilmiştir.

Aşınma davranışı ise pin-on-disk yöntemiyle değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, tüm sıcaklıklarda yüzeyde ϵ ve γ' fazlarından oluşan bir bileşik tabaka oluştuğunu göstermiştir. İşlem sıcaklığı 530 °C’den 570 °C’ye çıkarıldığında ϵ fazı miktarı artarken, 630 °C’de bu fazın miktarında azalma gözlemlenmiştir. Özellikle 570 °C’de uygulanan nitrokarbürleme işlemi, en yüksek yüzey sertliği, en yüksek aşınma direnci ve en düşük sürtünme katsayısı değerlerini vermiştir (Heydarzadeh Sohi et al., 2010).

Kusmic ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, silah sistemlerinin sürgü mekanizması üretiminde kullanılan 42CrMo4 çeliğinin plazma nitrürleme sonrası elde ettiği korozyon direncini, diğer yüzey işlem yöntemleriyle karşılaştırmalı olarak incelemektedir. Savunma sanayiinde ve diğer sanayi dallarında malzeme performansına yönelik artan beklentiler; özellikle aşınma direnci, yüzey sertliği, aşınma davranışı, korozyon dayanımı ve optik gereksinimler gibi yüzey özelliklerini iyileştirmeye yönelik yeni yüzey işlem teknolojilerinin geliştirilmesini zorunlu hale getirmiştir. Bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmada, plazma nitrürleme uygulanmış 42CrMo4 çeliği numuneler;

alkalin siyah oksitleme, manganez fosfatlama ve Arcor prosesi ile işlenmiş numunelerle karşılaştırılmıştır. Plazma nitrüleme işlemi, kontrollü parametrelerle tanımlı nitrür tabakalarının elde edilmesini sağlayacak şekilde yürütülmüştür. Tüm yüzey işlem yöntemleri, farklı numunelere uygulanmış; ardından metalografik analizler gerçekleştirilmiş ve sertlik ile mikrosertlik değerleri ölçülmüştür. Korozyon dayanımı karşılaştırması, yoğunlaşma odasında yapılan NSS (tuz spreyi) testleri ile gerçekleştirilmiş ve görsel olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, plazma nitrüleme yöntemi ile yüzey işlem görmüş numunelerin, diğer yöntemlere kıyasla korozyon ilerleme hızında belirgin farklılıklar gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, uygulanan farklı plazma nitrüleme koşullarına bağlı olarak aynı işlem görmüş numuneler arasında da korozyon direnci açısından farklılıklar gözlemlenmiştir. Korozyon direncine ilişkin değerlendirmeler, yüzey tabakasının karakteristik özellikleriyle desteklenmiştir (Kusmic et al., 2016).

Literatürde sunulan bu çalışmalar, nitrokarbürizasyon ve farklı yüzey modifikasyonlarının malzemelerin mekanik ve tribolojik özelliklerini geliştirmedeki önemini açıkça ortaya koymaktadır. Ancak, özellikle 42CrMo4 gibi yüksek mukavemetli ıslah çeliklerinde, tek başına uygulanan yüzey işlemlerinin sınırlı performans sağladığı görülmektedir. Bu bağlamda, bu tez çalışmasının temel amacı; nitrokarbürizasyon işleminin fosfatlama ve ince film seramik kaplama (Cerakote) gibi ek yüzey modifikasyonları ile kombine edilerek uygulanmasının malzemenin aşınma, korozyon ve yüzey özelliklerine etkilerini sistematik olarak incelemektir. Böylece, savunma sanayiinde yüksek dayanım ve uzun ömür gerektiren uygulamalar için daha optimize edilmiş yüzey işlem stratejileri geliştirilmesi hedeflenmektedir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Yapılan bu çalışmada uygun şekilde eş olarak parçalara ayrılan 42CrMo4 çeliğinin numuneleri taşlama tezgahında taşlanarak yüzey hazırlığı yapılmıştır. Çelik parça numuneleri lazer markalama tezgahından numaralandırılarak ayırt edilmiştir. Numaralandırılan parçaların yüzey pürüzlülükleri taşlama sonrası ölçülmüştür. Numuneler polisaj işlemi olan vibrasyonla çapak alma yöntemiyle polisaj işlemi uygulanmıştır. Çapak alma işlemi uygulanan parçaların yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Çelik yüzeyleri hazırlanan numuneler polisaj işlemi olan kumlama makinasında 2800 devirde 8 dakika olacak şekilde nitrokarbürizasyon yüzey işlemi öncesi otomasyon kumlama makinesinde kumlanmıştır. Kumlanan parçaların yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Kumlanan çelik parçalar nitrokarbürizasyon termokimyasal yüzey işlemi uygulanmıştır. Nitrokarbürizasyon yüzey işlemi öncesi parçalara yararlı difüzyonun gerçekleşmesi için ve parçaların termal şoka maruz kalmaması için ön ısıtma fırınında koruyucu atmosfersiz ortamda 30 dk ön ısıtma işlemi uygulanmıştır. Ön ısıtma işlemi tamamlanan parçalar tuz ortamında 560 °C’de 60 dk olacak şekilde nitrokarbürizasyon termokimyasal yüzey işlemi uygulanmıştır. Nitrokarbürizasyon işlemi tamamlanan parçaların yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Fosfatlama işlemi gerçekleştirilecek numune parçaların fosfatlama işlemi öncesi yüzey temizliği için otomasyon S70 çelik bilye kumlama sisteminde 2800 devirde 5 dk kumlanmıştır. Kumlama sonrası yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Ön işlemleri tamamlanan parçaların 94°C ‘de 20 dk olacak şekilde fosfatlama yüzey işlemi gerçekleştirilmiştir. Fosfatlama yüzey işlemi öncesi parçalara 80°C de 35 dakika sıcak yağ alma sıvı banyosunda temizlik işlemi gerçekleştirilmiştir. Fosfatlama öncesi numune parçalara aynı zamanda 40 °C de aktivasyon sıvı banyosunda daldırma yöntemiyle ön işlem gerçekleştirilmiştir. Fosfat yüzeyi kaplanan çelik parçalar yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür ve ince film seramik kaplama olan boyama işlemi gerçekleştirilmiştir. Yüzey işlemleri tamamlanan parçalar metalografik incelemeleri ve analizleri yapılmıştır.

2.1. Malzeme ve Deney Materyalleri

Deney numuneleri olarak kullanılacak olan 42CrMo4 ıslah çeliği, ısıtılı işlemleri olarak yurt içi firması olan Asil Çelik'ten alınmıştır. Numune parçası 42CrMo4 malzeme cinsi kütük ham mamul olacak şekilde 12 eş parçaya hassas kesme cihazında bölünmüştür. Şekil 9'da 12 eş parçaya bölünmüş hali gösterilmiştir. Numune spektral analiz testi sonucu Tablo 2'de olması gereken EN 10083 standart değer aralığı belirtilmiştir.

Tablo 2. EN10083 standart aralığına göre 42CrMo4 çelik malzemesinin elementel aralığı (%)

	C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S
EN 10083 Standart Aralığı	0,38- 0,45	0,10- 0,40	0,60- 0,90	0,90- 1,20	1,15- 0,30	≤ 0,025	≤ 0,035

Numune 12 eş parçaya ölçüleri 24x26x7,5 mm olacak şekilde Şekil 9'daki gibi kesilmiştir.



Şekil 9. Ham mamulden kesilen numaralandırılmış deney test parçaları

Tablo 3' de 42CrMo4 çeliğinden kesilen on iki eş parçaya uygulanan yüzey işlem çeşitleri belirtilmiştir.

Tablo 3. Numunelere göre uygulanan yüzey işlemler

Yüzey İşlem Uygulanmamış	Nitrokarbürizasyon	Nitrokarbürizasyon + Fosfatlama	Nitrokarbürizasyon+ Fosfatlama+İnce Film Seramik Kaplama(Cerakote)
N1	N4	N7	N10
N2	N5	N8	N11
N3	N6	N9	N12

2.2. Numune Hazırlama Süreçleri

Bu tez çalışması kapsamında 42CrMo4 çeliği Birinci Otomotiv firmasından sıcak dövme işlemi ve ıslah ısıtma işlemi görmüş ham mamul olarak tedarik edilmiştir. Tedarik edilen ham mamulden boyutları aynı olacak şekilde 12 adet numune hazırlanmıştır. Uygulanacak olan özel prosesler öncesi numune yüzeyleri taşlama işlemine tabi tutulmuştur. Taşlama tezgâhı çalışma parametreleri;

- Çalışma tablası: 990 × 290 mm (işleme alanı 630 × 200 mm)
- Taş çapı: 300 mm
- Mil hızı: ~900 rpm
- Boy enine ilerleme: 300 mm
- Kesintisiz uzunlamasına ilerleme: 2 m/dk
- Dikey besleme: 0,01 mm
- Ana motor: 4 kW
- Makine ölçüleri: 2340 × 1788 × 2030 mm
- Ağırlık: ~2400 kg
- Taş Tipi: 60 Grade Silisyum karbür

Taşlama işlemine ait görsel Şekil 10'da verilmiştir. Taşlanmış numuneler lazer markalama işlemi (Şekil 11) ile numaralandırılmıştır.



Şekil 10. Taşlama tezgâhı



Şekil 11. Lazer markalama cihazı görseli

2.2.1. Polisaj ve Kumlama Yüzey İşlemleri

Taşlanmış numuneler sonrasında polisaj işlemi için vibrasyonlu çapak alma işlemi uygulanmıştır. Çapak alma prosesinde Kromaş marka SM-500 model makine kullanılmıştır. Kimyasal olarak Rösler Compound FC-120 kimyasalı kullanılmıştır. Parçalar 10 dk boyunca kimyasal ve su vanası açık şekilde vibrasyon işlemine tabi tutulmuştur. Numunelerin yüzeyleri hazır hale geldikten sonra yüzeyin homojen bir hale gelmesi için Ervin Amasteel S70L çelik bilye 0125-425 mikrometre boyutunda ve kum sertliği 54-61 HRC olan otomasyon kumlama sisteminde kumlanmıştır. Kumlama işlemi 2800 devir/dk da 8 dakika olacak şekilde uygulanmıştır. Şekil 12’ de vibrasyonlu çapak alma cihazı görseli verilmiştir. Kumlama makinası Endümak marka otomasyon sistemli bir kumlama makinesidir. Şekil 13’de ise kumlama cihazı gösterilmiştir.



Şekil 12. Vibrasyonlu çapak alma



Şekil 13. Otomasyon kumlama makinesi

2.2.2. Tuz Nitrokarbürizasyon Isıl İşlemi

Kumlanmış deney numuneleri nitrokarbürizasyon termokimyasal ısıtma işlemi uygulanmadan önce aparata dizilmiştir. Şekil 14’de nitrokarbürizasyon hattındaki aşamalar gösterilmiştir.



Şekil 14. Nitrokarbürizasyon prosesinin şematik gösterimi

Tablo 4’de nitrokarbürizasyon hattında kullanılan kimyasal ve içerikleri gösterilmiştir.

Tablo 4. Nitrokarbürizasyon hattında kullanılan kimyasalların ticari adı ve içeriği

Sıcak Yağ Alma Banyosu		Nitrokarbürizasyon Banyosu	
Kimyasalın Ticari Adı	Kimyasalın İçeriği	Kimyasalın Ticari Adı	Kimyasalın İçeriği
Cleaner 504	Sodyum Hidroksit-Sodyum Karbonat-Disodyum Metasilikat-Fosfatlar	CR-TFN	Lityum Karbonat/Potasyum Siyanat
		REG-1	Potasyum Siyanat
		TFLK	Lityum Karbonat/Potasyum Karbonat
		NSK	Sodyum Siyanür/Potasyum Siyanür

Aparata dizilen parçalar ön yıkama ve temizleme işlemleri için alkali yağ alma kimyasal banyo çözeltisinde 50°C 5 dk daldırma yöntemi ile bekletilmiştir. Numune parçalara yağ alma işlemi sonrası saf su tanklarında daldırma yöntemiyle durulama ve temizleme işlemi uygulanmıştır. Yıkama ve temizleme işlemi gerçekleştirilen numune parçalara termal şoka uğramaması için ve nitrokarbürizasyon ısıl işleminde yararlı difüzyonun gerçekleşebilmesi için ve parçaların kurutulması için Treks TS0 600 model nitrokarbürizasyon fırınında 450°C 'de 30 dakika kuru atmosfer sirkülasyonlu ön ısıtma ısıl işlem fırınında, ısıl işlem uygulanmıştır. Ön ısıtma işlemi tamamlanan numune parçalar Treks T0 500 model nitrokarbürizasyon tuz kimyasal banyosunda 560 °C 'de 60 dakika daldırma yöntemiyle bekletilmiştir. Kimyasal banyoların analizleri siyanit miktarı %3,2-4,6 arasında, siyanat miktarı %35,6-38,2 aralığında olacak şekilde uygulanmıştır. Nitrokarbürizasyon işlemi sonrası parçalar temizliği için saf su dolu su tanklarına daldırma yöntemiyle daldırılmış ve sıcak su tankında 60 dakika bekletilmiştir. Sıcak su tankında bekletilen numuneler Treks TS0 600 model ısıl işlem fırınında 450 °C'de 1 dakika bekletilerek kurulama işlemi uygulanmıştır. Nitrokarbürizasyon termokimyasal ısıl işlem hattı Şekil 15'de gösterilmiştir.



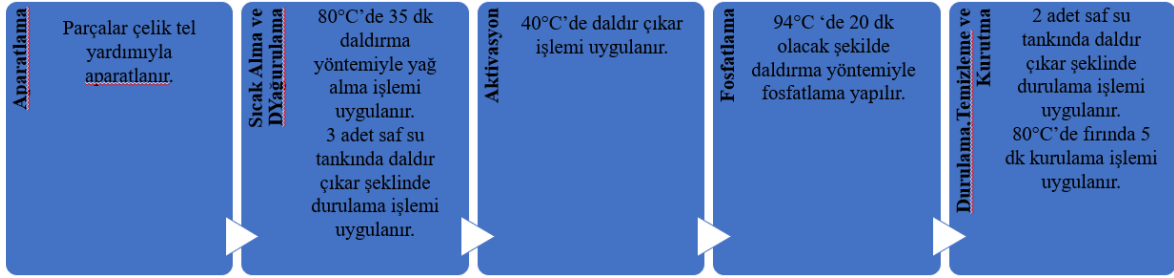
Şekil 15. Nitrokarbürizasyon termokimyasal ısıtım hattı

2.2.3. Fosfat Kaplama Yüzey İşlemi

Nitrokarbürizasyon ısıtım işlemi uygulanan numune parçalardan fosfatlama işlemi uygulanacak olan numuneler ayırt edilerek fosfatlama yüzey işlemi öncesi S70 çelik bilya otomasyon kumlama tezgahında 2800 devirde 5 dakika olacak şekilde kumlanmıştır. Şekil 16'da fosfat kaplama yüzey hattının işlem adımları gösterilmiştir. Tablo 5'de fosfat kaplama işlemi için kullanılan kimyasallara ait bilgiler verilmiştir.

Tablo 5. Fosfatlama yüzey işlemi hattında kullanılan kimyasalların ticari adı ve kimyasal içeriği

Sıcak Yağ Alma Banyosu		Aktivasyon Banyosu		Fosfat Banyosu	
Kimyasalın Ticari Adı	Kimyasalın İçeriği	Kimyasalın Ticari Adı	Kimyasalın İçeriği	Kimyasalın Ticari Adı	Kimyasalın İçeriği
Bonderite C-AK 2260 IT	Sodyum Hidroksit	Bonderite M-AC 5026	Tetrapotasyum Pirofosfat	Bonderite M-MN 117-M1	Manganez bis(Dihidrojen Fosfat) %25
			Mangan Hidrojen Fosfat		Fosforik Asit
			Sodyum Karbonat		Manganez Nitrat
					Nikel Dinitrat
				Bonderite M-AD MN-4	Manganez Karbonat



Şekil 16. Fosfat kaplama proses işleminin şematik gösterimi

Kumlama işlemi tamamlanan numune parçalar Şekil 17'de görseli bulunan fosfat kaplama yüzey işlem hattında fosfatlama yüzey işlemine tabi tutulmuştur. Fosfatlama yüzey işlemi öncesi numune parçalar sıcak yağ alma ve temizleme sıvı banyosu tankında 80°C'de 35 dk daldırma yöntemiyle bekletilmiştir. Yüzey temizliği yapılan parçalara aktivasyon sıvı banyosu tankında 40°C'de daldır çıkar işlemi yapılmıştır. Numune parçalar fosfatlama yüzey işleminde 94°C 'de 20 dk olacak şekilde daldırma yöntemiyle fosfatlama yüzey işlemi uygulanmıştır. Fosfatlama banyosunun analiz değerleri toplam asit miktarı 0,9 mol/L, serbest asit miktarı 0,18 mol/L olacak şekilde uygulanmıştır.



Şekil 17. Fosfat kaplama yüzey işlem hattı

2.2.4. İnce Film Seramik Boya Kaplaması İşlemi

Fosfatlama yüzey işlemi tamamlanan numuneler AK-MAKİNA Kuru Tip Filtreli Yaş Boya Kabini, markalı boya kabininde ince film seramik kaplanma yöntemi olan cerakote boyama işlemine tabi tutulur. Bu işlemde parçalar askı aparatına dizilir ve hava ile püskürtme tabancası yardımıyla siyah pigment içerikli boyayla boyanmıştır. Hava basıncı 30 PSI ve 0,2 mega pascal olacak şekilde uygulanmıştır. İnce film seramik kaplama yönteminin yüzeye tutunması ve sertleşmesi için Boysan Makine Kutu Tipi Kırılma Fırın'ında 150 °C sıcaklıkta ve 60 dakika sürede fırınlanmıştır. Boyama işlemi uygulanan boya kabini ve sistemi Şekil 18'de gösterilmiştir. Boyama işlemi tamamlanan parçanın fırınlanması için kullanılan fırın Şekil 19'da gösterilmiştir. Tablo 6 'da İnce film seramik kaplama yöntemlerinden biri olan cerakote boyanın içeriği verilmiştir.

Tablo 6. İnce film seramik kaplama kimyasalının adı ve içeriği

Cerakote Kimyasalları	
Kimyasalın Ticari Adı	Kimyasalın İçeriği
H - SERİSİ	p-klorobenzotriflurid
	Performans Seramik
	Seramik esaslı pigmentler ve katkı maddeleri
	Krom(III) Oksit
	2-Bütanol
	Siyah karbon



Şekil 18. İnce film seramik kaplama kabini



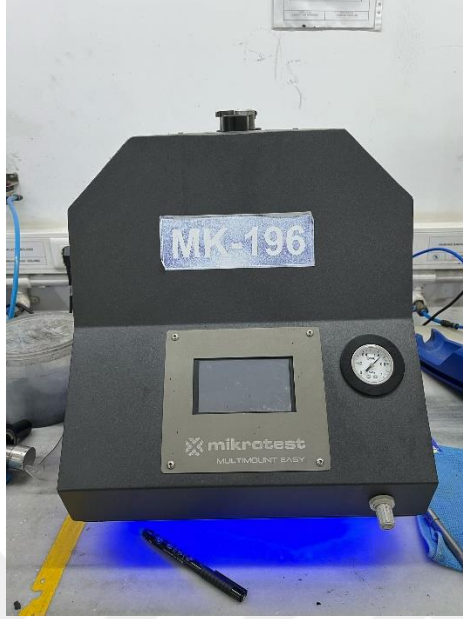
Şekil 19. İnce film seramik kaplama sonrası k rleme fırını

Nitrokarbürizasyon uygulanan, nitrokarbürizasyon ve üzerine oksidasyon ısıl işlemi uygulanan ve nitrokarbürizasyon oksidasyon ince film seramik kaplama uygulanan parçaların her birinden birer adet metalografik numune hazırlama süreçleri uygulanmıştır. Bu süreçte numune parçalar Şekil 20’de Metkon Metacut-M marka ve model hassas numune kesme cihazında kesilmiştir.



Şekil 20. Hassas numune kesme cihazı

Numune parçalar kesme işlemi tamamlandıktan sonra Şekil 21’de Mikrotest Multimont Easy model sıcak bakelite alma cihazında bakelite alma işlemi uygulanmıştır. 240 saniye sıcak pres 180°C, 180 sn soğutma şeklindedir.



Şekil 21. Sıcak bakalite alma cihazı

Bakalite alma işlemi uygulanan numune parçalar Şekil 22’de Qness ATA Gmbh marka Saphır 250A2-ECO model otomatik zımparalama ve parlatma cihazında 180/320, 320, 800/1000 elmas disklerde 5’er dakika 30N yük altında sulu zımparalama işlemi yapılmaktadır. Parlatma 6 mikron ve 1 mikronluk parlatma çuhalarında Akasel marka 6 mikron ve 1 mikron sıvı süspansiyonlarla 15N yük altında 5’er dakika işlem gerçekleştirilmiştir.

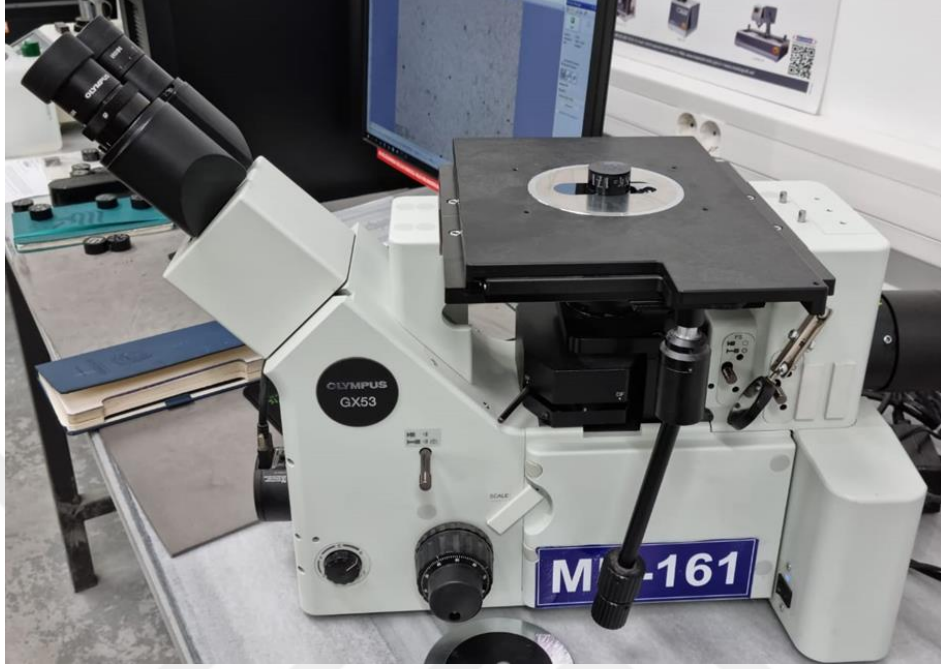


Şekil 22. Otomatik zımparalama ve parlatma cihazı

%3'lük nital dağlayıcı çözeltisinde damlatma yöntemi ile 5 saniye olacak şekilde dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir.

2.3. Mikroyapısal İncelemeler

Metalografi sonrası ters düzenek Olympus GX53 marka ve model olan metal mikroskobunda 100x, 500x ve 1000x büyütmelerde mikroyapısal analiz, inklüzyon, ısıtma işlem yapısal uygunluk, nitrokarbürizasyon bileşik tabaka kalınlığı ve difüzyon derinliği, fosfat kaplama tabaka kalınlığı, ince film seramik tabaka kalınlığı ve aşınma testi sonucu yüzeyleri incelenmiştir. Şekil 23'de metal mikroskop görüntüsü verilmiştir. Şekil 24'de ise Thermo Scientific Apreo 2 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü verilmiştir. SEM' de mikroyapısal incelemeler ve tabaka kalınlıkları incelenmiştir.



Şekil 23. Metal mikroskobu



Şekil 24. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazı

2.4. Aşınma Testleri

Bu çalışmada, numunelerin tribolojik performansını değerlendirmek amacıyla UTS Design Turkey / TRIBOLOG Sürtünme Katsayısı Ölçüm Cihazı Şekil 25 kullanılarak aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerde lineer (ileri-geri) sürtünme tipi uygulanmıştır. Tablo 7’de ise numunelere uygulanan aşınma test koşulları verilmiştir.



Şekil 25. Sürtünme katsayısı ölçüm cihazı

Tablo 7. Numunelere uygulanan aşınma testi koşulları

Numune Numarası	Yüzey İşlemi	Aşınma Direnci	Yük Altı Davranışı	Aşınma Mekanizması	Uzun Mesafe
-----------------	--------------	----------------	--------------------	--------------------	-------------

					Dayanımı
N5	Nitrokarbürizasyon	Orta	Sınırlı plastik deformasyon	Ploughing + Adhezyon	Difüzyon zonu etkili
N7	Nitrokarbürizasyon + Fosfat	Yüksek	Düşük deformasyon	Hafif abrasif + kayıcı	Film tabaka koruyucu
N12	Nitrokarbürizasyon + Fosfat + Cerakote	Çok yüksek	Elastik tepki, çatlamasız	Yüzey filmi koruyucu	Seramik dayanım çok yüksek

Deneylerde test numunesi malzemesi olarak 42CrMo4 çeliğine uygulanan çeşitli yüzey işlem ve ısıtma işlem numuneleri tercih edilmiştir. Karşı aşındırıcı malzeme olarak ise Al₂O₃ (alümina) seramik bilye kullanılmış olup, bilye çapı 6 mm'dir. Test yöntemi olarak lineer(ileri-geri) aşınma testi uygulanmıştır. Frekans olarak 2 Hz. uygulanmıştır. Stroke (ileri-geri mesafesi) olarak 14 mm uygulanmıştır. Yükler 5 N yol etkisi çalışmaları için, 10 N ve 20 N yük etkisi çalışmalar için uygulanmıştır. Aşınma yolları 50 m, 100 m ve 200 m (5N yük altında) gerçekleştirilmiştir. Toplam yol yük etkisi çalışması için 50m olarak test edilmiştir. Aşınma testlerinde, iki temel parametre grubu araştırılmıştır. Bunlar, yol etkisi: 5 N sabit yük altında; 50 m, 100 m ve 200 m toplam aşınma koşulları, yük etkisi: 50 m sabit aşınma yolu altında; 10 N ve 20 N yük koşullarında araştırılmıştır.

Her bir test öncesinde numunelerin başlangıç kütleleri Radwag marka analitik terazi kullanılarak ölçülmüştür. Test sonrasında ise numunelerin son kütleleri aynı cihaz ile yeniden tartılarak kütle kaybı (mg cinsinden) belirlenmiştir. Numune malzemesinin yoğunluk değeri, Arşimet Yoğunluk Belirleme Yöntemi kullanılarak tespit edilmiştir. Böylece, özgül aşınma kaybı miktarı (mm³/N·m) hesaplanabilmektedir. Özgül aşınma miktarı aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanmıştır:

$$\left(\frac{\text{mm}^3}{\text{N} \cdot \text{m}} \right) = \frac{M_{ilk} - M_{son}}{\text{Yol} \times \text{Yük} \times \text{Yoğunluk}}$$

Burada:

- M_{ilk} = Test öncesi numune kütlesi (mg)
- M_{son} = Test sonrası numune kütlesi (mg)

- Yol: Toplam kayma mesafesi (m)
- Yük: Uygulanan normal yük (N)
- Yoğunluk: Numunenin Arşimet yöntemi ile belirlenen yoğunluğu (mg/mm^3)

2.5. Sertlik İncelemeleri

Ham mamulden 12 eş numuneye şekil 26'da verilen Matsuzawa CXT-3 marka Rockwell sertlik test cihazında HRC cinsinden sertlik testi uygulanmıştır. Rockwell sertlik ölüm parametreleri; ölüm yükü 150 kgf (1471 N), n yük 10 kgf (98.70 N), toplam yük 160 kgf (1569 N), sertlik ucu konik elmas u, bekleme süresi 10 saniye olarak belirlenmiştir.



şekil 26. Rockwell sertlik test cihazı

2.6. Mikrosertlik ve Difüzyon Derinliği İncelemeleri

Nitrokarbürizasyon, fosfat kaplama ve ince film seramik kaplama numune parçaları Emcotest Durascan G5 model cihazında difüzyon derinliği ve Vickers (HV) cinsinden mikrosertlik testi yapılmıştır. 0,1 gram ve 10 saniye olacak şekilde yük uygulanmıştır. Şekil 27 'te mikrosertlik cihazının görseli verilmiştir. Mikrosertlik ölçümü yüzeyden 100 mikrona kadar yirmişer mikron olacak şekilde dört ölçüm, 100 mikrondan 300 mikrona olacak şekilde ellışer mikrondan dört ölçüm ve merkezden 500 mikron yüzeyden uzaklaşacak mesafeden üç ölçüm alınarak yapılmıştır.



Şekil 27. Mikrosertlik test ölçüm cihazı

2.7. Spektral Analiz Test Ölçümleri

Şekil 28’da Arun Artus 8 model cihazda numune parçalarının spektral analizi yapılarak kimyasal kompozisyonu değerlendirilmiştir.



Şekil 28. Spektral analiz test cihazı

2.8. Yüzey Pürüzlülüğü Testi

Şekil 29’da bütün proseslerin arasında, taşlama sonrası, kumlama sonrası, vibrasyon polisaj sonrası, nitrokarbürizasyon sonrası, fosfatlama sonrası ve ince film seramik kaplama sonrası, yüzey pürüzlülüğü ölçümü uygulanmıştır. Bu cihazın modeli MAHR MarSurf PS10’dur. Cihaz parametreleri ise test sırasında bütün numunelere $L_t = 8,0 \text{ mm}$ ($0,8 \times 5$) olacak şekilde yüzey pürüzlülük testi uygulanmıştır.



Şekil 29. Yüzey pürüzlülük test cihazı

2.9. XRD Analizi

Şekil 30'da Panalytical X'Pert3 Powder XRD marka ve model XRD analizi cihazından numune parçalarının analizi yapılarak malzemelerin yüzey işlemlerindeki faz bileşimi belirlenmiştir.



Şekil 30. XRD analizi test cihazı

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler, bu çalışmanın bulgular ve tartışma başlığı altında kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Bu bölümde, uygulanan farklı işlem parametrelerinin numunelerin mikroyapıları üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelenmiş; oluşan fazlar, mikro yapı homojenliği, SEM analizi, difüzyon derinliği gibi yapısal özellikler detaylı mikroskobik analizler eşliğinde değerlendirilmiştir. Ayrıca, numunelere ait fiziksel ve mekanik özellikler özellikle sertlik dağılımı, sertlik değişimleri, mikrosertlikler gibi kritik parametreler sistematik olarak analiz edilerek elde edilen bulgular, literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır. Bu karşılaştırmalar, kullanılan işlem parametrelerinin malzeme performansı üzerindeki etkilerini daha net bir şekilde ortaya koymak amacıyla yapılmıştır. Bununla birlikte, malzemelerin tribolojik davranışları da kapsamlı şekilde ele alınmıştır. Aşınma mekanizmaları, yüzey morfolojileri gibi tribolojik parametreler hem deneysel ölçümler hem de yüzey karakterizasyon teknikleriyle desteklenmiş ve elde edilen veriler ışığında yorumlanmıştır. Tüm bu değerlendirmeler, deneysel sonuçların bilimsel temellere dayandırılması ve malzeme davranışlarının daha derinlemesine anlaşılması açısından önemli katkılar sunmaktadır. Bu kapsamda, bulgular ve tartışma bölümü, sadece deney sonuçlarının sunulmasıyla sınırlı kalmayıp, bu sonuçların mühendislik uygulamaları ve literatürdeki güncel bilgilerle bağlantılı olarak yorumlanmasına da olanak tanımaktadır.

3.1 Rockwell Sertlik Testi

Nitrokarbürizasyon operasyon işleminden önce, 42CrMo4 çeliğinden hazırlanmış 12 adet numunenin başlangıç (işlem öncesi) sertlik değerleri Rockwell C (HRC) ölçeğinde ölçülmüş ve Tablo 8'deki sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 31 'de N1 numunesinin sertlik ölçüm sonucu görsel olarak ifade edilmiştir.

Tablo 8. Test numunelerinin sertlik sonuçları

	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12
HRC	28.8	27.5	28.6	29.3	28.7	29.6	30	29.4	28.3	29.2	29.7	28.5

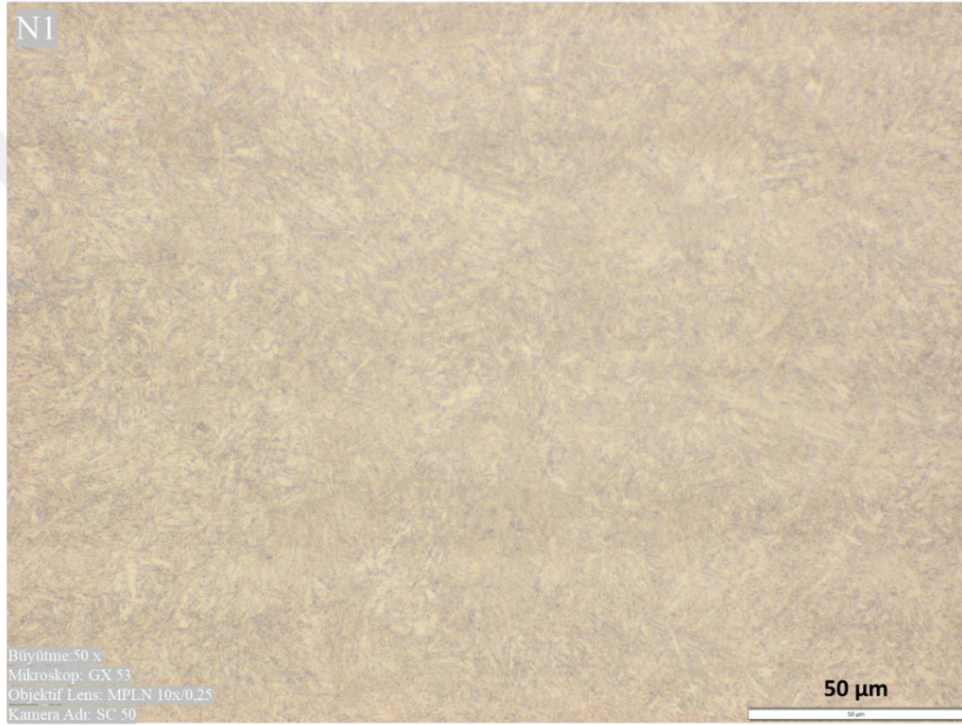


Şekil 31. Rockwell sertlik ölçüm testi

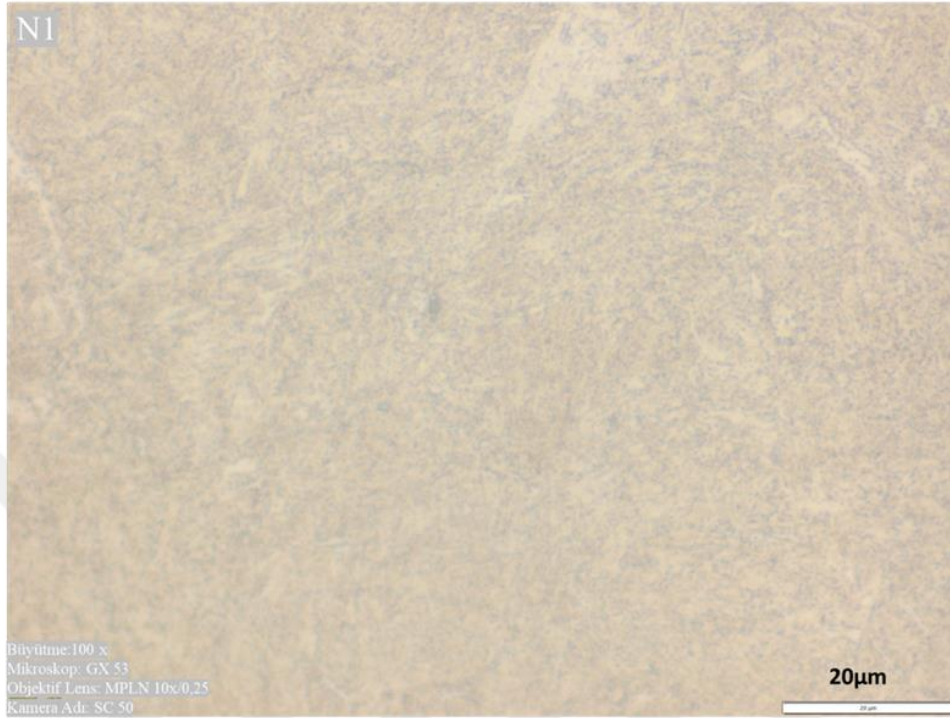
Tüm numunelerin ölçüm sonuçları dikkate alındığında işlem öncesi ortalama çekirdek sertliği yaklaşık 28,9 HRC olarak hesaplanmıştır. Numuneler arasındaki sertlik değerleri oldukça yakın aralıkta olup, minimum değer 27,5 HRC (N2) ve maksimum değer 30,0 HRC (N7) olarak ölçülmüştür. Sertlik değerlerinin dağılım aralığı yaklaşık 2,5 HRC olup, bu durum malzemenin üretim partisi içindeki homojenliğinin iyi seviyede olduğunu göstermektedir. Şekil 32 'de N1 numunesinin sertlik ölçüm örneği gösterilmiştir. Şekilde örnek N1 numunesi gibi 12 adet numune olan 42CrMo4 çeliğinin uygulanan nitrasyon yüzey işlemi, nitrokarbürizasyon üzeri fosfat kaplama yüzey işlemi ve nitrokarbürizasyon fosfat kaplama üzeri ince film seramik kaplamalar yüzey işlemleri yapılmadan önce sertlikleri Rockwell sertlik test cihazı ile ölçülmüştür. Parçaların sertlik aralıkları 27,5 HRC-30 HRC aralığında gelmiştir.

3.2. Mikroyapı

Numune hazırlama süreçleri tamamlanan numunelerin merkezi mikroyapı görüntüleri Şekil 32 ve Şekil 33’de gösterilmiştir. Şekil 32 ve Şekil 33’de görüldüğü gibi mikroyapı 50x ve 100x büyütmelerde mikroyapı görüntüsü alınmıştır.



Şekil 32. N1 numunesinin 50x büyütmedeki mikroyapı görüntüsü



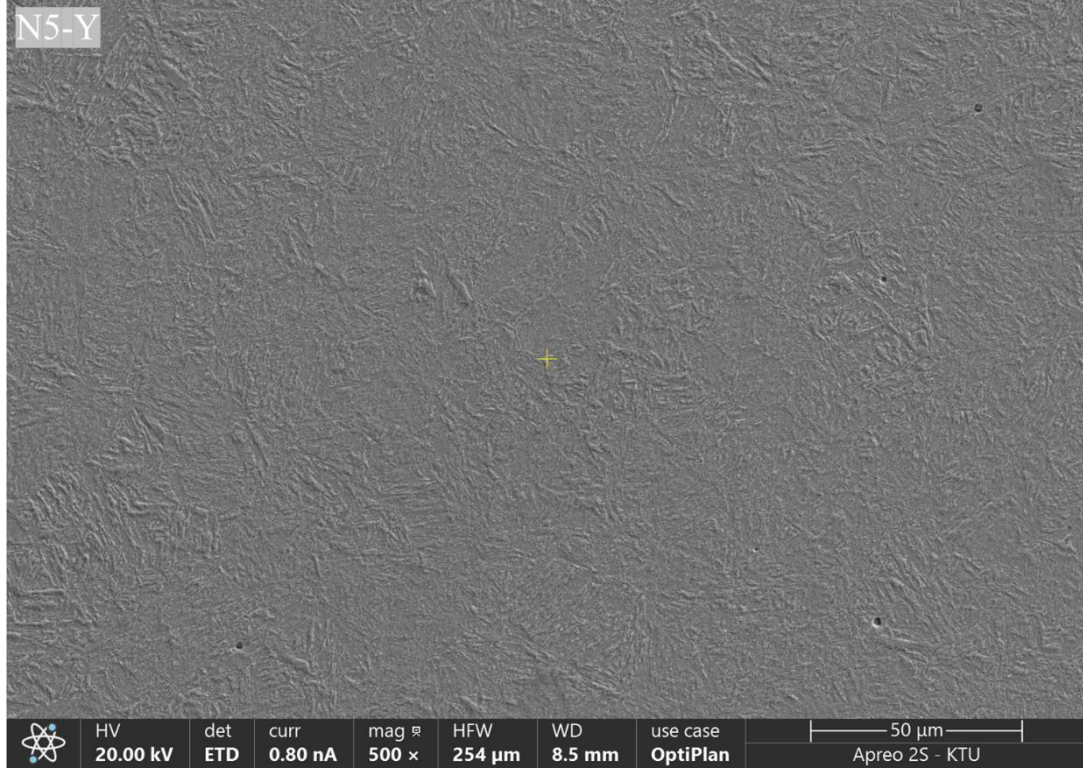
Şekil 33. N1 numunesinin 100x büyütmedeki mikroyapı görüntüsü

Merkezi mikroyapı her deney numunesinde aynı ham mamulden kesilip alındığı için farklılık göstermemektedir. Mikroyapısal inceleme sonucunda parça ıslah ısıtma işlemi görmüş bir parça olduğu için temperlenmiş martenzit mikroyapısındadır. Bu mikroyapı parçaya merkezi tokluk ve dayanım sağlamaktadır.

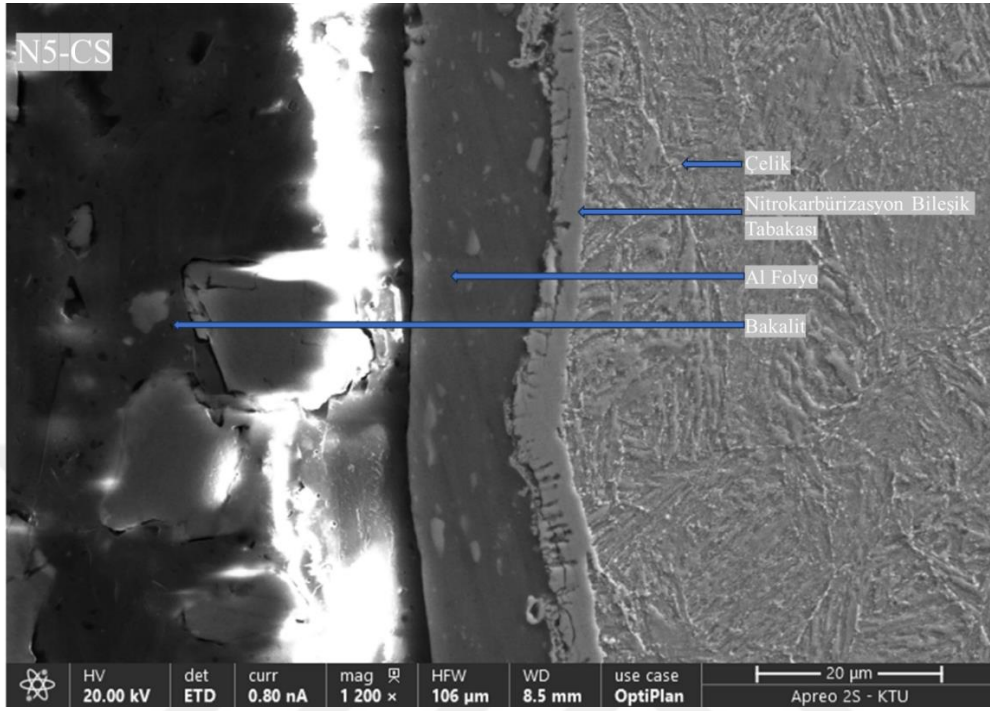
3.3. SEM Analizi İncelemeler

Numune olarak her prosesten alınan parçaların SEM analiz sonuçları Şekil 34, Şekil 35, Şekil 36, Şekil 37, Şekil 38, Şekil 39, Şekil 40, Şekil 41, Şekil 42’de görülmektedir. Bu görüntüler numune 5, numune 7 ve numune 12’ten alınmıştır. N5 ,5 numaralı deney parçasıdır ve termokimyasal ısıtma işlemi uygulanan nitrokarbürizasyonlu numunedir. N7 ise 7 numaralı deney parçasıdır, nitrokarbürizasyon ve fosfatlama yüzey işlemi uygulanan numunedir. N12 ise 12 numaralı deney parçasıdır, nitrokarbürizasyon ısıtma işlemi, fosfatlama yüzey işlemi ve ince film seramik kaplama yöntemi olan cerakot boyanmış deney numunesidir. N5-Y, N7-Y ve N12-Y görselleri parçanın merkezi yüzey görüntüsünü

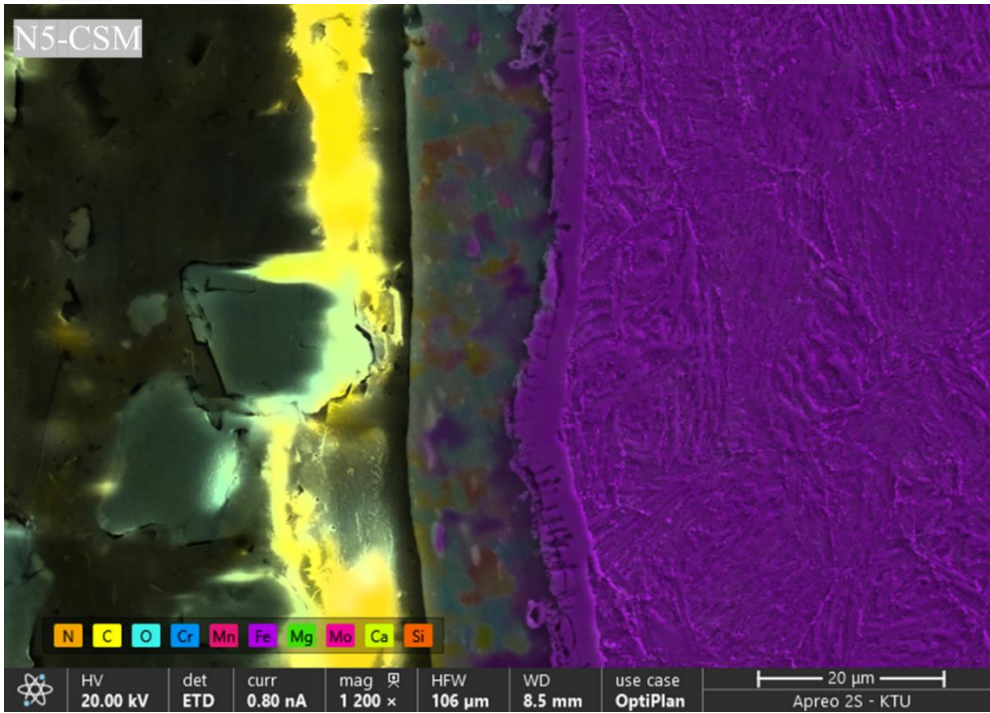
ifade etmektedir. Bu görseller de parçanın temperlenmiş martenzit mikroyapısı gözükmemektedir. N5-CS, N7-CS, N12-CS ile belirtilen görüntüler ise numune parçalarının kenar kısmı olan ve kaplamaların gözükmediği yapıyı ifade etmektedir. N5-Y, yüzey görüntüsü oldukça homojen bir topografi sergilemektedir. Mekanik işlem izleri ve belirgin morfolojik bozukluklar gözlemlenmemektedir. N5-CS, kesit görüntüsünde yüzeyden itibaren yoğun bir tabaka oluşumu izlenmektedir. Difüzyon bölgesi net olarak ayırt edilebilmektedir. Bu yapı, tipik olarak difüze olmuş azot ve karbonun altlık malzemede oluşturduğu bileşik tabaka ve difüzyon bölgesini yansıtır. N5-CSM, elementel haritalama, yüzey bölgesinde yoğun olarak sarı renkle gösterilen azot (N) ve karbon (C) dağılımını işaret etmektedir. Mor bölgede temel olarak altlık malzeme yapının (muhtemelen Fe) yer aldığı görülmektedir. N7-Y, yüzeyde önceki numuneye göre daha belirgin bir yüzey dokusu oluşmuştur. Fosfat kristallerinin oluşturduğu tipik granüler yapı gözlemlenmektedir. N7-CS, kesitte, nitrokarbürize tabakanın üzerine eklenmiş fosfat kaplamanın varlığı, yüzeyin daha kontrast bir tabaka yapısına sahip olmasıyla anlaşılmaktadır. Üstte daha yoğun, alt kısımlarda geçişli bir yapı mevcuttur. N2-CSM, EDS haritalama, sarı bölgelerde fosfor (P) ve oksijen (O) dağılımını göstermektedir. Mavi alanlarda muhtemelen demir (Fe) ve diğer alaşım elementleri (Cr, Mo) yoğunlaşmıştır. Fosfatlama işleminin çelik yüzeyinde kimyasal olarak bir dönüşüm tabakası oluşturduğu açıktır. N12-Y, yüzeyde çok katmanlı kaplama nedeniyle daha kompleks ve heterojen bir yapı izlenmektedir. Bu yapı, özellikle cerakote kaplamanın yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisini göstermektedir. N12-CS, kesit görüntüsünde çok katmanlı bir yapı net olarak gözlenmektedir. En altta altlık malzeme, onun üzerinde nitrokarbür tabakası, fosfat tabakası ve en üstte yüksek kontrastlı ince film seramik kaplama yer almaktadır. Tabakalar arası sınırlar oldukça belirgindir. N12-CSM, EDS haritalamada çeşitli elementlerin (Ti, Si, Al, C, O gibi) yüzeye homojen olmayan bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Bu, cerakote kaplamanın içerdiği seramik ve polimer bazlı bileşenlerin kompleks yapısını göstermektedir. Mor ve mavi alanlar metalik fazları, sarımsı-yeşil alanlar ise organik/seramik fazları işaret etmektedir. Şekil 34, Şekil 35, Şekil 36'de N5 numunesine ait, Şekil 37, Şekil 38, Şekil 39'de N7 numunesine ait, Şekil 40, Şekil 41, Şekil 42'de N12 numunesine ait, 42CrMo4 çeliği üzerinde çok katmanlı yüzey mühendisliği uygulamalarının morfolojik ve elementel düzeyde etkileri açıkça ortaya konmuştur.



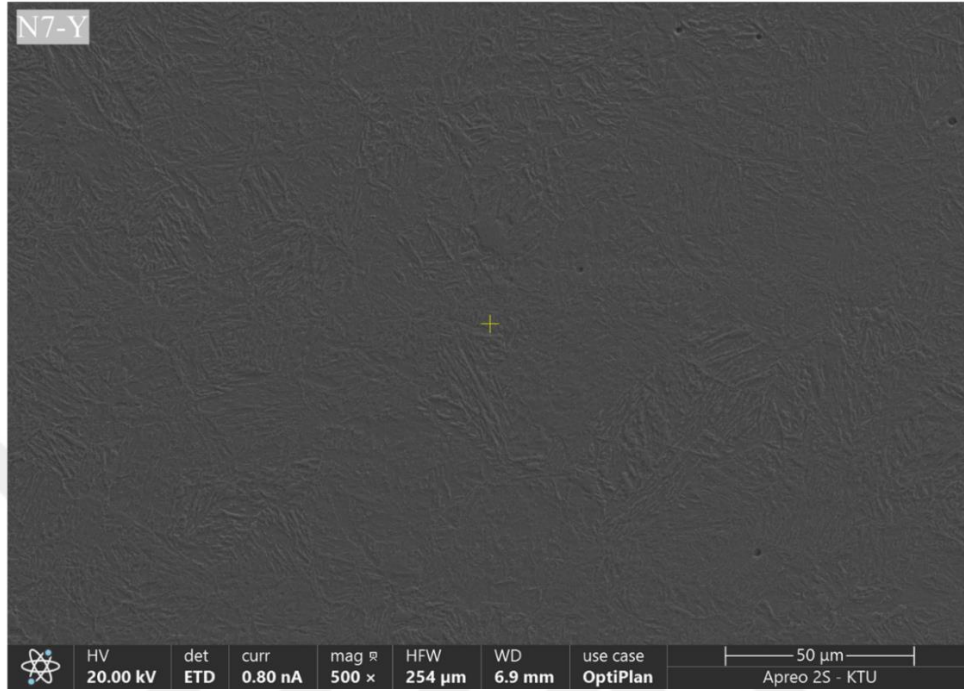
Şekil 34. N5 numunesinin yüzeyden alınan SEM görüntüsü



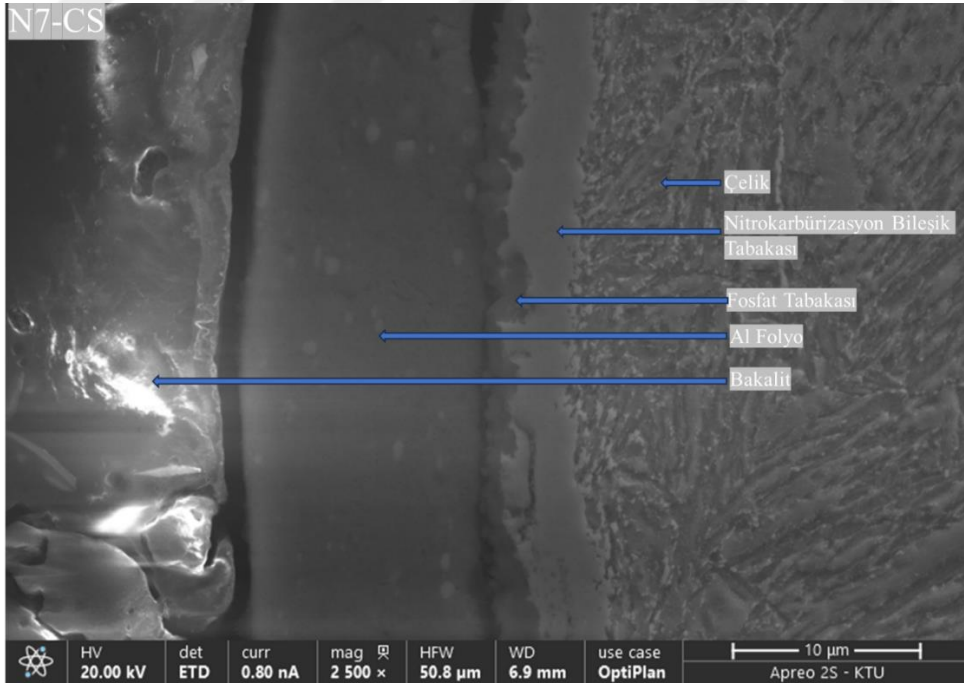
Şekil 35. N5 numunesinin kesitten alınan SEM görüntüsü



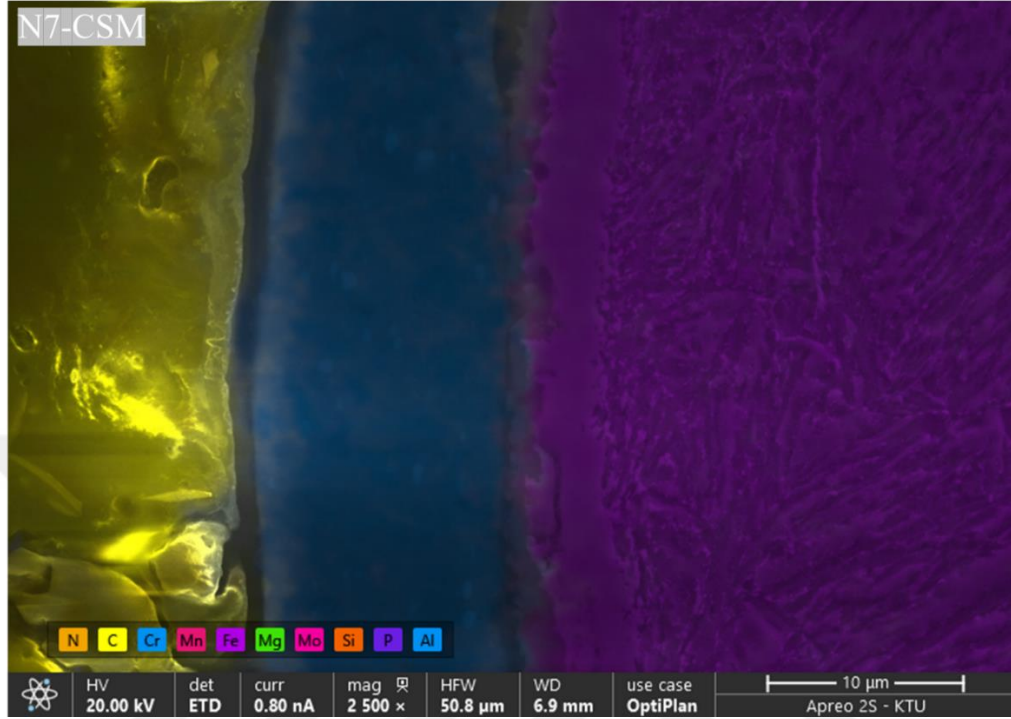
Şekil 36. N5 Numunesinin kesitten alınan EDS görüntüsü



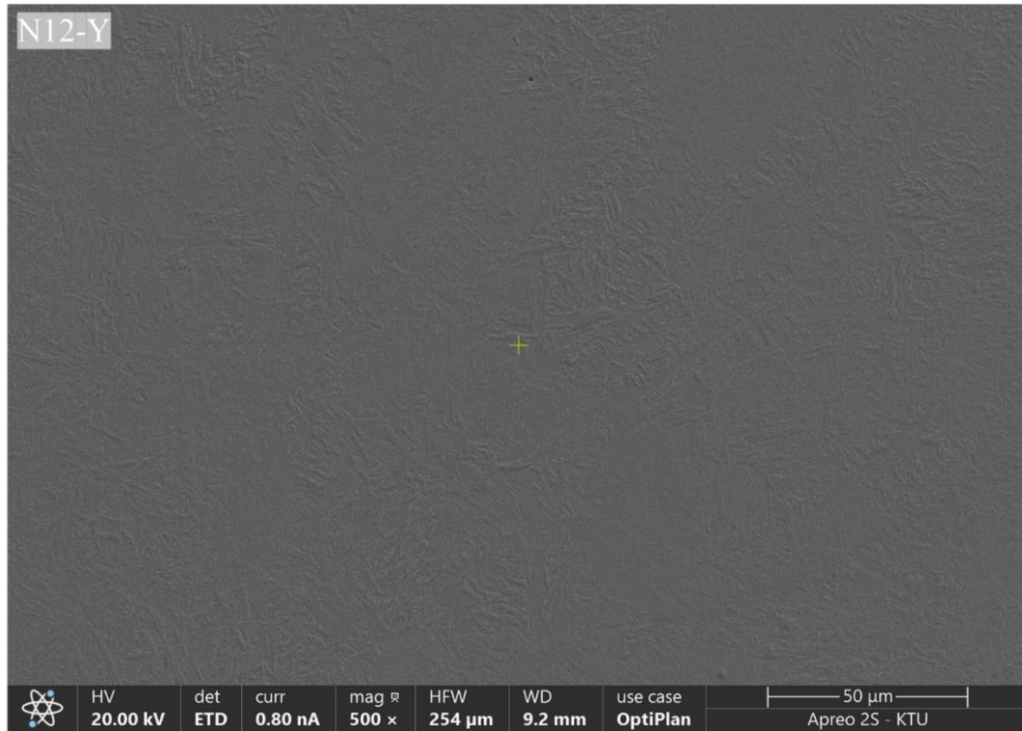
Şekil 37. N7 numunesinin yüzeyden alınan SEM görüntüsü



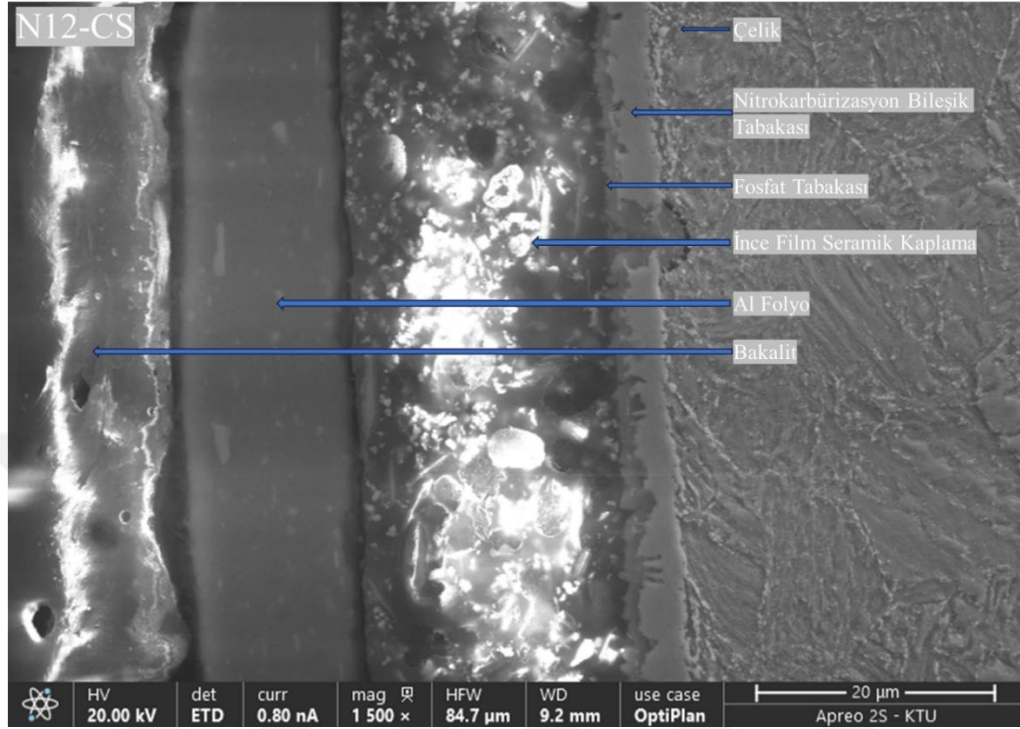
Şekil 38. N7 numunesinin kesitten alınan SEM görüntüsü



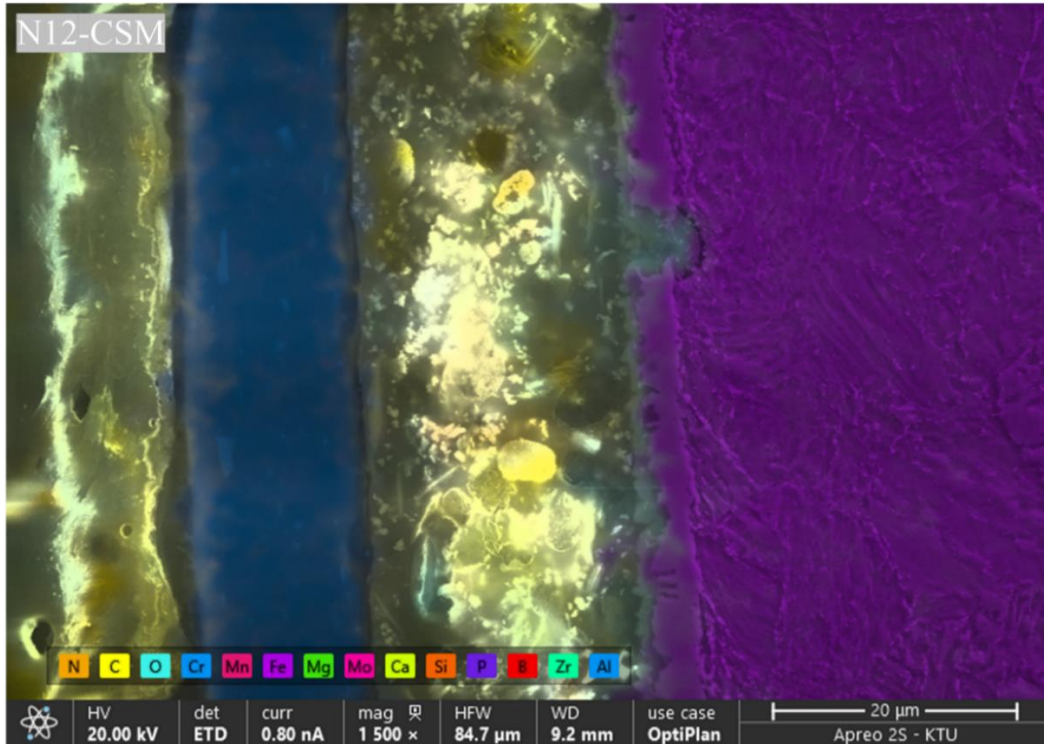
Şekil 39. N7 Numunesinin kesitten alınan EDS görüntüsü



Şekil 40. N12 numunesinin yüzeyden alınan SEM görüntüsü



Şekil 41. N12 numunesinin kesitten alınan SEM görüntüsü



Şekil 42. N12 Numunesinin kesitten alınan EDS görüntüsü

Nitrokarbürizasyon işlemi, yüzey sertliğini artırmak ve aşınma direncini yükseltmek amacıyla uygulanmıştır. Üçüncü aşamada uygulanan cerakote tipi seramik esaslı kaplama ise hem estetik hem de yüksek sıcaklık, kimyasal ve aşınma direnci sağlamak amacıyla tercih edilmiştir. Çok katmanlı yapıların mikroyapısal bütünlüğü ve ara yüzey bağlanması, özellikle N12 numunesinde oldukça başarılı görünmektedir. Elementel analizler, her katmanın karakteristik bileşenlerini doğrulamakta ve bu yapıların fonksiyonel yüzey mühendisliği açısından optimize edildiğini göstermektedir.

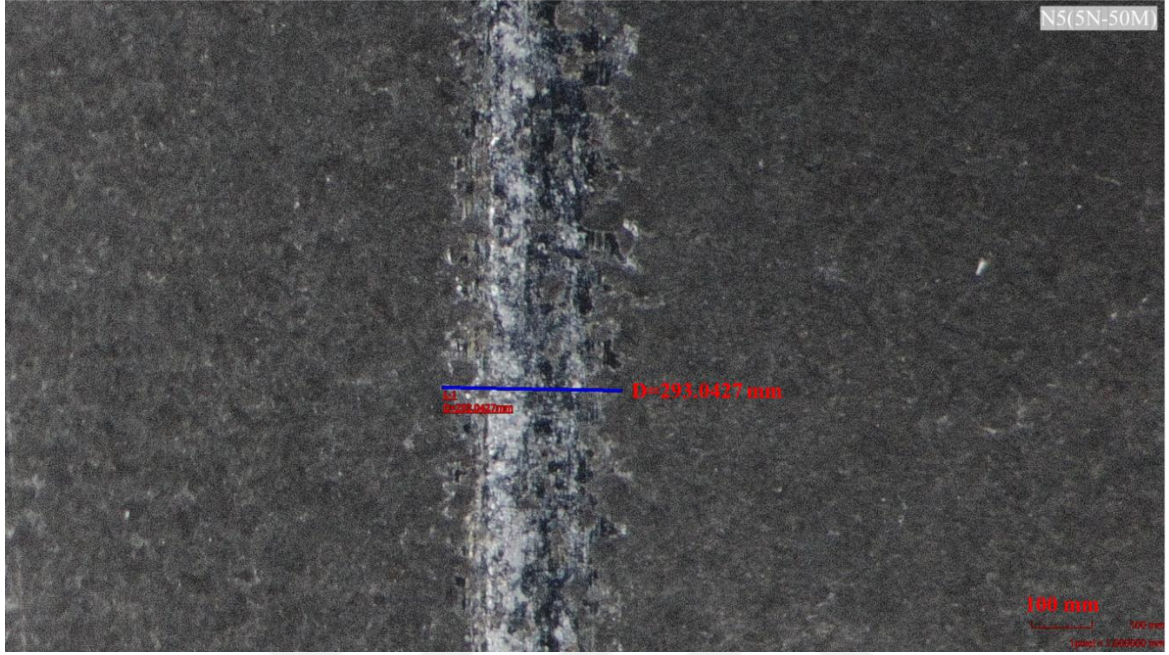
3.4. Aşınma Testi

Bu bölümde, yüzey modifikasyonlarına tabi tutulmuş 5, 7 ve 12 numaralı numunelere ait hem nicel aşınma verileri hem de mikroskobik aşınma morfolojileri birlikte değerlendirilmiştir. Aşınma testleri 42CrMo4 çeliği üzerinde gerçekleştirilmiş olup her bir numune aşağıdaki yüzey işlemlerine sahiptir. Tablo 9’da yüzey işlem çeşitlerine göre aşınma testi uygulanan numuneler belirtilmiştir.

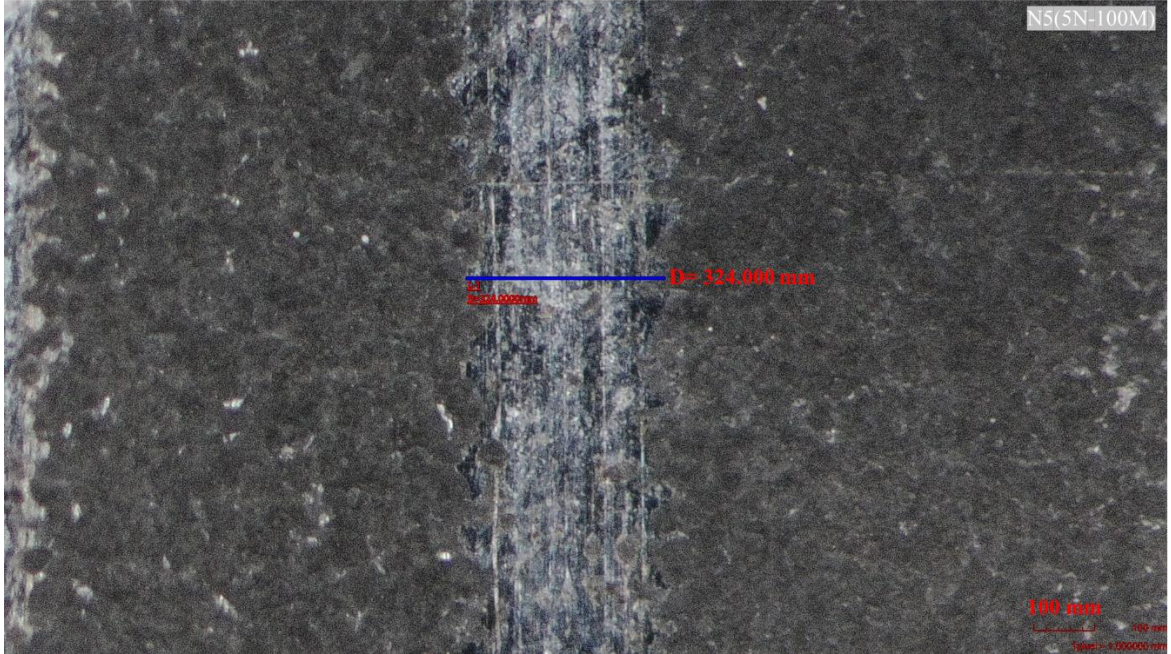
Tablo 9. Numunelere uygulanan yüzey işlemler

Numune No	Uygulanan Yüzey İşlemi
5	Nitrokarbürizasyon
7	Nitrokarbürizasyon + Fosfatlama
12	Nitrokarbürizasyon + Fosfatlama + Seramik Kaplama (Cerakote)

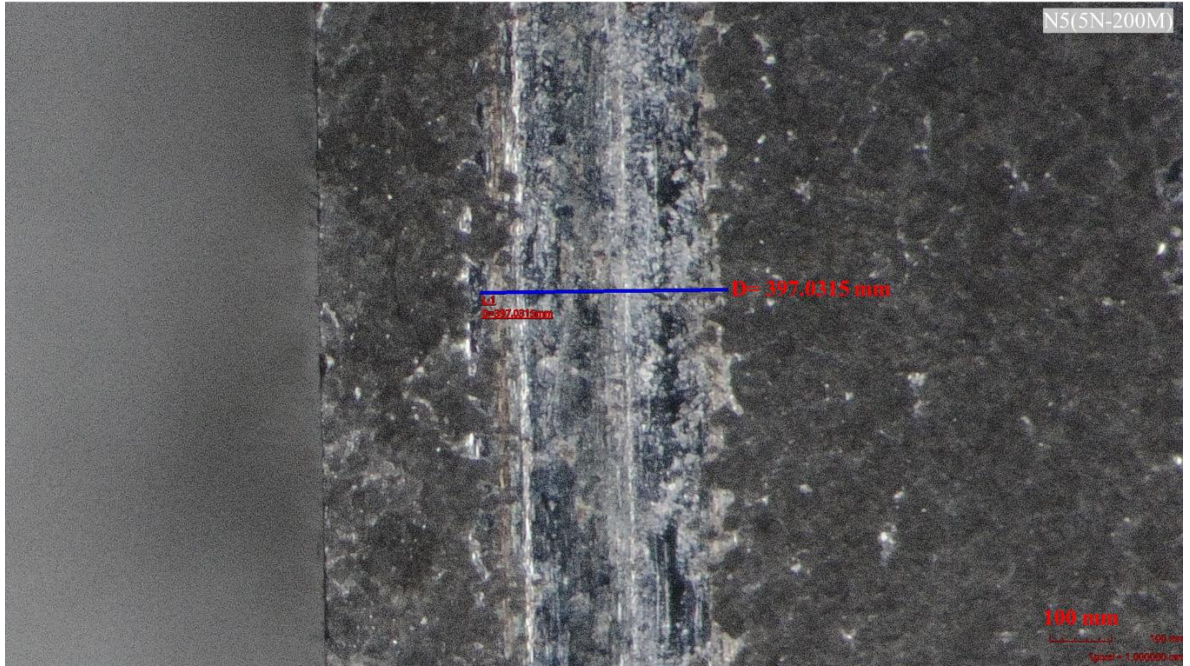
Şekil 43, Şekil 44, Şekil 45, Şekil 46 ve Şekil 47’de 5 numaralı numuneye ait farklı yük ve mesafelerde yapılan aşınma testleri sonrası elde edilen yüzey morfolojileri mikroskobik olarak incelenmiştir.



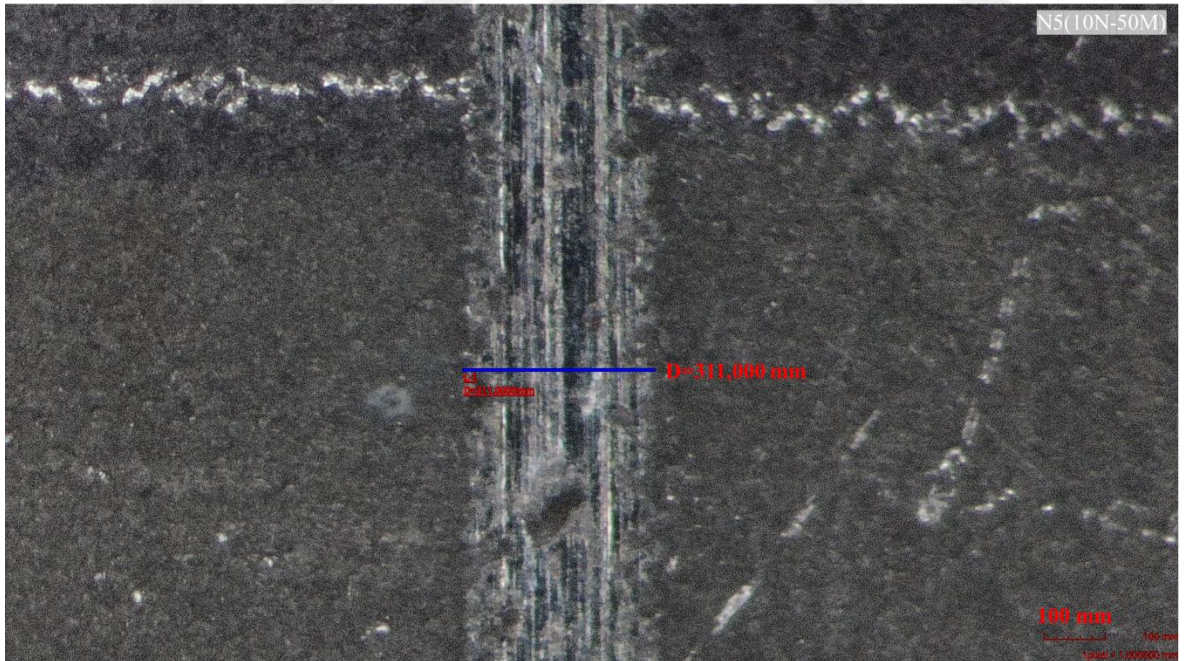
Şekil 43. N5 Numunesinin 5N kuvvet uygulanarak 500 metre mesafedeki aşınma izi görüntüsü



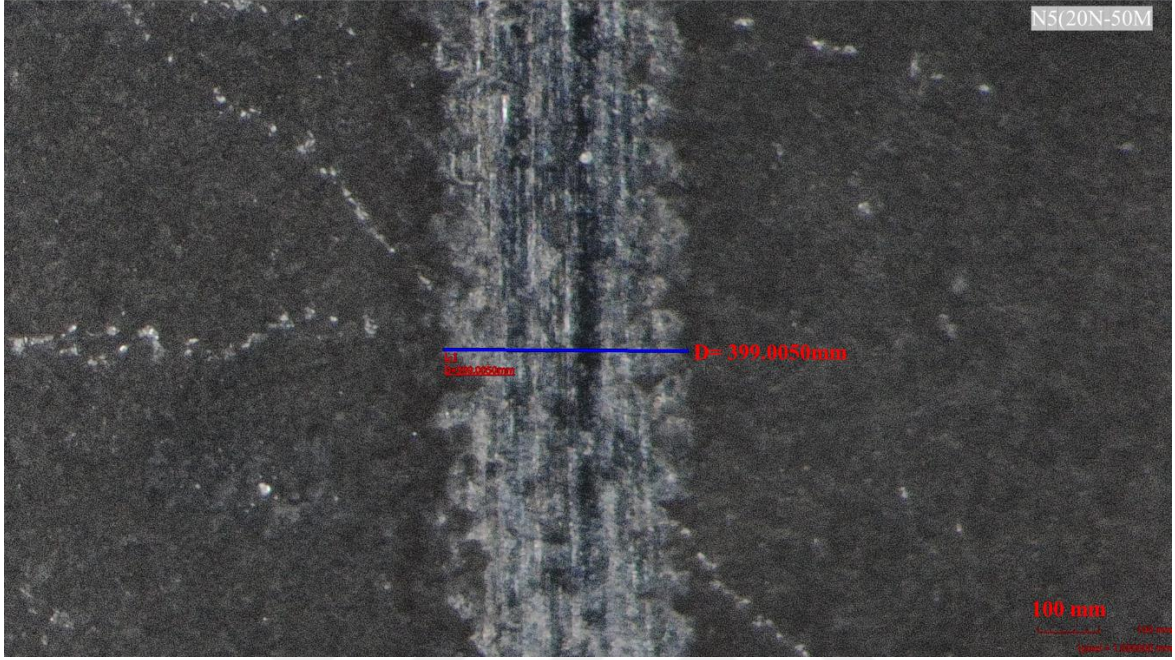
Şekil 44. N5 Numunesinin 5N kuvvet uygulanarak 100 metre mesafedeki aşınma izi görüntüsü



Şekil 45. N5 Numunesinin 5N kuvvet uygulanarak 200 metre mesafedeki aşınma izi görüntüsü



Şekil 46. N5 Numunesinin 10N kuvvet uygulanarak 50 metre mesafedeki aşınma izi görüntüsü

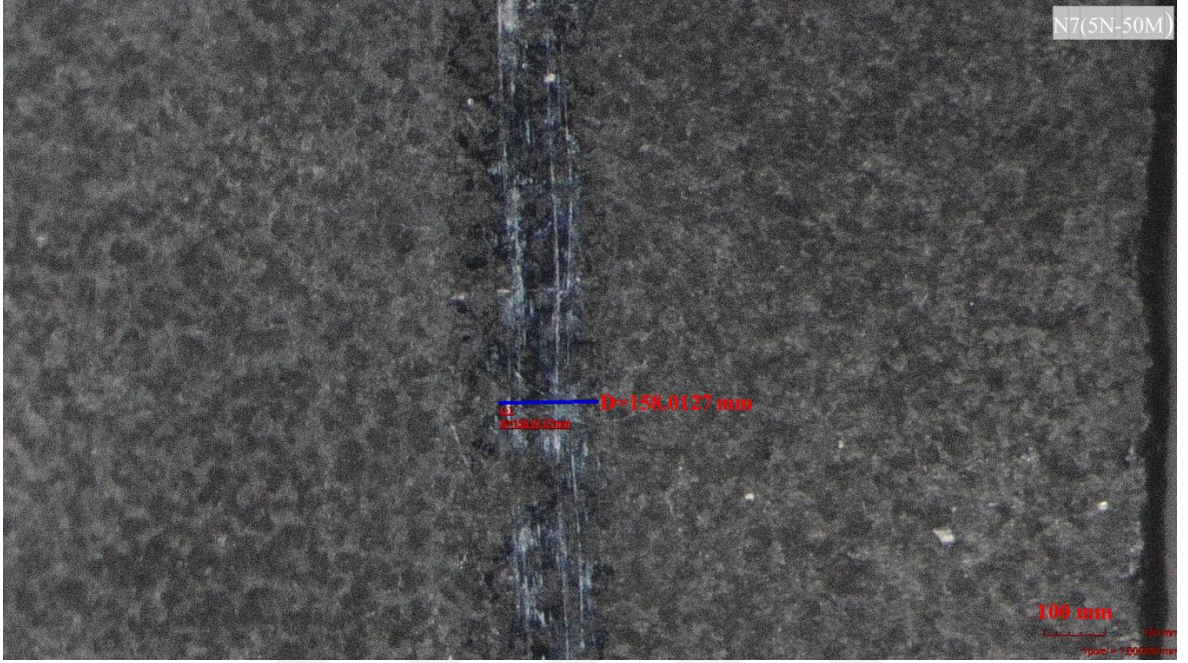


Şekil 47. N5 Numunesinin 20N kuvvet uygulanarak 50 metre mesafedeki aşınma izi görüntüsü

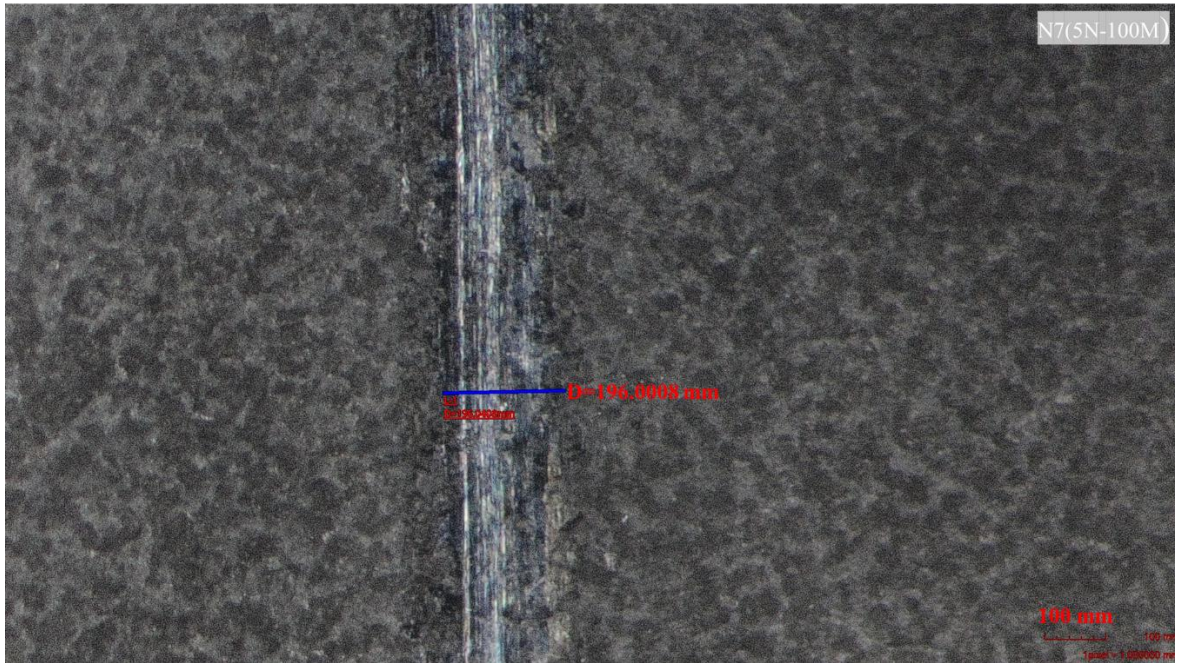
Aşınma izlerinin genişliği, derinliği, iz kenarlarındaki deformasyon yapısı ve oluşan lokal bozulmalar üzerinden, aşınma mekanizmaları değerlendirilmiştir. 50 m – 5 N (düşük yük, kısa mesafe), yüzeyde dar, tek hat üzerinde uzanan bir aşınma izi gözlenmektedir. Aşınma izi boyunca oluşan çizgisel aşınma izleri, özellikle mikro-plastik deformasyonun sınırlı olduğunu göstermektedir. Yüzey kenarlarında hafif kenar yırtılması ve birikme izlenmiştir. Bu durum, hafif adhezyon ve kısmi mikro-yüzey yırtılması ile uyumludur. İz dar ve düzgün ilerlemektedir, bu da yükün yeterli yüzey sertliği tarafından taşındığını gösterir. 50 m – 10 N (Orta yük, sabit mesafe), yük artışıyla birlikte, aşınma izi belirgin şekilde genişlemiş ve iz kenarlarında birikme-delikleşme (ploughing) etkisi başlamıştır. İz boyunca çizgisel yapılar daha derinleşmiş ve yüzeyde daha fazla yırtılma meydana gelmiştir. Bu, adhezyon etkisinin arttığını ve temas yüzeyinde daha yüksek gerilmelerin oluştuğunu göstermektedir. 50 m – 20 N (yüksek yük, sabit mesafe), bu koşulda oluşan iz, önceki iki duruma göre belirgin şekilde daha geniş ve derindir. İz kenarlarında yoğun plastik deformasyon ve mikro-yırtık oluşumu gözlenmektedir. Ayrıca merkez bölgede malzeme transferinin olduğu, yüzeydeki malzemenin kayarak bir kenara yığıldığı izlenmektedir. Bu iz yapısı, yoğun adhezyon, ploughing ve yer yer oksitlenme belirtileriyle

karakterizedir. Yüksek temas basıncı, difüzyon zonunun ötesine geçerek alt tabakada yüzey bozulmasına neden olmuştur. 100 m – 5 N (Düşük yük, orta mesafe), bu testte aşınma izi, 50 m – 5 N testine kıyasla daha belirgin hale gelmiş, ancak genişlikte ani artış görülmemiştir. Bu durum, oturmuş sürtünme rejimi oluştuğunu ve yüzeyin belirli bir süre sonra dengeye ulaştığını göstermektedir. Aşınma kenarlarında sınırlı birikme ve iz boyunca belirgin, düz çizgi yapıları vardır. Bu morfoloji, düzgün ilerleyen hafif abrazyon karakterindedir. 200 m – 5 N (Düşük yük, uzun mesafe), bu aşamada aşınma izi daha derinleşmiş, özellikle iz merkezinde çizgisel yapılar belirginleşmiştir. Ancak iz kenarlarında ciddi bozulmalar veya delaminasyon izlenmemektedir. Aşınmanın ileri aşamasında da difüzyon tabakasının yüzeyi korumaya devam ettiği anlaşılmaktadır. Aşınma izinin sabit genişlikte kalması ve kenar deformasyonunun azlığı, kararlı tribolojik davranışın sürdüğünü göstermektedir.

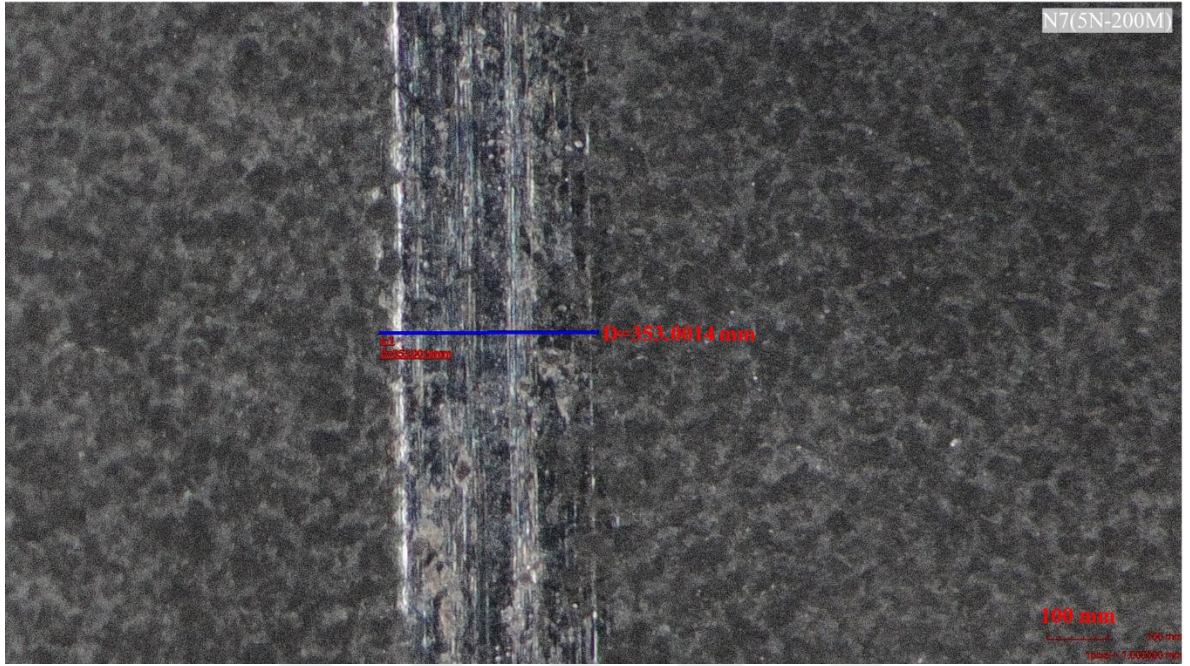
Nitrokarbürize edilmiş 42CrMo4 çeliği, düşük yük ve kısa mesafe koşullarında yüzey bütünlüğünü büyük oranda korumuştur. Yük arttıkça, difüzyon tabakasının sınırlarına ulaşıldığı ve alt katmandaki yapısal deformasyonların başladığı gözlenmiştir. Aşınma izleri, başlangıçta kontrollü adhezyon ve abrazyon mekanizması gösterirken; yük ve temas enerjisi arttıkça ploughing, malzeme transferi ve yırtılma karakteri daha baskın hale gelmiştir. Uzun mesafe (200 m) koşullarında yük sabit olsa dahi toplam enerji birikimi nedeniyle iz derinliği artmış, ancak yüzey deformasyonları aşırı seviyelere ulaşmamıştır. Şekil 48, Şekil 49, Şekil 50, Şekil 51 ve Şekil 52’de 7 numaralı numuneye ait farklı yük ve mesafelerde yapılan aşınma testleri sonrası elde edilen yüzey morfolojileri mikroskobik olarak incelenmiştir.



Şekil 48. N7 Numunesinin 5N kuvvet uygulanarak 50 metre mesafedeki aşınma izi görüntüsü



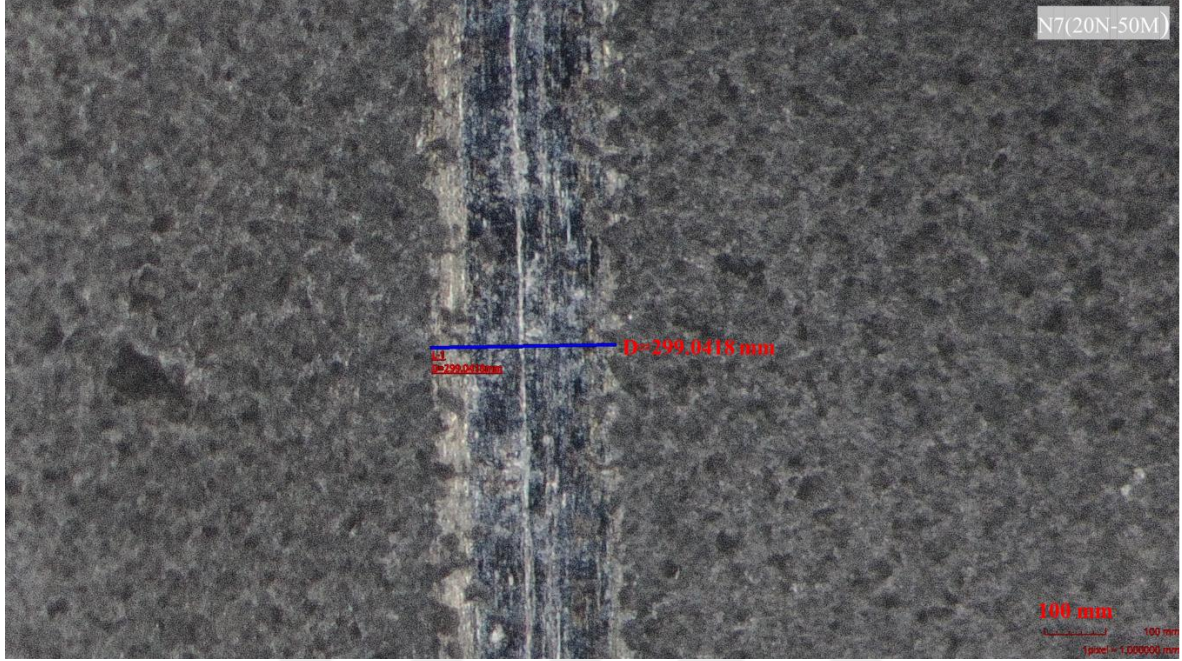
Şekil 49. N7 Numunesinin 5N kuvvet uygulanarak 100 metre mesafedeki aşınma izi görüntüsü



Şekil 50. N7 Numunesinin 5N kuvvet uygulanarak 200 metre mesafedeki aşınma izi görüntüsü



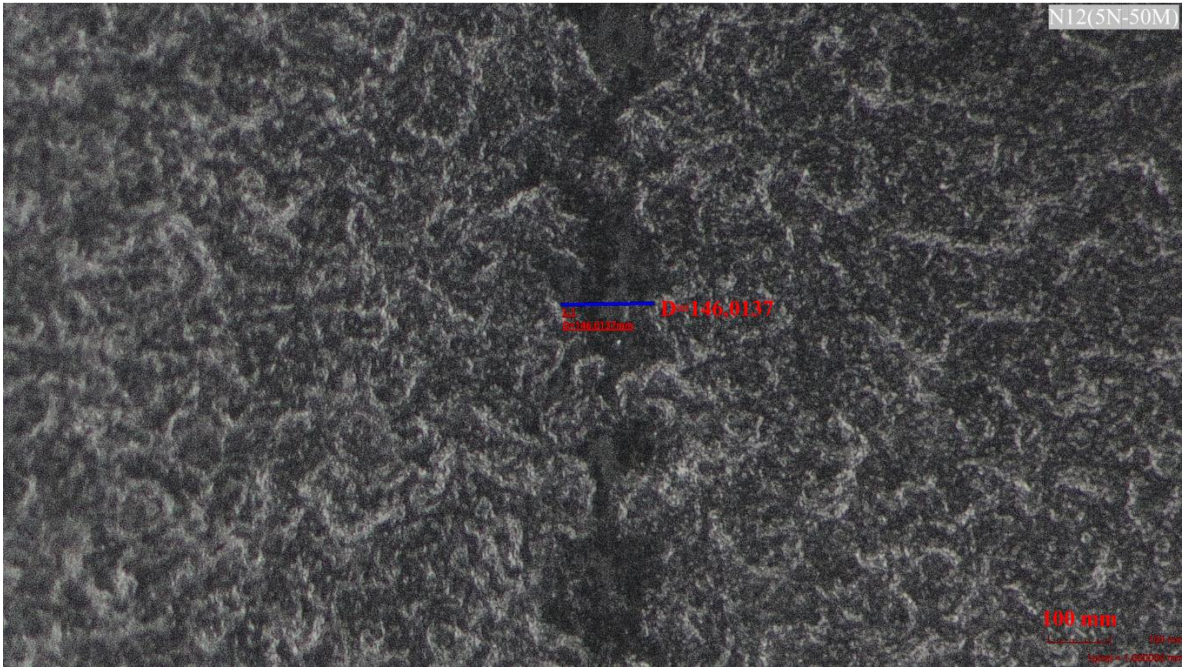
Şekil 51. N7 Numunesinin 10N kuvvet uygulanarak 50 metre mesafedeki aşınma izi görüntüsü



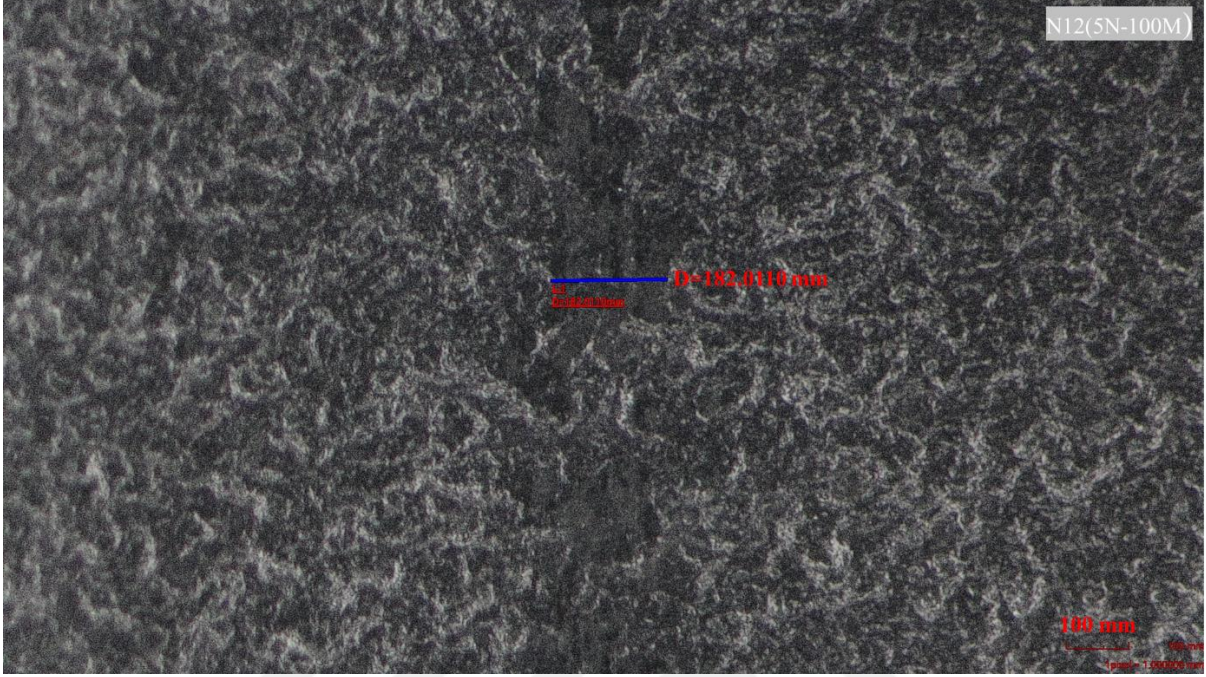
Şekil 52. N7 Numunesinin 20N kuvvet uygulanarak 50 metre mesafedeki aşınma izi görüntüsü

7 Numaralı Numune – Nitrokarbürizasyon + Fosfatlama, 7 numaralı numuneye fosfatlama işleminin uygulanması, yüzeyde mikrokristal yapıda bir fosfat film tabakası oluşturarak tribolojik performansı artırmıştır. Mikroskopik gözlemlerle birlikte aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır: 50 m – 5 N, aşınma izi oldukça incedir ve kenar deformasyonu minimaldir. Çizgisel yapı süreklilik gösterse de yüzeyde derin penetrasyon oluşmamıştır. Bu durum, fosfat kaplamanın katı yağlayıcı etkisi ile düşük sürtünme katsayısı sağladığını ve mikro yapışmayı engellediğini göstermektedir. 50 m – 10 N, yük artışıyla birlikte çizgi derinliği hafif artmış olsa da iz kenarlarında büyük plastik deformasyon izlenmemektedir. Adhezyon ve abrasif aşınma sınırlı kalmıştır. Bu, fosfat tabakanın hâlâ yüzeyi koruduğunu göstermektedir. 50 m – 20 N, yüksek yüklerle birlikte, ploughing belirtileri görülmekle birlikte deformasyon çok belirgin değildir. Yüzeydeki iz sürekli, ancak kenarlarda sınırlı deformasyon izlenmektedir. Bu, fosfat tabakanın yük taşıma kapasitesinin sınırına ulaştığını, fakat difüzyon zonunun desteğiyle aşınmanın kontrol altında kaldığını göstermektedir. 100 m – 5 N, aşınma izi düzgün, derinleşmemiştir. Fosfatlama, yükün zamana yayılması karşısında direnç göstermiştir. İz boyunca sürtünme rejiminin kararlı olduğu izlenmektedir. 200 m – 5 N, uzun mesafede bile iz genişliği

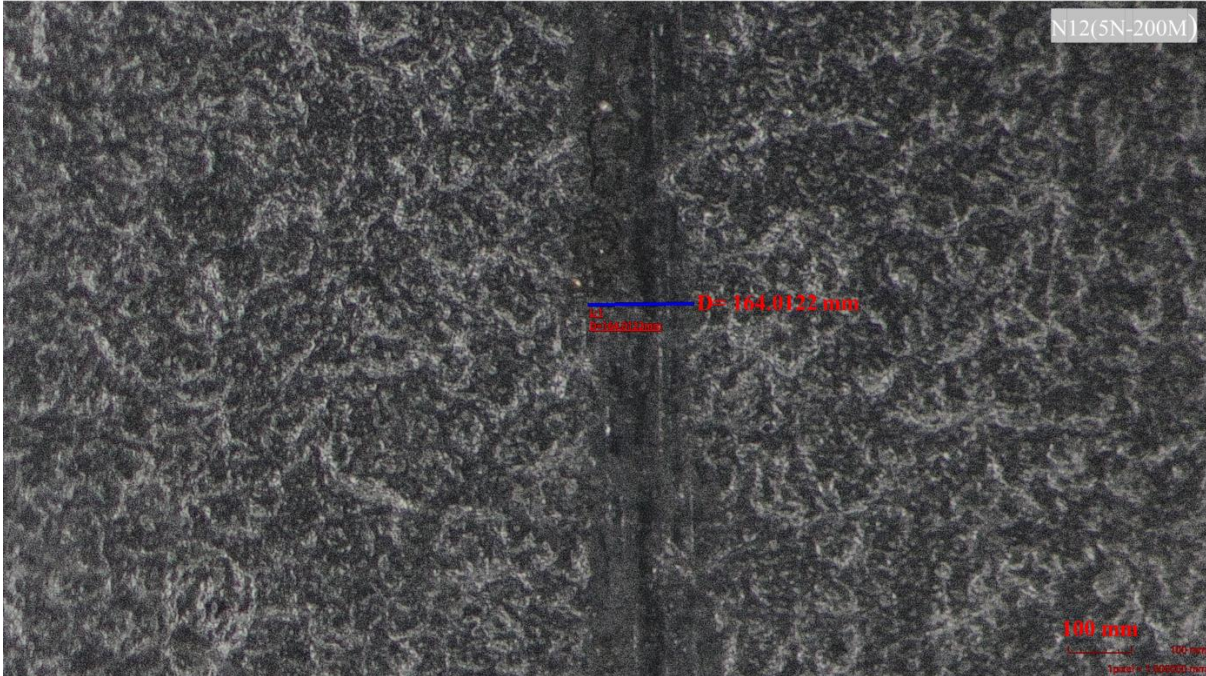
kontrollüdür. Yüzey kenarları oldukça düzgün, iz boyunca malzeme transferi gözlenmemektedir. Bu, fosfatlama sonrası yüzeyin tribolojik dayanımını zamanla koruyabildiğini göstermektedir. Şekil 53, Şekil 54, Şekil 55, Şekil 56 ve Şekil 57’ da 12 numaralı numuneye ait farklı yük ve mesafelerde yapılan aşınma testleri sonrası elde edilen yüzey morfolojileri mikroskopik olarak incelenmiştir.



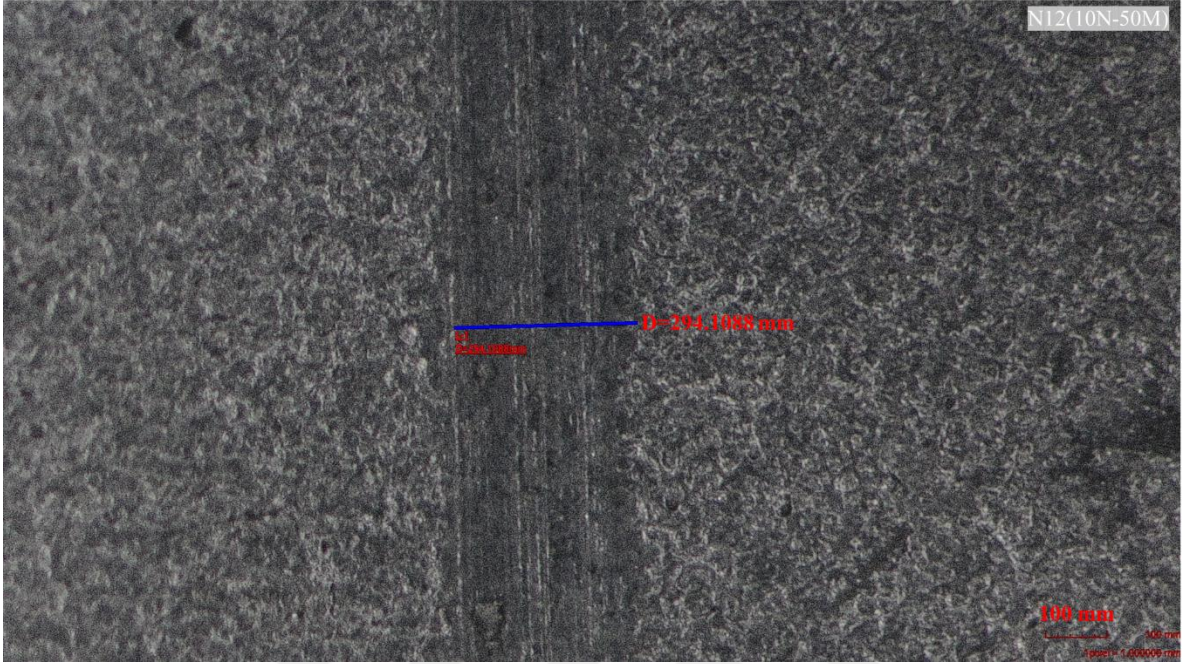
Şekil 53. N12 Numunesinin 5N kuvvet uygulanarak 50 metre mesafedeki aşınma izi görüntüsü



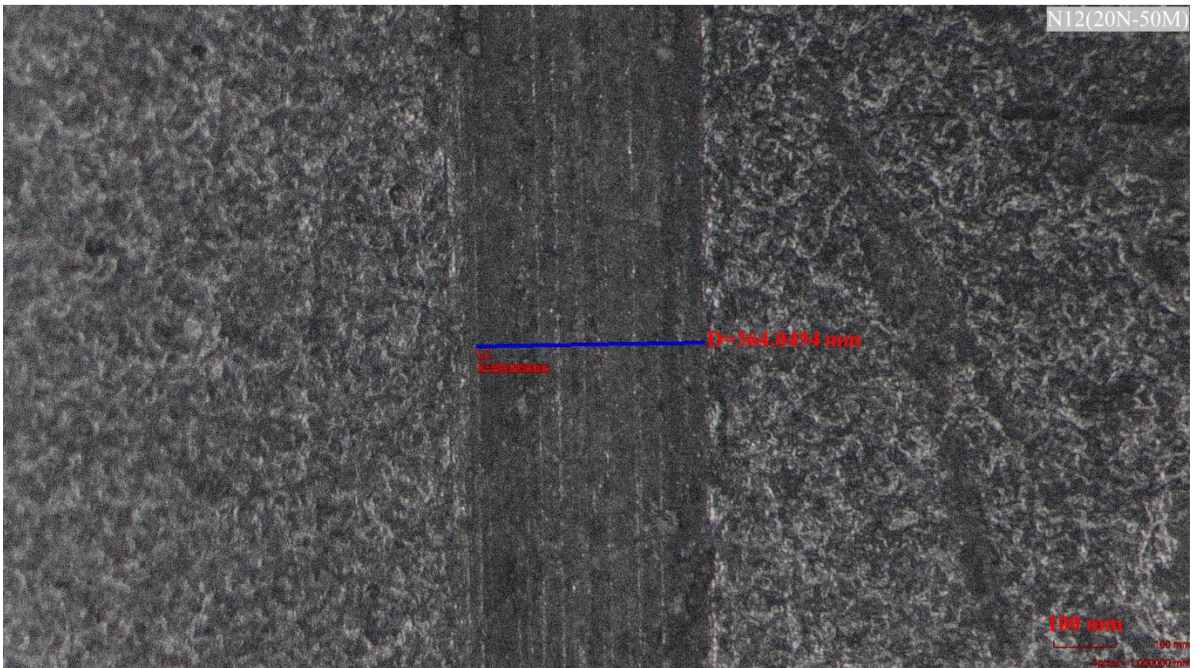
Şekil 54. N12 Numunesinin 5N kuvvet uygulanarak 100 metre mesafedeki aşınma izi görüntüsü



Şekil 55. N12 Numunesinin 5N kuvvet uygulanarak 200 metre mesafedeki aşınma izi görüntüsü



Şekil 56. N12 Numunesinin 10N kuvvet uygulanarak 50 metre mesafedeki aşınma izi görüntüsü



Şekil 57. N12 Numunesinin 20N kuvvet uygulanarak 50 metre mesafedeki aşınma izi görüntüsü

12 Numaralı Numune – Nitrokarbürizasyon + Fosfatlama + Cerakote Kaplama, 12 numaralı numune, yüzey modifikasyonlarının en üst düzeyde uygulandığı parçadır. Cerakote seramik kaplama sayesinde yüzey sertliği artmış, sürtünme katsayısı düşmüş ve yüzey enerjisi minimize edilmiştir. 50 m – 5 N, aşınma izi neredeyse belirsizdir. Hafif bir temas çizgisi dışında deformasyon gözlenmemektedir. Seramik kaplamanın kaydırıcı etkisi çok net hissedilmiştir. Bu, yük aktarımının son derece homojen olduğunu gösterir. 50 m – 10 N, iz görünür hâle gelmişse de hala çok sık ve dar bir çizgidir. Kenar deformasyonu yoktur. Bu, kaplamanın yük altında elastik tepki verdiğini ve çatlama üretmediğini göstermektedir. 50 m – 20 N, yüksek yük koşulunda bile derinlemesine izler oluşmamış, yüzey bozulması sınırlı kalmıştır. Hafif film çatlağı belirtileri olabilir, ancak bu çatlaklar delaminasyona yol açmamıştır. Bu, kaplamanın yük taşıma kapasitesinin oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. 100 m – 5 N, zamanla ilerleyen temas boyunca iz genişlemesi gözlenmemektedir. Aşınma direnci korunmuştur. Seramik film, kararlı tribolojik davranış göstermektedir. 200 m – 5 N, iz çok hafiftir ve kenarları düzgündür. Belirgin bir birikme, çentik ya da delaminasyon gözlenmez. Bu, seramik kaplamanın uzun süreli sürtünmeye karşı oldukça dayanıklı olduğunu kanıtlamaktadır.

Sonuç olarak, yüzey modifikasyonu arttıkça aşınma direnci belirgin biçimde artmıştır. Nitrokarbürizasyon tek başına yeterli değilken, fosfatlama bu sistemi desteklemiş, Cerakote ise optimum koruma sağlamıştır. Seramik film kaplama hem yüksek yüklere karşı hem de uzun süreli temaslara karşı en dayanıklı yapıyı sunmuştur. Numunelerin aşınma testlerinde maruz kaldığı kütle kayıpları ve hesaplanan özgül aşınma değerleri aşağıda sunulmuştur (Tablo 10).

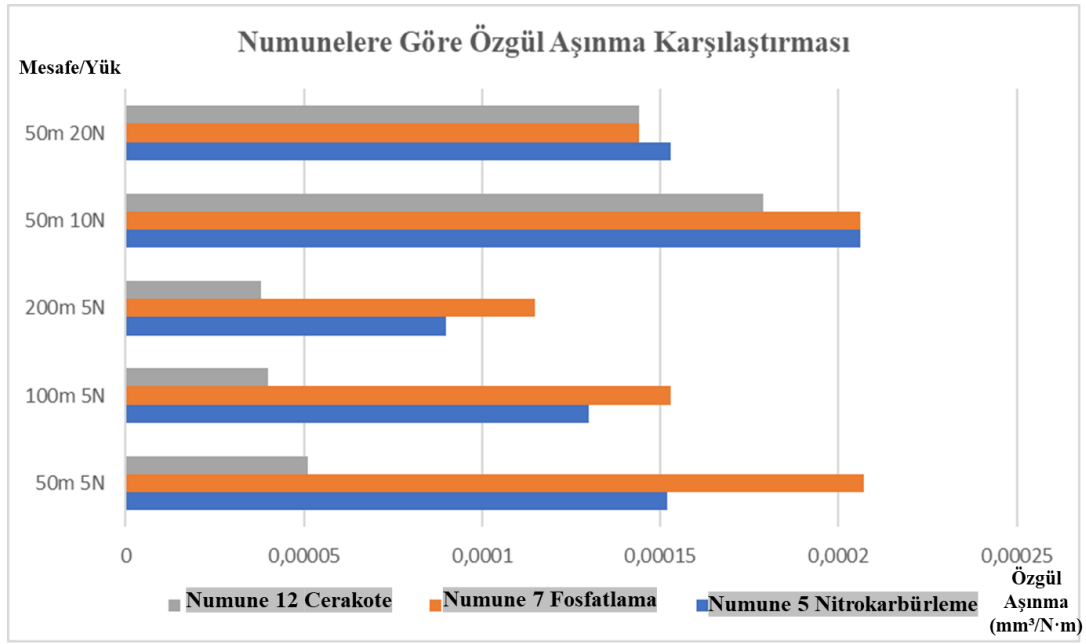
Tablo 10. Özgül aşınma miktarları

Numune	Yük (N)	Yol (m)	Kütle Kaybı (mg)	Özgül Aşınma (mm ³ /N·m)
5	5	50	0.3	1.53×10^{-4}
	5	100	0.5	1.27×10^{-4}
	5	200	0.7	8.92×10^{-5}
	10	50	0.8	2.04×10^{-4}
	20	50	1.2	1.53×10^{-4}
7	5	50	0.4	2.04×10^{-4}
	5	100	0.6	1.53×10^{-4}
	5	200	0.9	1.15×10^{-4}

	10	50	0.8	2.04×10^{-4}
	20	50	1.1	1.40×10^{-4}
12	5	50	0.2	5.10×10^{-5}
	5	100	0.3	3.82×10^{-5}
	5	200	0.6	3.82×10^{-5}
	10	50	0.7	1.78×10^{-4}
	20	50	1.1	1.40×10^{-4}

5 Numaralı numune (Nitrokarbürizasyon), mikroskobik olarak; düşük yükte düzgün aşınma izleri, artan yükte ploughing ve kenar deformasyonları tespit edilmiştir. Sayısal olarak; özgül aşınma değeri 200 m yol sonrası azalmış, yüzeyin aşınmaya karşı belli bir direnç geliştirdiği gözlenmiştir. 7 Numaralı Numune (Nitrokarbürizasyon + Fosfatlama), Mikroskobik olarak; daha dar aşınma izleri, daha az kenar yırtılması ve daha düzgün ploughing yapısı mevcuttur. Sayısal olarak; genel olarak 5 numaraya kıyasla daha düşük aşınma miktarı sergilemiştir. Fosfatlama yüzeyde yağlayıcı etkisi yaratmıştır. 12 Numaralı Numune (Nitrokarbürizasyon + Fosfatlama + Cerakote Kaplama), Mikroskobik olarak; yüzeyde aşınma izi çok hafif ve neredeyse görünmezdir. Kaplama, yüksek yükte bile yüzeyi çatlamaya karşı korumuştur. Sayısal olarak; en düşük özgül aşınma değerlerine sahip numunedir. Özellikle 5 N yük altında seramik film sayesinde yüzey bozulması minimumda kalmıştır. Bu çalışmada 4140 çeliği üzerine uygulanan farklı yüzey modifikasyonlarının tribolojik performansa etkisi incelenmiştir. Aşınma testleri sonucunda elde edilen bulgular, aşağıda özetlenmiştir: Yüzey işlemi türü, malzemenin aşınma direnci üzerinde belirleyici bir etkindir. Nitrokarbürizasyon, yüzey sertliğini artırmış ancak yüksek yükler altında deformasyon izleri oluşmuştur. Fosfatlama, sürtünmeyi azaltmış, adhezyon tipi aşınmayı sınırlamış ve difüzyon zonunun performansını iyileştirmiştir. Cerakote kaplama, yüzey üzerinde homojen bir bariyer oluşturmuş, seramik özellikleri sayesinde hem düşük hem de yüksek yüklerde en düşük aşınma değerlerini sağlamıştır. Özgül aşınma miktarı bakımından; 12 numaralı numune tüm koşullarda en iyi performansı sergilemiş, ardından 7 ve 5 numaralı numuneler sıralanmıştır. Mikroskobik iz morfolojisi ile sayısal veriler yüksek uyum göstermektedir. Görseldeki ploughing, deformasyon ve film çatlamaları, hesaplanan özgül aşınma değerleriyle örtüşmektedir. Seramik film kaplama ile desteklenmiş yüzey modifikasyonlarının, metalik malzemelerde yüksek performanslı tribolojik özellikler sağladığı; özellikle düşük sürtünme katsayısı ve düşük hacimsel

kayıplar sayesinde aşınma mekanizmalarının sınırlandığı ortaya konmuştur. Özellikle dar toleransla çalışan savunma sanayi parçaları veya yüksek sürtünmeye maruz bileşenler için seramik film destekli yüzey işlemleri önerilmektedir. Şekil 58’de aşınma testi numunelerine göre özgül aşınma değerlerinin mesafe/yük ve özgül aşınma değerleri gösterilmiştir.



Şekil 58. Numunelere göre özgül aşınma karşılaştırılması

12 numaralı numune (Cerakote kaplamalı), neredeyse tüm koşullarda en düşük özgül aşınma değerlerine sahiptir. Bu, yüzey kaplamasının yüksek performansını açıkça göstermektedir. 5 numaralı numune (sadece nitrokarbür), özellikle düşük yüklü uzun mesafe testlerinde daha fazla aşınma göstermiştir. 7 numaralı numune (fosfatlama), her iki uç arasında orta seviye bir performans sergileyerek aşınmayı azaltmıştır ama seramik kaplama kadar başarılı değildir. 50 m – 10 N ve 20 N koşullarında üç numune arasındaki farklar daha belirgindir ve yük altında kaplamalı yüzeylerin stabilitesi ön plana çıkmıştır.

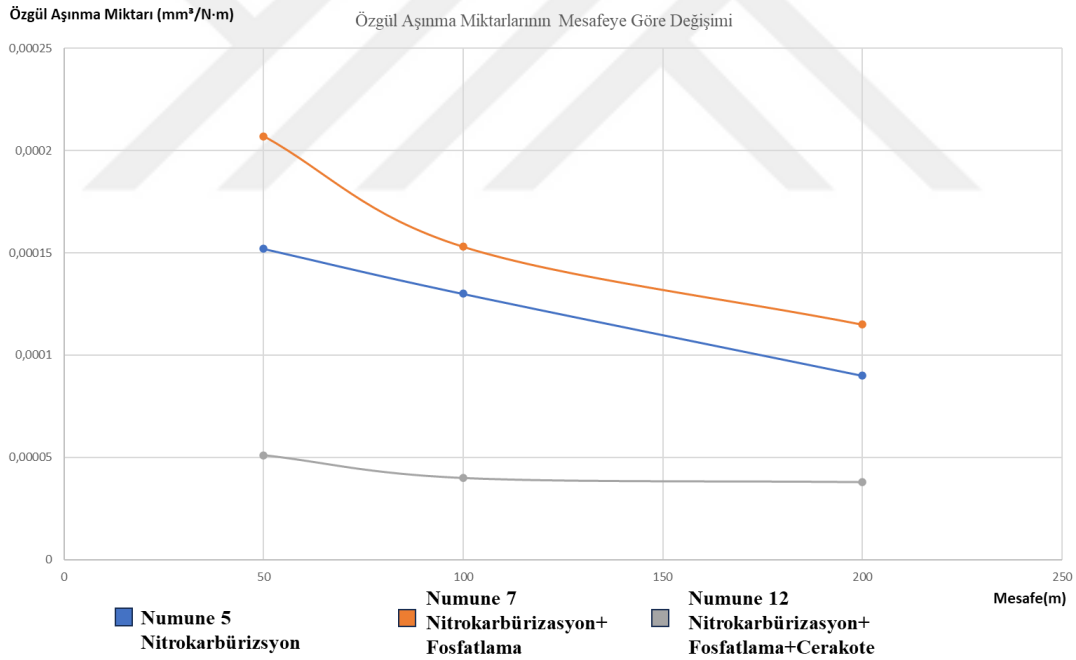
Aşınma test sonuçlarına göre, yalnızca nitrokarbürizasyon uygulanmış numune (N5) orta düzeyde aşınma direnci sergilemiş; yük arttıkça ploughing ve kenar deformasyonları belirginleşmiştir. Nitrokarbürizasyon + Fosfatlama uygulanan numune (N7), fosfat tabakanın kayıcı ve mikro-yapışmayı önleyici etkisiyle daha iyi performans göstermiştir.

Nitrokarbürizasyon + Fosfat + Cerakote kaplanan numune (N12), en yüksek aşınma direncine sahip olmuş; özellikle düşük yüklerde neredeyse iz bırakmayan yüzey davranışı sergilemiştir.

Özgül aşınma miktarı açısından:

- N5 numunesi (sadece nitrokarbürizasyon): $50 \text{ m} - 5 \text{ N}$ testinde $\approx 1.53 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$
- N7 numunesi (fosfat destekli): $\approx 2.04 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$
- N12 numunesi (ince film seramik kaplama): $\approx 5.10 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$

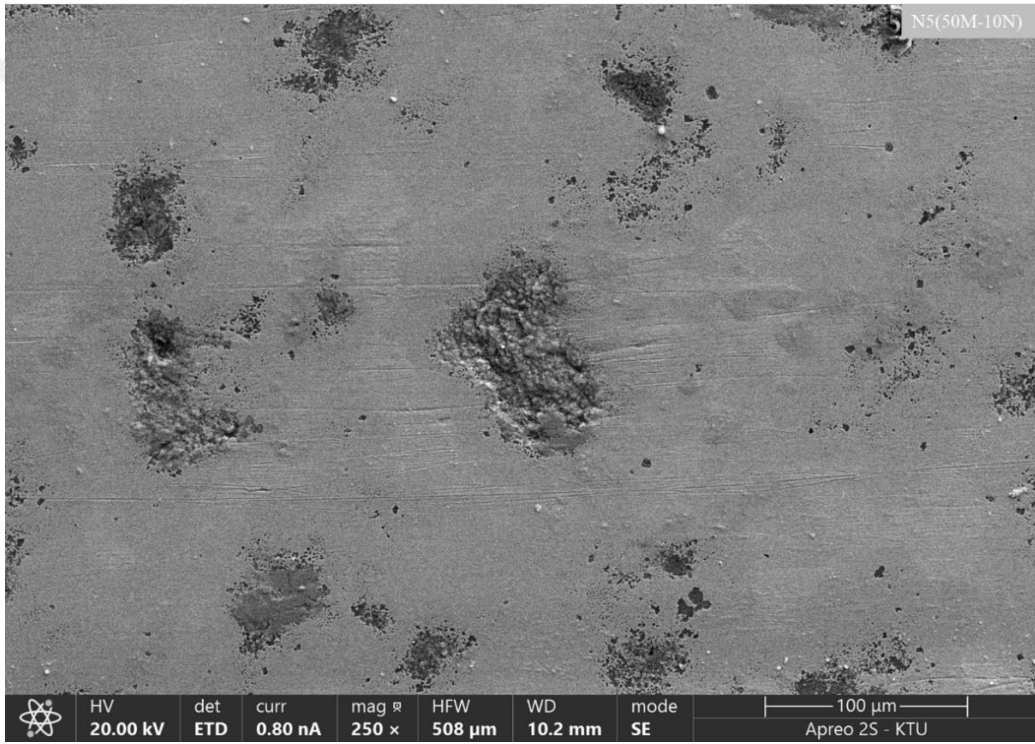
Bu veriler, çok katmanlı yüzey işlemlerinin sinerjik etkisiyle aşınma direncinin belirgin şekilde iyileştiğini kanıtlamaktadır. Şekil 59'de aşınma testi uygulanan N5, N7 ve N12 numunelerine ait özgül aşınma miktarının mesafeye göre değişimi gösterilmektedir.



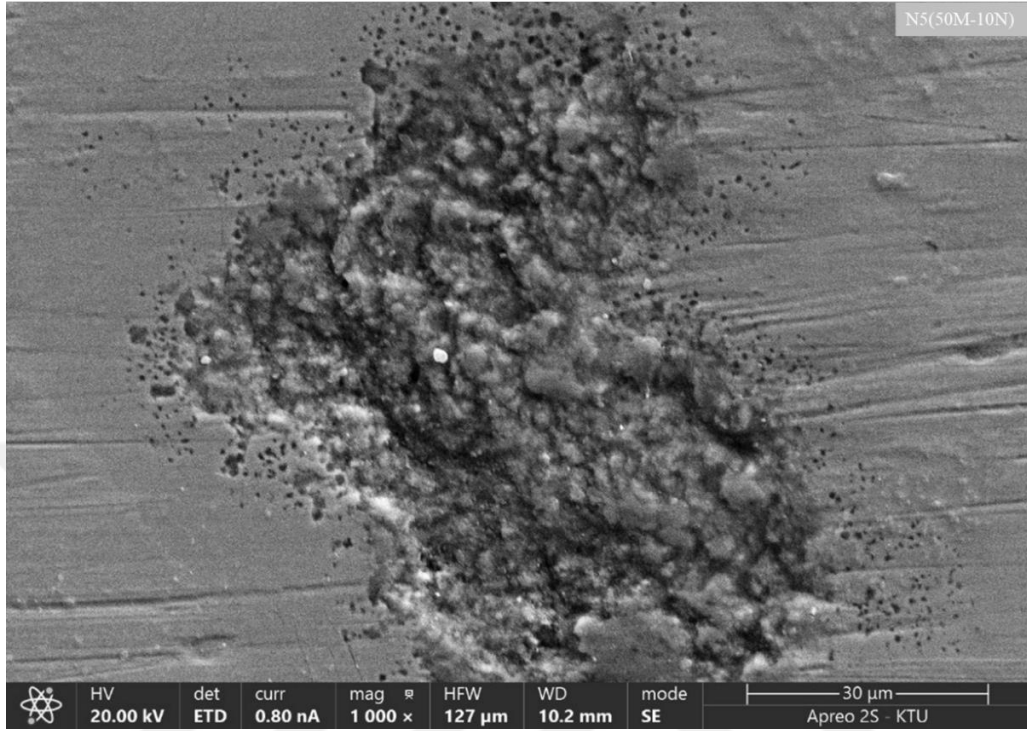
Şekil 59. Özgül aşınma miktarlarının mesafeye göre değişimi

Yük arttıkça yüzeydeki deformasyon mekanizmalarının türü değişmiş; düşük yüklerde adhezyon ve hafif abrazyon, yüksek yüklerde ise ploughing ve plastik deformasyonlar baskın hale gelmiştir.

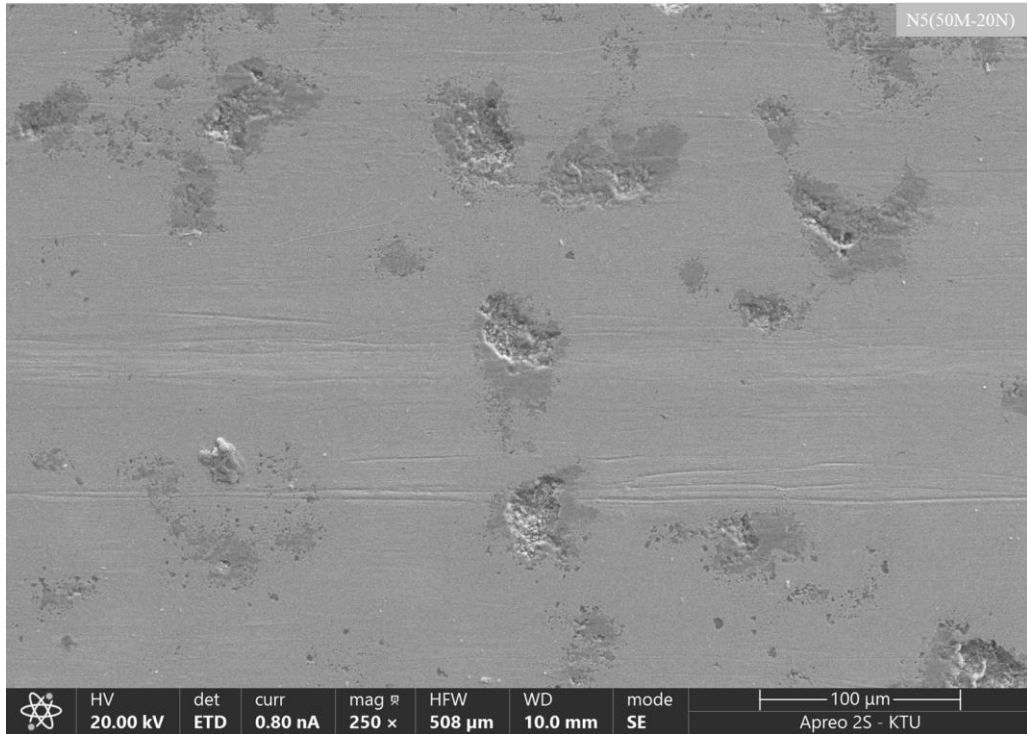
Şekil 60, Şekil 61, Şekil 62, Şekil 63, Şekil 64, Şekil 65, Şekil 66, Şekil 67, Şekil 68, Şekil 69 incelediğimizde yüzeyde lokalize gözenek oluşumları ve düzensiz partikül kümelenmeleri gözlenmiştir. Yüzey bütünlüğü zayıf olup, tabakanın kompakt bir şekilde oluşmadığı, yer yer çukurcuk ve çıkıntılar içerdiği tespit edilmiştir. Bu bölgeler, aşınma sırasında sıvama ve kazıma tipi malzeme yer değiştirmelerine zemin hazırlayabilecek zayıf noktalar.



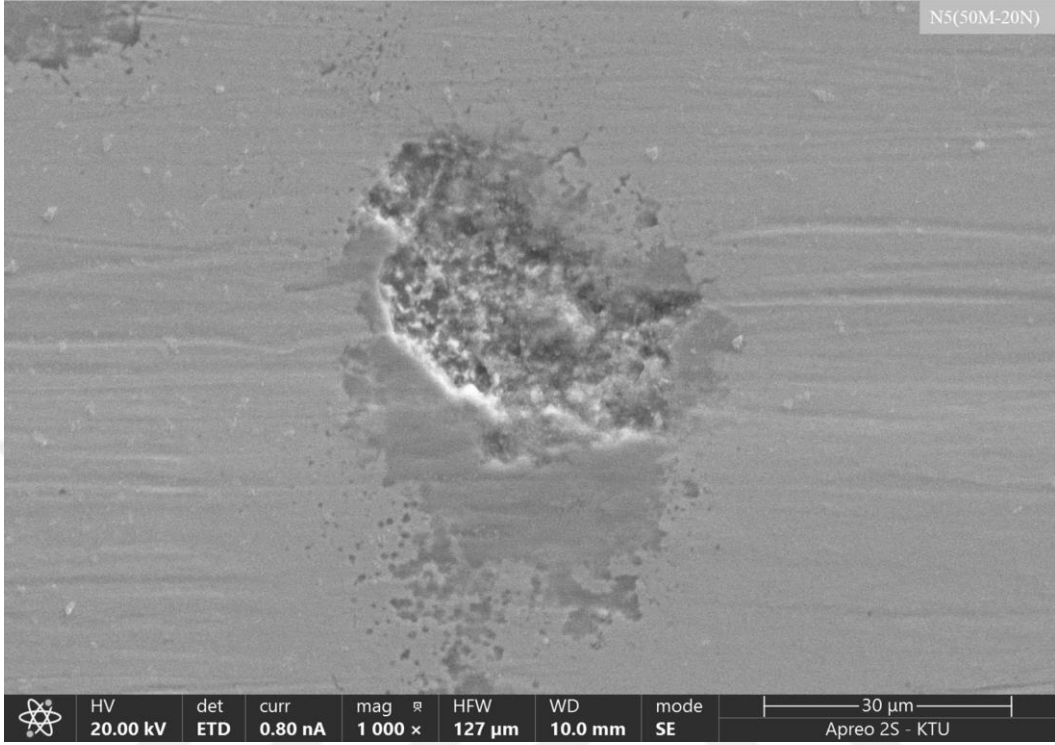
Şekil 60. N5 numunesinin 50M-10N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü



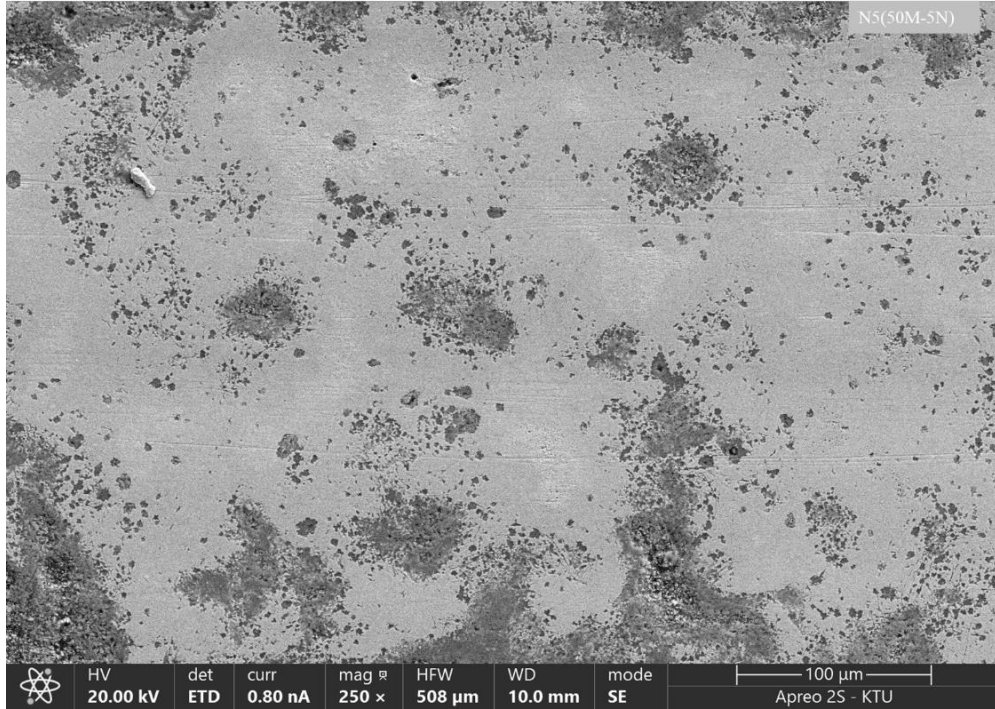
Şekil 61. N5 numunesinin 50M-10N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü



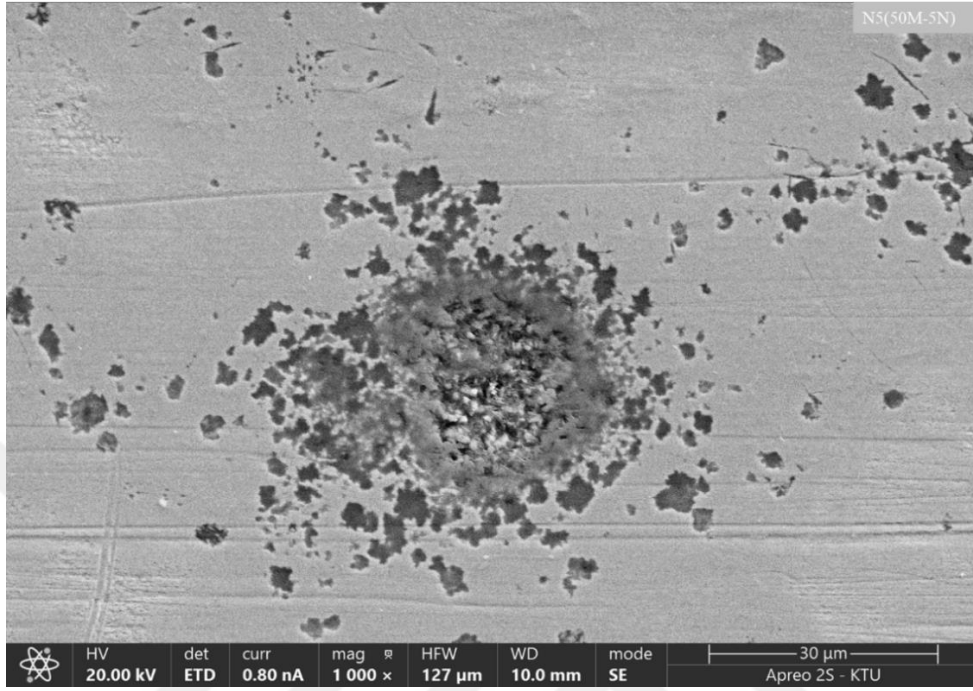
Şekil 62. N5 numunesinin 50M-20N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü



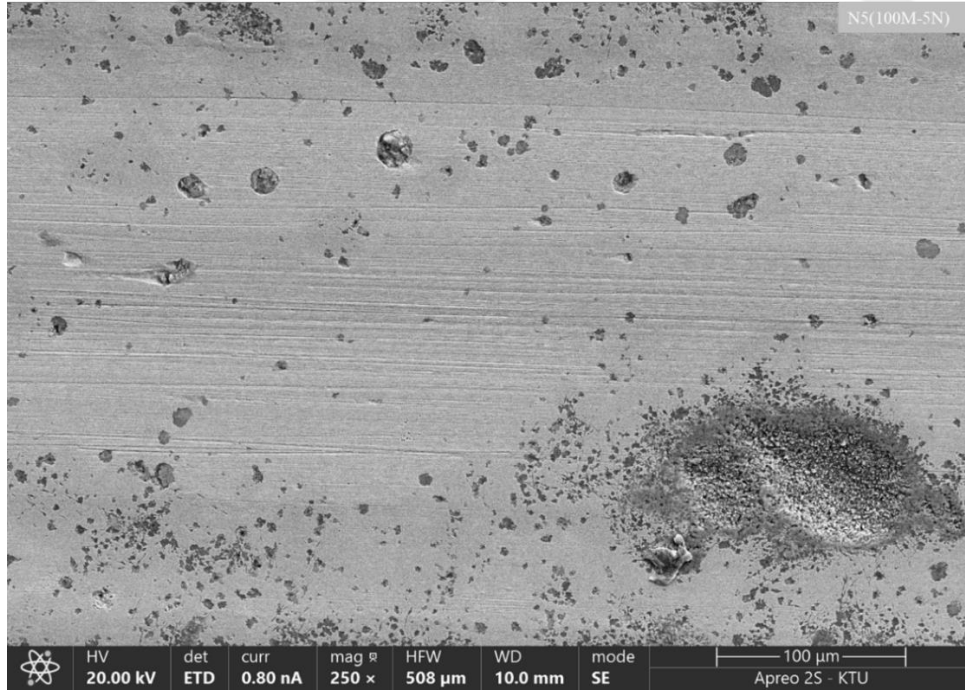
Şekil 63. N5 numunesinin 50M-20N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü



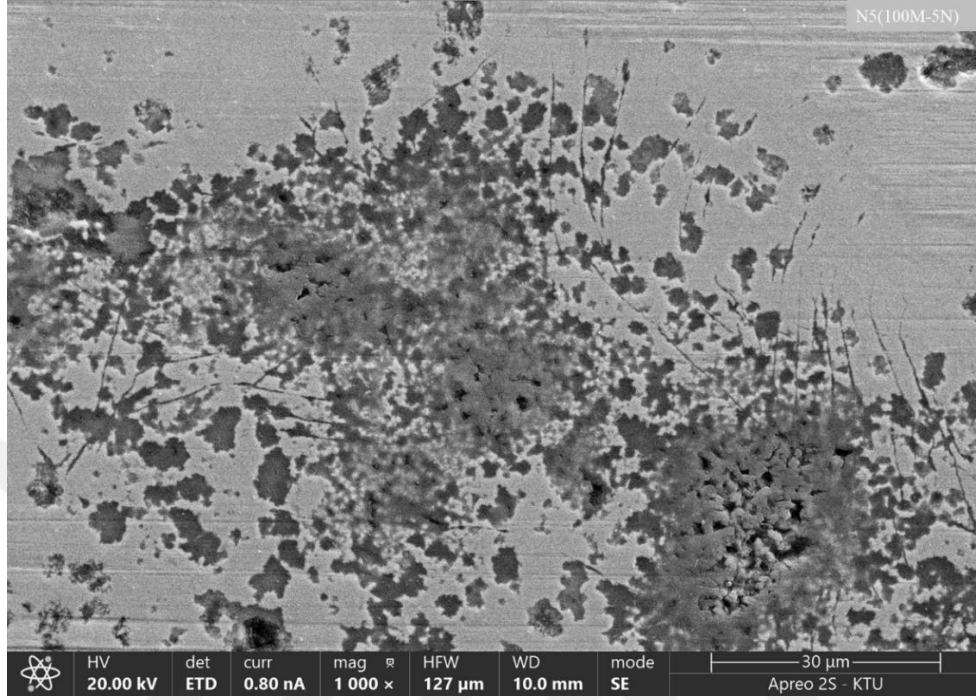
Şekil 64. N5 numunesinin 50M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü



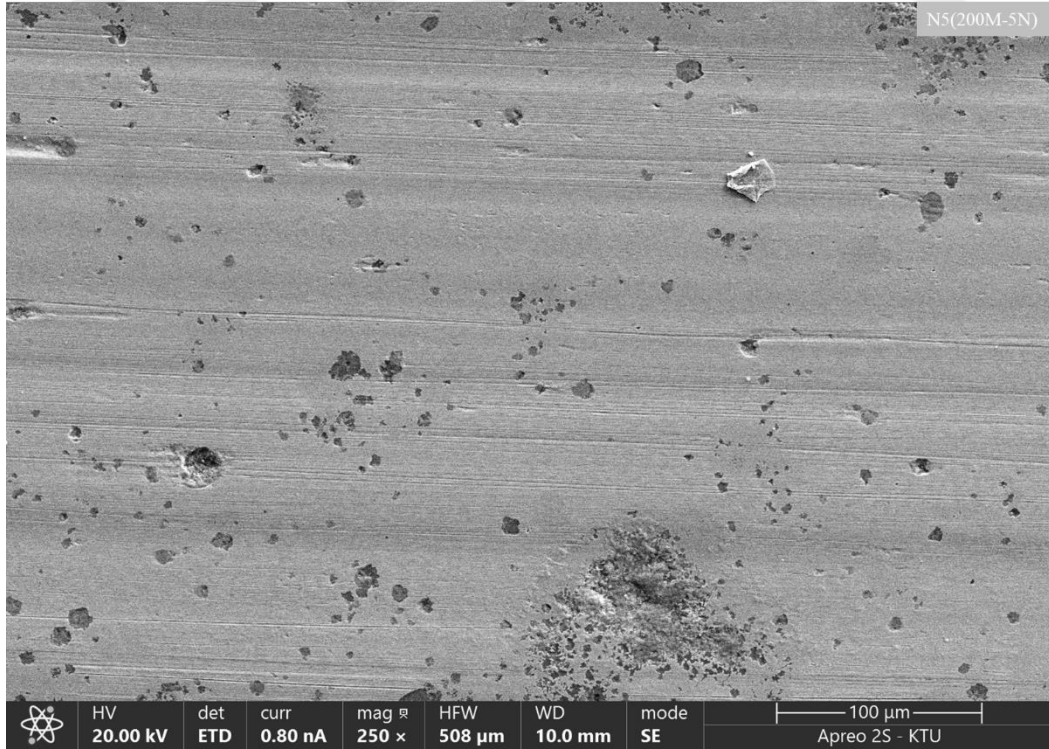
Şekil 65. N5 numunesinin 50M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü



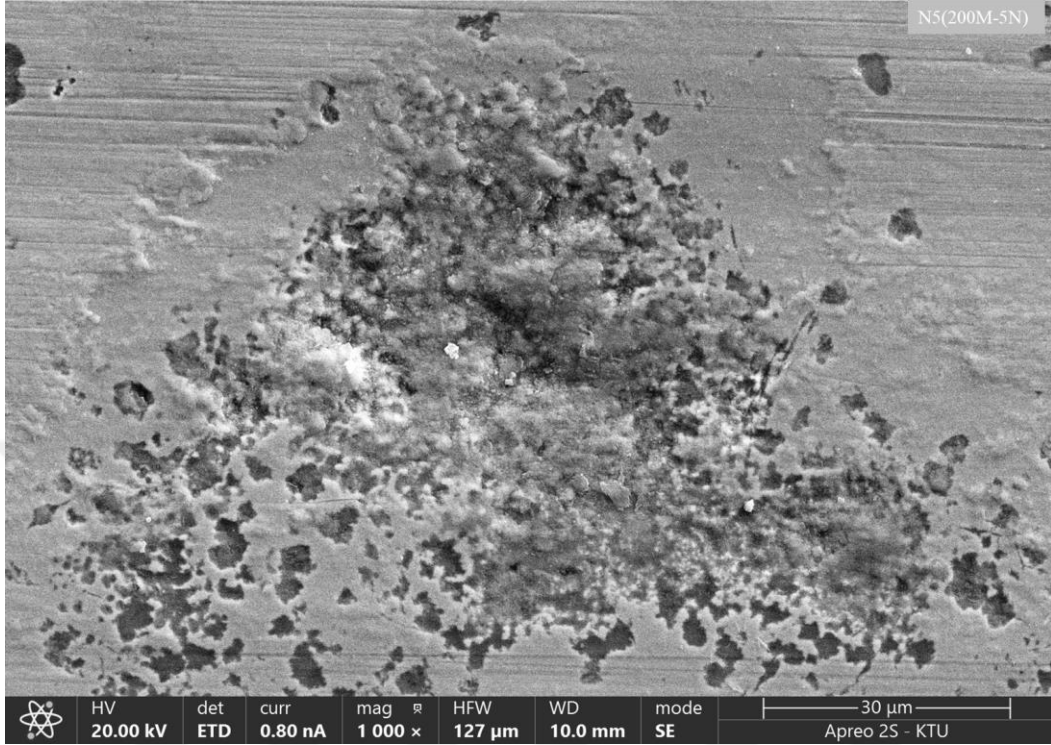
Şekil 66. N5 numunesinin 100M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü



Şekil 67. N5 numunesinin 100M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü

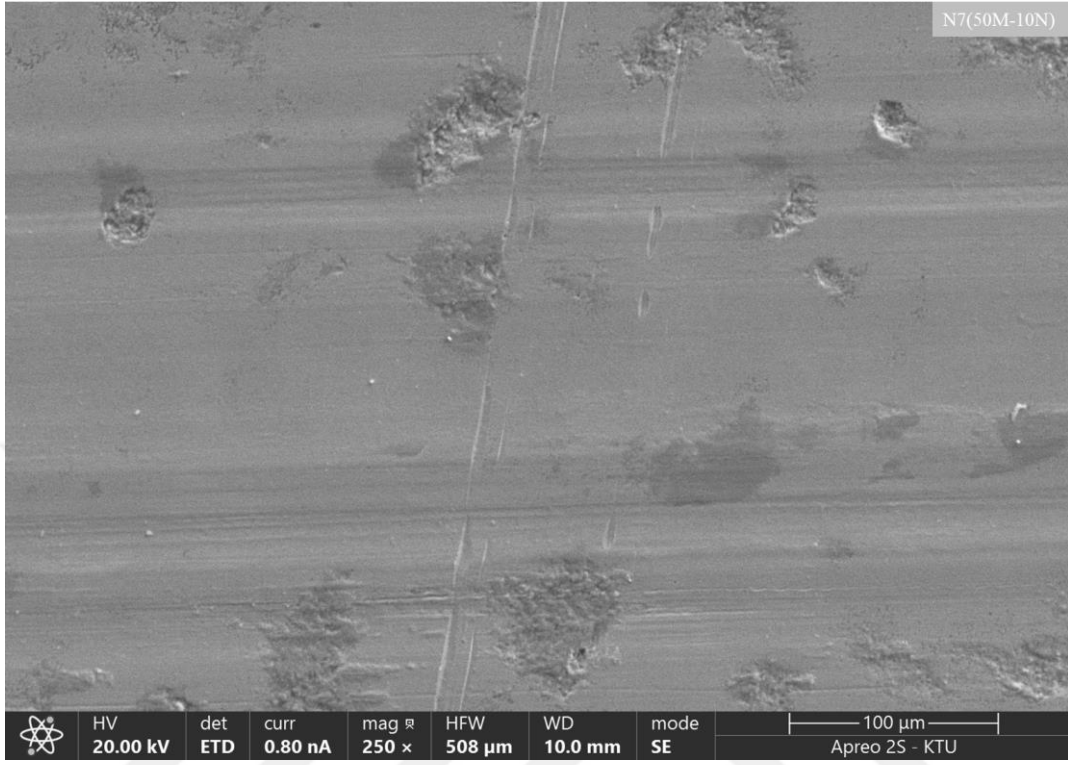


Şekil 68. N5 numunesinin 200M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü

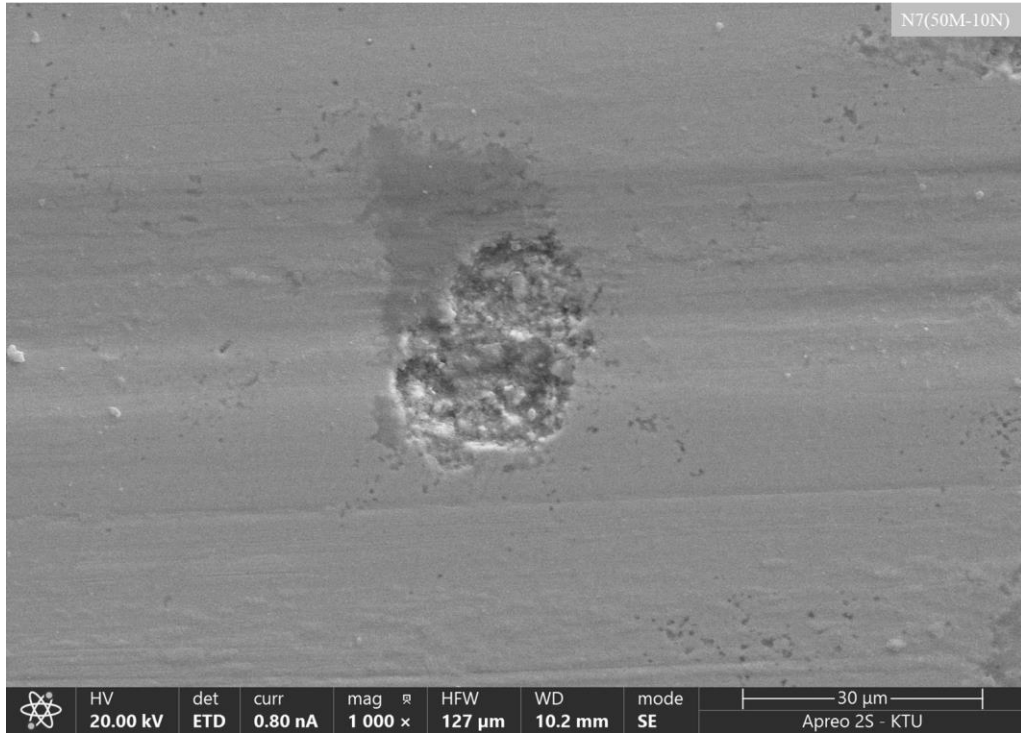


Şekil 69. N5 numunesinin 200M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü

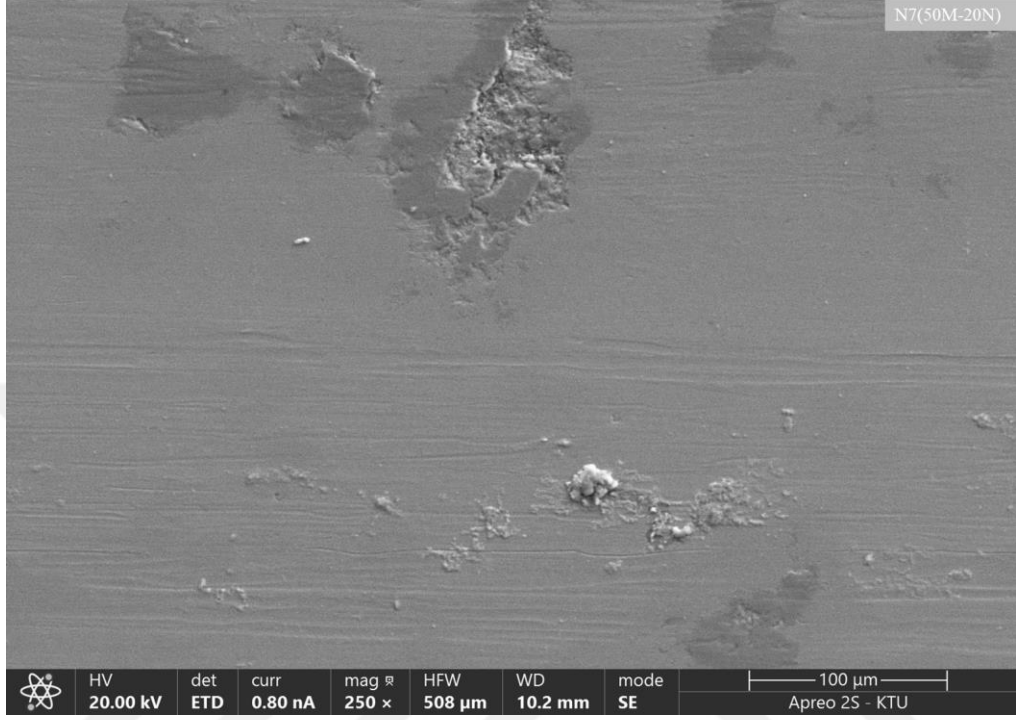
Şekil 70, Şekil 71, Şekil 72, Şekil 73, Şekil 74, Şekil 75, Şekil 76, Şekil 77, Şekil 78, Şekil 79 incelediğimizde fosfatlama ile yüzeyde iri kristal yapılar oluşmuş, ancak süreklilik tam sağlanamamıştır. Bazı bölgelerde fosfat kristallerinin yüzeye yeterince bağlanmadığı, bunun sonucunda delaminasyon başlangıç bölgeleri meydana geldiği gözlemlenmiştir. Kristal yapıların kenar bölgelerinde mikro-çatlaklar ve gevşek partikül yapıları tespit edilmiştir. Bu alanlar deformasyon ve aşınma sırasında kırılma/soyulma davranışına yol açabilir.



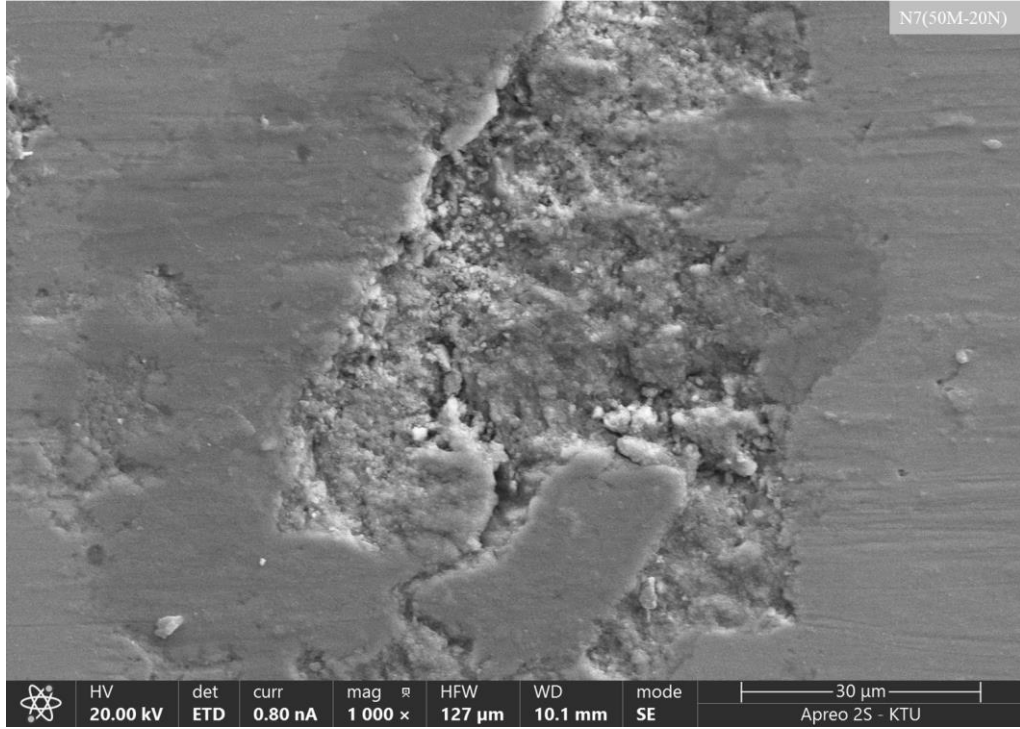
Şekil 70. N7 numunesinin 50M-10N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü



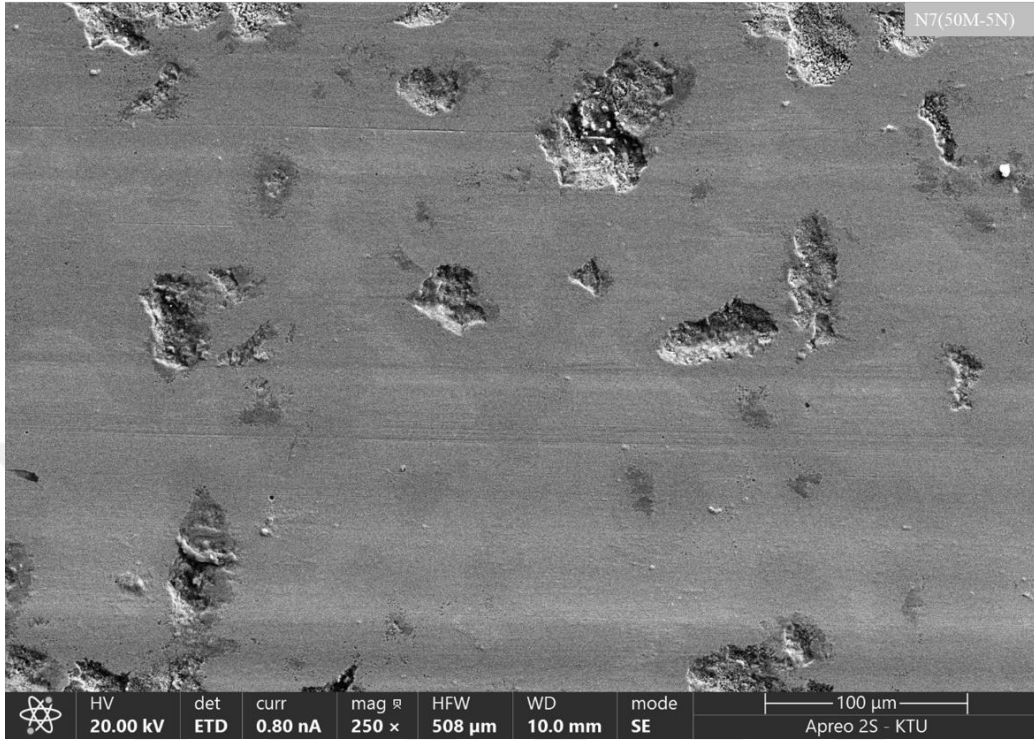
Şekil 71. N7 numunesinin 50M-10N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü



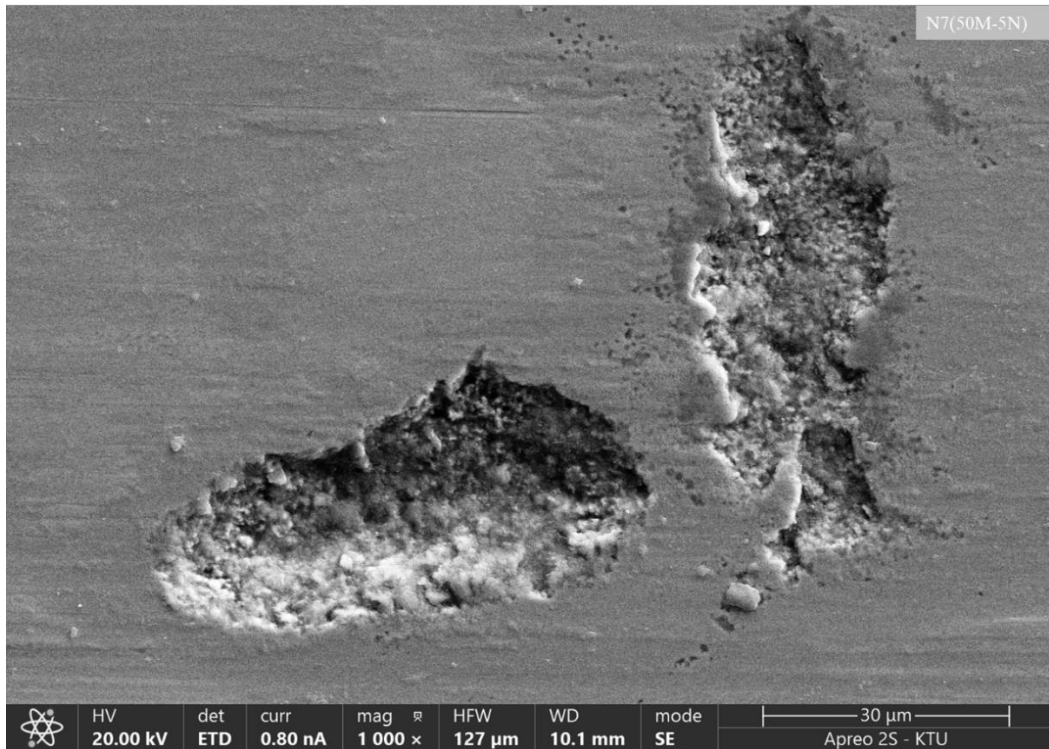
Şekil 72. N7 numunesinin 50M-20N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü



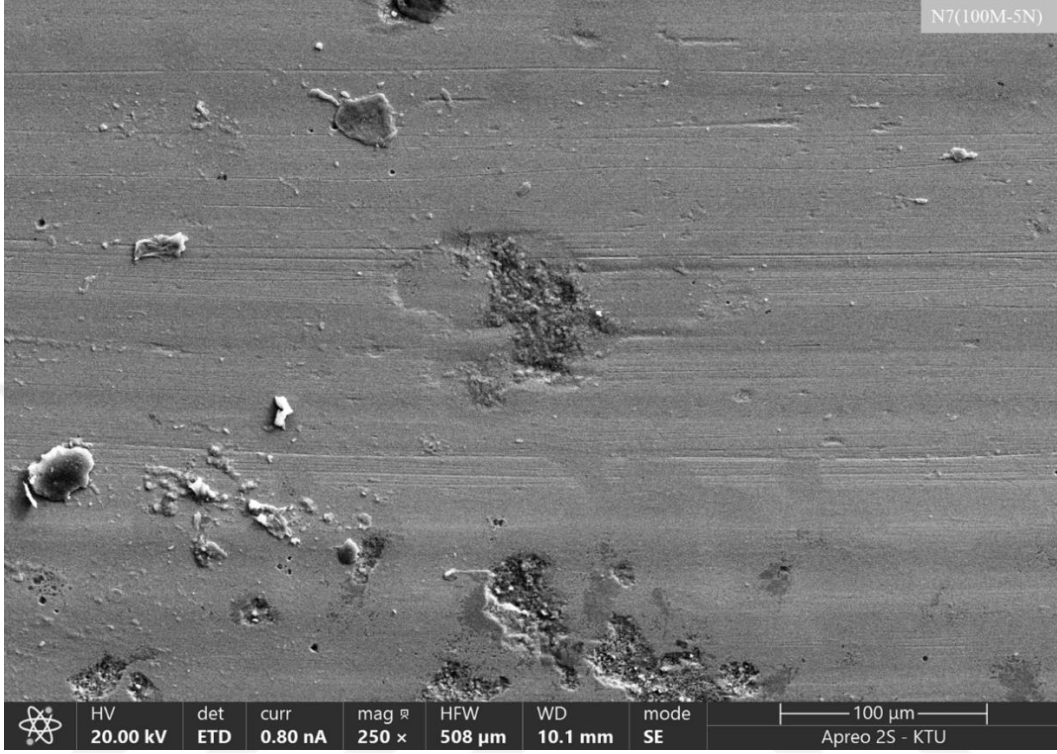
Şekil 73. N7 numunesinin 50M-20N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü



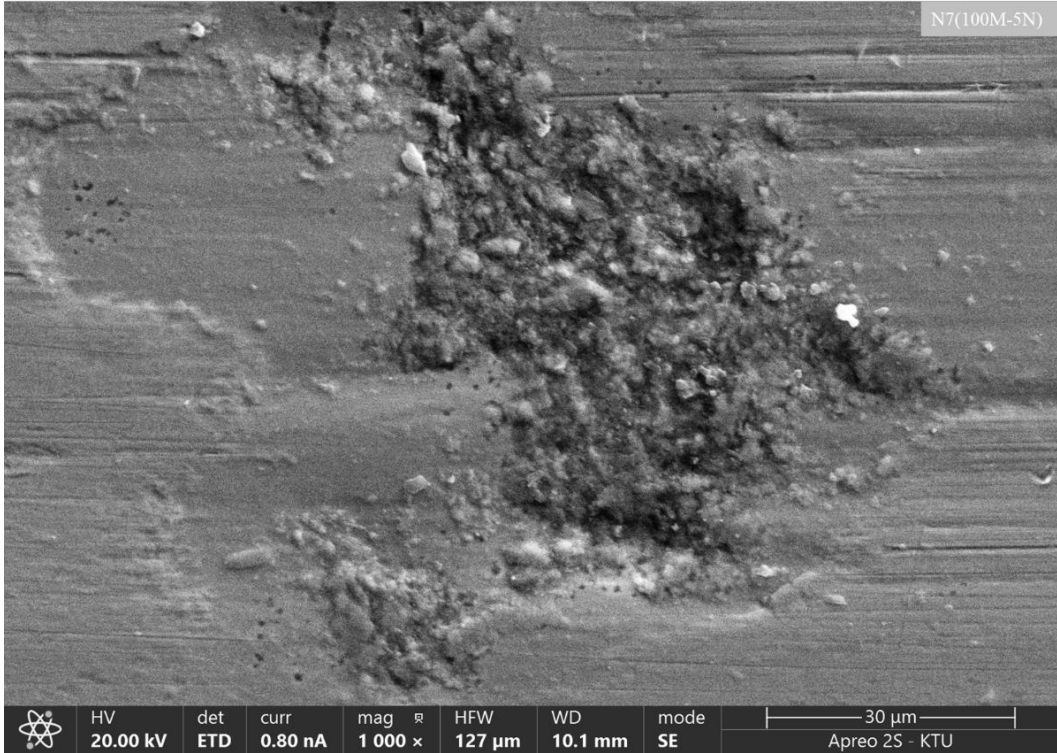
Şekil 74. N7 numunesinin 50M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü



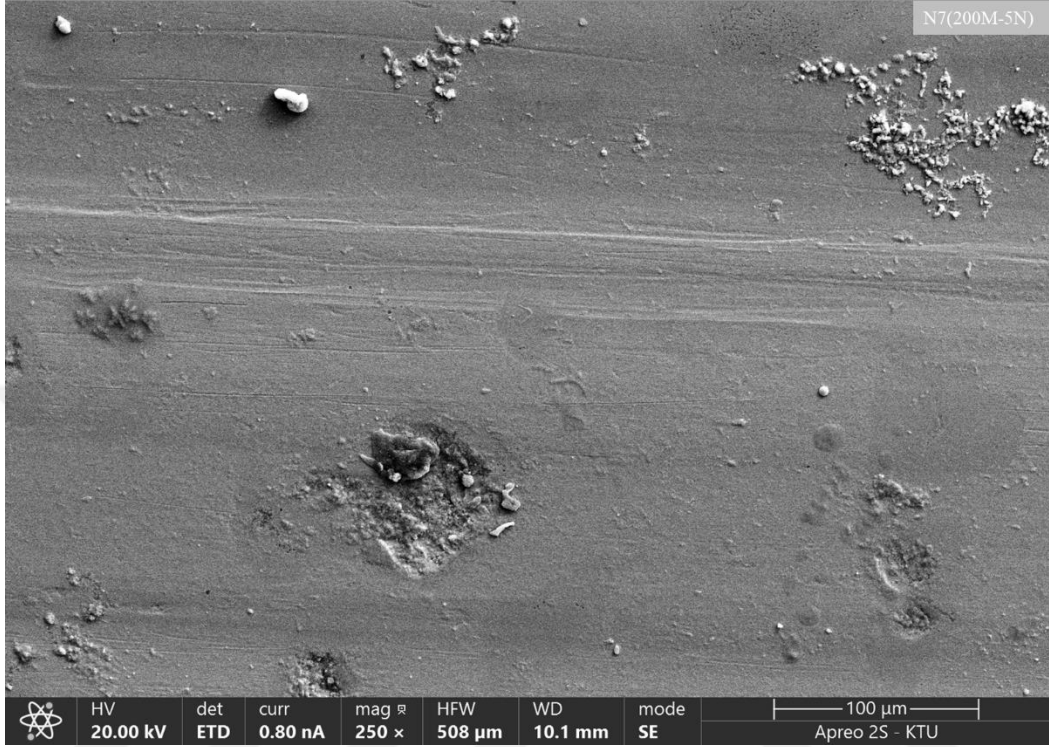
Şekil 75. N7 numunesinin 50M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü



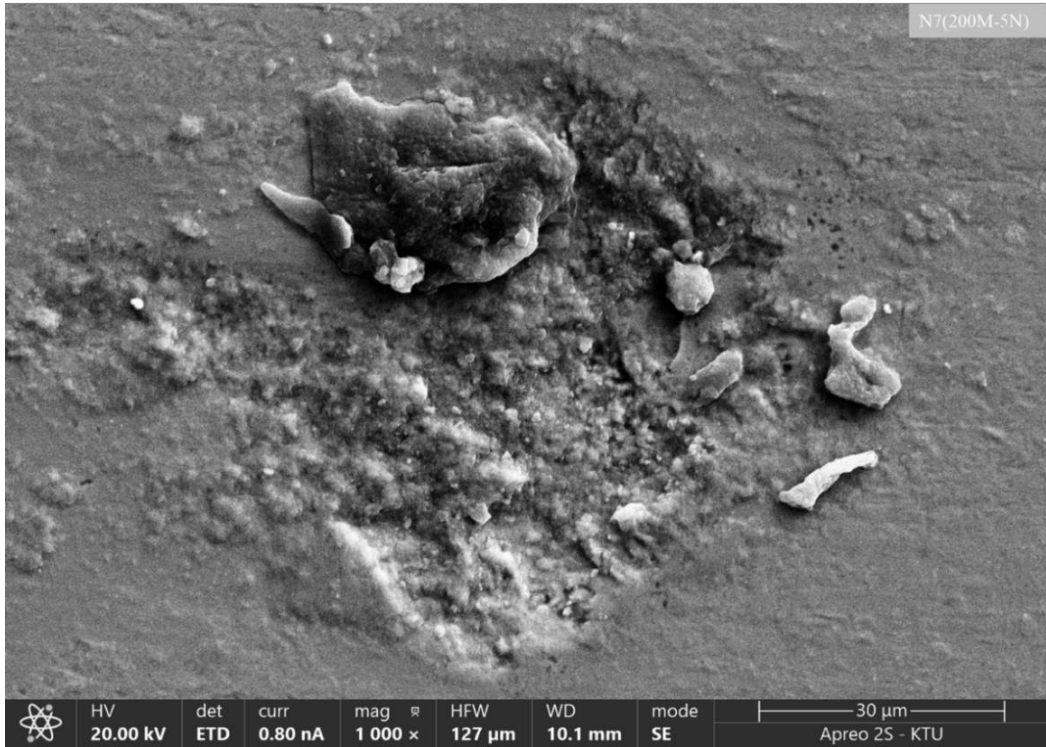
Şekil 76. N7 numunesinin 100M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü



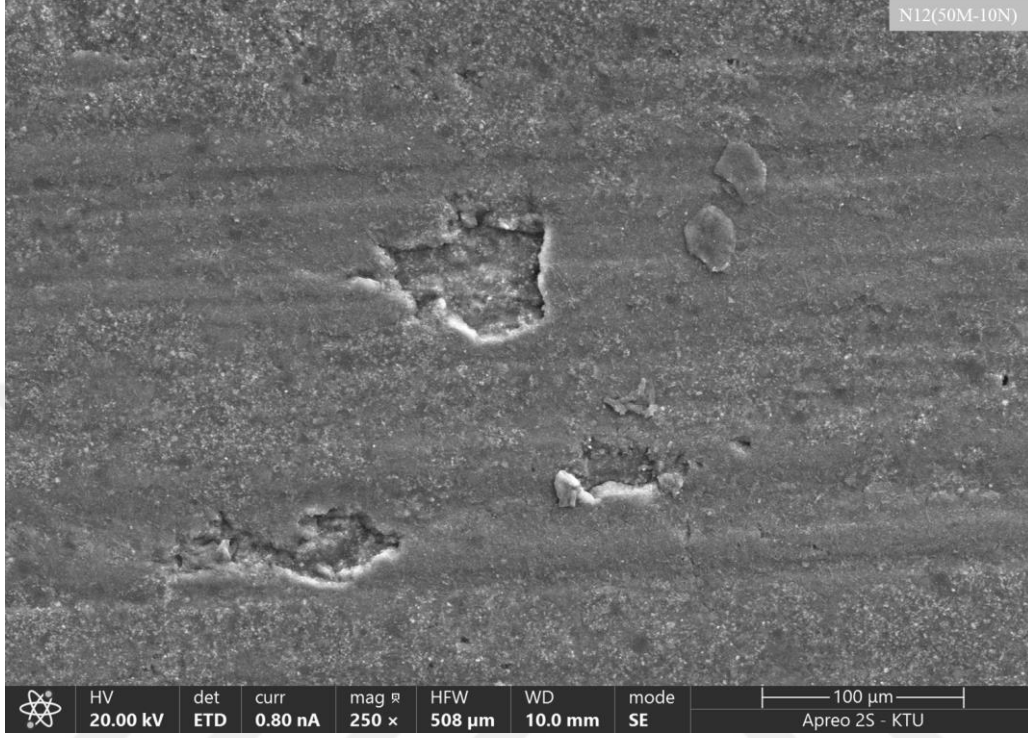
Şekil 77. N7 numunesinin 100M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü



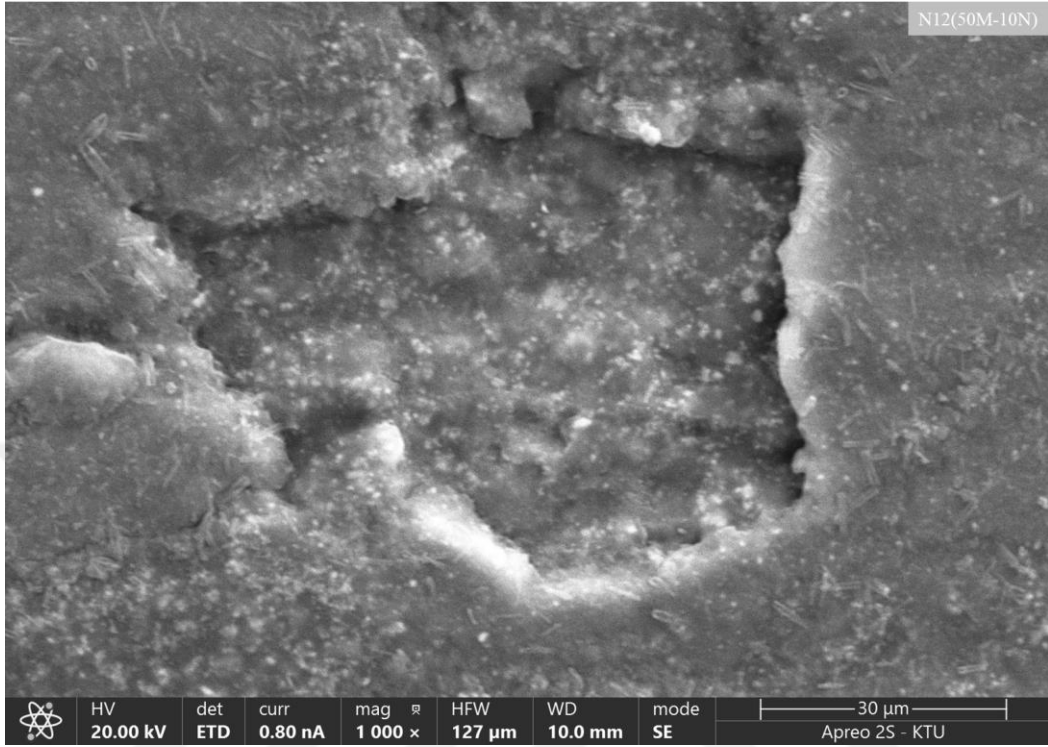
Şekil 78. N7 numunesinin 200M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü



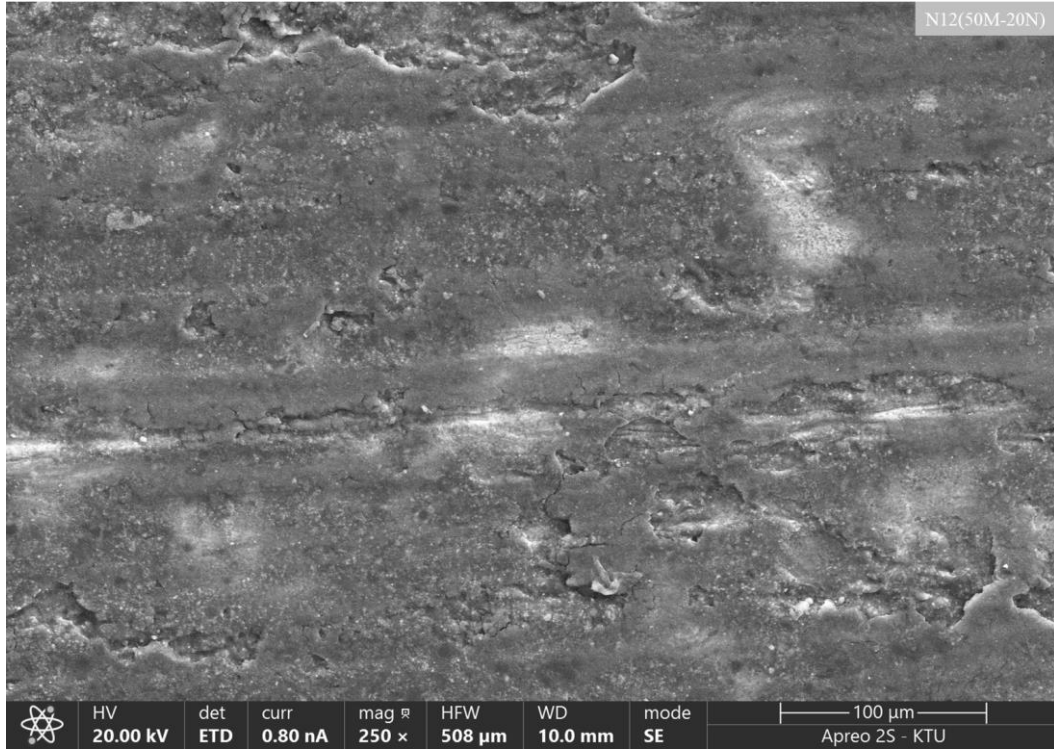
Şekil 79. N7 numunesinin 200M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü



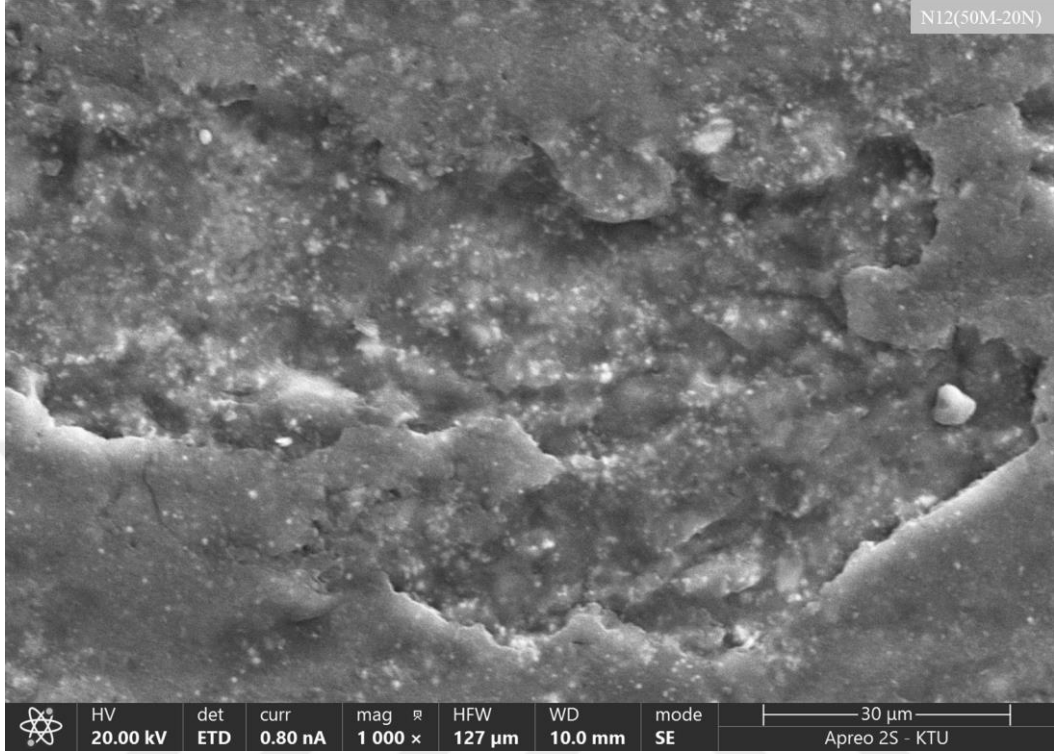
Şekil 80. N12 numunesinin 50M-10N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü



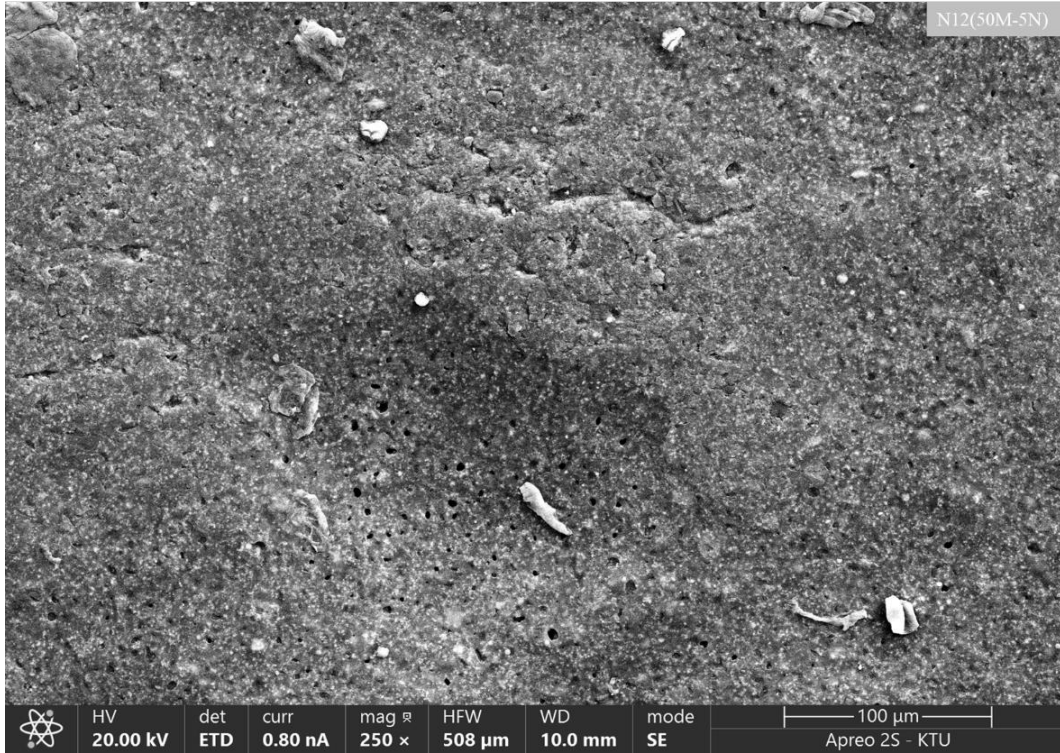
Şekil 81. N12 numunesinin 50M-10N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü



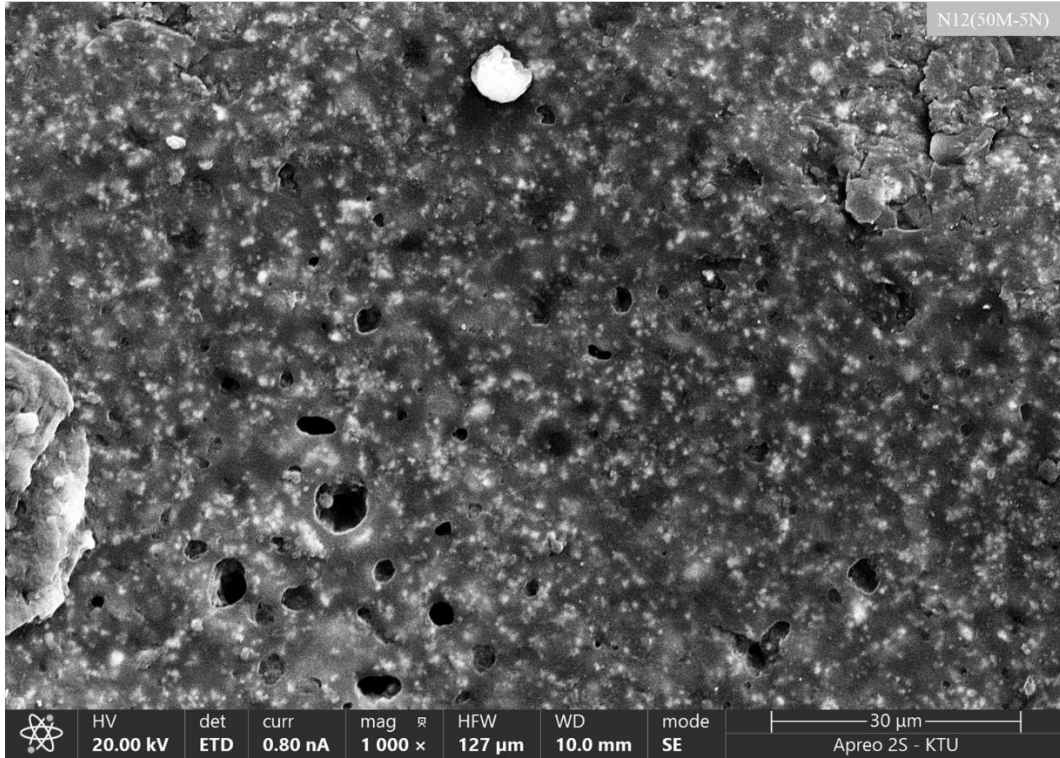
Şekil 82. N12 numunesinin 50M-20N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü



Şekil 83. N12 numunesinin 50M-20N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü



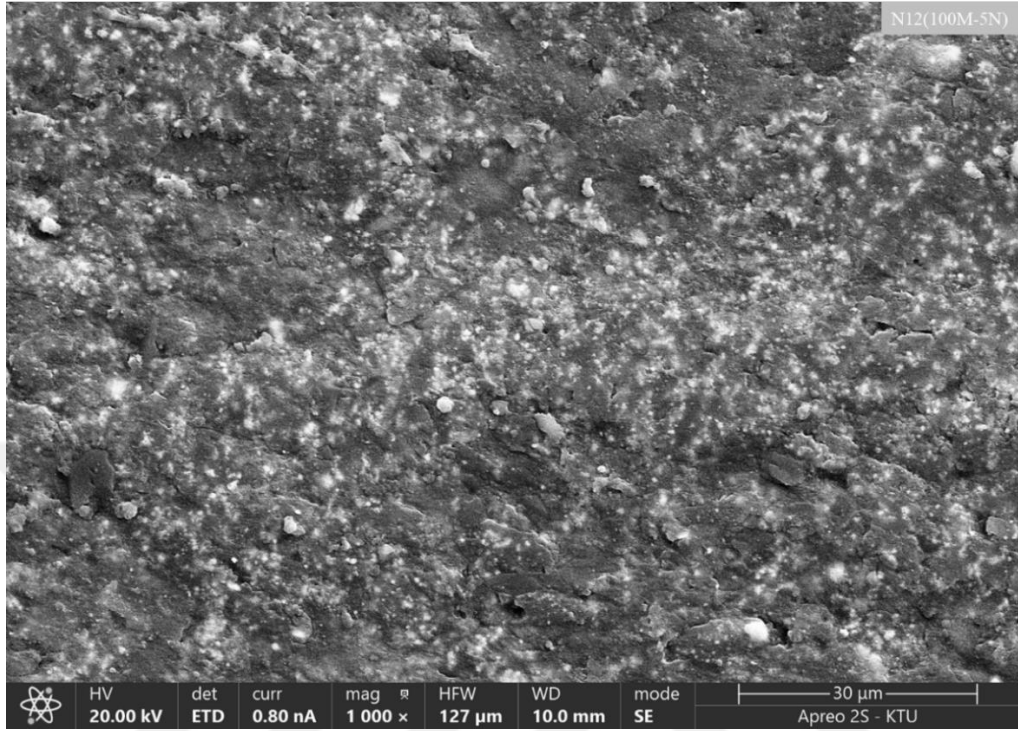
Şekil 84. N12 numunesinin 50M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü



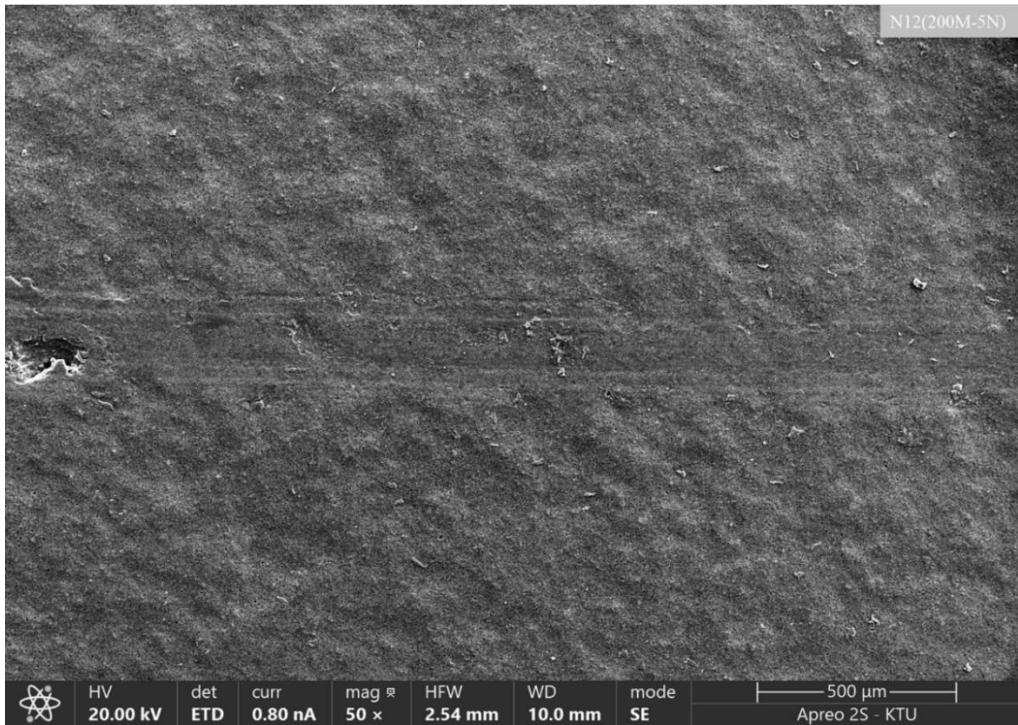
Şekil 85. N12 numunesinin 50M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü



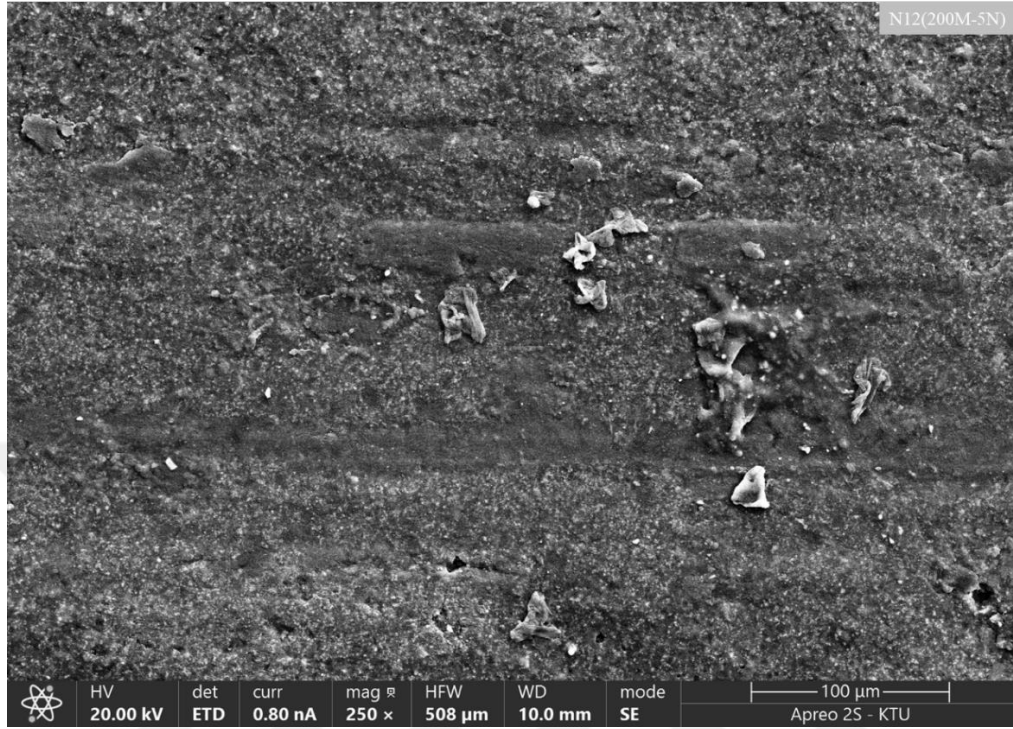
Şekil 86. N12 numunesinin 100M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü



Şekil 87. N12 numunesinin 100M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü



Şekil 88. N12 numunesinin 200M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü

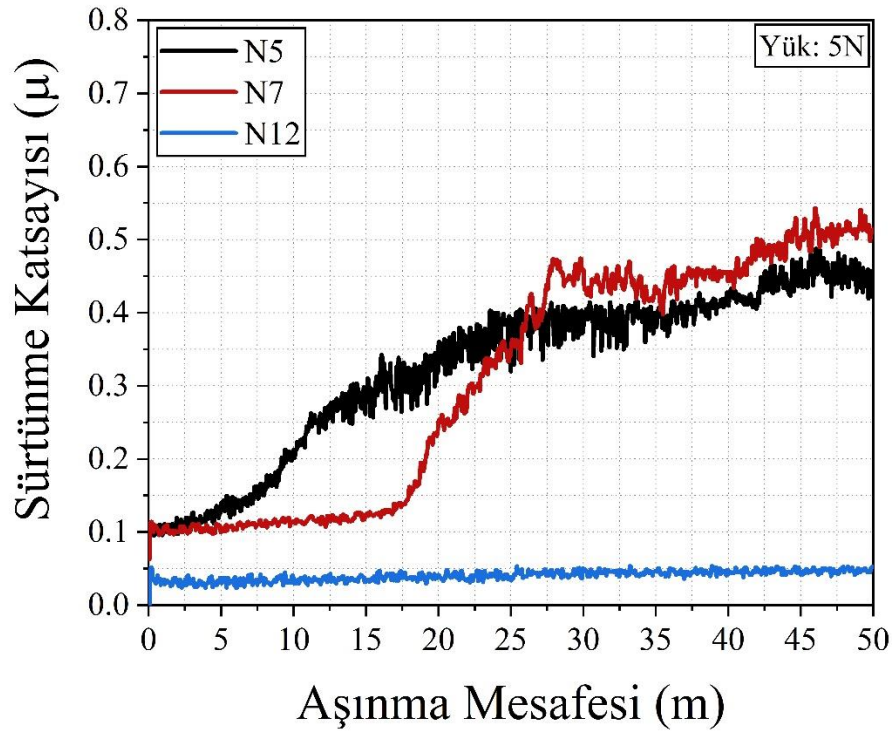


Şekil 89. N12 numunesinin 200M-5N (mesafe-yük) aralığında aşınma izi SEM görüntüsü

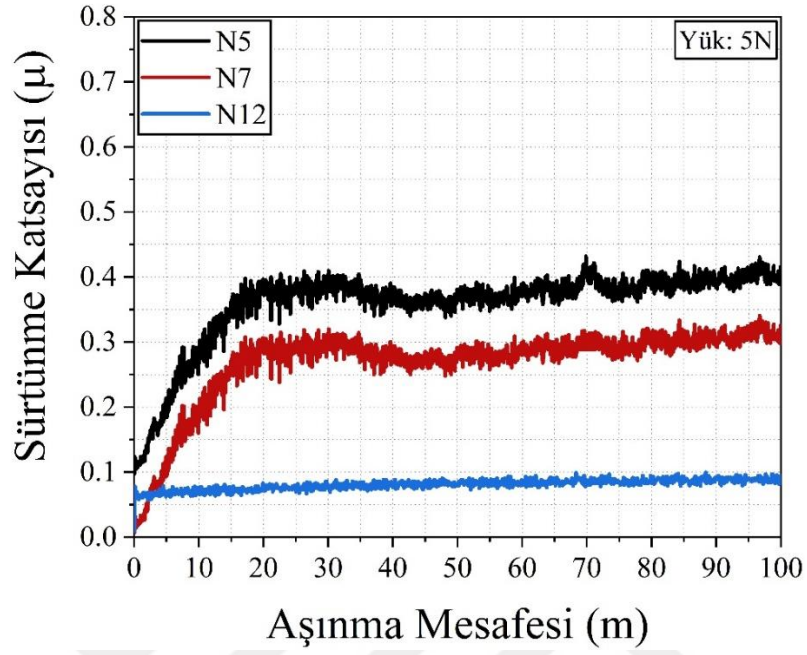
Cerakote kaplaması yüzeyde genel bir süreklilik ve homojenlik sağlamıştır. Ancak yüksek büyütmelerde kaplama tabakası içerisinde mikro-gözenekler, çukurcuklar ve bazı bölgelerde film kopmaları (delaminasyon) görülmüştür. Bu boşluklu alanlar, özellikle tekrarlayan sürtünme yükleri altında lokal deformasyon ve sıvama tipi aşınma izlerine neden olabilecek zayıf bölgeler olarak değerlendirilmektedir. Yüzeyde ayrıca plastik akma sonucu oluşan sıvama bölgeleri ve çekme–itme etkisiyle malzeme kazınması gözlenmiştir.

Şekil 90, Şekil 91, Şekil 92, Şekil 93, Şekil 94 grafikleri incelendiğinde, N5 (Nitrokarbürizasyon) numunesinde sürtünme katsayısı başlangıçta düşük (~ 0.1) olsa da aşınma mesafesi ilerledikçe hızla artarak 0.3–0.5 aralığında dengelenmiştir. Yük arttıkça katsayı dalgalanmaları daha belirgin hale gelmiştir. Bu durum, yalnızca nitrokarbürizasyon tabakasının belirli bir yüzey sertliği sağlasa da uzun mesafelerde ve yüksek yüklerde kararlı tribolojik performans gösteremediğini ortaya koymaktadır. N7 (Nitrokarbürizasyon + Fosfatlama) fosfatlama etkisiyle başlangıç sürtünme katsayısı yine düşük seviyeden başlamış, ancak mesafe ilerledikçe kademeli olarak artmış ve N5'e kıyasla daha kontrollü

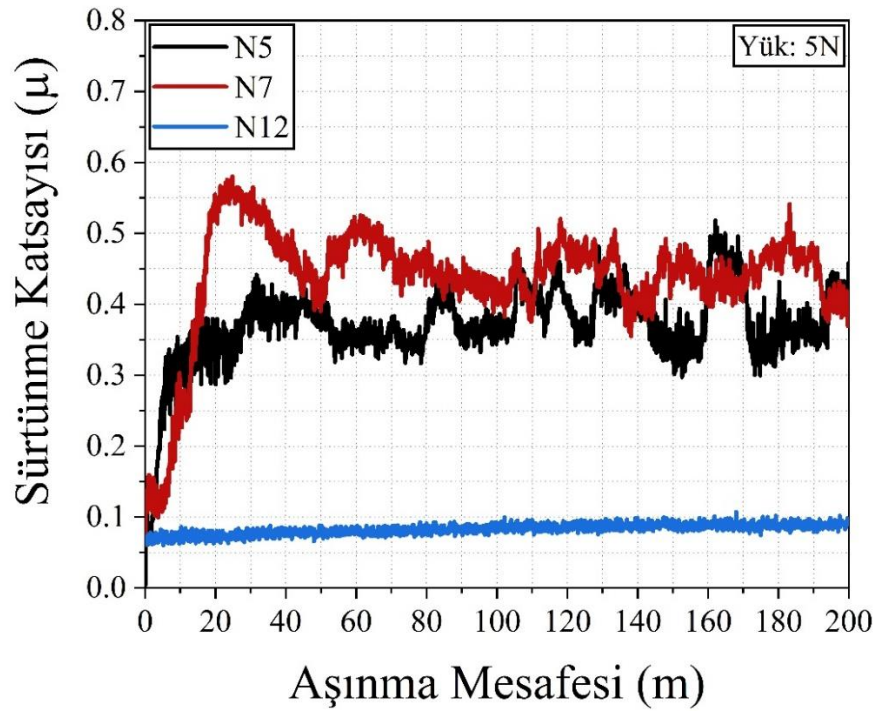
bir eğilim göstermiştir. Yükün 5 N'den 20 N'ye çıkarılmasıyla katsayı 0.3–0.5 aralığında kalmış ve N5'e göre daha istikrarlı bir davranış sergilemiştir. Fosfat tabakasının yağ tutma ve yüzeyde katı yağlayıcı rol üstlenmesi sayesinde sürtünme katsayısı ortalamada daha düşük seyretmiştir. N12 (Nitrokarbürizasyon + Fosfatlama + İnce Film Seramik Kaplama) cerakote kaplamanın eklenmesiyle tribolojik performans belirgin biçimde iyileşmiştir. Tüm yük ve mesafelerde sürtünme katsayısı 0.05–0.1 aralığında kalmış, oldukça kararlı ve düşük değerler sergilemiştir. Aşınma mesafesi arttığında dahi katsayının yükselmemesi, çok katmanlı bu sistemin aşınmaya karşı en yüksek direnci sağladığını göstermektedir.



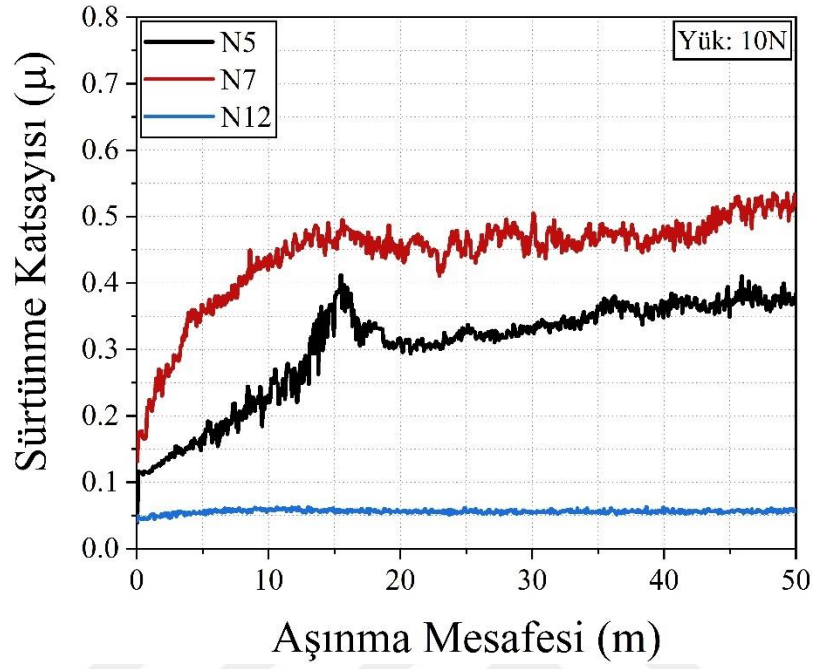
Şekil 90. 5N yük 50M mesafedeki N5, N7 ve N12 numunelerinin aşınma mesafesine karşı sürtünme katsayıları



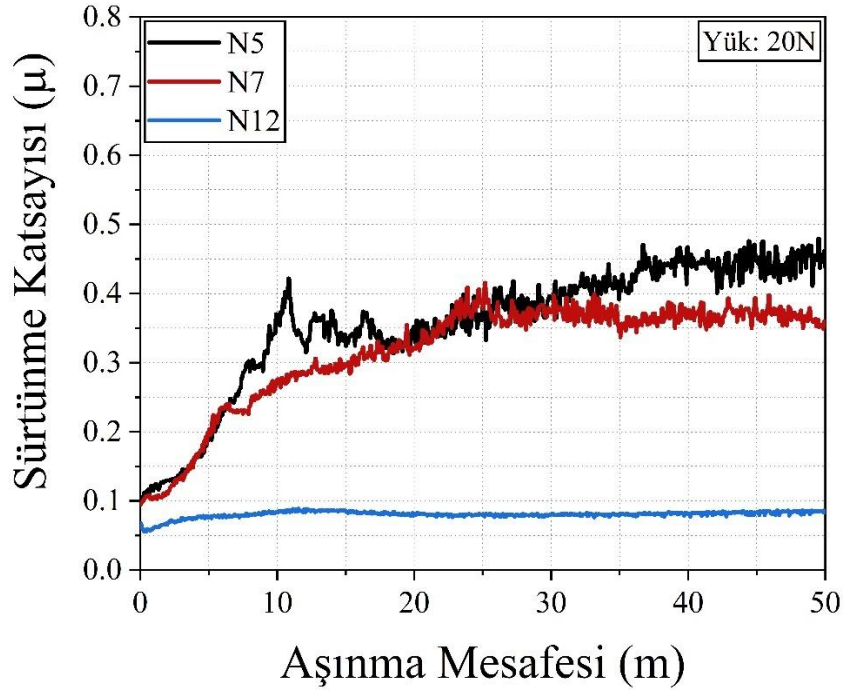
Şekil 91. 5N yük 100M mesafedeki N5, N7 ve N12 numunelerinin aşınma mesafesine karşı sürtünme katsayıları



Şekil 92. 5N yük 200M mesafedeki N5, N7 ve N12 numunelerinin aşınma mesafesine karşı sürtünme katsayıları



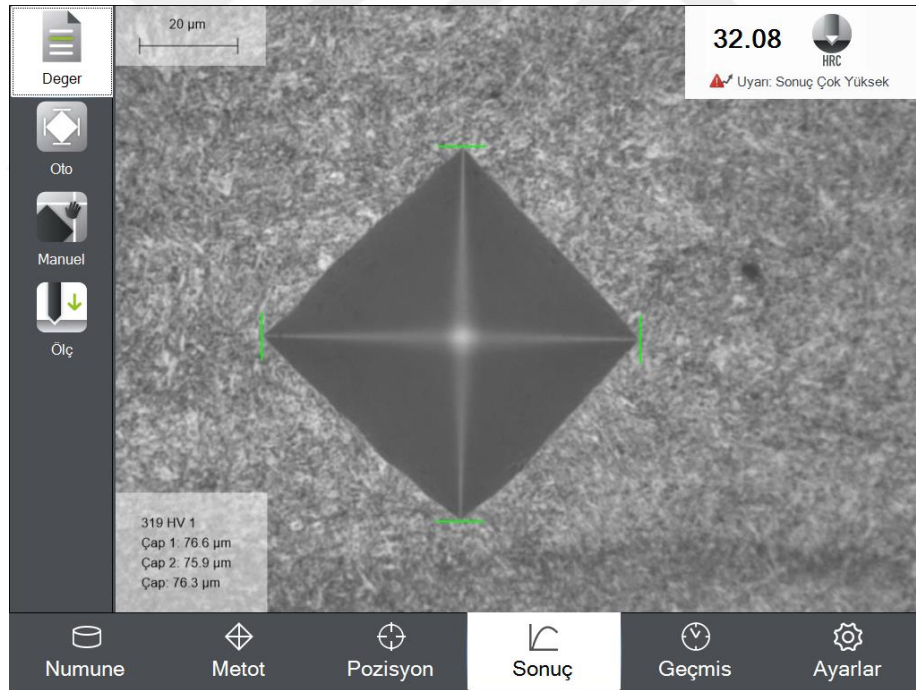
Şekil 93. 10N yük 50M mesafedeki N5, N7 ve N12 numunelerinin aşınma mesafesine karşı sürtünme katsayıları



Şekil 94. 20N yük 50M mesafedeki N5, N7 ve N12 numunelerinin aşınma mesafesine karşı sürtünme katsayıları

3.5. Vickers Sertlik Ölçüm Testi

Şekil 95’de görülen görüntü, merkezi bölgeden alınan Vickers mikrosertlik ölçümünü göstermektedir. Ölçüm sonucunda yaklaşık 319 HV (Vickers sertliği, 0,1 kgf yük altında) değeri elde edilmiştir. Bu değer, 42CrMo4 çeliğinin tavllanmış veya düşük sıcaklıkta işlem görmüş tipik çekirdek sertliği aralığıyla uyumludur. Ayrıca, cihaz ekranında yer alan dönüşüm tablosu uyarınca HRC (Rockwell C) karşılığı yaklaşık 32,08 HRC olarak hesaplanmıştır. Fakat cihaz arayüzünde, "Sonuç Çok Yüksek" uyarısı dikkat çekmektedir. Bu uyarı, Rockwell C dönüşümünün, mevcut mikrosertlik yükleme şartlarında cihazın standart aralığının dışında olduğu anlamına gelmektedir. Bu nedenle temel değerlendirme, Vickers sertlik değeri üzerinden yapılmıştır.



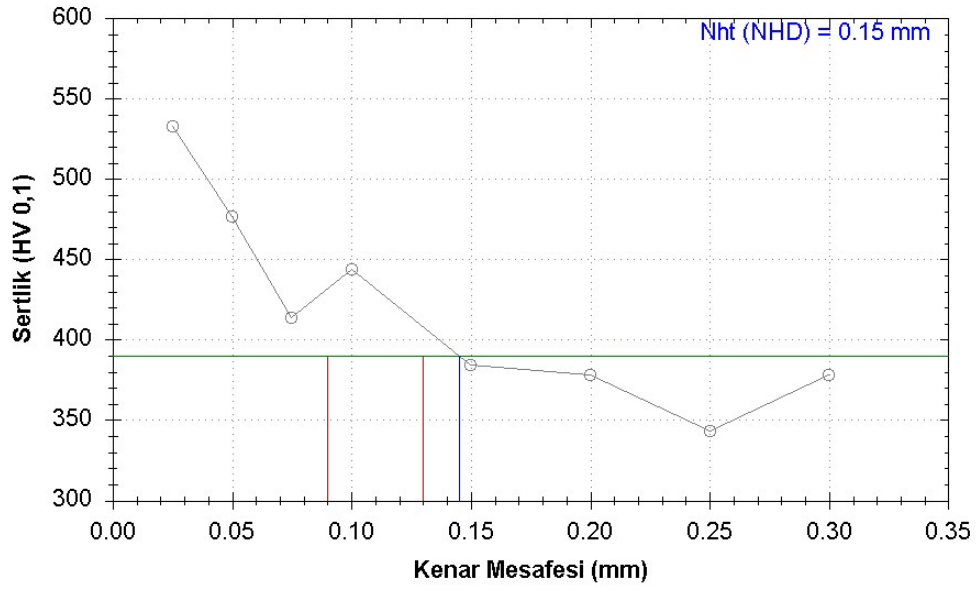
Şekil 95. Nitrokarbürleşmiş 42CrMo4 çeliğinde çekirdek bölge vickers sertlik ölçümü (319 HV / yaklaşık 32 HRC)

Nitrokarbürizasyon işlemi sonrası 42CrMo4 çeliğine ait numunenin çekirdek sertliği de ölçülerek değerlendirilmiştir. Ölçüm, numunenin yüzey etkilerinden bağımsız, işleminden

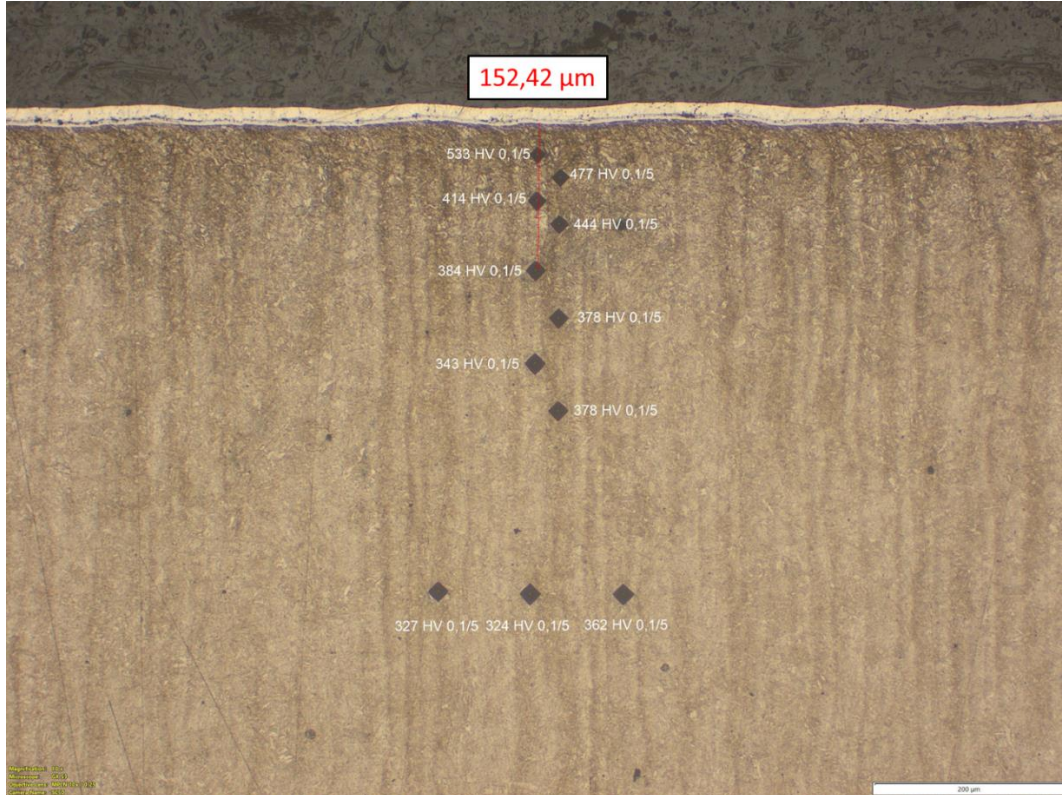
etkilenmemiş temel malzeme özelliklerini temsil edecek şekilde, yeterli derinlikte gerçekleştirilmiştir.

Çekirdek sertlik değeri ile yüzeyde elde edilen yüksek sertlik değerleri kıyaslandığında; nitrokarbürleme işleminin yüzeyde belirgin bir sertlik artışı sağladığı, ancak difüzyon etkisinin çekirdek bölgeye ulaşmadığı görülmektedir. Bu durum, istenen yüzey-mekanik performans hedeflerine ulaşıldığını göstermektedir.

Şekil 96'da görülen sertlik derinlik profili, yüzeyden itibaren farklı kenar mesafelerinde yapılan mikrosertlik ölçümleriyle elde edilmiştir. Ölçümler HV0.1 yük seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Yüzeyden itibaren sertlik değeri yaklaşık 530 HV seviyesinde başlamış ve artan mesafe ile sertlik kademeli olarak azalmıştır. Sertlik, yaklaşık 0,15 mm (150 μ m) derinlikte 400 HV değerinin altına düşmüştür. Bu nokta, DIN 50190 standardına göre "Efektif Sertlik Derinliği (Nht veya NHD)" olarak kabul edilmiştir. Şekil 96'da mavi çizgi ile işaretlenen bu sınır, yüzeyin altında etkili sertlik seviyesinin sürdüğü derinliği temsil etmektedir. Şekil 97'de ise numunenin optik mikroskop altında elde edilen mikroyapı kesiti üzerinde yapılan mikroyapılı sertlik ölçümleri sunulmaktadır. Ölçüm noktaları yüzeyden başlayarak artan derinliklerde yapılmış ve ilgili Vickers sertlik değerleri doğrudan mikroyapı görüntüsü üzerine işlenmiştir. Görselde, yüzeye yakın bölgede daha yüksek sertlik değerleri (533 HV- 477 HV gibi) elde edilirken, difüzyon tabakasının ilerleyen derinliklerinde sertlik kademeli olarak düşmektedir (327 HV- 324 HV gibi). Optik mikrograf üzerinde belirtilen toplam difüzyon tabaka kalınlığı yaklaşık 152,42 μ m olarak ölçülmüştür. Bu değer, nitrokarbürizasyon işlem koşulları dikkate alındığında literatürdeki benzer çalışmalara uygunluk göstermektedir.



Şekil 96. Nitrokarbürizasyon Sonrası Sertlik Derinlik Profili (42CrMo4 Çeliği - 560°C / 1 Saat



Şekil 97. Nitrokarbürlenmiş 42CrMo4 çeliğinde mikroyapısal sertlik dağılımı ve difüzyon tabaka kalınlığı

Tablo 11’de mikrosertlik ölçümleri yapılan numune parçasının değerleri gösterilmiştir.

Tablo 11. Difüzyon derinliği mikrosertlik ölçüm sonuçları

Mesafe(mm)	Sertlik Değeri (HV)	Metot	Diyagonal(mm)
0	327	HV 0,1	0,02
0	324	HV 0,1	0,02
0	362	HV 0,1	0,02
0,03	533	HV 0,1	0,02
0,05	477	HV 0,1	0,02
0,08	414	HV 0,1	0,02
0,1	444	HV 0,1	0,02
0,15	384	HV 0,1	0,02
0,2	378	HV 0,1	0,02
0,25	343	HV 0,1	0,02
0,3	378	HV 0,1	0,02

Bu çalışmada, 42CrMo4 çeliğine 560 °C sıcaklıkta 60 dakika süreyle tuz(salt) nitrokarbürizasyon işlemi uygulanmıştır. Termokimyasal işlem sonrası numunenin yüzey sertlik profili ve sertlik derinliği, DIN 50190 standardına uygun şekilde incelenmiştir.

Genel değerlendirme sonucunda; uygulanan nitrokarbürizasyon prosesi, yüzeyde istenilen sertlik artışını sağlamış ve difüzyon derinliği açısından DIN 50190 standardında öngörülen sınır değerlere ulaşılmıştır. Elde edilen sertlik profili, yüzey mühendisliği uygulamalarında gerekli olan aşınma dayanımı ve yorulma performansı gibi mekanik özelliklerin geliştirilmesi açısından başarılı bir sonuç ortaya koymaktadır.

3.6. Spektral Analiz Testi

Tablo 12’de aynı ham mamulden kesilen numune parçaların spektral analiz testi sonuçları verilmiştir. Bu neticede her bir numunenin aynı ham mamulden elde edildiği ve her numunenin 42CrMo4 çelik standardını karşıladığı da ortaya konulmuştur.

Tablo 12. Test numunelerinin spektral analiz sonuçları (%).

Numune	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V
1	97.0	0.374	0.302	0.712	0.0054	0.0055	1.02	0.161	0.148	0.0309
2	96.88	0.432	0.318	0.699	0.0085	0.0039	1.07	0.181	0.129	0.0345
3	96.95	0.418	0.292	0.705	0.0093	0.0063	1.07	0.148	0.118	0.0309
4	96.77	0.331	0.325	0.687	0.0164	0.0058	1.08	0.184	0.228	0.0327
5	96.89	0.409	0.32	0.702	0.0044	0.004	1.05	0.179	0.15	0.0328
6	96.95	0.434	0.29	0.697	0.0087	0.0027	1.08	0.135	0.117	0.0334
7	96.84	0.303	0.3	0.728	0.0109	0.0079	1.08	0.186	0.179	0.0375
8	96.95	0.409	0.278	0.707	0.0043	0.0075	1.03	0.188	0.137	0.0345
9	96.96	0.399	0.285	0.704	0.0035	0.0049	1.05	0.181	0.129	0.033
10	96.92	0.42	0.327	0.689	0.0091	0.0023	1.05	0.177	0.13	0.0298
11	96.81	0.435	0.388	0.709	0.0061	0.0045	1.05	0.156	0.123	0.0418
12	96.9	0.424	0.25	0.735	0.0097	0.0086	1.06	0.18	0.121	0.0355

3.7. Yüzey Pürüzlülüğü Testi

Tablo 13’de ham mamulden kesilen 12 eşit numunenin imalat ve özel proses süreçlerinin her aşamasında ölçülen yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları verilmiştir.

Tablo 13. Prosesler Arasında Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Sonuçları

Numune Numarası	Taşlama Sonrası		Vibrasyon Sonrası		Kumlama Sonrası		Nitrokarbürizasyon Sonrası		Fosfatlama Sonrası		İnce Film Seramik Kaplama Sonrası	
	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
1	0,158	1,219	0,56	3,771	1,762	11,068	1,504	12,049				
	0,156	1,081	0,2345	2,238	1,171	8,033	2,158	14,129				
	0,207	1,056	0,401	3,506	1,241	9,236	2,040	13,607				
Ort.	0,17	1,12	0,40	3,17	1,39	9,45	1,900,67	13,261,67				
2	0,293	2,642	0,299	2,32	1	7,739	1,778	13,505				
	0,259	1,829	0,331	3,206	0,96	7,862	2,069	13,399				
	0,29	1,446	0,423	2,821	0,933	7,376	1,782	12,376				
Ort.	0,28	1,97	0,35	2,78	0,96	7,66	1,876,33	13,093,33				
3	0,241	1,322	0,404	3,792	1,503	10,604	1,590	11,969				
	0,226	2,166	0,281	2,219	1,451	10,621	1,553	10,969				
	0,28	3,567	0,368	4,184	1,743	13,455	2,234	15,076				
Ort.	0,25	2,35	0,35	3,40	1,57	11,56	1,792,33	12,671,33				
4	0,152	1,74	0,326	3,12	1,767	11,77	1,794	15,207	1,513	9,806		
	0,231	1,311	0,428	4,161	1,85	12,427	1,802	12,174	1,723	11,869		
	0,318	2,207	0,449	4,326	1,815	12,185	2,129	14,533	1,474	10,064		
Ort.	0,23	1,75	0,40	3,87	1,81	12,13	1,908,33	13,971,33	1,57	10,58		
5	0,325	2,742	0,385	4,248	1,583	10,741	1,821	13,389	1,627	10,008		
	0,205	2,134	0,418	2,882	1,482	10,513	1,753	12,492	1,876	12,541		
	0,216	1,672	0,269	2,72	1,588	12,105	2,013	13,893	1,584	11,687		
Ort.	0,25	2,18	0,36	3,28	1,55	11,12	1,255,94	13,258,00	1,70	11,41		
6	0,346	1,96	0,489	4,63	1,16	8,385	1,789	12,462	1,051	8,128		
	0,155	0,935	0,384	3,646	1,144	8,681	1,518	11,592	1,178	8,436		
	0,168	1,727	0,397	3,337	1,406	10	1,619	14,807	1,23	9,314		
Ort.	0,22	1,54	0,42	3,87	1,24	9,12	1,642,00	12,953,67	1,15	8,63		
7	0,396	3,438	0,961	5,655	0,997	7,631	1,554	11,483	0,816	6,283		
	0,35	2,425	0,491	4,196	1,447	8,890	1,627	11,081	1,424	10,554		
	0,683	4,473	0,684	5,164	1,235	10,526	2,134	13,716	0,878	7,066		
Ort.	0,48	3,45	0,71	5,01	1,23	9,015,67	1,771,67	12,093,33	1,04	7,97		
8	0,398	2,764	0,463	3,362	1,890	12,774	2,307	14,600	1,843	12,328		
	0,302	1,926	0,611	5,44	1,927	12,798	2,568	17,151	1,894	12,701		
	0,384	2,049	0,552	5,247	1,873	12,790	1,883	13,010	1,759	12,027		
Ort.	0,36	2,25	0,54	4,68	1,896,67	12,787,33	2,252,67	14,920,33	1,83	12,35		
9	0,265	2,065	0,494	4,285	1,202	9,934	1,973	11,316	1,506	10,769		
	0,296	2,285	0,386	3,702	1,810	11,486	2,012	13,133	1,011	6,863		
	0,215	1,617	0,406	5,172	1,282	9,295	2,137	14,691	1,032	7,053		
Ort.	0,26	1,99	0,43	4,39	1,431,33	10,238,33	2,040,67	13,046,67	1,18	8,23		
10	0,576	4,718	0,389	2,945	1,569	10,968	1,655	12,658	1,573	10,708	1,601	10,561
	0,386	2,88	0,394	3,371	1,712	11,629	1,588	11,288	1,426	10,137	1,531	10,266
	0,422	1,975	0,314	2,845	1,776	16,593	1,941	12,814	1,513	9,741	1,556	9,98
Ort.	0,46	3,19	0,37	3,05	1,685,67	13,063,33	1,728,00	12,253,33	1,50	10,20	1,56	10,27
11	0,736	5,299	0,268	2,279	1,374	10,018	1,249	10,421	1,203	9,239	1,579	10,089
	0,145	1,423	0,406	3,353	1,385	10,344	1,063	8,775	1,457	9,938	1,509	9,288
	0,81	3,826	0,257	2,905	1,205	8,616	1,393	9,743	1,029	7,922	1,536	9,719
Ort.	0,56	3,52	0,31	2,85	1,321,33	9,659,33	1,235,00	9,646,33	1,23	9,03	1,54	9,70
12	0,305	2,983	0,197	2,064	1,306	10,256	1,682	11,631	1,753	10,625	1,835	13,002
	0,42	2,275	0,487	3,055	1,812	12,187	1,911	13,380	1,024	7,344	1,534	11,451
	0,336	2,242	0,243	2,771	1,382	9,607	2,680	16,743	2,51	14,692	1,858	12,175
Ort.	0,35	2,50	0,31	2,63	1,500,00	10,683,33	2,091,00	13,918,00	1,76	10,89	1,74	12,21

Taşlama sonrası Ra değerleri 0,15–0,29 μm aralığındadır. Yüzey en düzgün seviyede, beklenildiği gibi çok düşük pürüzlülük sağlanmış. Vibrasyon sonrası Ra değerleri 0,23–0,56 μm 'ye çıkıyor. Vibrasyon işleminde mikroyüzeyde aşındırma ve yuvarlama etkisi olduğundan taşlamaya kıyasla daha pürüzlü bir yüzey oluşmuştur. Kumlama sonrası Ra

değerleri 0,93–1,76 μm aralığındadır. En yüksek pürüzlülük değerleri bu aşamada gözleniyor. Kum taneleri yüzeye darbeli etki yaptığından, yüzey enerjisini ve kaplamanın tutunmasını artıracak bir topografya oluşuyor. Nitrokarbürizasyon sonrası Ra değerleri 1,5–2,1 μm civarında. Termokimyasal işlem sonrası yüzeyde bileşik tabaka ve difüzyon etkisiyle pürüzlülük artmıştır. Bu özellikle difüzyon ve yüzey tabakasındaki mikroyapısal değişimlerden kaynaklanıyor. Fosfatlama sonrası ölçüm yapılan numunelerde Ra değerleri 1,5–1,7 μm seviyesine geriliyor. Fosfat tabakasının yüzeyde dolgu etkisiyle bazı boşlukları kapattığı, pürüzlülüğü kısmen azalttığı söylenebilir. İnce film seramik kaplama sonrası (Cerakote) seramik kaplamanın yüzeyde homojen ve nispeten düzgün bir tabaka oluşturmasıdır. Bu da nihai yüzeyin daha kontrollü bir pürüzlülük değerine sahip olduğunu göstermiştir.

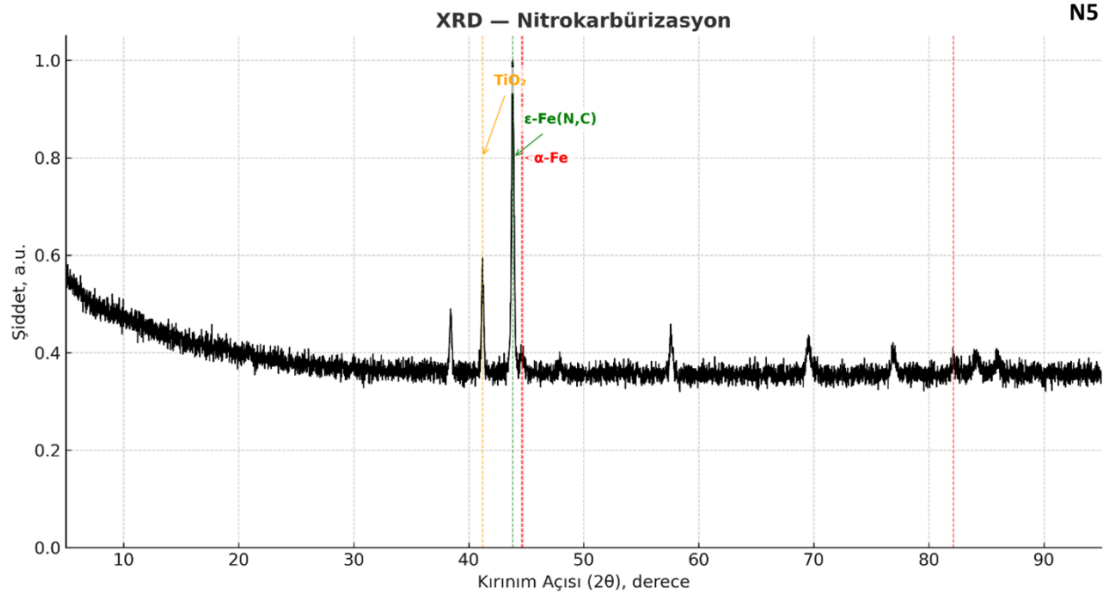
3.8. XRD Test Analizi

Şekil 98’de 4140 çeliğine uygulanan nitrokarbürizasyon işlemi sonrasında elde edilen X-ışını kırınım (XRD) deseni görülmektedir. $2\theta = 37.6^\circ$, 43.6° ve 47.9° bölgelerinde belirgin pikler gözlenmiş olup, bu pikler $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}(\text{N,C})$ fazına (hekzagonal demir nitrür/karbür fazı) karşılık gelmektedir. Ayrıca 42.9° ve 49.7° civarındaki pikler $\gamma'\text{-Fe}_4(\text{N,C})$ fazının varlığını göstermektedir. Yaklaşık 44.7° , 65.0° ve 82.3° açılarında gözlenen karakteristik pikler ise $\alpha\text{-Fe}$ (ferrit) fazına aittir. Bu faz, 4140 çeliğinin temel matrisi olup, yüzeyde oluşan nitrür tabakasının altında yer alan çekirdek malzemeyi temsil etmektedir. Nitrokarbürizasyon işlemi, yüzeyde ϵ ve γ' nitrür fazlarından oluşan çift tabakalı yapı meydana getirir. Bu yapı yüksek yüzey sertliği ve aşınma direnci kazandırırken, $\alpha\text{-Fe}$ matris ile güçlü bir ara faz oluşturur. XRD sonuçları, tipik nitrokarbürize çeliklerde beklenen faz dağılımı ile uyumludur. Sonuç olarak ana fazlar: $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}(\text{N,C})$, $\gamma'\text{-Fe}_4(\text{N,C})$, $\alpha\text{-Fe}$ ’dır. Bu faz dağılımı, işlemin etkin bir nitrür difüzyonu sağladığını kanıtlamaktadır.

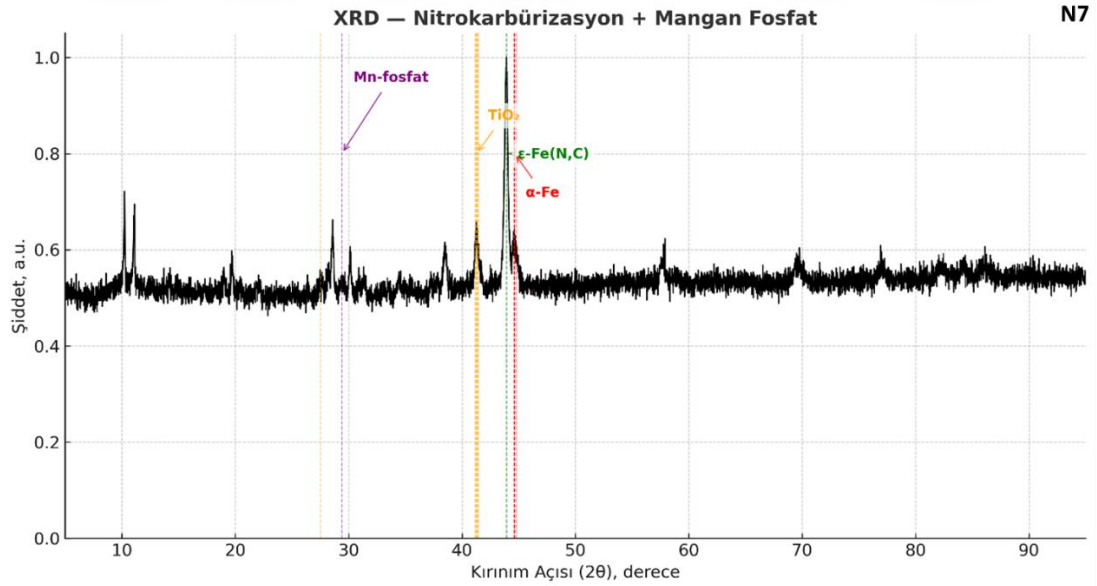
Şekil 99’de nitrokarbürize edilmiş numune üzerine uygulanan mangan fosfatlama işlemi sonrasında oluşan XRD deseni yer almaktadır. Nitrokarbürizasyondan gelen $\epsilon\text{-Fe}(\text{N,C})$ ve $\gamma'\text{-Fe}(\text{N,C})$ fazlarının karakteristik pikleri korunmuş, bunlara ek olarak düşük

açılarda (yaklaşık 16.9°, 22.7°, 26.8°, 28.0°, 29.7° ve 33.3°) yeni pikler ortaya çıkmıştır. Bu yeni pikler, Mn-fosfat (hureaulite-türevi, $Mn_5H_2(PO_4)_4 \cdot 4H_2O$) fazına karşılık gelmektedir. Bu faz, fosfatlama işlemi sırasında yüzeyde kristal yapıda bir tribolojik film oluştuğunu göstermektedir. Mangan fosfat tabakası, yüzeyde mikrogözenekli bir yapı oluşturur ve yağ tutuculuğu artırarak sürtünme koşullarında yağlama katkısı sağlar. Nitrokarbürize alt tabaka ile mangan fosfat arasındaki fazlar, difüzyonla bütünleşik bir geçiş bölgesi oluşturur. Sonuç olarak ana fazlar ϵ -Fe(N,C), γ' -Fe(N,C), α -Fe, Mn-fosfat'dır. Mangan fosfatlama, nitrokarbürize yüzeyin tribolojik performansını artıran kristal bir film oluşturmuştur.

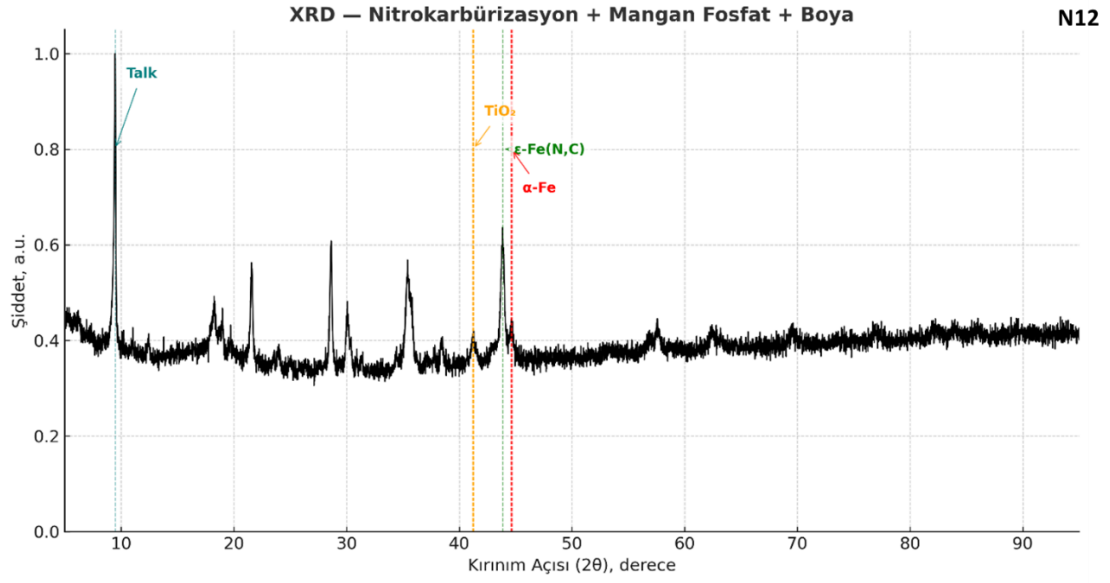
Şekil 100'de, nitrokarbürize ve mangan fosfatlı yüzey üzerine uygulanan Cerakote H-serisi seramik kaplamadan sonra elde edilen XRD deseni verilmiştir. Kaplamaya ait yeni fazlar düşük ve orta açılarda tespit edilmiştir. Yaklaşık 9.36° pik, kaplama reçetesinde kullanılan talk ($Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$) dolgu fazına; 25.3°, 27.4°, 36.1°, 37.8°, 41.2°, 48.0°, 55.1° civarındaki pikler TiO_2 (anataz + rutil) faz karışımına; 24.6°, 33.6°, 36.2°, 41.5°, 50.2° ve 63.2° civarındaki pikler ise Cr_2O_3 pigmentine karşılık gelmektedir. Alt tabakaya ait ϵ -Fe(N,C) ve γ' -Fe(N,C) fazlarının düşük yoğunluklu yansımaları hâlâ gözlenebilir; bu, kaplama altında nitrür tabakasının yapısal bütünlüğünü koruduğunu göstermektedir. Cerakote, yüksek sıcaklıkta fırınlanarak (150 °C, 1 saat) metal altlık üzerine yoğun ve amorf-seramik karakterde bir film oluşturur. XRD deseni, kaplamanın çok fazlı (TiO_2 – Cr_2O_3 –Talk) yapıda olduğunu ve metal altlıkla reaksiyona girmediğini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak ana fazlar TiO_2 (Anataz + Rutil), Cr_2O_3 , Talk, alt tabakada ϵ -Fe(N,C), γ' -Fe(N,C), α -Fe'dir. Kaplama, yüzeyde seramik/pigment karakterli fazlar oluşturmuş; bu fazlar yüksek kimyasal ve termal stabilite sağlamaktadır.



Şekil 98. N5 42CrMO4 Çeliği üzerine uygulanan nitrokarbürizasyon sonrası XRD analizi testi grafiği



Şekil 99. N7 42CrMO4 Çeliği üzerine uygulanan nitrokarbürizasyon ve mangan fosfat kaplama sonrası XRD analizi testi grafiği



Şekil 100. N12 42CrMO4 Çeliği üzerine uygulanan nitrokarbürizasyon, mangan fosfat ve cerakote ince film seramik kaplama sonrası XRD analizi testi grafiği

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında 42CrMo4 çeliği üzerine uygulanan nitrokarbürizasyon, fosfatlama ve seramik kaplama (Cerakote) işlemlerinin mekanik, mikroyapısal ve tribolojik özellikler üzerindeki etkileri sistematik şekilde değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir.

Tablo 13’da verilen yüzey pürüzlülüğü değerleri, taşlama işlemi sonrası en düşük Ra değerlerinin elde edildiğini ve yüzeyin oldukça düzgün bir topografya kazandığını göstermektedir. Benzer şekilde Alphonsa vd. (2015), yüzeyin işlem öncesi düzgünlüğünün sonraki kaplamaların başarısı için kritik olduğunu bildirmiştir.

Vibrasyon ve özellikle kumlama işlemlerinin yüzey pürüzlülüğünü artırdığı belirlenmiştir. Bu bulgu, Jacquet vd. (2011) tarafından rapor edilen, kaplama öncesi pürüzlü yüzeylerin tutunmayı kolaylaştırdığı yönündeki sonuçlarla uyumludur.

Nitrokarbürizasyon işlemi sonucunda yüzeyde bileşik tabaka (ϵ ve γ' fazları) oluşmuş, pürüzlülük değerleri artmış ve yüzey sertliği yükselmiştir. Bu sonuç, Marušić vd. (2006) ile Heydarzadeh vd. (2010)’un nitrokarbürizasyonun sertlik ve aşınma direncini artırdığına yönelik bulgularını destekler niteliktedir.

Fosfatlama işlemi yüzeyde dolgu ve homojen bir tabaka etkisi yaratmış, pürüzlülüğü kısmen azaltmış ve yüzeyin kaplama için daha uygun hale gelmesini sağlamıştır. Kusmic vd. (2016) çalışmasında da benzer şekilde fosfat tabakasının aşınma direncini iyileştirdiği rapor edilmiştir.

Sertlik ölçümleri, nitrokarbürizasyon işlemi ile yüzey sertliğinde belirgin bir artış sağlandığını, fosfatlama ve seramik kaplamaların ise bu sert tabakanın korunmasına katkı sunduğunu göstermiştir. Fattah vd. (1998) tarafından yapılan plazma nitrokarbürleme çalışmaları da, çok katmanlı tabakaların sertlik ve dayanımı korumada etkili olduğunu göstermiştir.

Tribolojik testlerde, çok katmanlı yüzey işlemleri (nitrokarbürizasyon + fosfatlama + ince film seramik kaplama) en düşük sürtünme katsayısı ve en yüksek aşınma direnci

değerlerini vermiştir. Heydarzadeh vd. (2010) ve Alphonsa vd. (2015)'in rapor ettiği optimum işlem koşullarında elde edilen yüksek aşınma direnci bulgularıyla paralellik göstermektedir.

Ham malzeme temperlenmiş martenzit yapıda olup, tüm numunelerde bu temel yapı korunmuştur. SEM analizleri, nitrokarbürizasyon işlemine bağlı olarak yüzeyde belirgin bir bileşik tabaka ve altında difüzyon zonu oluştuğunu ortaya koymuştur. Fosfatlama işleminde mikrokristal yapıdaki fosfat film tabakası gözlenmiş; seramik kaplama sonrası ise homojen ve süreksiz çatlak içermeyen kompakt bir yüzey filmi elde edilmiştir.

200 m mesafeye kadar olan aşınma testlerinde, özellikle N12 numunesi ince film seramik kaplaması sayesinde aşınmaya karşı üstün direnç göstermiştir.

N5 numunesinde elde edilen nitrokarbürize tabakanın homojen olmaması ve yüzeydeki boşluklu yapı, aşınma sırasında tabakanın erken yüzey kırılmaları ve sıvama tipi hasarlara açık olduğunu göstermektedir.

N7 numunesinde fosfatlama, yüzeyde ek bir bariyer sağlamış olsa da, kristal yapıların süreksizliği ve zayıf aderansı nedeniyle delaminasyon ve parçacıklı aşınma mekanizmasına yol açabilecek bölgeler oluşmuştur.

N12 numunesi en homojen kaplamayı sağlamış, yüzey bütünlüğünü artırmıştır. Ancak kaplama içinde tespit edilen mikro-gözenekler ve lokal film kopmaları, uzun vadeli kullanımda lokal deformasyon, sıvama ve kazıma aşınmasına zemin hazırlayabilir. Yine de, üç numune içinde en yüksek koruma potansiyeli N12'de gözlenmiştir. Genel olarak, nitrokarbürizasyon sonrası fosfatlama ve özellikle ince film seramik kaplamanın yüzey bütünlüğünü belirgin ölçüde iyileştirdiği, fakat yüzeyde kalan gözenekler ve tabaka süreksizliklerinin aşınma direncini kısıtlayan kritik faktörler olduğu sonucuna varılmıştır.

Nitrokarbürizasyon tabakası (N5), yüzey sertliği kazandırmasına rağmen uzun mesafe ve yüksek yükler altında sürtünme katsayısında artış ve kararsızlık göstermiştir. Fosfatlama ilavesi (N7), sürtünme katsayısını düşürmüş ve tribolojik davranışı daha istikrarlı hale getirmiştir. Bu, fosfat tabakasının katı yağlayıcı etkisinden kaynaklanmaktadır. İnce film seramik kaplama (N12) ile desteklenen çok katmanlı yapı,

tüm yük seviyelerinde en düşük ve en kararlı sürtünme katsayısını sağlamıştır. Bu sistem, hem düşük aşınma mesafesi hem de kararlı düşük sürtünme ile en yüksek tribolojik performansı göstermiştir. Sonuç olarak, N12 numunesi (hibrit kaplama sistemi) tribolojik performans açısından en uygun çözümdür ve özellikle savunma sanayi gibi yüksek temas yüklerinin söz konusu olduğu uygulamalar için kritik avantaj sunmaktadır.

Mikrosertlik testleri ve difüzyon profilleri, her işlem basamağının yüzey altı sertlik değerine doğrudan katkı sağladığını doğrulamıştır.

Özellikle nitrokarbürizasyon işleminde elde edilen difüzyon tabakası, mekanik yük altındaki deformasyonların sınırlandırılmasında etkili olmuştur. Bu sonuçlar doğrultusunda, kombine yüzey modifikasyonlarının (termokimyasal, kimyasal ve seramik kaplama) 42CrMo4 çeliği gibi ıslah çeliklerinde tribolojik performansı optimize ettiği ve bu yöntemlerin savunma ve otomotiv gibi kritik mühendislik uygulamalarında önemli avantajlar sunduğu ortaya konmuştur.

Genel olarak, bu tez çalışmasının bulguları, literatürde bildirilen nitrokarbürizasyonun sertlik artışı sağladığı, fosfatlama ve ince film kaplamaların ise tribolojik performansı geliştirdiği yönündeki sonuçlarla tutarlı bulunmuştur.

Çalışmada uygulanan spektral analiz testleri, kullanılan numunelerin 42CrMo4 çeliği ile uyumlu kimyasal bileşime sahip olup olmadığını tespit etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, numunelerin karbon (C), silisyum (Si), mangan (Mn), krom (Cr), molibden (Mo), fosfor (P) ve kükürt (S) elementleri bakımından EN 10083 standardında belirtilen sınır değerler içerisinde kaldığını göstermiştir. Özellikle karbon içeriği %0,427 olarak ölçülmüş olup, bu değer %0,38–0,45 aralığına tam uyum göstermektedir. Mangan, krom ve molibden gibi mekanik özellikler üzerinde belirleyici etkileri bulunan alaşım elementlerinin de uygun oranlarda tespit edilmesi, uygulanan tüm ısıt ve yüzey işlemlerinin doğru malzeme üzerinden gerçekleştirildiğini teyit etmektedir. Fosfor (%0,0067) ve kükürt (%0,0024) gibi istenmeyen elementlerin oldukça düşük seviyelerde bulunması, çeliğin saflık seviyesinin yüksek olduğunu ve özellikle kaynaklanabilirlik özelliklerinin olumlu yönde etkileneceğini göstermektedir.

Bu doğrultuda yapılan spektral analiz testleri, deneysel süreçlerin başlangıcında kullanılan 12 numunenin tamamının 42CrMo4 çeliği karakteristiğini sağladığını, dolayısıyla sonrasında uygulanan yüzey işlemleri ve karşılaştırmalı testlerin bilimsel açıdan sağlam bir temele dayandığını ortaya koymaktadır. Tablo 12’de yüzey işlemleri yapılmadan önce spektral analiz testine tabi tutulan numune parçaların kimyasal kompozisyonları gösterilmiştir.

Tablo 13’da verilen veriler ışığında, 42CrMo4 çeliği numunelerine uygulanan yüzey işlemlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde belirgin etkiler oluşturduğu görülmektedir. Taşlama işlemi sonrası ölçülen en düşük Ra değerleri, yüzeyin oldukça düzgün bir topografya kazandığını ortaya koymaktadır. Bunu takiben gerçekleştirilen vibrasyon ve özellikle kumlama işlemleri, yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde artırmış ve kaplama öncesi yüzey enerjisinin yükseltilmesine katkı sağlamıştır. Nitrokarbürizasyon işleminde ise bileşik tabaka oluşumu ve difüzyon etkisiyle pürüzlülük değerlerinde ilave bir artış meydana gelmiştir. Fosfatlama uygulaması, yüzeyde kısmi bir dolgu etkisi yaratarak pürüzlülüğü nispeten düşürmüş ve homojen bir tabaka sağlamıştır. İnce film seramik kaplama (Cerakote) işlemi ise yüzeyde koruyucu, stabil ve kontrollü bir son tabaka oluşturarak nihai yüzey kalitesini belirlemiştir. Elde edilen sonuçlar, sıralı yüzey işlemlerinin yüzey topografyasında kontrollü bir değişim sağladığını göstermektedir. Özellikle kumlama ve nitrokarbürizasyon aşamalarında artan pürüzlülük, kaplama tabakalarının yüzeye tutunmasını kolaylaştırıcı bir etki yaratırken; fosfatlama ve seramik kaplama aşamalarında yüzeyin stabilize edilerek daha homojen bir yapıya kavuştuğu tespit edilmiştir. Bu bulgular, uygulanan yüzey işlem kombinasyonlarının tribolojik performansın artırılmasında kritik bir rol oynadığını ve savunma sanayii gibi yüksek dayanım ve uzun ömür gerektiren alanlarda malzeme performansını optimize edebilecek potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

XRD analizleri, nitrokarbürizasyon sonrası yüzeyde ϵ -Fe₂₋₃(N,C) ve γ' -Fe₄(N,C) fazlarının oluştuğunu, bu fazların yüksek sertlik ve aşınma direnci sağladığını göstermiştir. Bu sonuçlar, nitrokarbürize tabaka karakteristikleriyle uyumludur. Fosfatlama sonrasında fazların zayıfladığı ancak yapısal bütünlüğün korunduğu, Cerakote ince film seramik

kaplama sonrasında ise TiO_2 (Anataz + Rutil), Cr_2O_3 ve Talk fazlarının yüzeyde stabil seramik bir tabaka oluşturduğu belirlenmiştir. Bu bulgu nitrülenmiş yüzeyler üzerine uygulanan oksit kaplamaların kararlılığını vurgulayan çalışmasıyla örtüşmektedir. Sonuç olarak, XRD verileri çok katmanlı kaplama sisteminde hem metalik alt tabakanın hem de seramik üst katmanın yapısal bütünlüğünün korunduğunu ortaya koymuştur.



5. ÖNERİLER

Bu çalışmada elde edilen bulgular doğrultusunda aşağıdaki öneriler sunulmaktadır, çok katmanlı yüzey işlemleri kombinasyonları tek başına uygulanan nitrokarbürizasyon işlemi, sınırlı aşınma direnci sağlamaktadır. Bu nedenle fosfatlama ve seramik kaplama gibi yüzey modifikasyonlarının kombine şekilde uygulanması, 42CrMo4 gibi ıslah çeliklerinde yüksek tribolojik performans hedeflenen uygulamalarda tercih edilmelidir.

Kaplama sıralamasının ve süreç parametrelerinin optimizasyonu fosfatlama ve seramik kaplama öncesi yapılan kumlama, yüzeyin tutunabilirliğini artırmıştır. Bu nedenle ön işlemlerin sıralaması, kumlama süresi ve kaplama kalınlıklarının kontrolü, yüzey dayanımını doğrudan etkilemektedir. Bu parametrelerin daha hassas optimizasyonu ile performans daha da iyileştirilebilir.

Kaplama kalınlığı – Difüzyon derinliği ilişkisinin mikroyapısal incelemesi difüzyon derinliği ile yüzeydeki aşınma izleri arasında doğrudan bir ilişki gözlemlenmiştir. Bu nedenle, farklı difüzyon sürelerinin mikroyapı üzerindeki etkileri detaylı şekilde SEM-EDS analizleriyle desteklenerek araştırılmalıdır.

Spektral analiz, yüzey ve çekirdek ayrımında uygulanabilir, yalnızca yüzeyden alınan analizler yerine, çapraz kesit alınarak yüzey/çekirdek kompozisyon farkları incelenebilir. Bu, özellikle yüzey işlemleri sonrası oluşabilecek elementsel difüzyonun tespiti açısından değerlidir.

Farklı spektroskopik yöntemlerle karşılaştırmalı analiz önerilir, kullanılan optik emisyon spektrometresi (OES) yerine veya yanında, XRF (X-ray fluorescence) ya da ICP-OES gibi daha hassas yöntemlerle çapraz kontrol yapılması, hata payını azaltır ve elementel tespit hassasiyetini artırır.

Kaplama öncesi ve sonrası elementsel karşılaştırma, kaplamaların (özellikle Cerakote) kimyasal bileşime etkisini daha iyi anlamak için, aynı numunenin kaplama öncesi ve sonrası spektral analiz karşılaştırması yapılabilir. Bu sayede yüzeyde kalıcı difüzyon etkisi olup olmadığı tespit edilebilir.

6. KAYNAKLAR

- Alphonsa, J., Raja, V. S., & Mukherjee, S. (2015). Development of highly hard and corrosion resistant A286 stainless steel through plasma nitrocarburizing process. *Surface and Coatings Technology*, 280, 268-276. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.09.017>
- Ashdown, R. A., & Lever, R. C. (1975). POWDER COATINGS. *Pigment & Resin Technology*, 4(10), 11-21. <https://doi.org/10.1108/eb041122>
- Bender, H. S., Dale Cheever, G., & Wojtkowiak, J. J. (1980). Zinc phosphate treatment of metals. *Progress in Organic Coatings*, 8(3), 241-274. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0300-9440\(80\)80018-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0300-9440(80)80018-X)
- Bhaskar, S. V., & Kudal, H. N. (2017). Tribology of nitrided-coated steel-a review. *Archives of mechanical Technology and Materials*, 37.
- Calata, J. N., Lu, G.-Q., & Chuang, T.-J. (2001). Constrained sintering of glass, glass-ceramic and ceramic coatings on metal substrates. *Surface and Interface Analysis*, 31(7), 673-681. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/sia.1093>
- Cerakote. <https://www.cerakote.com/cerakote-vs-other-coatings/black-nitride>
- Czerwiec, T., Michel, H., & Bergmann, E. (1998). Low-pressure, high-density plasma nitriding: mechanisms, technology and results. *Surface and Coatings Technology*, 108-109, 182-190. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(98\)00555-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0257-8972(98)00555-6)
- Czerwiec, T., Renevier, N., & Michel, H. (2000). Low-temperature plasma-assisted nitriding. *Surface and Coatings Technology*, 131(1), 267-277. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00792-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00792-1)
- Davis, J. R. (2002). *Surface hardening of steels: understanding the basics*. ASM international.
- Dehghanghadikolaie, A., Mohammadian, B., Namdari, N., & Fotovvati, B. (2018). Abrasive machining techniques for biomedical device applications. *J. Mater. Sci*, 5(1), 1-11.
- DeMasi-Marcin, J. T., & Gupta, D. K. (1994). Protective coatings in the gas turbine engine. *Surface and Coatings Technology*, 68, 1-9.
- Di Maggio, R., Tomasi, A., & Scardi, P. (1997). Characterisation of thin ceramic coatings on metal substrates. *Materials Letters*, 31(3), 345-349. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(96\)00298-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-577X(96)00298-4)
- Dossett, J. L., & Totten, G. E. (2013). *Steel heat treating fundamentals and processes*. Asm International.
- F. Allen, G. B., J. Liu, R. Iezzi, G. Skandan. (2013). *Active Corrosion Protection- A New Strategy for Metal Pretreatments to Enhance Corrosion Resistance*
- Fazlalipour, F., Shakib, N., Shokuhfar, A., & Niki Nushari, M. (2012). Effect of Nitro-Carburizing Treatment on Wear Mechanism and Friction of Steel/WC-Co Sliding Couple. *Journal of Tribology*, 134(1). <https://doi.org/10.1115/1.4005521>
- GmbH, H. D. *TUFFTRIDE® TF 1 - Process*.
- Gramlich, A., Auger, M., & Richter, S. (2022). Plasma nitriding of an air-hardening medium manganese forging steel. *HTM Journal of Heat Treatment and Materials*, 77(4), 298-315.

- Hafeez, M. A., Farooq, A., Zang, A., Saleem, A., & Deen, K. M. (2020). Phosphate chemical conversion coatings for magnesium alloys: a review. *Journal of Coatings Technology and Research*, 17(4), 827-849. <https://doi.org/10.1007/s11998-020-00335-2>
- Hamdy Makhoul, A. S., & Prado, J. (2020). Chapter 2 - Recent developments in smart coatings for steel alloys, their impact in the steel industry, and applications. In A. S. H. Makhoul & N. Y. Abu-Thabit (Eds.), *Advances in Smart Coatings and Thin Films for Future Industrial and Biomedical Engineering Applications* (pp. 39-55). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-849870-5.00017-3>
- Heydarzadeh Sohi, M., Ebrahimi, M., Honarbakhsh Raouf, A., & Mahboubi, F. (2010). Effect of plasma nitrocarburizing temperature on the wear behavior of AISI 4140 steel. *Surface and Coatings Technology*, 205, S84-S89. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.04.054>
- Hoppe, S. (1998). Fundamentals and applications of the combination of plasma nitrocarburizing and oxidizing. *Surface and Coatings Technology*, 98(1), 1199-1204. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(97\)00548-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0257-8972(97)00548-3)
- Jacquet, P., Coudert, J. B., & Lourdin, P. (2011). How different steel grades react to a salt bath nitrocarburizing and post-oxidation process: Influence of alloying elements. *Surface and Coatings Technology*, 205(16), 4064-4067. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.02.049>
- Jamalabadi, M. Y. A. (2025). REVOLUTIONIZING GEAR PERFORMANCE: CUTTING-EDGE HEAT TREATMENT METHODS, BREAKTHROUGH INNOVATIONS, AND INDUSTRY STANDARDS FOR SUPERIOR DURABILITY. *Journal of Sustainable Engineering & Green Technologies*, 1(1), 1-66.
- Józwik, J., Dziedzic, K., Usydus, I., Raos, P., & Krolczyk, G. (2016). HS 6-5-2 steel surface layer development in carbonitriding with zero-flow method. *Tehnicki Vjesnik*, 23, 1405-1409. <https://doi.org/10.17559/TV-20150402150811>
- Kathrein, M., Michotte, C., Penoy, M., Polcik, P., & Mitterer, C. (2005). Multifunctional multi-component PVD coatings for cutting tools. *Surface & Coatings Technology - SURF COAT TECH*, 200, 1867-1871. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.08.105>
- Kim, S., Yoon, S., Kim, J., & Park, S. (2020). The Effect of the Transformation of ϵ -Fe₂-3N into γ' -Fe₄N Phase on the Fatigue Strength of Gas-Nitrided Pure Iron. *Metals*, 10, 823. <https://doi.org/10.3390/met10060823>
- Klaassen, C. D., & Amdur, M. O. (2013). *Casarett and Doull's toxicology: the basic science of poisons* (Vol. 1236). McGraw-Hill New York.
- Korkmaz, E., Ari, A., Başıyigit, B., & Bayram, A. (2022). Effect of Plasma and Gas Nitriding Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of DIN 1.2367 Hot Work Tool Steel. *International Journal of Mechanical Engineering*, 9, 12-22. <https://doi.org/10.14445/23488360/IJME-V9I10P102>
- Kusmic, D., Hrubý, V., & Bachárová, L. (2016). Corrosion resistance of surface treated 42CrMo4 steel. 54, 491-496. <https://doi.org/10.4149/km-2016-6-491>
- Li, C. X. (2010). Active screen plasma nitriding – an overview. *Surface engineering*, 26(1-2), 135-141. <https://doi.org/10.1179/174329409x439032>

- Li, G.-j., Wang, J., Peng, Q., Li, C., Wang, Y., & Shen, B.-l. (2008). Influence of salt bath nitrocarburizing and post-oxidation process on surface microstructure evolution of 17-4PH stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 207(1), 187-192. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.082>
- Li, G., Niu, L., Lian, J., & Jiang, Z. (2004). A black phosphate coating for C1008 steel. *Surface and Coatings Technology*, 176(2), 215-221. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(03\)00736-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00736-9)
- Liu, B., Zhang, X., Xiao, G.-y., & Lu, Y.-p. (2015). Phosphate chemical conversion coatings on metallic substrates for biomedical application: A review. *Materials Science and Engineering: C*, 47, 97-104. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msec.2014.11.038>
- Marušić, K., Otmačić, H., Landek, D., Cajner, F., & Stupnišek-Lisac, E. (2006). Modification of carbon steel surface by the Tenifer® process of nitrocarburizing and post-oxidation. *Surface and Coatings Technology*, 201(6), 3415-3421. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.07.231>
- Narayanan, T. S. N. S. (1994). Phosphate Conversion Coatings - A Metal Pretreatment Process. *Corrosion Reviews*, 12(3-4), 201-238. <https://doi.org/doi:10.1515/CORRREV.1994.12.3-4.201>
- Narayanan, T. S. N. S. (2005). *Surface pretreatment by phosphating - A review* RAMS.
- NGAKE, T. L., & MJALI, K. V. (2024). Impact of Diffusion Coating and Laser Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Steel. *European Journal of Materials Science and Engineering*, 9(4), 245-268.
- Niu, L. Y., Jiang, Z. H., Li, G. Y., Gu, C. D., & Lian, J. S. (2006). A study and application of zinc phosphate coating on AZ91D magnesium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 200(9), 3021-3026. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.10.119>
- Ohmura, T., & Matsuoka, S. (2003). Evaluation of mechanical properties of ceramic coatings on a metal substrate. *Surface and Coatings Technology*, 169-170, 728-731. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(03\)00210-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00210-X)
- Olajire, A. A. (2018). Recent advances on organic coating system technologies for corrosion protection of offshore metallic structures. *Journal of Molecular Liquids*, 269, 572-606. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.08.053>
- Phuong, N. V., Lee, K., Chang, D., Kim, M., Lee, S., & Moon, S. (2013). Zinc phosphate conversion coatings on magnesium alloys: A review. *Metals and Materials International*, 19(2), 273-281. <https://doi.org/10.1007/s12540-013-2023-0>
- Rakhit, A. K. (2000). Nitriding Gears. In *Heat Treatment of Gears: A Practical Guide for Engineers* (pp. 0). ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.htgpgge.t67320133>
- S, A., Krishnamurthy, S., Kandasubramanian, B., & Kumar B, P. (2023). Probing into atomically thin layered nano-materials protective coating for aerospace and strategic defence application – A review. *Journal of Alloys and Compounds*, 968, 172203. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.172203>
- Saha, M. K., & Das, S. (2016). A review on different cladding techniques employed to resist corrosion. *Journal of the Association of Engineers*, 86(1-2), 51-63.

- Sahoo, G., Singh, K. K., & Kumar, V. (2020). Quenched and tempered high strength steel: A review. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 30(4), 19-29.
- Sampath, S. (2009). Thermal sprayed ceramic coatings: fundamental issues and application considerations. *International Journal of Materials & Product Technology - INT J MATER PROD TECHNOL*, 35. <https://doi.org/10.1504/IJMPT.2009.025691>
- Sankara Narayanan, T. (2005). Surface pretreatment by phosphate conversion coatings-A review. *Reviews in Advanced Materials Science*, 9, 130-177.
- Shen, D.-J., Wang, Y.-L., Nash, P., & Xing, G.-Z. (2007). A novel method of surface modification for steel by plasma electrolysis carbonitriding. *Materials Science and Engineering: A*, 458(1), 240-243. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.12.067>
- Siengchin, S. (2023). A review on lightweight materials for defence applications: Present and future developments. *Defence Technology*, 24, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2023.02.025>
- Singh, R. (2012). Classification of Steels. In (pp. 51-56). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-391916-8.00006-6>
- Slycke, J., & Ericsson, T. (1981). A study of reactions occurring during the carbonitriding process. *Journal of Heat Treating*, 2(1), 3-19. <https://doi.org/10.1007/BF02833069>
- Stojanović, Ž., Gligorijević, B., Prvulović, S., But, A., Svoboda, P., Pitel, J., & Vencl, A. (2025). Decarburization and Its Effects on the Properties of Plasma-Nitrided AISI 4140 Steel: A Review. *Materials*, 18(10), 2207.
- Sun, Y. (2005). Kinetics of low temperature plasma carburizing of austenitic stainless steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 168, 189-194. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.10.005>
- Taczała-Warga, J., & Pawęta, S. (2023). Low-pressure ferritic nitrocarburizing: a review. *Archives of Materials Science and Engineering*, 119(2).
- Thakare, M., Wharton, J., Wood, R., & Menger, C. (2007). Exposure effects of alkaline drilling fluid on the microscale abrasion–corrosion of WC-based hardmetals. *Wear*, 263(1-6), 125-136.
- Tong, W. P., Tao, N. R., Wang, Z. B., Lu, J., & Lu, K. (2003). Nitriding Iron at Lower Temperatures. *Science*, 299(5607), 686-688. <https://doi.org/10.1126/science.1080216>
- Totten, G. E., & Howes, M. (1997). *Distortion of heat-treated components*. Marcel Dekker, Inc. New York, NY, USA.
- Willmott, P. R. (2004). Deposition of complex multielemental thin films. *Progress in Surface Science*, 76(6), 163-217. <https://doi.org/10.1016/j.progsurf.2004.06.001>
- Winter, K.-M., Hoja, S., & Klümper-Westkamp, H. (2011). Controlled nitriding and nitrocarburizing – state of the art. *HTM Journal of Heat Treatment and Materials*, 66(2), 68-75. <https://doi.org/10.3139/105.110095>
- Zhang, Z., Wang, D., Liu, G., Qian, Y., Xu, Y., & Xiang, D. (2024). Surface modification of 42CrMo steels: A review from wear and corrosion resistance. *Coatings*, 14(3), 337.

ÖZGEÇMİŞ

Burak Berk DAY, ilköğrenimini Mehmet Akif Ersoy İlköğretim Okulu'nda bitirdikten sonra lise eğitiminin ilk iki yılını Dernekpazarı Hasan Cansız Kom lisesinde tamamladı. Lise öğreniminin 3. ve 4. senelerini Trabzon'un Of ilçesi Şehit Ahmet Türkkkan Çok Programlı Lisesi'nde tamamladı. 2015- 2019 yılları arasında Afyon Kocatepe Üniversitesi'nde Teknoloji Fakültesi'nde Metalurji ve Malzeme Mühendisliği anabilim dalından mezun oldu. 2021 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği anabilim dalında yüksek lisansına başladı. Orta derecede ingilizce bilmektedir.