

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**AISI 4140 ÇELİKLERİNDEN ÜRETİLEN HAFİF SİLAH KAPAK BİLEŞENLERİNİN
YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN NİTROKARBÜRİZASYON YÖNTEMİ İLE
GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Yavuz KÖKSAL

**EYLÜL 2022
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**AISI 4140 ÇELİKLERİNDEN ÜRETİLEN HAFİF SİLAH KAPAK
BİLEŞENLERİNİN YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN NİTROKARBÜRİZASYON
YÖNTEMİ İLE GELİŞTİRİLMESİ**

Mak. Müh. Yavuz KÖKSAL

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
“ MAKİNA YÜKSEK MÜHENDİSİ ”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 08 / 08 / 2022

Tezin Savunma Tarihi : 14 / 09 / 2022

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Gençğa PÜRÇEK
ORCID : - - -

ÖNSÖZ

AISI 4140 çeliklerinde diğer aşınma ve sürtünme davranışına maruz kalan çelikler gibi yüzey sertleştirme işlemlerine ihtiyaç duymaktadır. Bu çalışmada, AISI 4140 tabanca kapak parçalarına uygulanan ferritik nitrokarbürizasyon prosesi öncesi yüzey hazırlık işlemleri, nitrokarbürizasyon prosesi ve sonraki yüzey işlem süreçleri incelenmiş ve optimizasyon çalışmaları yürütülmüştür. Nitrokarbürizasyon prosesi için belirli sıcaklık ve süre parametrelerine bağlı olarak on iki farklı alt proses çalışılmış ve bu proseslere ait difüzyon derinlikleri ve tabaka (bileşik, beyaz ve poroz) kalınlıkları elde edilmiştir. Sonraki süreçte ise numunelerin korozyon dayanımı ve estetik bir görünüm kazanması için nitrokarbürizasyon sonrası yüzey işlemleri uygulanmıştır.

Bu konuyu seçmeme vesile olarak önemli bir bilgi birikimine sahip olmamı sağladığı ve çalışmalarım sırasında bilgisini ve tecrübesini paylaştığı için hocam Prof. Dr. Gençaga PÜRÇEK'e içtenlikle teşekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışmalarda verdiği katkılardan ötürü Dr. Harun YANAR'a da teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışmalarına sağladığı katkılardan dolayı TİSAŞ Ar-Ge merkezi yöneticileri ve mesai arkadaşlarım, Metalürji ve Malzeme Mühendisi Burak Berk DAY ve Ahmet Fuat GÜNAÇAR'a da teşekkür ederim. Çalışmaların tribolojik testler kısmında bana alt yapısını açarak destek veren UTS Yazılım ve Mühendislik firmasına da teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca, desteklerini esirgemeyen canım annem, babam, kardeşlerim ve eşime çok teşekkür ederim.

Yavuz KÖKSAL

Trabzon, 2022

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “AISI 4140 Çeliklerinden Üretilen Hafif Silah Kapak Bileşenlerinin Yüzey Özelliklerinin Nitrokarbürizasyon Yöntemi ile Geliştirilmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Gençğa PÜRÇEK’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlar da yaptığımı, 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. 14/09/2022

Yavuz KÖKSAL

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Çeliklere Uygulanan Yüzey Sertleştirme İşlemleri	5
1.2.1. Enerji Uygulamaya Dayalı Yüzey Sertleştirme İşlemleri.....	6
1.2.1.1. Alevle Yüzey Sertleştirme	7
1.2.1.2. İndüksiyonla Yüzey Sertleştirme.....	7
1.2.1.3. Lazerle Yüzey Sertleştirme.....	8
1.2.1.4. Elektron Demeti ile Yüzey Sertleştirme	8
1.2.2. Difüzyon Esaslı Yüzey Sertleştirme Metotları	9
1.2.2.1. Karbürleme	12
1.2.2.2. Borlama.....	13
1.2.2.3. Nitrürleme.....	14
1.2.2.4. Karbonitrürleme.....	15
1.2.2.5. Nitrokarbürizasyon (Nitrokarbürleme)	15
1.3. Oksidasyon.....	20
1.4. Yüzey Sertleştirme İşlemlerinin Hafif Silah Çeliklerine Uygulanması.....	21
1.4.1. Dönüşümlü Yüzey İşlemler	26
1.4.2. Metalik Kaplamalar	31
1.4.3. Polimer Kaplamalar	35
1.4.4. Seramik Kaplamalar	36

1.4.5.	Karbon Kaplamalar	37
1.5.	Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı	39
2.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	42
2.1.	Malzeme ve Deney Parçaları	42
2.2.	Uygulanan Prosesler	44
2.2.1.	Nitrokarbürizasyon İşlemi Öncesi Uygulanan Yüzey İşlemleri	46
2.2.2.	Nitrokarbürizasyon İşlemi	51
2.2.3.	Nitrokarbürizasyon İşlemi Sonrası Yüzey İşlemleri.....	52
2.3.	Pürüzlük ve Yüzey Topografyası İncelemeleri	54
2.4.	Numune Hazırlama Süreci.....	56
2.5.	Sertlik İncelemeleri.....	57
2.6.	Mikroyapısal İncelemeler	58
2.7.	Sürtünme ve Aşınma Testleri	58
3.	BULGULAR VE İRDELEME	60
3.1.	Nitrokarbürizasyon İşlemi Öncesi En İyi İyileme İşlemleri	60
3.1.1.	Kumlama En İyi İyileme İşlemi (Silindirik Numune ile).....	60
3.1.2.	Ultrasonik Yıkama En İyi İyileme İşlemi	64
3.2.	AISI 4140 Tabanca Malzemelerine Yönelik Nitrokarbürizasyon İşlemi	65
3.2.1.	Pürüzlülük.....	65
3.2.2.	Yüzey Topografyası İncelemeleri.....	74
3.2.3.	Mikroyapı.....	77
3.2.4.	Sertlik.....	88
3.2.5.	Sürtünme ve Aşınma Testleri	89
3.2.5.1.	Sürtünme ve Aşınma Testi Sonrası Yüzey Topoğrafya ve Pürüzlülüğü İncelemeleri	92
4.	GENEL SONUÇLAR.....	96
5.	ÖNERİLER.....	98
6.	KAYNAKLAR	99

ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

AISI 4140 ÇELİKLERİDEN ÜRETİLEN HAFİF SİLAH KAPAK BİLEŞENLERİNİN YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN NİTROKARBÜRİZASYON YÖNTEMİ İLE GELİŞTİRİLMESİ

Yavuz KÖKSAL

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Gençğa PÜRÇEK
2022, 104 Sayfa

Bu çalışmada, hafif silahlarda ateşleme esnasında ve sonrasında meydana gelen sürtünme, aşınma, yorulma, aşırı ısınma ve korozyon gibi olumsuz etkilerin nitrokarbürizasyon işlemi ile minimize edilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda temel tabanca parçalarından biri olan AISI 4140 kapak parçası yüzey hazırlık işlemleri optimize edilerek nitrokarbürizasyon prosesi öncesi en iyi yüzey durumuna getirilmiştir. Deney numunelerine farklı sıcaklık ve süre parametrelerinden oluşan on iki farklı nitrokarbürizasyon işlemi uygulanmıştır. Sonrasında ise tüm deney numunelerinin korozyon dayanımı artırmak ve estetik bir görünüm kazandırmak için numunelere oksidasyon ve kumlama işlemleri uygulanmıştır. Numunelere uygulanan her yüzey işlem sonrasında yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yapılmıştır. Nitrokarbürizasyon sonrası yüzey işlemleri de uygulandıktan sonra sertlik değeri ölçümü, metalografik incelemeler, aşınma testi, yüzey topografyası incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kumlama en iyilemesi sonrası en kararlı ve homojen yüzey S70 çelik bilye ile kumlanan numunelerde elde edilmiştir. Bileşik tabaka kalınlığının sıcaklık ve süre ile birlikte arttığı, aşınma miktarının ise bileşik tabaka değeri arttıkça azaldığı görülmüştür. Difüzyon tabakasındaki artışın süre ve sıcaklık artışı ile doğru orantılı arttığı, fakat işlem süresi arttıkça kalınlık artış hızında düşüş meydana geldiği tespit edilmiştir. Difüzyon tabakasının belirli kalınlığa ulaştıktan sonra yavaş ilerlediği; sertliğin ise difüzyona bağlı olmaksızın arttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Nitrokarbürizasyon, Hafif Silah Bileşenleri, Yüzey Sertleştirme, Aşınma Direnci

Master Thesis

SUMMARY

DEVELOPMENT OF SURFACE CHARACTERISTICS OF LIGHT WEAPON SLIDE COMPONENTS TO BE MADE OF AISI 4140 STEELS WITH NITROCARBURIZATION METHOD

Yavuz KÖKSAL

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Gençğa PÜRÇEK
2022, 104 Pages

In this study, it is aimed to minimize the negative effects such as friction, wear, fatigue, overheating and corrosion that occur in weapons during and after firing by nitrocarburization process. In this context, the AISI 4140 slide piece, which is one of the basic gun parts, has been brought to the best surface condition before the nitrocarburization process by optimizing the surface preparation processes. Twelve different nitrocarburization processes consisting of different temperature and time parameters were applied to the test samples. Afterwards, oxidation and sandblasting processes were applied to all test samples to increase corrosion resistance and to give them an aesthetic appearance. Surface roughness measurements were made after each surface treatment applied to the samples. After applying the surface treatments after nitrocarburization, hardness value measurement, metallographic examinations, wear tests, surface topography examinations were carried out. According to the results obtained, the most stable and homogeneous surface after sandblasting optimization was obtained in the samples blasted with S70 steel shot. It was observed that the composite layer thickness increased with temperature and time, while the rate of wear decreased as the composite layer value increased. It was determined that increasing in the diffusion layer also increased in direct proportion with the increase in time and temperature, but as the treatment time increased, the thickness increment rate decreased. After reaching a certain thickness, the increment rate in the diffusion layer decreased slowly; It was also observed that the hardness increased regardless of the diffusion.

Key Words: Nitrocarburizing, Light Weapon Components, Surface Hardening, Wear Resistance

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Çeliklere uygulanan yüzey sertleştirme metotları [1, 23].	5
Şekil 2. Difüzyon işlemlerinde kullanılan çelik türleri [1].	11
Şekil 3. Çeliklere uygulanacak difüzyon işlemleri ile elde edilebilen sertlik değer aralıkları [1, 26].	11
Şekil 4. 570 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen nitrokarbürizasyon proses süresinin beyaz tabaka kalınlığına etkisi [33]: (a) 1 saat, (b) 3 saat, (c) 5 saat ve (d) 6 saat	17
Şekil 5. Hafif ateşli AR-15 tipi tüfek parçalarından alınan dağlanmış örnek numuneler [45]: (a) Gövde, (b) Namlu, (c) Namlu hamili, (d) Mekanizma, (e) Döner başlık ve (f) Tırnak parçaları.....	25
Şekil 6. Sıvı nitrasyon uygulanmış hafif silah parçaları [51].	28
Şekil 7. Hafif silah bileşenlerine akımsız nikel kaplama [51].	33
Şekil 8. PVD yöntemi ile kaplanmış tabanca namluları [51].	38
Şekil 9. Kapak deney numunelerine ait katı model görüntüleri	44
Şekil 10. Kapak numunelerine uygulanacak prosesler ve proseslere ait operasyon şeması.....	45
Şekil 11. Kapak numunesine ait polisaj işlemleri: (a) Zımparalama ve (b) İnce zımparalama (Skoç zımparalama) işlemleri.....	47
Şekil 12. Kumlamada kullanılan AISI 4140 silindirik parçalar	48
Şekil 13. Temas açısı ölçüm cihazı (Dataphysics Oca 50 Micro).....	49
Şekil 14 . Ultrasonik yıkama ünitesi bölümleri: (a) Ultrasonik yıkama ünitesi, (b) Korozyondan koruyucu sıvıya daldırma (c) Durulama ünitesi, (d) Bekleme ünitesi ve (e) Kurutma ünitesi	51
Şekil 15. Bazı kapak numuneleri: (a) Nitrokarbürizasyon işlemi sonrası ve (b) Oksidasyon işlemi sonrası	52
Şekil 16. İkinci kumlama ve ikinci oksidasyon işlemleri sonrası kapak numuneleri.....	53
Şekil 17. Koruyucu yağ banyosu daldırılmış kapak numuneleri.....	54
Şekil 18. Kapak numunelerindeki yüzey pürüzlülük ölçüm bölgeleri	54
Şekil 19. 3D optik profilometre cihazı	55

Şekil 20. (a) Kapak parçasından alınan kesit örneği ve (b) Metalografik inceleme için belirlenen bölge.....	56
Şekil 21. Bakalite alınan numune örnekleri.....	57
Şekil 22. Sürtünme ve aşınma testi için hazırlanan deney numunesine ait şematik görünüm	59
Şekil 23. Mevcut çalışmada kullanılan disk üzerinde bilye temas konfigürasyonuna sahip sürtünme ve aşınma test donanımı (UTS TRIBOLOG)	59
Şekil 24. Temas açısı ölçüm görüntüleri: (a) Proses-1 (Numune-1), (b) Proses-2 (Numune-3), (c) Proses-3 (Numune-5), (d) Proses-4 (Numune-7).....	62
Şekil 25. Korozyona uğrayan örnek numuneye ait stereo mikroskop görüntüsü.....	65
Şekil 26. K-1 Numunesine uygulanan operasyonlar sonrası Ra ölçümleri	71
Şekil 27. K-1 numunesine uygulanan operasyonlar sonrası Rz ölçümleri	71
Şekil 28. Numunelere uygulanan operasyonlar sonrası Ra grafiği	72
Şekil 29. Numunelere uygulanan operasyonlar sonrası Rz grafiği	73
Şekil 30. Deney numunelerine ait yüzey topografyası görüntüleri: (a) Numune 1, (b) Numune 2, (c) Numune 3, (d) Numune 4, (e) Numune 5 ve (f) Numune 6	75
Şekil 31. Deney numunelerine ait yüzey topografyası görüntüleri: (a) Numune 7, (b) Numune 8, (c) Numune 9, (d) Numune 10, (e) Numune 11 ve (f) Numune 12 ..	76
Şekil 32. Kapak-1 numunesine ait iç yapı görüntüleri: (a) Difüzyon derinliği, (b) Tabaka kalınlığı ((1) Bileşik tabaka, (2) Poroz tabaka ve (3) Beyaz tabaka) ölçümleri..	78
Şekil 33. Kapak-2 numunesine ait iç yapı görüntüleri: (a) Difüzyon derinliği, (b) Tabaka kalınlığı ((1) Bileşik tabaka, (2) Poroz tabaka ve (3) Beyaz tabaka) ölçümleri..	78
Şekil 34. Kapak-3 numunesine ait iç yapı görüntüleri: (a) Difüzyon derinliği, (b) Tabaka kalınlığı ((1) Bileşik tabaka, (2) Poroz tabaka ve (3) Beyaz tabaka) ölçümleri..	79
Şekil 35. Kapak-4 numunesine ait iç yapı görüntüleri: (a) Difüzyon derinliği, (b) Tabaka kalınlığı ((1) Bileşik tabaka, (2) Poroz tabaka ve (3) Beyaz tabaka) ölçümleri..	79
Şekil 36. Kapak-5 numunesine ait iç yapı görüntüleri: (a) Difüzyon derinliği, (b) Tabaka kalınlığı ((1) Bileşik tabaka, (2) Poroz tabaka ve (3) Beyaz tabaka) ölçümleri..	80
Şekil 37. Kapak-6 numunesine ait iç yapı görüntüleri: (a) Difüzyon derinliği, (b) Tabaka kalınlığı ((1) Bileşik tabaka, (2) Poroz tabaka ve (3) Beyaz tabaka) ölçümleri..	80
Şekil 38. Kapak-7 numunesine ait iç yapı görüntüleri: (a) Difüzyon derinliği, (b) Tabaka kalınlığı ((1) Bileşik tabaka, (2) Poroz tabaka ve (3) Beyaz tabaka) ölçümleri..	81
Şekil 39. Kapak-8 numunesine ait iç yapı görüntüleri: (a) Difüzyon derinliği, (b) Tabaka kalınlığı ((1) Bileşik tabaka, (2) Poroz tabaka ve (3) Beyaz tabaka) ölçümleri..	81
Şekil 40. Kapak-9 numunesine ait iç yapı görüntüleri: (a) Difüzyon derinliği, (b) Tabaka kalınlığı ((1) Bileşik tabaka, (2) Poroz tabaka ve (3) Beyaz tabaka) ölçümleri..	82

Şekil 41. Kapak-10 numunesine ait iç yapı görüntüleri: (a) Difüzyon derinliği, (b) Tabaka kalınlığı ((1) Bileşik tabaka, (2) Poroz tabaka ve (3) Beyaz tabaka) ölçümleri..	82
Şekil 42. Kapak-11 numunesine ait iç yapı görüntüleri: (a) Difüzyon derinliği, (b) Tabaka kalınlığı ((1) Bileşik tabaka, (2) Poroz tabaka ve (3) Beyaz tabaka) ölçümleri..	83
Şekil 43. Kapak-12 numunesine ait iç yapı görüntüleri: (a) Difüzyon derinliği, (b) Tabaka kalınlığı ((1) Bileşik tabaka, (2) Poroz tabaka ve (3) Beyaz tabaka) ölçümleri..	83
Şekil 44. Difüzyon derinliğinin sıcaklık ve süre ile değişimi.....	86
Şekil 45. Bileşik tabaka kalınlığının sıcaklık ve süre ile değişimi	86
Şekil 46. Beyaz tabaka kalınlığının sıcaklık ve süre ile değişimi	87
Şekil 47. Poroz tabaka kalınlığının sıcaklık ve süre ile değişimi	87
Şekil 48. Yüzeyden 25 µm derinlikteki ortalama sertlik değerleri grafiği	89
Şekil 49. Deney numunelerine ait sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvveti grafikleri: (a) Numune 3, (b) Numune 8 ve (c) Numune 10	91
Şekil 50. Sürtünme ve aşınma testi uygulanan deney numunelerine ait üç boyutlu (3D) yüzey topografyası görüntüleri: (a) Numune 3, (b) Numune 8 ve (c) Numune 10	94
Şekil 51. Sürtünme ve aşınma testi uygulanan deney numunelerine ait iki boyutlu (2D) aşınma izi profili: (a) Numune 3, (b) Numune 8 ve (c) Numune 10.....	95

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Difüzyon metotlarının genel özellikleri ve teknik verileri [1, 5].	10
Tablo 2. Dünyada popüler olarak silah üretiminde uygulanan yüzey işlemleri [45].	23
Tablo 3. AR-15 tipi hafif silahın kritik parçalarına ait malzemeler ve yüzey işlemleri [45].	24
Tablo 4. AISI 4140 çelik malzemesine ait standart kimyasal bileşimler	43
Tablo 5. Örnek olması açısından, tedarik edilen 4140 kapak malzemesi üzerinden yapılan örnek bir spektral analiz raporu	43
Tablo 6. Tedarik edilen 4140 ham mamul malzemesine ait ortalama mekanik özellik değerleri	43
Tablo 7. Taşlama işlemine ait bazı teknik veriler	46
Tablo 8. Kumlama en iyilemesi sırasında kullanılan kum çeşitleri	47
Tablo 9. Kumlama sırasında kullanılan kumlara ait teknik özellikler	48
Tablo 10. Ultrasonik yıkama işlemleri ve parametreleri	50
Tablo 11. Koruyucu yağ banyosu değişimi	53
Tablo 12. Kumlama işlemi uygulanan numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri	61
Tablo 13. Kumlama işlemi uygulanan numunelerin temas açısı değerleri	62
Tablo 14. Kumlama işlemi optimizasyonu için hazırlanan silindirik numunelerin nitrokarbürizasyon işlemi sonrası difüzyon derinliği ve beyaz tabaka kalınlıkları	64
Tablo 15. Numunelere ait Ra değerleri tablosu	68
Tablo 16. Numunelere ait Rz değerleri tablosu	69
Tablo 17. Numunelere ait ortalama Ra değerleri tablosu	70
Tablo 18. Numunelere ait ortalama Rz değerleri tablosu	70
Tablo 19. Deney numunelerinin yüzey topoğrafya incelemeleri sonucu elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerleri	77
Tablo 20. Mikroyapı inceleme verileri şablonu	77
Tablo 21. Tüm proseslere ait mikroyapı inceleme verileri (Difüzyon derinliği, bileşik tabaka kalınlığı, beyaz tabaka kalınlığı ve poroz tabaka kalınlığı)	85

Tablo 22. Numunelere ait ortalama sertlik değerleri ve standart sapma değerleri (Uygulanan yük= 0,1 kg ve Vickers uç)	88
Tablo 23. Deney numunelerine ait sürtünme katsayısı değerleri	92
Tablo 24. Sürtünme ve aşınma testi uygulanan numunelerden elde edilen teknik veriler özet tablosu	95



SEMBOLLER DİZİNİ

AISI	: Amerikan Demir Çelik Enstitüsü
Fe	: Demir
N	: Azot
C	: Karbon
HV	: Vickers Sertlik Değeri
HRC	: Rockwell-C sertliği
Ra	: Yüzey Pürüzlülük Değeri (μm)
Rz	: Yüzey Pürüzlülük Değeri (μm)
ϵ	: Fe_{2-3} (N, C)
γ'	: Fe_4 (N, C)
μm	: Mikrometre

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Gelişen teknoloji ile makine elemanlarından beklenen yüksek aşınma ve korozyon direnci ile yorulma dayanımı gibi mekanik özellikleri iyileştirmek için birçok yüzey işlem tekniği kullanılmaktadır [1]. Mekanik sistemler kullanım alanına göre aşırı yük ve yüksek hız gibi birçok ağır koşullar altında çalışmaktadır [2]. Mekanik sistemlerde yer alan makine elemanları sağlamaları gereken fonksiyonları yerine getirirken dış yüzeyleri iç yüzeylerine göre daha yüksek gerilme ve daha yüksek aşındırıcı kuvvetler etkisinde kalmaktadır. Bu etkiler malzemenin yüzey dayanım sınırını aşınca malzeme yüzeyinde kırılmalar başlar ve aşınma meydana gelir. Bu sebeple malzeme dış yüzeyinden içine doğru bir hasar meydana gelir. Daha uzun bir ömür için bu tür etkilere maruz kalan malzemelerinin yüzey dayanımları artırılması gerekmektedir [2, 3]. Bu nedenle yüzey işlemleri hakkında endüstriyel ve bilimsel çalışmalar, mevcut malzemelerden beklenen özellikleri sürekli iyileştirme ve geliştirme doğrultusunda sürdürülmektedir [2]. Bu çalışmalar ile son yıllarda metalik malzemelerin mikro yapıları, temel mekanik özellikleri ve kırılma karakteristikleri arasındaki ilişkiler üzerine yapılan çalışmalara olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır [4].

Yüzey mühendisliği, sürtünmenin söz konusu olduğu makine elemanlarında gözlemlenen aşınma problemlerini azaltmak, metalik makine elemanlarının ve takımların yüzey ve yüzeye yakın yerlerinde daha iyi mekanik özellikler ve fonksiyonellik elde etmek amacıyla son yıllarda endüstriyel uygulamalarda ihtiyaç duyulan bir yöntem haline gelmiştir. Uygulamada, malzemelerin hem dinamik yükleri karşılayabilmek için sünek bir içyapıya hem de sert, yorulma ve aşınma dayanımı yüksek, korozyon direnci iyi bir dış yüzeye sahip olması gibi beklentiler doğrultusunda yüzey sertleştirme işlemleri uygulanmaktadır. Hem geleneksel hem de günümüzde uygulanan modern yüzey işlemlerinin amacı birdir [2]. Genel olarak bütün yüzey sertleştirme işlemlerinin amacı, malzemenin aşınma, yorulma ve korozyon dayanımını artırarak malzemeden beklenen özelliklerin sağlanmasıdır. Malzemenin kazandığı yeni mekanik özellikler sayesinde, aşınma ve korozyon kayıpları azalmakta, malzemenin ömrü uzamaktadır. Yüzey işlemleri ile malzemelerin daha verimli kullanılabilmesi sağlanmakta ve aşınma kayıpları büyük ölçüde

azaltılmaktadır. Malzemenin iç ve dış yapısını etkileyen ısıtma işlem yöntemleri çekme ve basma dayanımı gerektiren kullanım durumları için vazgeçilmez olsa da yüksek aşınma, korozyon ve yorulma dayanımının gerektiği durumlarda bu işlemlerin kullanılması yeterli değildir. Yüzey sertleştirme metotları sayesinde malzemenin çekirdek kısmında herhangi değişiklik olmadan, sadece yüzeyin geliştirilmesiyle aşınma, korozyon ve yorulma dayanımının yükseltilmesi sağlanmaktadır [5, 6, 7]. Malzeme yüzeyinde istenilen derinliğe kadar sertleşme sağlayan, sünek iç yapıyı etkilemeyen değişik yüzey sertleştirme yöntemleri geliştirilmiştir. Sertleştirilen malzeme özellikleri, arzu edilen sertlik değeri ve derinliği, uygulanabilirlik, malzemenin kullanım şartları ve gelişen teknolojiye bağlı olarak çok değişik yüzey sertleştirme yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir [8]. Yüzey işlemlerini öncelikle, yüzeyde yeni bir tabaka oluşturularak ve tabaka oluşturmaksızın yapılan işlemler olmak üzere iki ana gruba ayırmak mümkündür. İlk grup yüzey işlemlerinde yeni bir tabaka ilavesi, ince filmler, kaplamalar veya kaynaklı üst tabakalardan oluşmaktadır. İkinci grup ise tabaka oluşturmaksızın yüzey modifikasyonu içermektedir. Yani karbon, azot ve bor gibi sertleştirici elementler yardımıyla difüzyon yöntemi ile yüzeyin kimyasal bileşimi değiştirilmektedir. Bir parçanın yüzeyden içeriye doğru sertliğini artırmak için çok sık olarak difüzyon teknikleri tercih edilirken, buna karşılık bir parçanın lokal olarak sadece istenilen kısımlarının sertleştirilmesinde seçimli sertleştirme metotları kullanılmaktadır [1, 5].

Difüzyon yoluyla yüzey sertleştirmede kullanılan en eski metotlar karbürleme ve nitrürlemedir. Yeni kullanım alanlarının doğması, taleplerin oluşması ve gelişen teknoloji ile bu teknikler değişime uğramıştır. Karbürleme ve nitrürleme işlemlerinin farklı parametreler dahilinde karışımı olan karbonitrürleme ve nitrokarbürlemenin yanı sıra, üstün özellikleri ve özel kullanım amacına yönelik borlama başta olmak üzere alüminyum, krom, silikon, titanyum ve vanadyum gibi elementlerle kimyasal modifikasyonu içine alan birçok özel difüzyon metodu oluşturmaktadır [5]. Yeni tekniklerin ortaya çıkmasında karbürleme işleminin yüksek sıcaklıklarda yapılması, nitrürleme işlemi için alaşımlı çelik şartının olması gibi sebepler etkili olmuştur. Bu yeni tekniklerden biri olan nitrokarbürleme işlemi, malzemelerin aşınma direnci, yorulma ve korozyon direncini iyileştirmekte kullanılan en önemli termokimyasal işlemlerden biridir. Bu işlem, oldukça kalın azot difüzyon bölgesi üzerine 10-20 µm kalınlıkta hekzagonal sıkı paket (hcp) karbonitrür ($Fe_{2-3}(N, C)$) fazından oluşan beyaz tabakayı üretmek için parça yüzeyine azot ve karbon atomlarının eş zamanlı difüzyonunu içerir. Karbür ve nitrürler içeren bileşik tabaka ve difüzyon bölgesi malzemelerin mekanik özelliklerinde iyileşmeler sağlar [9, 10].

Fe-N diyagramına dayanarak ötektoid nokta (590°C) referans alınarak nitrokarbürizasyon işlemi iki sınıfa ayrılabilir. Fe-N diyagramında ötektoid sıcaklık altında yapılan nitrokarbürizasyon işlemine ferrit fazının baskın olmasından dolayı ferritik nitrokarbürizasyon, ötektoid sıcaklığın üstünde yapılan nitrokarbürizasyon işlemine ise östenit fazının baskın olması sebebiyle östenitik nitrokarbürizasyon adı verilir [11]. Heydarzadeh vd. [11] AISI 4140 çeliğinin 530°C, 570°C ferritik ve 630°C'de östenitik olarak plazma nitrokarbürleme ve oksidasyon işlemlerine tabi tutmuşlardır. Bu çalışma sonucunda AISI 4140 çeliğinin korozyon direncinin arttığını ve en yüksek korozyon direncinin 570°C'de ferritik olarak nitrokarbürleme sonrası elde edildiğini tespit etmişlerdir. Bunun yanı sıra nitrokarbürizasyon işlemini uygulama tekniklerine göre de sınıflandırmak mümkündür. Nitrokarbürizasyon prosesinin uygulama teknikleri; gaz nitrokarbürizasyon, tuz banyosu nitrokarbürizasyon, (iyon) plazma nitrokarbürizasyon şeklindedir [12]. Bu yöntemler ile ilgili birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Hidrokarbonların propan veya endotermik gaz atmosferine ilave edilmesi ile gerçekleşen gaz nitrokarbürleme işlemi eskiden beri yaygın olarak kullanılmaktadır. Gaz nitrokarbürleme işlemini karbonitrilemeden ayıran en büyük özellik işlem sıcaklığıdır. Gaz nitrokarbürleme yaklaşık 570°C'de gerçekleşir [13]. Genel uygulama alanları olarak, tekstil makine dişlileri, pompa silindir blokları, füze savarlar, jet memeleri ve krank biyeller gibi aşınma ve yorulma mukavemetinin özellikle istendiği alanlar gösterilebilir [13]. Plazma nitrokarbürleme işlemi ise demir esaslı malzemelerin yüzeyine azot ve karbon yayılımının plazma ortamında gerçekleşmesi sonucu oluşan termokimyasal bir işlemdir. Bu işlem genellikle düşük alaşımlı çelikler ve sade karbonlu çelikler gibi maliyeti düşük olan malzemelerde tercih edilmektedir. Bu kapsamda plazma nitrokarbürleme silah endüstrisinde, otomotiv sanayinde, kalıp uygulamalarında, metalürji sektöründe ve takım imalat sanayinde son yıllarda geniş uygulama alanı bulan yüzey sertleştirme yöntemidir [3, 5, 13]. Bir diğer işlem olan tuz banyosu nitrokarbürleme ise en eski tekniklerden olup, sıvı nitrokarbürleme olarak da adlandırılmaktadır. Bu çalışma kapsamında da kullanılacak olan sıvı nitrokarbürleme işlemi genelde küçük parçalar için tercih edilir. Tuz banyosu içeriği sıvı azot, siyanür, karbonat ve siyanat içeren eriyik tuzlardan oluşmaktadır. Pompalar, pistonlar, vanalar, dişliler, cıvatalar, somunlar, silindir başları, oturak dirsekleri gibi birçok alanda tercih edilmektedirler [14].

Nitrokarbürleme işleminin aşınma özelliklerini ne şekilde etkilediğini araştıran birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda nitrokarbürleme de aşınma mekanizmasının başlangıçta adhezif olmasına rağmen sert ve kırılgan beyaz tabakanın parçalanmasıyla

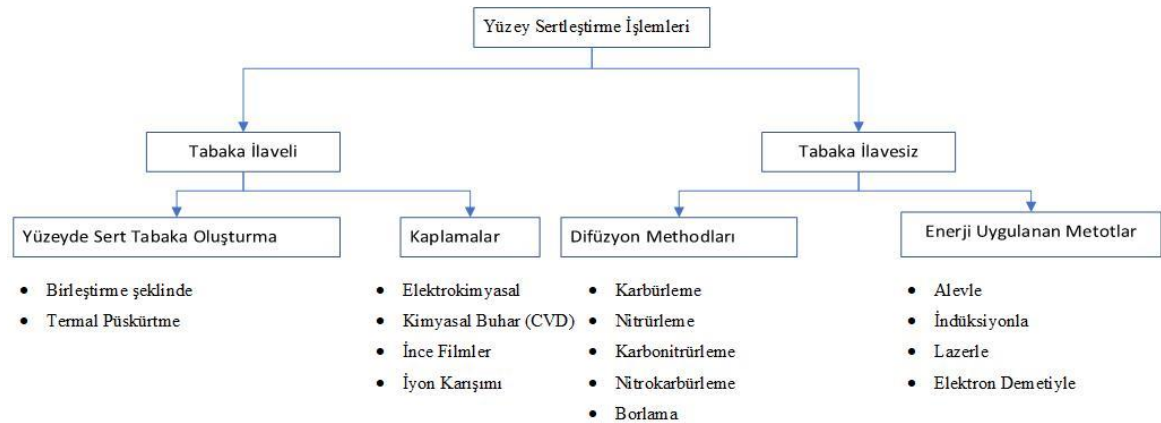
abrazif aşınmanın en önemli aşınma mekanizması olduğu vurgulanmıştır. Özellikle yüzeyde oluşacak tek fazlı ya da baskın ϵ -Fe₂₋₃ (N, C) beyaz tabakasının aşınma mukavemetini iyileştirdiği rapor edilmiştir [15, 16]. Krishnaraj vd. [17] tuz banyosunda nitrokarbürlenen H11 çeliğinin aşınma mukavemeti için beyaz tabaka kalınlığının etkisini pin-on-disk aşınma makinasında araştırarak beyaz tabaka kalınlığı ile aşınma mukavemetinin orantılı olduğunu tespit etmiştir.

Nitrokarbürizasyon işlemi ile oluşan tabakanın gözenekli yapısından dolayı çelik yüzeyi için nitrokarbürleme işlemi tek başına yeterli olmamaktadır. Nitrokarbürleme sonrası oksidasyon işlemi uygulamak malzemenin aşınma ve korozyon direncini artıracak iyi bir seçenek olarak görülmektedir [1]. Oksidasyon işlemi oksijen zengin gaz veya gaz karışımı atmosferinde, 350-500°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir. İşlem sonrası malzeme yüzeyinde 0,5-3,5 μ m kalınlığında demir oksit tabakası oluşmaktadır [18, 19]. Bu işlem ile ilgili yapılan bir çalışmada nitrokarbürleme sonrası korozyon direncinin düştüğü ve daha sonra uygulanan post oksidasyon işlemi ile çeliğin korozyon direncinin işlemsiz durumdaki değerine yaklaştırılarak iyileştirildiği ortaya konmuştur [2]. Heydarzadeh vd. [11] ise oksidasyon öncesi ve sonrası korozyon davranışını inceleyerek artan nitrokarbürizasyon sıcaklığı ile N ve C hareketliliğinden dolayı beyaz tabaka kalınlığında artış olduğu, oksidasyon işlemi ile beyaz tabaka kalınlığının azalırken, ara tabaka kalınlığının arttığını tespit etmişlerdir. Bir diğer çalışmada, Lee vd. [20] plazma nitrokarbürlenmiş AISI 1020 çeliğinin oksidasyon işlem süresini inceleyerek oksidasyon sonrası oluşan oksit tabakasının kalınlığının belirli bir süreye kadar arttığını, daha sonra ise azaldığını belirlemiştir.

Bu tez çalışmasında, hafif silah sanayi sektöründe çokça kullanılan AISI 4140 çeliğinin nitrokarbürizasyon öncesi ve sonrası yüzey özelliklerinin durumunu yapısal, mekanik, metalografik ve tribolojik açıdan inceleyerek nitrokarbürizasyon prosesinin karektarizasyonu amaçlanmıştır. Bu kapsamda, nitrokarbürizasyon öncesi en iyilenen yüzey kalitesini elde edebilmek için farklı yüzey hazırlık süreçlerinin uygulanması ve bazı yüzey hazırlık işlemlerinin en iyilemesi (optimizasyonu) hedeflenmiştir. Nihai ürün eldesi içinde farklı yüzey işlemleri uygulanarak homojen bir yüzey ve estetik bir görünüm elde edilmesi hedeflenmiştir.

1.2. Çeliklere Uygulanan Yüzey Sertleştirme İşlemleri

Uzun yıllardan beri malzeme yüzeylerini sertleştirmek için birçok yüzey sertleştirme teknikleri kullanılmaktadır. Bu teknikler ile ana malzemenin sertliğini değiştirmeksizin parçaların yüzeyden içeriye doğru sertleştirilerek aşınma dirençlerini artırmada kullanılırlar. Bu işlemler malzeme yüzeyinde yüksek aşınma dayanımının, malzeme çekirdeğinde ise yüksek tokluk ve darbe dayanımının istendiği durumlarda tercih edilir. Bunun yanı sıra sert bir yüzey istenmesi ve aynı zamanda malzeme çekirdeğinin yumuşak ve tok olması yüksek darbe mukavemeti sağlamaktadır. Yüzey sertleştirme esnasında oluşan bası gerilmesi artışı ile malzemenin yorulma mukavemeti de artmaktadır [15, 21]. Özetle yüzey sertleştirme işlemleri, malzemenin tamamı yerine sadece yüzeyinde gerçekleşerek, parçanın aşınmaya maruz kalan yüzeyinde veya yüzeyin belirli bölgelerinde sert ve aşınmaya dayanıklı bir yüzey oluşturmak için tercih edilmektedir. Yüzeyde oluşan ince ve sert tabaka sadece aşınma direncini değil, aynı zamanda yorulma ve korozyon dayanımını da arttırmaktadır. Yüzey sertleştirme işlemlerinin, diğer ısıtım işlem yöntemlerine göre avantajı da malzemenin tamamını gevrekleştirmeden, malzeme çekirdeğinde yüksek tokluk gerektiren durumlarda gerekli darbe dayanımını ve tokluğu sağlayabilmesidir. Bu sebeple güç aktarımı yapılan, yüksek aşınma direnci, yüksek tokluk ve darbe dayanımının beklenildiği makine parçalarında kullanılmaktadır [1, 7]. Şekil 1’de görüldüğü üzere yüzey sertleştirme işlemleri iki grup altında incelenebilmektedir. İlk grup yeni bir tabaka ilavesi veya tabaka oluşturan metotlar, ikinci grup ise yüzey ve yüzey altı modifikasyon metotları yani tabaka ilavesi olmaksızın uygulanan metotlar halinde incelenmektedir [1, 22].



Şekil 1. Çeliklere uygulanan yüzey sertleştirme metotları [1, 23].

Yüzey sertleştirme işlemlerinde ilk gruba tabaka ilavesinin olduğu, ince filmler, kaplamalar veya kaynaklı üst tabakalar girmektedir. Bu metotlar, malzemenin tüm yüzeyinin sertleştirilmesi istenildiğinde genellikle daha az maliyetle ürün kalitesini artırmayı amaçlamaktadır. Filmler, kaplamalar ve üst tabakaların yorulma performansı, ana malzeme ile ilave edilen tabaka arasında yapışma kabiliyetine bağlı olarak değişmektedir. Dolgu kaynaklı üst tabakaların üstün adezyon kuvvetlerine rağmen, kalın tabaka sertleştirme uygulamalarında, genellikle alevle veya indüksiyonla sertleştirilmiş çelikler kullanılır. Bununla birlikte kaplamalar veya üst tabakalar bazı uygulamalar için ilk tercih olabilmektedir. Örneğin, TiN ve Al₂O₃ kaplamalar sadece sertliklerinden dolayı değil aynı zamanda takımlarda talaşlara ve bazı aşınmalara karşı kimyasal olarak ilgiyi de azaltır. Üst tabakalar, büyük alanların seçimli yüzey sertleştirilmesi gerektiği zaman uygun bir işlem olabilir [1, 5]. Difüzyon yöntemleri ve seçimli sertleştirme teknikleri yüzeyde tabaka oluşturmayan ikinci yüzey sertleştirme metot grubu içerisinde yer almaktadır. Difüzyon metotları, karbon, azot ve bor gibi sertleştirici elementleri kullanarak yüzeylerin kimyasal kompozisyonunun değiştirilmesini içerir. Bir parçanın yüzeyden içeriye doğru etkili bir şekilde sertliğini artırmak için difüzyon teknikleri sıkça tercih edilmektedir. Buna karşılık seçimli sertleştirme metotları bir parçanın lokal olarak sadece istenilen kısımlarının sertleştirilmesini sağlamaktadır [1, 5].

1.2.1. Enerji Uygulamaya Dayalı Yüzey Sertleştirme İşlemleri

Seçimli sertleştirme metotları bir parçanın lokal olarak sadece istenilen kısımlarının sertleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Çeliklerin yüzeylerinin seçimli sertleştirilmesi, yüzeyde kimyasal bir modifikasyon olmaksızın, tipik olarak ısıtma ve su vermeyle yapılmaktadır. Bununla birlikte seçimli yüzey sertleştirme, iyon implantasyonu (aşılama) ve seçimli karbürleme tekniklerinde olduğu gibi kimyasal modifikasyonla da yapılabilmektedir. Çeliklerin yüzeyini seçimli sertleştirmek için mevcut en yaygın kullanılan yöntemler alev ve indüksiyonla sertleştirmedir. Bununla birlikte bu metotların her birinin bazı uygulamalar için sınırlayıcı dezavantajları vardır. Örneğin alevle sertleştirmede parça distorsiyonu problemi varken, indüksiyonla sertleştirmede özellikle yüksek frekanslarda çok küçük parçalarda soğutma mesafesi gereklidir [1, 5].

Bu çalışma da uygulanan ferritik nitrokarbürleme ve post-oksidasyon yöntemleri, tabaka ilavesiz difüzyon metotlarından olduğundan, difüzyon metotları ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Enerji uygulamaya dayalı yüzey sertleştirme metotları hakkında ise yüzeysel incelemeler yapılmıştır.

1.2.1.1. Alevle Yüzey Sertleştirme

Yüksek yoğunluklu bir oksiasetilen alevi iş parçasının seçilmiş bir bölgesine uygulanır. Sıcaklık östenit dönüşüm bölgesine çıkıncaya kadar yükseltilir. Isıtılan bölgeye arzu edilen sertliği kazandırmak için su verilir. Böylece ferrit ve perlit iç yapıya sahip daha yumuşak bir çekirdek, malzeme yüzeyinde ise sert martenzitik bir tabaka elde edilir. Yüzey kompozisyonlarında herhangi bir değişim içermemesi nedeniyle alevle sertleştirilecek çeliklerin sertleştirme için yeterli karbon bileşimine sahip olması gerekmektedir. Alevle sertleştirme ekipmanları, otomatik indeks, ısıtma ve su verme parçalarından oluşan uygun bir cihaz veya özel olarak dizayn edilmiş kafa olarak tabir edilen bir torç olmalıdır. Ölçü ve şekilleriyle fırın ısıtma işlemine uygun olmayan dişli çark ve makine takım kızakları gibi büyük parçalar kolayca alevle sertleştirilebilir [1, 5, 23].

1.2.1.2. İndüksiyonla Yüzey Sertleştirme

Genel olarak %0,35-0,7 oranında karbon içeren çelikler, pratikte ise en az %0,45 karbon oranına sahip çelikler, indüksiyon ile sertleştirilebilir. Bu işlemten sonra yüzeyin 0,5-4 mm aralığında 45-60 HRC sertlik elde edilir. İndüksiyon çeliklerine önce ıslah, sonradan indüksiyon yapılırsa, çekirdekte 30-35 HRC sertlikte darbe dayanımı yüksek, yüzeyde ise 45-60 HRC sertliğinde sert ve aşınma dayanımı yüksek bir yapı elde edilir [24].

Yüksek frekanslı, indüktif akımdan faydalanarak parça yüzeyinde çok ince bir tabaka ani olarak kritik sıcaklık üzerine çıkarılıp hızlı olarak soğutulularak yüzeyi sertleştirilebilir. Üniform yüzey sertleştirme, lokal yüzey sertleştirme, sertleştirme ve sertleşen parçaların temperlenmesi işlemlerinde kullanılabilen çok yönlü bir metottur. Isıtma, genellikle su soğutmalı bakırdan yapılmış bir indüktör vasıtasıyla geçirilen yüksek frekanslı alternatif akım kullanılarak üretilen manyetik alana parçanın yerleştirilmesiyle yapılır. İndüksiyonla üretilen ısıнын derinliği alternatif akımın frekansıyla ilgilidir. Avantajları, yalnızca istenilen

bölgenin sertleştirilmesi, ısıtma süreleri, minimum yüzey dekarbürizasyonu ve oksidasyonu sadece hafif deformasyon, artan yorulma mukavemeti, bir üretim hattı ile birleştirilebilme imkânı ve düşük işlem maliyetidir. Dezavantajları olarak, yanında yüksek kalitede cihaz gereksinimi ve sadece belirli sayıda çeliğe uygulanabilmesidir [1, 5].

1.2.1.3. Lazerle Yüzey Sertleştirme

Çelik ve dökme demir makine elemanlarının lokal alanlarını sertleştirmek için geniş olarak kullanılmaktadır. Isıtma işlemi lazer ışığının emilmesi yardımı ile yapılmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken husus erimenin kontrol altında tutulması gerektiğidir. Lazerin parça yüzeyine uyguladığı ışınlar yüzeyde ısınma meydana getirecektir. Işın kesildiğinde veya hareket ettirildiğinde oluşan ısı iç kısımlara kısa sürede iletileceği için ısınan bu bölge ani olarak soğuyacak ve sertleşecektir. Diğer metotlara göre daha fazla sertlik elde edilebilir. Dar ve girilmesi zor bölgeler bu yöntem ile sertleştirilebilir. İndüksiyon veya alevle yüzey sertleştirme işlemlerinde olduğu gibi bu işlemde de kimyasal bir değişim söz konusu değildir. Alev ve indüksiyonla sertleştirmeden ayrılan diğer bir özelliği ise çok az lokal mesafelerde bile sertlik artışı sağlayabilmesidir. Lazer ışığı, ısıtılan nokta veya izin genişliği kontrol edilen odaklanabilen lensli aynalarla yansıtılır.

Çelikler için tipik tabaka derinlikleri 250-750 μm ve dökme demirler için yaklaşık 1000 μm 'dir. Sertleşen tabaka çok ince olduğu için herhangi bir taşlama işlemi yapılmaz. Bu sebeple parçanın son boyutlarında olması gerekir. Lazer fırlatma sistemlerinin esnekliği ve elde edilen düşük distorsiyon ve yüksek yüzey sertliği, kam mili ve krank mili gibi düzensiz şekilli makine elemanları üzerinde aşınma ve yorulma eğilimli alanların seçimli sertleştirilmelerinde sıkça kullanılmaktadır [1, 5].

1.2.1.4. Elektron Demeti ile Yüzey Sertleştirme

Bu işlem demir esaslı parçaların seçilen yüzey alanlarını ısıtmak için bir enerji kaynağı olarak yüksek hızlı elektronların yoğunlaştırılmış bir demetini kullanır. Manyetik ve elektrostatik odaklayıcı mercekler tarafından büzülen elektron akısı, kuvvetli bir elektriksel alan içinde katottan anoda yüksek hızla gider. Elektronlar hızlandırılır ve bir elektron ışın tabancasıyla güdümlü bir ışın demeti oluşturur. Elektronlar iş parçası (anot) yüzeyine

çarptıklarında, kinetik enerjileri ısı enerjisiye dönüşerek onu ısıtırlar. Bir elektron demeti üretmek için 10^{-5} torr gibi yüksek bir vakuma elektronların çıkarıldığı ve hızlandırıldığı bölgede ihtiyaç duyulur. Bu vakum ortamı vericiyi oksitlerden korur ve nispeten düşük hızda hala hareket eden elektronların dağılmasını önler. Lazer ışını sertleştirme benzer olarak elektron demeti işlemi, su verme işlemi gerektirmemektedir fakat belirli bir miktar kütleye ihtiyaç duymaktadır. Elektron demeti sertleştirme lazer demeti sertleştirmesinde olduğu gibi enerji yutan kaplamalar gerektirmez. Bu yöntemin dezavantajları ise yüksek maliyet ve düşük üretim temposu olarak gösterilmektedir [1, 5, 25].

1.2.2. Difüzyon Esaslı Yüzey Sertleştirme Metotları

Termokimyasal bir işlem olan difüzyonlu yüzey sertleştirme metotları yüzeyin kimyasal modifikasyona uğraması prensibine dayanır. Parça yüzey ve yüzey altı bölgesi ısıtılarak sertleştirme elementlerinin (C, B, N₂, vs.) difüzyonunu sağlanmaktadır. Bu prensip ile difüzyon derinliği sıcaklık ve zaman parametrelerine bağlıdır.

$$\text{Difüzyon derinliği} = K \cdot \sqrt{\text{Zaman}} \quad (1)$$

Burada (1) numaralı denklemde K difüzyon sabitini temsil etmektedir. Difüzyon sabiti verilen sertleştirme elementinin konsantrasyon yoğunluğuna ve çeliklerin kimyasal yapısına bağlıdır. Difüzyon katsayısı, sıcaklığa bağlı olarak etkili bir şekilde artmaktadır. Difüzyon sertleştirme metotları; sertleştirme elementlerine (karbon, azot, bor gibi), uygulanan işlem metotlarına ve sertleştirme ortamlarına (sıvı, gaz veya iyon gibi formlarda) bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Bu işlem çeşitliliği doğal olarak tabaka derinliği ve sertlikte çeşitlilikler meydana getirerek farklı metotların (Tablo 1) oluşumunu sağlamaktadır. [1, 26].

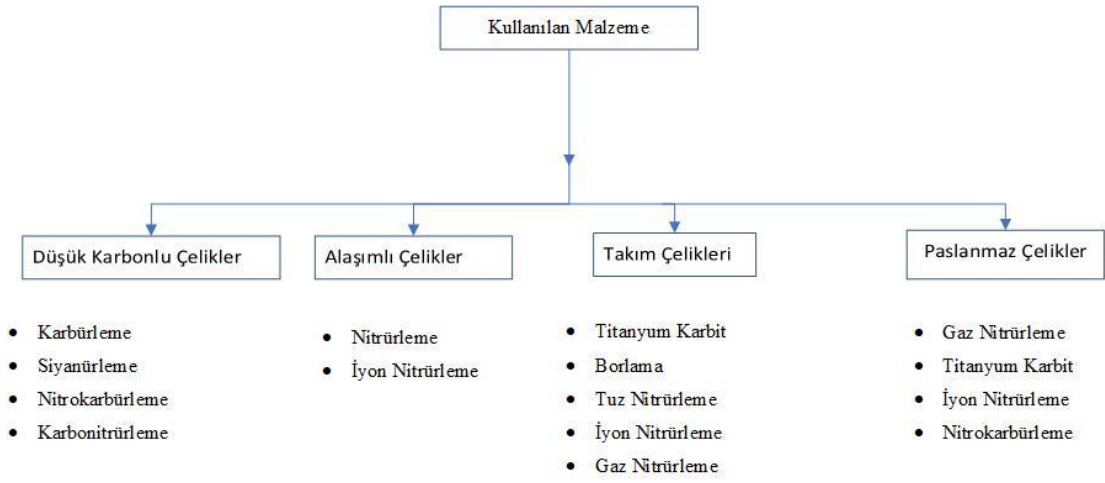
Tablo 1. Difüzyon metotlarının genel özellikleri ve teknik verileri [1, 5].

İşlem	Tabaka yapısı	İşlem sıcaklığı (°C)	Tabaka derinliği (µm)	Tabaka sertliği (HRC)	Kullanılan metaller	İşlem özellikleri
Karbürleme						
Paket	Difüze olmuş C	815-1090	125-1500	50-63	Düşük karbonlu çelikler, düşük karbonlu alaşımlı çelikler	Düşük ekipman maliyeti, tam olarak tabaka derinliği zorluğu
Gaz	Difüze olmuş C	815-980	75-1500	50-63	Düşük karbonlu çelikler, düşük karbonlu alaşımlı çelikler	Tabaka derinliğinin iyi kontrolü, sürekli işletim için uygunluk, iyi gaz kontrolü gerektirir, tehlikeli olabilir
Sıvı	Difüze olmuş C ve N ₂	815-980	50-1500	50-65	Düşük karbonlu çelikler, düşük karbonlu alaşımlı çelikler	Paket ve gaz tekniklerinden daha hızlı, tuz kullanma problemleri görülebilir, tuz banyosu sık sık bakım gerektirir
Vakum	Difüze olmuş C	815-1090	75-1500	50-63	Düşük karbonlu çelikler, düşük karbonlu alaşımlı çelikler	Mükemmel işlem kontrolü, parlak parçalar, gaz tekniğinden daha hızlı, yüksek ekipman maliyeti
Nitrürleme						
Gaz	Difüze olmuş N ₂ , N ₂ bileşenl.	480-590	125-750	50-70	Alaşımlı çelikler, nitrürasyon çelikleri, paslanmaz çelikler	Nitrürlenmiş çeliklerden en sert tabaka, su verme gerekmez, düşük distorsiyon, işlem yavaştır, genellikle toplu yapılan
Tuz	Difüze olmuş N ₂ , N ₂ bileşenl.	510-565	2.5-750	50-70	Dökme demir dahil bir çok demir metaller	Genellikle <25 µm ince sert tabakalar için kullanılır, beyaz tabaka yoktur, çoğunlukla özel işlemlerdir
İon	Difüze olmuş N ₂ , N ₂ bileşenl.	340-565	75-750	50-70	Alaşımlı çelikler, nitrürasyon çelikleri, paslanmaz çelikler	Gaz nitrürasyondan daha hızlı, beyaz tabaka yoktur, yüksek ekipman maliyeti, mükemmel tabaka kontrolü
Karbonitrürleme						
Gaz	Difüze olmuş C ve N ₂	760-870	75-750	50-65	Düşük karbonlu çelikler, düşük karbonlu alaşımlı çelikler, paslanmaz çelikler	Karbürlemeden daha düşük sıcaklık (daha az distorsiyon), gaz kontrolü önemli, karbürlemeden biraz daha sert tabaka
Sıvı	Difüze olmuş C ve N ₂	760-870	2.5-125	50-65	Düşük karbonlu çelikler	Kritik olmayan parçalarda ince tabakalar için uygun, tuz kullanma problemleri görülebilir, toplu yapılan
Feritik nitrokarb.	Difüze olmuş C ve N ₂	565-675	2.5-25	40-60	Düşük karbonlu çelikler	Düşük karbonlu çelikler üzerinde ince tabakalar için düşük distorsiyon, daha çok özel işlerde
Diğer yöntemler						
Alüminyuml. (paket)	Difüze olmuş alüminyum	870-980	25-1000	<20	Düşük karbonlu çelikler	Seçilen sıcaklıkta oksidasyon mukavemeti için kullanılan kaplama işlemi
Silikonlama (CVD)	Difüze olmuş silikon	925-1040	25-1000	30-50	Düşük karbonlu çelikler	Korozyon ve aşınma mukavemetleri için, atmosfer kontrolü önemlidir
Kromlama (CVD)	Difüze olmuş krom	980-1090	25-50	Düş. C <20, Yük. C 50-60	Düşük ve yüksek karbonlu çelikler	Kromlanan düşük karbonlu çelikler düşük maliyetli paslanmaz çelik sağlar, yüksek karbonlu çeliklerde sert korozyon mukavemet tabaka
Titanyum karbür	Difüze olmuş C ve Ti, TiC bileşikler	900-1010	2.5-12.5	>70	Alaşımlı çelikler, takım çelikleri	Aşınmaya karşı mukavemet için ince bir karbit tabakası (TiC) üretir, yüksek sıcaklıklarda distorsiyona sebep olabilir
Borlama	Difüze olmuş bor ve bileşik.	400-1150	12.5-50	40->70	Alaşımlı çelikler, takım çelikleri, kobalt ve nikel alaşımları	Sert bir beyaz tabaka üretir, sertleştirilen takım çeliklerinde sıkça kullanılmaktadır, yüksek işlem sıcaklıkları distorsiyona sebep olabilir

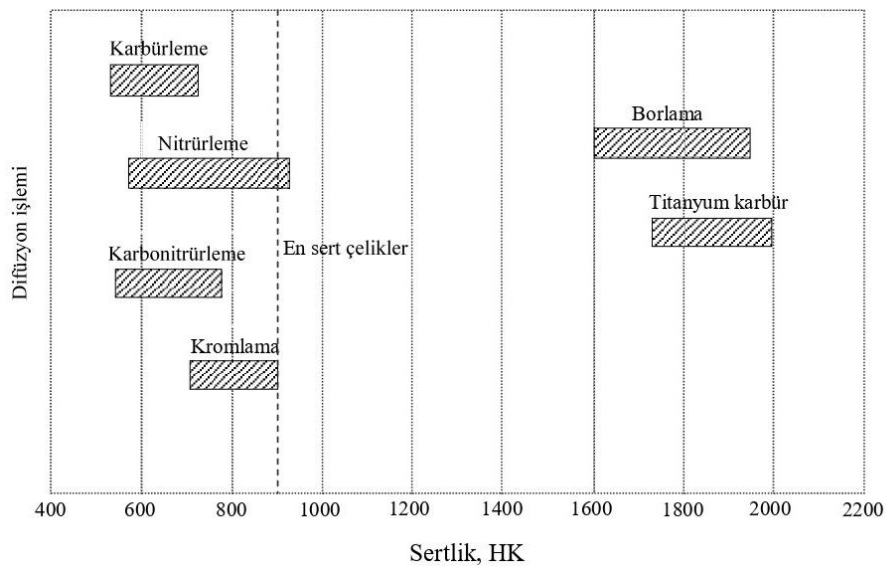
Metal parçaların iç yapısında yer alan elementlerinin aktarımı ile oluşan difüzyon işleminde difüzyon oranı, yüzeyden aktarılan elementlerin atomik yoğunluğundan ve

sıcaklığından etkilenir. Yüzey reaksiyonları, yüzeyde bulunan elementler ve sıcaklıkta seçilen işleme göre difüzyon oranını doğrudan etkilemektedir [1, 26].

Hangi difüzyon metodunun kullanılacağına karar vermede en önemli kriterler; çeliğin tipi (Şekil 2), istenilen sertlik (Şekil 3) ve tabaka derinliğidir. Şekil 2’de çelik tiplerinde kullanılan difüzyon metodları görülmektedir. Şekil 3’de ise çeliklere uygulanacak difüzyon işlemleri ile elde edilebilen sertlik değerleri kıyaslanmıştır. Difüzyon yüzey sertleştirme işlemi uygulanması istenen çeliklere bu kriterler göz önünde bulundurularak en uygun metod belirlenir [1, 26].



Şekil 2. Difüzyon işlemlerinde kullanılan çelik türleri [1].



Şekil 3. Çeliklere uygulanacak difüzyon işlemleri ile elde edilebilen sertlik değer aralıkları [1, 26].

1.2.2.1. Karbürleme

Karbürleme sağladığı üstün mekanik özellikler nedeniyle çeliklere uygulanan ısıtma işlem tekniklerinden biridir. Sertleştirme prensipleri yüzyıllar önce sementasyon prosesiyle işlenmiş demirin çeliğe dönüşümünde kullanılmıştır. Karbürleme prosesinde %0,10-0,25 C içeren düşük karbonlu çelikler kullanılır. Karbürizasyon normal olarak 850-950°C sıcaklıkları arasında, katı karbürizasyon ortamında, tuz banyolarında, gazlar içerisinde ve plazma ortamında uygulanır. Demirin 910°C üzerinde yüzey merkezli kübik (YMK) kafes yapısına sahip olması karbon atomlarının demire yayınmasını sağlar. Yeterli derinlikte karbonca zenginleştirilmiş tabaka meydana gelinceye kadar bu sıcaklıkta tutulur. Sonuçta demir yüzeyinde karbürlenmiş tabaka oluşturulur. Karbonca zengin tabaka daha sonra tekrar ısıtma ve su verme ya da karbürleme sıcaklığından direkt su verme ile sertleştirilebilir [5, 15, 9].

Yapı parçaları olarak kullanılan çelikler, genellikle kullanım ve maliyet etkileri sebebi ile düşük karbon içerirler. Fakat bu tür çelikler, su verme sırasında nerdeyse hiç sertleşmezler. Bu nedenle yüzeye difüzyonla karbon emdirilerek, sementitli bir yapı elde edilmeye çalışılır. Bu olaya sementasyon adı verilmiştir. Bunun ardından yapılacak su verme işlemi ile cam gibi sert bir yüzey elde edilir. Buna karşılık iç kısımlarda yeterli karbon olmadığından, su verme sonunda sertleşmeden kalırlar ve sünekliliklerini korurlar. Böylece hem aşınmaya hem de değişken ve darbeli yüklere dayanıklı parçalar elde edilmiş olmaktadır [5]. Karbürleme yöntemleri, çeliğin östenit sıcaklığına kadar ısıtılması ve bu sıcaklıkta karbon verici bir ortamda tutulması ve sonradan da esas sertleştirme işleminin uygulanmasından meydana gelmektedir. 5 çeşit karbürleme yöntemi vardır:

- Kutu karbürleme
- Sıvı karbürleme
- Gaz karbürleme
- Plazma karbürleme
- Vakum karbürleme

Özetle karbürleme metotları; paket karbürleme, tuz banyosunda karbürleme, gaz karbürleme, vakum karbürleme ve plazma karbürlemeden oluşmaktadır [15, 27].

Bu metotlarda karbon; gaz (atmosferik gaz veya vakum karbürleme), sıvı (tuz banyosunda karbürleme), katı (paket karbürleme) ortamda veya plazma ortamı kullanılarak malzeme yüzeyine verilir. Bu metotların her birinin avantajları ve sınırlandırıcı etkenleri mevcuttur. Gaz karbürleme büyük çaplı üretimler için, tam kontrol edilebilirlik ve operatörden kaynaklanan hataların asgariye indirilmiş olması nedeniyle oldukça yaygın kullanılmaktadır. Vakum karbürleme ve plazma karbürleme fırın atmosferinde oksijen bulunmaması nedeniyle uygulama alanı bulmaktadır. Tuz banyosu ve paket karbürleme ise bugün ticari önemleri oldukça azalmasına rağmen seyrek de olsa kullanılmaktadırlar [1, 5]. Karbürleme genellikle 850-950°C sıcaklık aralığında uygulanmakla birlikte, işlem süresini azaltmak ve yüzey tabakası derinliğini artırmak için daha yüksek sıcaklıklara çıkılabilmektedir [1].

1.2.2.2. Borlama

Borlama, iş parçasının yüzeyine bor atomlarının difüzyonu ile yüzeyde borür fazı oluşturmak suretiyle sertliği, aşınma ve korozyon direncini arttırmak amacıyla yapılan difüzyon kontrollü bir termokimyasal yüzey sertleştirme işlemidir. Borlama, farklı ortamlarda (katı, sıvı, gaz veya plazma), alaşımsız ve alaşımlı çeliklere, dökme demirlere, demir dışı metal ve alaşımlara, bu alaşımların toz metalürjisi yöntemiyle üretilen tozlarına uygulanabilir. Bu işlemde bor atomları, metalin yüzeyine difüze ederek FeB, FeB₂ gibi borürler oluştururlar. Borlanmış çeliklerin sertlikleri 1650-2000 HV arasında, işlem süresi ise 1-12 saat arasında değişirken proses sıcaklığı ise 700-1000°C arasındadır. Borlama işlemi ile yüksek aşınma ve korozyon direncinin yanında yüksek sıcaklık mukavemeti de elde edilir [1, 15, 9, 28].

Borlama işlemi kutu ve plazma borlama yöntemleri ile gerçekleştirilmektedir. En yaygın olarak kullanılan kutu borlama işlemi taban malzemesi üzerine bor veya boronkarbid bileşiminde aktivatörlerle paketlenmesiyle yapılan borlamadır. Metot yalnızca küçük boyutlu parçalara uygulanabilmekte ve demir dışı alaşımlardan Ti, Ni, Ta esaslı alaşımlar bu yöntemle borlanabilmektedir. Bu yöntemin dezavantajları; otomasyona müsaade etmemesi, atık ürünlerin çevreye verdiği zarar ve kontrol yeteneğinin kötü olması olarak sıralanabilir [29]. Diğer bir borlama işlemi olan plazma borlama ise 800-1000°C sıcaklıklar arasında demir ve demir dışı metallere ve alaşımlarına uygulanmaktadır. Kutu borlama işleminden farklı olarak, borür tabakası sadece Fe₂B fazında oluşmaktadır. Fe₂B fazı, FeB fazı kadar

sert olmasa da yaklaşık 1600 HV sertlik değerlerine ulaşabilmektedir. Borlama sonucunda, yüzeyin en üst tabakasında sert borür, onun altında ise difüzyon bölgesi ve de en içte çekirdek bölgesi yer almaktadır [14]. Borür tabaka yüksek aşınma direnci, yüksek sertlik ve yüksek aşınma dayanımı, yüksek sıcaklıklarda sertliğini koruma gibi olumlu özelliklerinden dolayı bor ve bileşikler kimya, cam, seramik, nükleer sanayisinde, jet ve roket yakıtlarında kullanılmaktadır.

1.2.2.3. Nitrürleme

Nitrürleme 450-550°C işlem sıcaklığında malzeme yüzeyine azot atomu emdirilerek sert maden nitrür fazları oluşturulması ile aşınma ve korozyon direncinin artırılması temeline dayanan bir ferritik termokimyasal işlemdir [1]. Nitrürleme işlem metotları; gaz, sıvı ve plazma nitrürlemeden oluşur. Nitrürleme işlemi ile geliştirilen özellikler, yüzey sertliği, aşınma direnci, yorulma mukavemeti ve paslanmaz çelikler hariç diğer çeliklerin korozyon dirençlerinin iyileştirilmesine etki eder [5]. Nitrürleme işlemi 450-550°C sıcaklıkları arasında yapıldığından çelikler bu sıcaklıklarda ferritik yapıdadır. Nitrürleme, yüzeye difüzyon yoluyla bir element yayındırılmasından dolayı karbürlemeye benzer. Nitrürleme işleminde karbon yerine azot, sıcaklık olarak da 950-1050°C (östenit) yerine 450-550°C (ferritik) sıcaklık aralığı kullanılır. Nitrürleme işleminde tavlama sonrasında soğutma ve faz dönüşümü gerçekleşmediği için ısı çarpılma minimum düzeydedir. Dolayısıyla nitrürleme işlemi yüksek doğrusalığın yanında yüksek boyutsal hassasiyet istenen ve talaşlı imalattan çıkmış makine parçaları için uygundur [9].

Nitrürleme sonrası oluşan nitrür tabakasının derinliğine etki eden en büyük faktörler; işlem zamanı, azot aktivasyonu, sıcaklık ve çelik bileşimidir. Bu işlemin uygulanabilmesi için nitrürlenebilen nitrürasyon çelikleri kullanılmalıdır. Nitrürlenebilirlik, bir taraftan malzemenin azotu absorbe edebilme kabiliyetiyle diğer yandan azotla oluşturulan nitrür bileşikler nedeniyle sertlikte meydana gelen artıştır. Nitrürlenebilme olayında en önemli etken yapıda bulunan alaşım elementlerinin cinsi ve miktarıdır. Bu elementlerin başında da alüminyum, titanyum, krom, molibden, vanadyum ve nikel gelmektedir [21, 30].

1.2.2.4. Karbonitrürleme

Karbonitrürleme, östenit fazındaki çelik yüzeyine karbon ve azot atomlarının emdirilmesi prensibine dayanan termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemidir. Karbonitrürleme işleminde karbon ve azot difüzyonu tamamlandıktan sonra yüzeydeki kompozisyonun değiştirilmesi için suda soğutma işlemi yapılır. Gerçekleşen karbon difüzyonu ve dönüşüm sertleşmesinden dolayı karbonitrürleme işlemi karbürlemeye benzer. Karbonitrürleme işleminin nitrokarbürlemeye göre temel farkı, faz dönüşümünün gerçekleşmesidir. Nitrokarbürleme işlemi ferritik fazda meydana geldiği için faz dönüşümü söz konusu değildir. Karbonitrürleme ise östenit sıcaklığında (950-1050°C) yapıldığı için faz dönüşümü vardır. Difüzyonun tamamlanmasının ardından çelik suda soğutulursa martenzitik yapı elde edilir [1, 7].

Karbonitrürleme işlemi gaz atmosferinde ve tuz banyolarında yapılabilir. Tuz banyosunda karbonitrürleme ile siyanür banyosunda yüzey sertleştirme aynı işlemdir. Bu iki proseste de azot yüzey sertliğini ve sertleşebilme kabiliyetini artırır. Fakat azotun yüzeyde birikmesi aynı zamanda karbonun difüzyonuna da engel olur. Aynı şekilde yüzeyde oluşan sementit fazı miktarındaki artış, azot atomlarının difüzyonuna engel olarak, sert nitrür fazlarının oluşmasını yavaşlatmaktadır. Karbonitrürleme prosesindeki tüm bu değişkenler dikkate alındığında azot ve karbon verici ortamların ve ısıtma işlem parametrelerinin iyi seçilmesi gerektiği anlaşılmaktadır [7].

1.2.2.5. Nitrokarbürizasyon (Nitrokarbürleme)

Nitrokarbürizasyon işlemi çeliklere, dökme demirlere, sinterlenmiş demir temelli malzemelere uygulanan ve sonuç olarak uygulanan parçalarda aşınma, yorulma dayanımı ve korozyon direncini arttıran termokimyasal bir yüzey işlemidir [31]. Nitrokarbürizasyon işlemi ile çelik yüzeyine eş zamanlı olarak azot ve karbon atomları difüze ettirilerek yüzey ve yüzeye yakın bölgelerde karbür ve nitrürler oluşturularak malzemenin aşınma, korozyon ve yorulma dayanımı artırılır [12]. İşlem ile birlikte parçalarda oluşan kalıntı basma gerilmeleri malzemelerin yorulma dayanımını da olumlu yönde etkilemektedir [32]. Nitrokarbürizasyon işlemi ardından yüzey; bileşik tabaka ve difüzyon bölgesi olmak üzere iki ayrı bölgeden oluşur. Nitrokarbürizasyon işlemi ile oluşturulan bu bileşik tabaka malzemenin aşınma ve yorulma dayanımını iyileştirir [12]. Bileşik tabaka $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}(\text{N}, \text{C})$ ve

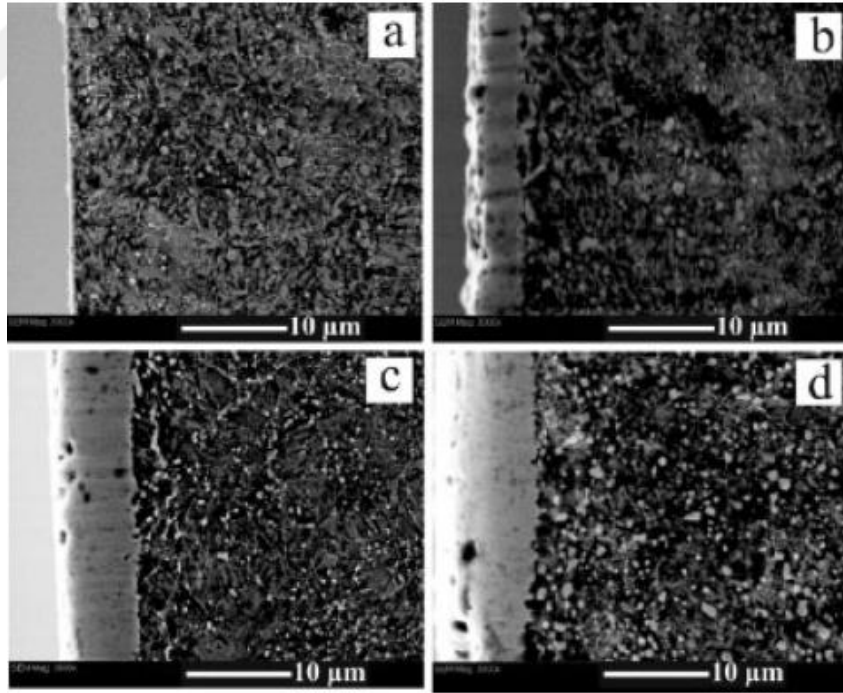
γ' -Fe₄ (N, C) karbonyürler içerir [5]. En dış kısımda ϵ fazı onun altında ise γ' fazı yer alır ve yüzey kesintisiz bir tabaka şeklindedir. Bileşik tabaka kalınlığı 0 ila 20 μ m arasında değişmektedir [33]. Oluşan bileşik tabaka metalik özellikte değildir [31]. Proses sonucu oluşturulacak bileşik tabaka aşınma ve yorulma dayanımının iyileştirilmesi amacıyla mono- ϵ fazından oluşması arzu edilir. Fakat nitrokarbürizasyon işlemi ile oluşturulan bileşik katmanı genellikle heterojen ϵ - γ' karışımından oluşur. Bu heterojen karışım sebebiyle faz sınırlarında iç gerilmeler gözlemlenir. Bahsi geçen iç gerilmeler sebebiyle parça yüzeyi kırılğan bir hal alır [34].

Önceki kısımlarda değinildiği üzere beyaz tabakayı oluşturan ϵ -Fe₂₋₃ ve γ' -Fe₄ oluşumları proses sonucu elde edecek özellikler üzerinde önemli etkiye sahiptir. Mono- ϵ yapısı optimum aşınma ve yorulma dayanımı değerleri için istenilen yapı türüdür. Sohi vd. [34] 4140 çeliği ile yaptıkları çalışmada 530°C sıcaklıkta nitrokarbürizasyon sonucu elde ettikleri bileşik tabakasında γ' - ϵ fazlarının bulunduğunu, γ' fazının bu yapıda baskın olduğunu tespit etmişlerdir. Proses sıcaklığı 570°C'ye çıkarıldığında bileşik tabakasının ϵ fazı ve eser miktarda γ' fazından oluştuğu ve dolayısıyla daha iyi aşınma ve yorulma dayanımı özellikleri gösterdiğini gözlemlemişlerdir. 570°C üzerindeki sıcaklıklardaki işlemlerde ise bileşik tabakasında γ' tekrar baskın konuma geçerek bahsi geçen özellikleri olumsuz yönde etkilemektedir. Sran vd. [35] ise A105 çeliği ile yaptıkları çalışmada 580°C üzerindeki proses sıcaklıklarında aşınma dayanımı ve sertlik değerlerinde düşüş gözlemlemişlerdir. Sran vd. [35] artan proses süresi ile bahsi geçen özelliklerin iyileştiğini, 120-240 dk aralığında inceledikleri proses sürelerinde en iyi değerlerin 240 dakika işlem süresi ile elde ettiklerini raporlamışlardır. Bir diğer çalışmada ise nitrokarbürleme de aşınma mekanizmasının başlangıçta adhezif olmasına rağmen sert ve kırılğan beyaz tabakanın parçalanmasıyla abrazif aşınmanın en önemli aşınma mekanizması olduğu ve yüzeyde oluşacak tek fazlı ya da baskın ϵ -Fe₂₋₃ (N, C) beyaz tabakasının aşınma mukavemetini iyileştirdiği sonucuna varılmıştır [18].

Bileşik tabakanın oluşumu ve yapısı incelendiğinde; oluşumunda ve tabaka kalınlığında etken parametrelerin işlem sıcaklığı ve süresi, banyo, altlık malzemenin kompozisyonu (alaşım elementi ve karbon miktarı) olduğu görülmektedir [31]. Sohi vd. AISI 4140 altlık malzemesi kullanarak yaptıkları çalışmada 530-630°C sıcaklıklar arasında nitrokarbürizasyon işlemlerini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda bileşik tabaka kalınlığının nitrokarbürizasyon banyo sıcaklığının yükseltilmesiyle kalınlaştığını tespit etmişlerdir [34]. Krishnaraj vd. [36] ise H11 çeliğinin nitrokarbürizasyon prosesinin

optimizasyonu çalışmasında artan proses sıcaklığı ile bileşik tabakasının artmasına ek olarak malzemenin merkezindeki dayanımın düşüş gösterdiği sonucuna varmışlardır. Sran ve Sharma [35] A105 çeliğinin nitrokarbürizasyon üzerine yaptıkları çalışmada artan proses sıcaklığının yanı sıra artan proses süresinin de bileşik tabakasını kalınlaştırıcı etkide olduğunu rapor etmişlerdir.

Altlık malzeme kompozisyonunun nitrokarbürizasyon işlemi ile malzemede oluşturulan bileşik tabaka kalınlığını etkilediğinden daha önce bahsedildiği üzere; çelik kompozisyonunda artan alaşım elementi miktarı ile bileşik tabaka kalınlığı azalmakta fakat sertlik değeri artmaktadır [31]. Fares vd. [33] 570°C sıcaklıkta gerçekleştirilen nitrokarbürizasyon işlem süresinin bileşik tabaka kalınlığına etkisi incelemiş ve işlem süresi 1 saat (Şekil 4a) olduğunda bileşik tabaka kalınlığının 0,5 μm , 3 saat (Şekil 4b) olduğunda 5 μm , 5 saat (Şekil 4c) olduğunda 8 μm ve 6 saat (Şekil 4d) olduğunda 9 μm olduğu tespit etmişlerdir. İşlem sıcaklığı arttıkça bileşik tabaka kalınlığının arttığı, artış hızının ise azaldığı çıkarımın da bulunmuşlardır.



Şekil 4. 570 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen nitrokarbürizasyon proses süresinin beyaz tabaka kalınlığına etkisi [33]: (a) 1 saat, (b) 3 saat, (c) 5 saat ve (d) 6 saat

Difüzyon bölgesi nitrokarbürizasyon işlemiyle yüzeyde oluşturulan ikinci yapıdır ve bileşik tabakanın altında yer alır. Difüzyon bölgesinin kalınlığı 0,8 mm'ye kadar çıkabilir. Difüzyon bölgesinin kalınlığı, bileşik tabaka ile çelik malzemenin çekirdek sertliği değerinin yüzeye doğru 100 HV artış gösterdiği noktalar arasındaki ölçüdür [33]. Difüzyon bölgesinde azot, çelik bünyesinde katı çözelti olarak var olur [12]. Sachs ve Clayton [37] yaptıkları çalışmada gaz ortamında 570°C sıcaklıkta En₃₂ malzemesinin nitrürleme ve nitrokarbürleme işlemlerine tabi tutarak, işlem sonrası özelliklerini karşılaştırmışlardır. Bu çalışma da yorulma ömrüne difüzyon tabakasının önemli etkiye sahip olduğu ve beyaz tabakanın etkisinin ise çok daha az olduğunu gözlemlemişlerdir. Bell ve Lee [38] 570°C sıcaklıkta gaz atmosferinde En₃₂ çeliğine nitrokarbürizasyon işlemi uygulayarak yorulma ve aşınma davranışını incelemişlerdir. Çalışmalar sonucunda difüzyon tabakasının yorulma limitinde %143 iyileştirme sağladıklarını ifade etmişlerdir.

Nitrokarbürizasyon prosesi difüzyon temelli bir proses olduğundan, düşük sıcaklıkta N ve C atomlarının difüzyon kabiliyeti ve dolayısıyla atomsal hareketliliğin (mobilitelerinin) düşük olması sebebiyle difüzyon tane sınırlarında gerçekleşmektedir. Difüzyonun bu bölgelerde gerçekleşmesi tabakanın homojenliğini etkilemektedir. Artan işlem sıcaklığı ile birlikte N ve C atomlarının difüzyon kabiliyetlerinin artmasıyla latis difüzyonu baskın hale gelmekte ve bileşik tabaka daha üniform bir yapıda oluşmaktadır. Yapının üniform olması tabakanın sergileyeceği özellikleri olumlu etkilemektedir. Fakat çok yüksek proses sıcaklıklarında N atomlarının atomsal hareketlilikleri (mobiliteleri) çok yüksek olacağından, elementel azot oluşturma ihtimalleri oldukça yükselmekte ve bileşik tabakası poroz hale gelmektedir [34]. Bileşik tabakanın poroz olması aşınma dayanımı haricinde ki mekanik özelliklere olumsuz yönde etki etmektedir [35]. Bileşik tabakada oluşan poroz yapı oksidasyon işlemiyle kısmi olarak giderilebilir. Ek olarak Nitrokarbürizasyon işlem sıcaklığının artması ile oluşan poroz yapı malzemelerin yüzey pürüzlülüğünü arttırmaktadır [11].

Fe-N diyagramına dayanarak ötektoid nokta (590°C) referans alınarak nitrokarbürizasyon işlemi iki sınıfa ayrılabilir. Fe-N diyagramında ötektoid sıcaklık altında yapılan nitrokarbürizasyon işlemine ferrit fazının baskın olmasından dolayı ferritik nitrokarbürizasyon, ötektoid sıcaklığın üstünde yapılan nitrokarbürizasyon işlemine ise östenit fazının baskın olması sebebiyle östenitik nitrokarbürizasyon adı verilir [34]. Bunun yanı sıra nitrokarbürizasyon işlemini uygulama tekniklerine göre de sınıflandırmak

mümkündür. Nitrokarbürizasyon prosesinin uygulama teknikleri; gaz nitrokarbürizasyon, sıvı (tuz) banyosu nitrokarbürizasyon, (iyon) plazma nitrokarbürizasyon şeklindedir [12].

En eski tekniklerden biri olan sıvı nitrokarbürleme, tuz banyosunda nitrokarbürleme olarak da bilinir. Sıvı nitrokarbürleme oldukça küçük parçalar ve yüzeyde ince tabaka oluşturmak için kullanılmaktadır. Tabaka sertleştirme ortamı, sıvı azot ve siyanür içeren eriyik tuz banyosudur. Patentli tuz banyoları, %60-61 NaCN, %15-15,5 K₂CO₃ ve %23-24 KCl, ilave olarak çok az miktarda karbonat (Na₂CO₃) (yaklaşık %2,5) ve %0,5 siyanat (NaNCO) içerir. Bazı tescilli banyolarda sülfidler (Na₂S) banyoya ilave edilir. Çünkü kükürt ve bazı sülfidler iyi yağlayıcılık özelliğine sahiptirler. Tuz banyosuna ilave edilen kükürt hem aşınma mukavemetini artırır hem de azot hareketini hızlandırır. Sıvı nitrokarbürlemenin tercih edildiği uygulama alanlarından bazıları; pompalar, pistonlar, vanalar, dişliler, cıvatalar, somunlar, silindir başları vs. olarak sıralanabilir [14].

Gaz nitrokarbürleme yaklaşık 570°C işlem sıcaklığında gerçekleşir. Bu işlem sıcaklığı gaz nitrokarbürleme işlemini karbonitrürleme işleminden ayıran en belirgin özelliktir. Gaz nitrokarbürleme azot gibi karbonunda eş zamanlı difüzyonunu içerir ve ε fazı elde etmeyi amaçlar. Gaz nitrokarbürleme hakkında en önemli bilimsel çalışma Prenosil [13] tarafından 1965 yılında yayınlanmıştır. Bu çalışmada Prenosil [13], 580°C’de yaklaşık %50 amonyak (NH₃) ve %50 propan (C₃H₈) gazlarından oluşan atmosferde yapılan nitrokarbürleme sonucu saf demir üzerinde oluşan beyaz tabakanın yapısı ve kompozisyonunu araştırmış, yüksek karbon oranlarında elde edilen tabakasının malzeme sertlik ve aşınma mukavemetini oldukça iyileştirdiğini tespit etmiştir. Genel olarak aşınma ve yorulma mukavemetinin iyi olması istendiği dişli, pompa silindir blokları, füze savarlar jet mermisi ve krank biyeller gibi aksam ve parçalarda kullanılır.

Plazma nitrokarbürleme işlemi, plazma ortamında demir esaslı malzemelerin yüzeyine azot ve karbonun yayınmasını içeren termokimyasal bir işlemdir. Yüzeyde γ'-nitrür ile beraber ε-nitrür tabakası, onun altında da difüzyon tabakası oluşur. Plazma ile nitrürleme işleminin tersine bu işlemde kullanılan gazlar azot-hidrojen-metan veya azot-hidrojen-karbondioksittir. Bu işlem ile, düşük karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerin yüzeyinde ε-nitrür tabakası oluşturularak korozyon ve aşınma dayanımını artırmak amaçlanmaktadır. Bu işlem çoğunlukla sade karbonlu çelikler ve düşük alaşımlı çelikler gibi piyasada daha ucuz olan malzemelerin yüzeyini iyileştirmekte kullanılır. Aşınma ve belirli durumlarda korozyon direncindeki artış, yüzeyde oluşan tek fazlı beyaz tabaka (ε-nitrür) sayesinde gerçekleşir [13, 39]. Plazma şartlarında gerçekleştirilen nitrokarbürleme, işlemin çevreyle dost olması,

uygun işlem değişkenleri ile tek fazlı nitrür fazının elde etmenin mümkünlüğü, gaz ve enerji tüketiminin az olması patlama riski içermemesi nedeniyle tercih edilmektedir. İşlemin endüstride kullanımı son yıllarda giderek yaygın hale gelmektedir.

1.3. Oksidasyon

Nitrokarbürleme işlemi ile yüzeyde oluşan beyaz tabakanın gözenekli yapısı korozyon direncinin yeteri kadar iyi olmamasına sebep olmaktadır. Bu sorunu gidermek için nitrokarbürleme sonrasında oksidasyon işlemi uygulanmaktadır. Oksidasyon işlemi ile nitrokarbürleme atmosferinin uzaklaştırılıp içeriye oksijence zenginleştirilmiş gaz veya gaz karışımı gönderilmesiyle gerçekleştirilir. Bu işlem genellikle 350-500°C aralığında ve 2-5 mbar gaz basıncı aralığında gerçekleştirilir. Nitrokarbürleme işlemine maruz bırakılan çelik bileşenlerin kalitesi, yüzey özellikleri ve özellikle korozyon özellikleri nitrokarbürleme sonrası adımda oksidasyon işlemi ile ϵ bileşik tabakasının üzerine, 0,5-3,5 μm kalınlığında magnetit (Fe_3O_4) ve hematit (Fe_2O_3) fazlarından oluşan ince oksit filmi oluşturularak, iyileştirilebildiği görülmüştür [39, 21]. Yüzeyde oluşan magnetit fazının, hematit (gözenekli bir yapıya sahip) fazından daha yoğun ve yüzeye tutunmasının iyi olması nedeniyle korozyon direnci daha iyidir. Oksidasyon işlem süresi ve zamanı normalin üzerinde arttığında hematit fazı çekirdeklerinde büyüme olur. Bunun sonrasında ise yüzeyden parçalanarak, pul pul dökülmeye başlar ve korozyon direnci azalır [40, 21].

Oksit filminin yüzeye tutunması oksidasyon sıcaklığına bağlıdır. Oksidasyon sıcaklığı oluşan oksit filminin yapısı üzerinde oldukça etkili bir parametredir. Oksidasyon sıcaklığının artışıyla oksit filmi gözenekli bir hal almaya başlar. Yoğun ve bağlanması iyi olan bir oksit filmi nispeten düşük sıcaklıklarda oluşturulabilir. Taban malzemedeki alaşım elementleri morfoloji ve oksit filminin kalınlığında önemli bir etkiye sahiptir. Malzemedeki alaşım elementi miktarının artmasıyla oksit filminin büyüme oranı azalmaktadır. Alaşımli çeliklerde oluşturulan oksit filmleri daha incedir ve sade karbonlu çeliklerde oluşturulan oksit filminden daha gözenekli bir yapıya sahiptir. Nitrokarbürleme sonrası oluşan beyaz tabakanın korozyon özelliklerini iyileştirdiği, fakat daha ileri bir iyileşmenin ise oksidasyon işlemi ile gerçekleştirildiği görülmüştür [41]. Oluşturulan oksit filminin tribolojik özellikler üzerine de yararlı etkiye sahip olduğu araştırmacılar tarafından tespit edilmiştir [39].

Oksidasyon işlemine etki eden en önemli parametrelerden biri de işlem süresidir. Yapılan çalışmalarda belirli bir işlem zamanına kadar oksit tabakası kalınlığının arttığı, 1

saatin üzerinde ki işlem sürelerin de ise plazma bombardımanının etkisiyle bu tabakanın incelendiği gözlemlenmiştir [20, 42]. İşlem sürelerinin kısa tutulduğu çalışmalar da elde edilen oksit filminin korozyon direncinin daha iyi olmasına karşın, işlem sürelerinin uzun tutulduğu çalışmalar da saçılmanın etkisiyle oksit filminin parçalandığı ve korozyon direncinin olumsuz etkilendiği görülmüştür. Lee [43] yaptığı çalışmada, sıcaklık (450°C'nin üzerinde) ve zaman parametrelerinde artış yaşanması ile oksit tabakasının büyüme oranında artış olduğu ve oksit tabakasının beyaz tabaka üzerinde kolay parçalandığı gözlemlenmiştir. Yine işlem sıcaklığı 400°C olup işlem süresi 2 saatten fazla olursa da oksit tabakasının parçalandığını ve korozyon direncinin olumsuz etkilendiği gözlemlenmiştir. En iyi oksit tabakasının 400°C de 30 dakika ile 1 saat aralığında pul pul dökülmeksizin üretilbileceği iddia edilmiştir.

1.4. Yüzey Sertleştirme İşlemlerinin Hafif Silah Çeliklerine Uygulanması

Savunma sanayisinin bir alt kolu olan hafif silah sanayisinde üretilen ürünlerin sahip olması gereken birtakım özellikler bulunmaktadır. Ürünlerden, teknik şartnamelerde belirtildiği üzere belirli bir tolerans aralığında ve nesnel standartlar ile belirtilmiş; mukavemet, tokluk, yorulma dayanımı, aşınma ve korozyon dayanımı gibi özelliklere sahip olması beklenmektedir. Bahsi geçen mekanik özellikler ürünlerin üretildiği malzeme türüne, bu malzemelerin üretim metotlarına bağlı olarak şekillenmektedir. Yüzey işlemleriyle malzemelerin sertlik, aşınma dayanımı, korozyon dayanımı, yorulma dayanımı, sürtünme katsayısı, yüzey pürüzlülüğü gibi mekanik özellikleri istenilen ölçüde, gerekli mühendislik uygulamalarıyla geliştirilebilir. İlave olarak çeşitli uygulamalarla ürünlerin yüzeyleri estetik açıdan da iyileştirilebilir.

Hafif silah kategorisinde üretilen ürünlerin büyük bir çoğunluğunu tabancalar oluşturmaktadır. Tabancalar tasarımı ve özellikleri doğrultusunda onlarca parçadan oluşmaktadır. Parçaların, silahın işlevini yerine getirmesi noktasında kritik görevleri ve işlevsellikleri bulunmaktadır. Dolayısıyla parçaların yüzey işlemleri silah sistemi içerisinde görecekleri işleve ve kendilerinden beklenen performansa göre belirlenmektedir.

Silah sanayisinde ürünlere uygulanan, nitrürleme, karbürleme, nitrokarbürizasyon, fosfat, eloksal, Ni-B kaplama, dekoratif krom kaplama, sert krom kaplama, pasivasyon, PVD, CVD gibi birçok yüzey işlemi vardır. Bu yüzey işlemlerinin seçimi ve uygulanması daha önce değinildiği üzere işlem sonrasında ürünlerde elde edilmek istenen

özellik/özelliklere ek olarak malzeme türüne de bağlıdır. Bununla birlikte işlem seçimi firma özelinde incelendiğinde, makine parkuru ve tesis imkanları da karar mekanizmasında yer almalıdır. Metalik malzemelere uygulanan yüzey işlemleri incelendiğinde bu tür malzemelere uygulanan yüzey işlemlerinin yüzey metalürjisini değiştirmek, yüzey kimyasını değiştirmek, malzemeye yeni bir yüzey ekleme ya da kaplama olmak üzere üç sınıfa ayrıldığı görülmektedir. Bu sınıflardan ilki olan yüzey metalürjisinin değiştirilmesinde ısı uygulanması ile icra edilen yüzey sertleştirme işlemleri, lazer ile ergitme, bilyalı sertleştirme gibi işlemler bulunur. Yüzey kimyası ise fosfatlama, oksitleme, anodizasyon, nitrüleme, iyon implantasyonu, lazer alaşımlama gibi işlemler ile değiştirilir. Seramik kaplamalar, elektrolitik kaplamalar, akımsız kaplama, termal sprej, fiziksel ve kimyasal buhar biriktirme (PVD-CVD) yöntemleri ise malzeme yüzeyine yeni bir tabaka eklenen yüzey işlemleridir [44].

Hafif silah sanayisinde kullanılan yüzey işlemlerini, işlem için kullanılan malzeme türlerine göre ayırmakta mümkündür. Bu bakımdan yüzey işlemleri; dönüşümlü, metalik, organik, seramik ve karbon yüzey işlemleri olarak sınıflandırılır (Tablo 2). Greg Boban'ın yüksek lisans tezi olarak hazırladığı çalışmada dünyada silah üretiminde popüler olarak kullanılan yüzey işlemleri listelenmiştir (Tablo 2) [45].

Tablo 2. Dünyada popüler olarak silah üretiminde uygulanan yüzey işlemleri [45].

Kaplama Çeşitleri	Alt Gruplar
Dönüşümlü Yüzey İşlemler	-Oksidasyon (Black oxide, bluing) -Nitrokarbürizasyon -Fosfatlama (Parkerizing) -Eloksal (Anodizasyon)
Metalik Kaplamalar	-Altın Kaplama -Nikel Kaplama -Akımsız Nikel Kaplama -Akımsız Nikel ve Teflon Kaplama -Sert ve Dekoratif Krom Kaplama -Siyah Krom Kaplama -TDC (Thin Dense Chrome) -Elmas parçacıklı TDC
Polimer Kaplamalar	-Boya -Fenolik Reçine -Naylon -PTFE -Poliepoksi -Epoksi
Seramik Kaplamalar	-Borürler -Karbürler -Nitrürler -Oksitler -Sülfidler
Karbon Kaplamalar	-Grafit - $(CF_x)_n$ -Elmas benzeri karbon (Diamond-Like Carbon, DLC, CVD Diamond)); -Tungsten elmas benzeri (Tungsten Diamond-Like (W-DLC, Nitron))

Tablo 3, AR-15 tipi piyade tüfeklerinde yer alan kritik parçaların üretildiği malzemeleri ve bu malzemelerde kullanılan yüzey işlem tiplerini göstermektedir. Gövde (7075 T6 Alüminyum) haricinde ki tüm kritik parçalar değişen miktarlarda farklı alaşımlar içeren demir esaslı malzemelerden üretilmektedir. Mekanizma (bolt carrier) ve namlu hamili (barrel extension) 90XX serisi çelikten, tırnak (extractor) parçası 40XX serisi çelikten, namlu (barrel) ise AISI 4150, 4140 türevleri çelik malzemelerden üretilmiştir. Parçaların çalışma prensipleri ve sergilediklerini davranışlara bağlı olarak malzemelere ilave alaşımlar eklenerek istenen özelliklerde (süneklik, sertlik vs.) artış ya da azalma sağlanabildiği görülmektedir [45].

Greg Boban yüksek lisans tezi olarak hazırladığı çalışmada [45] AR-15 tipi bir hafif silahın hangi parçalarının imalattan sonra yüzey işlemlerine tabi tutulduğunu belirlemek için kritik parçaların her birini aşındırmıştır. Daha sonra çelik numuneleri %2 Nital solüsyonu alüminyum numuneleri ise Keller's solüsyonu kullanılarak dağlamıştır. Dağlama işlemi gövde (Şekil 5a), namlu (Şekil 5b), namlu hamili (Şekil 5c), mekanizma (Şekil 5d), döner başlık (Şekil 5e) ve tırnak (Şekil 5f) parçalarında kesiti alınarak hazırlanan numunelerde gerçekleştirilmiştir. Bu parçalar, yanma sırasında fişek ile doğrudan temas halindedir ve bu sistemdeki en yüksek gerilimli parçalardır. Dağlanan bu parçalar metalografik olarak incelendiğinde bir takım yüzey işlemlerine tabi tutuldukları ortaya çıkmıştır. Yapılan bu çalışmalar sonucunda kritik parçalara Tablo 3'te belirtilen yüzey işlemlerin uygulandığı anlaşılmıştır [45].

Tablo 3. AR-15 tipi hafif silahın kritik parçalarına ait malzemeler ve yüzey işlemleri [45].

Parça	Malzeme	Yüzey İşlem
Gövde (Receivers)	7075-T6 Alüminyum	Eloksal Tip-3 Sert Kaplama
Namlu (Barrel)	ORD/AISI/SAE 4150 ORD/AISI/SAE 4150 Yeniden Kükürtlenmiş 4140 Krom-Molibden Çelik Krom-Molibden Çelik	Mangan Fosfat Sert Krom (delik)
Namlu Hamili (Barrel Extension)	90XX Serisi Çelik	Fosfat (dış) Sert Krom (iç)
Mekanizma (Bolt)	40XX Serisi Çelik	Fosfat
Döner Başlık (Bolt Carrier)	90XX Serisi Çelik	Orijinal Krom Kaplama
Tırnak (Extractor)	40XX Serisi Çelik	Fosfat



Şekil 5. Hafif ateşli AR-15 tipi tüfek parçalarından alınan dağlanmış örnek numuneler [45]: (a) Gövde, (b) Namlu, (c) Namlu hamili, (d) Mekanizma, (e) Döner başlık ve (f) Tırnak parçaları

Son iki yüzyıldaki hızlı gelişen teknolojik faaliyetlerden önce neredeyse ateşli silahlara uygulanan bir yüzey işlem yoktu. Metal aletlere uygulanan ilk koruyucu yüzey işlem ise pas mavisi (rust-bluing) olarak adlandırılan uygulamaydı [46]. İlk ve en eski yüzey işlemleri; oksidasyon (black oxide, bluing vb.), kabuk sertleştirme veya yüzey sertleştirme (color case hardening) ve fosfatlama (parkerizing) işlemleridir. Bu işlemler, çeliğin yüzeyinin kimyasal reaksiyona uğramasından kaynaklanır. İkinci tip yüzey işlem ise çeliğe yapıştır ve onu pastan korur. Bu yüzey işlemleri arasında krom, nikel, altın, epoksi ve hatta boya bulunur. Üçüncü tip yüzey işlem, paslanmaya dayanıklı, sert ve düşük sürtünmeli bir yüzey oluşturmak için birden fazla malzemeyi birleştirme prensibine dayanır. Bu yüzey işlemler: elmas benzeri kaplamalar, titanyum nitrür, tungsten karbür, titanyum-alüminyum-nitrür, nikel-borür ve bor karbür içerirler. Burada bahsedilen birçok kaplama tipinden aşağıda detaylı bir şekilde bahsedilecektir.

1.4.1. Dönüşümlü Yüzey İşlemler

Dönüşümlü yüzey işlemler, metalik malzemelerin akım ile veya akımsız bir şekilde kimyasal bir banyoya daldırılması ile icra edilen yüzey işlem sınıfıdır. Metalin banyoya daldırılmasıyla birlikte banyo ve metal yüzeyinin reaksiyonu sonucu yüzeyde koruyucu bir tabaka oluşturulur [47]. Dönüşümlü yüzey işlemler başlığı altında, oksidasyon (black oxide), kabuk sertleştirme (color case hardening), karbonitrürleme, nitrokarbürizasyon, fosfatlama ve eloksal gibi işlemler incelenecektir.

Siyah oksit kaplamalar (Black oxide, bluing), ateşli silah endüstrisinde yaygın olarak “oksidasyon (bluing)” olarak adlandırılan, siyah karatma oksidasyon işlemi, kimyasal bir reaksiyon sonucu pas şeklinde bir dönüşüm kaplaması üreten ve oksitlenmeye (pasa) karşı koruma sağlayan koruyucu bir tabakadır. Genel kanının aksine, tek bir sıcak banyo kimyasal çözeltisi kullanılarak yapılan oksit kaplamalar 1910'dan beri yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Çeliğin düşük sıcaklıklarda siyah oksitlenmesi ilk olarak 1901'de patentlenmiştir [48]. II. Dünya Savaşı sisteme önemli bir ivme kazandırmış ve kararlı karışımlardan oluşan standart prosedürler üretmeye yardımcı olmuştur. Herhangi bir yüzey işlem uygulanmamış çeliğe uygulanan oksidasyon işlemi çelik yüzeyinde donuk ve siyah bir renk oluşturur [49]. Ancak yüzey sertleştirme işlemi uygulanan çeliklere uygulanan oksidasyon işleminde, özellikle tüfeklerde kullanılan hafif alaşımlar, çelik yüzeyinde koyu

mavi renk oluşumu gözlenir [45, 49]. Siyah oksit kaplamalar Colt, Smith and Wesson ve bazı silah üretici firmaları tarafından 2. Dünya savaşıdan beri kullanılmaktadır [45].

Kabuk sertleştirme veya yüzey sertleştirme (Color case hardening), sert bir alaşımdan ince bir oksit tabakası oluşturarak, elementleri malzemenin yüzeyine akıtarak metalin yüzeyini sertleştirme işlemidir. Kabuk sertleştirme işlemi, geleneksel kimyasal kaynaklı korozyondan ziyade öncelikle aşınma ve erozyonla mücadele için kullanılmaktadır. İşlem genellikle karbon içeren ortamda metallerin 2 ila 4 saat boyunca fırınlarda 760°C'ye ısıtılması ile gerçekleştirilir [49]. Sıcaklık ile harekete geçen karbon demir veya çelik yüzeyine difüze etmektedir. Isıtmayı durdurmak için çelik parçaya su verme işlemi uygulanmaktadır. Su verme işlemi sonrasında ortaya çıkan renkler, karbon içeren ortamdaki farklılıklar nedeniyle benekli ancak çok çekici olabilir. Ne yazık ki, sertlik yüzeyin yalnızca 127 µm (0,005 inç) altına nüfuz eder [49]. Fırında daha uzun bekletme süreleri veya daha yüksek sıcaklıklar, karbonu yüzeyin daha derinlerine iter. Bununla birlikte, karbon daha derine difüze ettikçe renk hızla azalır. Günümüzde artık bu uygulama yaygın bir şekilde kullanılmamaktadır. Isı ve su ile söndürme işlemi parçayı bükerek işlemi çok pahalı hale getirmektedir. Kabuk sertleştirme, adından da anlaşılacağı gibi, yumuşak bir demir veya yumuşak çelik iç çekirdeği etrafında sert bir dış karbon tabakası sağlama işlemidir. Kabuğun derinliği genellikle çok incedir (on altıda bir inç veya daha az) ancak bu kabuk aşınmaya, gerilmeye ve darbeye karşı oldukça dirençlidir. Ayrıca paslanmaya karşı da oldukça dayanıklıdır. Bu işlem kesinlikle amatör silah ustaları için uygun değildir. Bu iş yetkin ve işi güvenli bir şekilde yapacak donanıma sahip uzmanlara bırakılmalıdır. [49].

Karbonitrürleme (FeN, gaz siyanürleme, sıvı siyanürleme, nikarblama, nitrokarbürleme ve Tenifer), nitrokarbürizasyon, çeşitli tuz banyosu nitrür işlemleri için genel bir terimdir. Nitrokarbürizasyon için diğer ticari isimler arasında Tenifer, Melonite, Sursulf, Arcor, Tufftride ve Koline bulunur. Nitrokarbürlemenin en popüler işlemlerinden biri siyanür-siyanat tuz banyosunda yapılır ve buna “Tenifer” denir. Tenifer, Glock firması tarafından ateşli silahlar da yaygın bir şekilde kullanılır. Tenifer, Almanya'da yerleşik bir şirket olan Durferri'tin ticari markasıdır. Nitrokarbürizasyon işlemi, artan korozyon ve aşınma direnci ile birlikte esas olarak yüzey sertliğini arttırmak için kullanılır. Ateşli silah üreticileri, estetik bir görünüm için fosfat, siyah oksit kaplama ve nitrokarbürizasyon işlemlerini uygulayarak siyah bir görünüm elde edebilirler. Bu işlemler basit, uygun maliyetli ve çeşitli çeliklerden yapılmış parçalar için uygundur.

Gaz nitrüleme işlemi ise, aşınmaya dayanıklı sert bir kaplama oluşturmak için daha basit bir işlemdir fakat daha yüksek maliyete sahiptir. Gaz nitrüleme de amonyak gazı 500-600°C sıcaklıkları arasında hidrojen ve azota ayrışır, açığa çıkan azotun çelik yüzeyine yayınmasıyla nitrüleme gerçekleşir [15]. Bu yöntemde, martenzitten çok daha sert olan ve kaygan sürtünmeler sonucu aşınmayan bir tabaka meydana gelmesi, su vermeye gerek olmadığı için içyapı dönüşümlerinde gerçekleşmemesi gaz nitrülemenin avantajları arasındadır. Bu yöntemin dezavantajlarına örnek olarak; işlemin çok uzun zaman gerektirmesi dolayısıyla maliyetin artması, yüzey üzerinde meydana gelen gevrek beyaz tabakanın pul pul dökülebilir olması verilebilir [50].

HEF Groupe şirketinin silahların yüzey özelliklerinin iyileştirmesi için oluşturduğu ticari prosesler de bulunmaktadır. Bu proseslerden bir tanesi Melonite&Arcor sıvı/tuz banyosu nitrülemidir. Bu tuz banyosunda nitrülenen hafif silah parçaları Şekil 6'da görülmektedir [51].



Şekil 6. Sıvı nitrasyon uygulanmış hafif silah parçaları [51].

Fosfatlama (Phosphating) karbon çelikleri, düşük alaşımlı çelikler ve dökme demirlere korozyon ve aşınma özelliklerini iyileştirmek amacıyla uygulanan bir yüzey işlemidir [52]. Fosfatlamayı çinko fosfat, demir fosfat ve mangan fosfat olarak üç sınıfa ayırmak mümkündür. Mangan fosfat bahsi geçen üç fosfatlama türü arasında en yüksek sertliği veren işlemdir [53]. Fosfatlama işlemi çeliklere püskürtme veya daldırma yöntemleriyle uygulanabilir [46, 54]. 1800'lerin sonlarından beri kullanılmakta olan fosfat kaplama işlemi, 1910 yılında ticari olarak Parkerizasyon (Parkerizing) olarak adlandırıldı [46]. Daha sonra Parkerizasyon ticari işlemi yaygın olarak kullanılmaya başlandı. Parkerizasyon, sıradan pas karşı önemli bir direnç sağlamak için çeliğin yüzeyini yarı nötr bir fosfata dönüştüren çok

dayanıklı, yansıtıcı olmayan bir yüzey işlemidir. Metalik bir parçanın yüzeyi sulu bir dihidrojen fosfat çözeltisine daldırıldığında yapışkan bir fosfat tabakası ile kaplanır. Banyo bileşimine bağlı olarak, elde edilen tabaka ya kristal ya da amorfudur [55]. Fosfat kaplamaların kalınlığı 3 ila 50 μm arasında değişmektedir [45]. Kaplamalar, işlem öncesi temizleme yöntemine, fosfatlama çözeltisinin bileşimine, sıcaklığa ve işlem süresine bağlı olarak çok çeşitli kalınlıklarda üretilebilir. Fosfatlamada elektrik akımı kullanılmaz ve kaplamanın oluşumu öncelikle fosfatlama solüsyonu ile metal yüzey arasındaki temasa ve solüsyonun sıcaklığına bağlıdır. Sonuç olarak, kaplama işleminin kimyasal yapısından dolayı düzensiz şekilli ürünler üzerinde, girintili alanlarda ve dişli ve düz yüzeylerde tek tip kaplamalar üretilir.

Parkerizasyon, oksidasyon (bluing) işlemine göre daha dayanıklı ve paslanmaya karşı da daha iyi direnç göstermektedir. Parkerizasyon oksidasyon (bluing) işleminden daha pratik olmasına rağmen, estetik görünüşünün hoş olmaması en büyük dezavantajıdır. Estetiklik askeri personel için önemli olmasa da sivil avcılar ve sporcular için önemli bir kriterdir. Parkerizasyon işlemi ordularda ilk olarak 1993 yılında Springfield firmasının hizmet tüfekleriyle kullanılmaya başlandı [45, 49]. Parkerizasyon benzer ancak daha modern kaplamaların büyük ölçüde yerini aldığı 1940 yılına kadar ordu tarafından kullanıldı [48]. Ateşli silahlarda parkerizasyon işlemine tabi tutulan parçalar, önce bir temizleme asidi banyosuna daldırılır. Parçalar demir tozlarından temizlendikten sonra, çinko veya manganez fosfat içeren kaynayan bir fosforik asit çözeltisine daldırılır ve daldırılan çözeltiye göre yüzeyde manganez fosfat veya çinko fosfat reaksiyonu gerçekleşir [45]. Pürüzlü bir yüzey pürüzsüz yüzeye göre fosfatın reaksiyona girebileceği daha fazla alan sağladığından, parkerizasyon işlemi en verimli kumlanmış veya kaba zımparalanmış bir yüzeye uygulanır. Parkerizasyon işlemi uygulanmış ateşli silah parçaları hem parkerizasyon işleminin etkisi hem de önceki kaplamaları matlaşması sebebi ile parkerizasyon öncesi halden daha yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahiptir [45].

Sıkıca montajlanmış bir tabancanın sorunsuz bir şekilde kayabilmesi için sürgü (kapak) ve sürgü rayının alıştırılması gerekmektedir. Parkerizasyon, oksidasyon (bluing) gibi çok fazla alıştırma süresi gerektirmez. Yeni pürüzlü yüzey yağı yakalar ve tutar. Yağlanmış ve parkerizasyon işlemine uğramış yüzey paslanmaya karşı çok dayanıklıdır. Ayrıca parçalara oksidasyon (bluing) işlemi uygulayarak maliyet artmaktadır, üreticiler bu maliyetleri ortadan kaldırmak için parkerizasyon işlemini tercih etmektedir [45]. Parkerizasyon kaplamalı askeri silahlar, yüksek performans beklentisi içinde olduğunda

parkerizasyon üzerine oksidasyon (bluing) işlemi de uygulanabilmektedir [49]. Ayrıca askeri standartlar, karbonlu veya nitrürlü yüzeylerde parkerizasyon yapılmasını yasaklar [56].

Eloksal (Anodizing) kaplama, alüminyum malzemelerin yüzey özelliklerini geliştirmek için kullanılan elektrokimyasal bir yüzey işlemdir. Eloksal işleminde yüzeyde anodik bir oksit film oluşturarak yüzey özellikleri geliştirilir. Prosesin etken parametreleri banyo kompozisyonu, banyo pH'ı, sıcaklık, işlem süresi, akım yoğunluğu olarak sıralanmaktadır [57]. Eloksal prosesinde kaplanacak alüminyum malzeme elektrolitte anot konuma getirilir ve yüzeyde Al_2O_3 katmanı oluşturarak koruma sağlanır. Anodizasyon prosesi, kromik, sülfürik ve sert kaplama anodizasyon olarak üç gruba ayrılır [44]. Eloksal endüstriyel ölçekte ilk olarak 1923 yılında kullanıldı. Metal parçaların yüzeyindeki doğal oksit tabakasının kalınlığını artırmak için kullanılan elektrolitik bir pasivasyon işlemidir. Bu işlem, demir veya karbon çeliği için yararlı bir işlem değildir, çünkü demir oksit pul pul dökülür ve alttaki metali sürekli olarak korozyona maruz bırakır. Eloksal, metalin yüzey tabakasından sertleştirilmiş bir tabaka oluşturur ve korozyon direncini ve aşınma direncini artırır. En yaygın olarak kullanılan anotlama spesifikasyonu MIL-A-8625, altı tip alüminyum anotlama tanımlar:

- Tip I – Kromik asit eloksal, kromik asit banyosundan üretilen geleneksel kaplamalar
- Tip IB – Kromik asit eloksal, alçak gerilim prosesi, $22 \pm 2V$
- Tip IC – Tip I ve IB kaplamalar için kromat olmayan bir alternatif olarak kullanım için kromik olmayan asit anotlama
- Tip II – Sülfürik asit eloksal, sülfürik asit banyosundan üretilen geleneksel kaplamalar
- Tip IIB- Tip I ve IB kaplamalar için kromat olmayan bir alternatif olarak kullanım için ince sülfürik asit anotlama
- Tip III – Sert Anodik Kaplamalar

Tip I, IB ve II anodik kaplamaların, ağır hizmet koşulları altında veya boya sistemleri için temel olarak yüzey korozyon korumasını iyileştirmesi amaçlanmıştır. Anodik kaplamalar, çok çeşitli boyalar ve pigmentler ile renklendirilebilir. Tip I, IB ve II kaplamalar, kimyasal dönüşüm sistemlerinden daha yüksek maliyetle daha iyi korozyon koruması sağlar. Kullanılan boyaya bağlı olarak, alüminyumun her zaman popüler olan siyah da dahil olmak üzere bir dizi rengi anodize etmesi sağlanabilmektedir. Çok renkli anotlama, parçanın önce daha açık renkle boyanması ve ardından açık rengin maskelenerek daha koyu bir tonla

boyanmasıyla gerçekleştirilmektedir. AR15 tipi ateşli silah gövdelerinde kamuflaj deseni elde etmek için çok renkli anotlama sistemi kullanılmıştır [45].

Alüminyum sert eloksal kaplarken, homojen bir renk elde etmek çok zordur [45]. Alüminyum parçalar çeşitli farklı alaşımlar içerdiğinden farklı renklendirmeyi kabul edebilirler. Aynı partideki alüminyum parçalarda ısıtım işlemi sırasında hafif değişiklikler olabilir ve bu da renk değişikliğine neden olabilir. Aynı zamanda aynı anda renklendirilen özdeş parçalar bile, kazan içindeki konumlarına bağlı olarak renk farklılıklarına sahip olabilir. Parçaların renk tonlarını eşleştirmek için parçalar birlikte anodize edilmelidir. Bu zaman alıcı ve maliyetli bir iştir. Bununla birlikte, zamanla ve kullandıkça, eloksal kaplama solmaktadır. Yeniden eloksal kaplanması gereken alüminyum silah gövdesindeki tüm çelik parçalarının çıkarılması gerekir, aksi takdirde kimyasal çözeltileri kirletirler [45].

1.4.2. Metalik Kaplamalar

Kaplama malzemelerinin metalik olduğu yüzey işlem grubuna metalik kaplamalar adı verilir. Bu grubun içerisinde altın kaplama, nikel kaplama, akımsız nikel kaplama, dekoratif ve sert krom kaplama, siyah krom kaplama, TDC, elmas parçacıklı TDC gibi yüzey işlemleri bulunur.

Altın kaplama düşük dayanımlı, gösterişli, pahalı ve çok yumuşaktır. Oldukça elektropozitif olduğundan, ana metale çok az elektrokimyasal koruma sağlar. Altının kimyasal saldırılara ve kararmaya karşı direnci, onu aşındırıcı bir ortam için özellikle arzu edilen bir metal haline getirir. Çok pahalı özel ateşli silahlarda, çeliğin yüzeyine altın işlenebilir. Altın kaplama ateşli hafif silahlarda en sık gövde, sürgü, namlu, kapak, tetik ve diğer mandalların estetiğini vurgulamak için kullanılmaktadır [45].

Nikel kaplama 19. yüzyılın ortalarına doğru koruyucu bir kaplama olarak ortaya çıkmaya başladı. İlk önce ayna parlaklığında ve daha sonra zımparalanmış veya kumlanmış yüzeylere uygulanan nikel kaplamalar korozyona karşı koruma sağladı. Elektrolitik nikel kaplama, elektriği, pahalı kimyasalları ve tükendiğinde bu kimyasalların pahalı bir şekilde elden çıkarılmasını içeren karmaşık ve maliyetli bir işlemdir. Düzgün kaplanmamış bir ateşli silah kolayca kırılabilir veya yüzeyinde pul pul dökülmeler görülebilir. Ateşli silah üreticileri, nikel kaplamayı aşamalı olarak kaldırdı ve nikel kaplama yerine paslanmaz çelik kullanmaya başladı. Askeri standartlar, nikel kaplamanın yalnızca aşağıdaki uygulamalar için kullanılacağını belirtmektedir [56]:

1. Sıcaklığın 538°C'yi (1.000°F) aşmadığı ve diğer kaplamaların uygun olmadığı durumlarda,
2. Kaplamasız korozyona dayanıklı çelik veya diğer paslanmaz çeliklerle temas halinde paslanmaz çelik ile çatlak korozyonunun etkilerini en aza indirmek istenen durumlarda,
3. Diğer fonksiyonel kaplamalar için astar olarak,
4. Aşınmış yüzeyleri yeniden oluşturarak ölçüleri eski haline getirmek,
5. Kum erozyonuna karşı direnç için.

Akımsız nikel kaplama işlemi oto katalitik bir yüzey bitirme işlemidir. Bu işlem esnasında akım kullanılmaz. Akımsız nikel kaplama parça yüzeyinde homojen kaplama kalınlığı dağılımı, korozyon ve aşınma dayanımı, sertlik gibi özellikler sunmaktadır. Proses kontrollü kimyasal redüksiyon reaksiyon prensibine dayanmaktadır. Akımsız nikel kaplama işleminde etken parametreler şu şekilde sıralanmaktadır; banyo kompozisyonu, banyo sıcaklığı ve pH'ı, kaplanacak malzemenin yüzey alanı ve zamandır. İşlem için sıcaklık aralığı 60-90°C arasında değişmektedir [58]. Akımsız nikel kaplamalar kolayca lehimlenebilir ve elektronik uygulamalarda alüminyum gibi hafif metallerin lehimlenmesini kolaylaştırmak için kullanılır. Akımsız nikel genellikle bariyer kaplama olarak kullanılır; etkili olması için, tortunun gözeneklerden ve kusurlardan arındırılmış olması gerekir. Birikmiş amorf durumda, kaplama korozyon direnci mükemmeldir ve birçok ortamda saf nikel veya krom alaşımlarından üstündür. Ancak ısı işleminden sonra korozyon direnci bozulabilir [56].

Ateşli Silahlar endüstrisinde metalik görünümlü bir yüzey istendiğinde akımsız nikel kaplamalar kullanılır (Şekil 7). Bu kaplamalar, karmaşık şekilli ateşli silah bileşenlerine uygulanabilir ve iyi düzeyde aşınma ve korozyon koruması sağlar. HEF, Michigan, Benton Harbor'daki Tech Nickel konumu aracılığıyla ateşli silahlar için akımsız nikel kaplamalar sunmaktadır.



Şekil 7. Hafif silah bileşenlerine akımsız nikel kaplama [51].

Sert ve dekoratif krom kaplama metalik malzemelerinin yüzeylerini işlemede dekoratif veya koruyucu amaçlarla kullanılmaktadır. Kaplama işlemiyle elde edilen tabaka kalınlığına göre krom kaplamaları dekoratif ve sert krom kaplama olarak iki gruba ayırmak mümkündür. $0,25\ \mu\text{m}$ 'ye kadar olan kalınlıklardaki krom kaplamalar dekoratif krom kaplama olarak adlandırılırken $1-500\ \mu\text{m}$ arasındaki kalınlıklara sahip kaplamalar sert krom kaplama sınıfını oluşturur. Sert krom kaplama işlemi özellikle aşınma direncini iyileştirmek amacıyla uygulanmaktadır [44]. Krom kaplama tekniği ile yapılan kaplamalar çeşitli ısı işlemleri ile geliştirilebilirler. Li vd. [59] yaptıkları çalışmada artan ısı işlem sıcaklığı ile elde edilen kaplama tabakası sertliğinin arttığı sonucuna ulaşmışlardır. Banyo sıcaklığının kaplama kalitesine etkisi üzerine yaptıkları çalışma neticesinde Barbato vd. [56] artan banyo sıcaklığı değeriyle daha kaliteli bir kaplama katmanı elde etmişlerdir.

19. yüzyılın ortalarında icat edilen, ancak 1900'lerin başına kadar mükemmelleştirilmeyen sert krom, demir alaşımlarının yüzeyinde kromun elektrokimyasal bir birikimidir. Dekoratif kromla aynı metali kullanan sert krom, freze ve delme aletlerinin kesici kenarlarını kaplamak için geliştirildi ve endüstriyel uygulamalarda daha uzun ömür sağladı. Sert krom kaplamalar, aşınmaya, ısı aşınmaya ve/veya korozyona karşı direncin gerekli olduğu hidrolik piston ve silindirler, piston segmanları, uçak motor parçaları ve plastik kalıplar için kullanılır [56]. Sert krom kaplama 1970'lerin ortalarından sonlarına kadar yeterince yaygınlaştığında, ateşli silah sahipleri tabancalarına bu işlemi uygulatmaya başladılar. Pek çok açıdan sert krom, ideal bir ateşli silah kaplamasıdır. Sert krom kaplama korozyon direncinde nihai olmasa da (çelik çok yavaş olsa da paslanır), ateşli silahları çok fazla kullanım gören üreticilerce çok popülerdir. Sert krom ayrıca çok düşük sürtünme

katsayısına sahiptir ve birbiri üzerinde kayan iki krom yüzey, iki çelik parçadan daha az sürtünür. Daha sert yüzey ve azaltılmış sürtünme, herhangi bir hareketli parçanın hizmet ömrünü büyük ölçüde artırır. Maliyetine ve görünümüne rağmen sert krom, bir tüfeğe uygulayabileceğiniz en koruyucu kaplamalardan biridir [45].

Siyah krom kaplama'nın 1980'lerde ateşli silahlarda sert krom kaplamadan sonraki büyük sıçrama olduğu düşünülüyordu. Siyah krom kaplama ile, atıcıların sert kromun dayanıklılığına ve oksidasyon (bluing) işleminin korozyon dayanımına sahip olabileceği düşünülüyordu. Ne yazık ki, siyah kromun çok dayanıklı ve kullanışlı olmadığı anlaşıldı. Siyah krom kaplama bir tabancanın iç boşluklarına ulaşamaz, bu nedenle de tabancanın şarjör yuvası gibi derin yüzeylerini tamamen kaplayamaz. Simsiyah kaplama oldukça çekici olsa da aynı dayanıklılık için, daha düşük bir maliyetle ve kaplamayı yama ile onarma yeteneği sunan fırınlanmış bir epoksi işlemi kullanımı daha doğru bir tercih olacaktır.

TDC (İnce yoğun krom kaplama), krom kaplamaya alternatif ve kaplama kalınlığının 0,635 ila 12,7 µm arasında değiştiği bir yüzey işlemidir. Proses sonucu elde edilen kaplama tabakasının çok ince olması tabakada iç gerilme oluşmasını engelleyerek standart krom kaplamalarda meydana gelen çatlama problemini elimine etmektedir. İşlem özel florür banyolarında 60°C sıcaklıkta gerçekleştirilir [45]. İnce yoğun krom (TDC) ilk olarak 1957'de tanıtıldı [60]. TDC kaplama işlemi, küçük çatlaklar oluşturabilen standart krom kaplamaya bir alternatiftir. Krom kaplamanın aksine, TDC o kadar incedir ki çatlamaya neden olacak kadar iç gerilim oluşturmaz ve bu nedenle iyi bir korozyon direncine sahiptir. Standart sert krom prosesleriyle karşılaştırıldığında TDC, daha iyi yapışma, korozyon direnci ve yüzey sertliği sunmaktadır [60].

Elmas Parçacıklı TDC (XADC); Soğuk savaş döneminde Sovyet mühendisliğinin geliştirdiği bir teknolojiye dayanarak 1997 yılında Armory Şirketi tarafından TDC kaplamadan daha sert bir kaplama olan elmas parçacıklı TDC kaplama yöntemini geliştirilmiştir. Elmas parçacıklar kaplamanın sürtünme katsayısını düşürerek daha iyi bir aşınma davranışı göstermesini sağlamaktadır [45]. XADC, alüminyum, magnezyum ve titanyum hariç tüm önemli demirli ve demirsiz metallere yapışır ve iyi performans gösterir. XADC yüksek dayanım, kayganlık, yapışma ve aşınmaya karşı direnç sunar. XADC, aşınma testlerinde standart sert krom, akımsız nikel ve titanyum nitrürden daha iyi performans göstermiştir [60].

1.4.3. Polimer Kaplamalar

Polimer kaplamalar kaplama malzemesi olarak organik materyallerin kullanıldığı yüzey işlemleridir. Boyama, fenolik reçine, poliepoksi (PTFE), epoksi gibi yüzey işleme yöntemleri organik kaplamalar içerisinde yer almaktadır.

Boya bir alt tabakaya ince bir tabaka halinde uygulandıktan sonra katı bir filme dönüştürülen herhangi bir sıvı, sıvılaştırılabilir veya mastik bileşimdir. Geniş boya kategorisi, uzun süredir metaller için koruyucu kaplamalar olarak kullanılan çeşitli boya türleri, vernikleri ve emayeleri içerir. Askeri standartlar, herhangi bir boya türünün işlevsel, çalışan veya aşınan yüzeylere; yağlanmış yüzeylere, ayarlanabilir vida dişlerine; yağlama veya tahliye deliklerine, yatak veya kayan yüzeylere; düzgün çalışması için temiz ve çıplak olması gereken yüzeylere, sürtünebilecekleri veya kazınabilecekleri alanlara veya kaplamanın uygulanmasının parça veya sistemin arızalanmasına neden olabileceği alanlarda kullanılmaması gerektiğini ifade eder. Ayrıca boyalar genellikle hassas toleransa sahip hareketli ve birbiri ile çalışan parçalarda kullanılamayacak kadar kalındırlar. Bu sebeple boyalar ateşli silahlarda estetik ve kamuflaj amaçlı kullanılmaktadır [45].

Fenolik reçine (Phenolic resin) ile molibden disülfür'ün süspansiyonu oluşturularak bunun bir aerosol olarak sprey şeklinde metal yüzeyine püskürtülmesi şeklinde uygulanmaktadır. Spreyleme öncesinde operasyonun uygulanacak metal yaklaşık olarak 82°C'ye ısıtılır ve sprey uygulaması ardından 150°C sıcaklıkta yarım saat süren bir ısıtım işlemi uygulanır. Prosesin ardından yüzeyde fosfatlamaya benzer görünüşte bir kaplama tabakası oluşmaktadır [45]. Bu uygulama Amerikan Deniz Kuvvetleri ve Deniz Piyadeleri tarafından M16 tüfeklerini yenilemek için sıklıkla kullanılmaktadır [45].

Poliepoksi (PTFE), diğer adıyla teflon, kuru film yağlayıcı özelliği, termal stabilitesi, kimyasallara ve korozyona karşı direnci, temizlik kolaylığı ve mat görünümü vasıtasıyla silah üretimi endüstrisinde kendisine yer kazanmış bir yüzey işlemidir [61].

Epoksi (Epoxy) veya poliepoksit, bir katalize edici madde veya "sertleştirici" ile karıştırıldığında kürlenir (polimerize olan ve çapraz bağlar oluşturan) ısıyla sertleşen bir epoksit polimerdir. Epoksiler, boyaların sağlayamadığı gerekli dayanıklılığı sağlar. İki veya daha fazla kimyasal arasındaki reaksiyon, epoksi de sert ve kalıcı bir kaplama oluşturur. Epoksi kaplama uygulanan bir tabancada epoksi solmaz ve çizilmeye karşı da oldukça dayanım sağlar. Epoksi kaplamalar sadece siyah renkte oluşmaktadır. Ticari uygulamalar yalnızca 25,4 µm (0,001 inç) kalınlığında bir katmanda oluşmaktadır. Bu sebeple de ateşli

silah gövdesi üzerindeki hiçbir işaret epoksi kaplama kalınlığı ile kaybolmaz [46]. Metalik kaplamalar kadar aşınmaya dirençli değildirler ancak oksidasyon işlemi (bluing) ve fosfatlamaya göre aşınmaya karşı daha dirençlidirler.

1.4.4. Seramik Kaplamalar

Seramik malzemeler yüksek sertlikleri ve elektriksel açıdan yalıtkanlıkları ile bilinmektedirler. Bahsedilen iki özellik metalik malzemelerin korozyon ve aşınma dayanımlarını arttırmak için oldukça önemlidir. Bunun yanı sıra seramiklerin sürtünme katsayısı düşüktür ve bu da aşınma direncine olumlu olarak etki etmektedir. Seramik kaplamalarda karbürler, oksitler, nitrürler, silikatlar, borürler kullanılmaktadır ve kaplama yapmanın birçok tekniği vardır [45].

Bir M4 ve M16'nın maksimum namlu sıcaklığı 871°C (1600°F) olduğundan, mevcut ateşli silah tasarımların da seramik malzemelerin kullanılması fayda sağlayacaktır. 1000°C (1832°F) ve daha yüksek sıcaklıklar için metal yapı malzemeleri ve taşıyıcı malzemeler seramiklerle değiştirilmektedir [62]. Bu seramikler ya kendi kendini yağlamalı ya da katı bir yağlayıcı ile kaplanmalıdır. Neyse ki seramiklerin (özellikle oksit seramiklerin) bileşimi kolayca değiştirilebilir ve bu nedenle belirli özellikler için özel olarak hazırlanabilmektedirler. Seramikler, temel yapılarına yağlayıcı bileşenler dahil edilerek veya katı yağlayıcı malzemenin seramiğin yüzey tabakasına yüzey difüzyonu ile kendi kendini yağlayabilir hale getirilmesi ile yağlanmaktadır. Tüm bunlar, mukavemet ve boyutsal kararlılık gibi diğer özelliklere zarar vermeden gereken yağlama derecesine ulaşılarak gerçekleştirilmektedir. ABD Ordusu Araştırma Laboratuvarı şu anda namlu ömründe önemli bir artış, ağırlıkta bir azalma (öncelikle daha küçük kalibreli sistemler için) ve daha yüksek enerjili mühimmat kullanımına olanak sağlamak amacıyla seramik silah namlularının fizibilitesini değerlendirmektedir. Bu araştırma, 5,56 mm tüfekten 155 mm topçu sistemine kadar bir dizi kalibreyi kapsamaktadır. Seramik kaplamanın yüksek aşınma direnci, yüksek sıcaklık dayanım kapasitesi ve nispeten düşük yoğunluk kombinasyonu ile seramik kaplanan silah namlusunda %50 ömür artışı, namlu kinetik enerjisinde %20 artış ve ağırlıkta %5-25 arasında bir azalma sağlaması beklenmektedir [63].

Nikel borür seramik kaplamalar havacılık teknolojisinde, motor parçalarında, hidrodinamik tahrik sistemlerinde ve askeri roket kızıağı testlerinde kullanılmıştır. Nikel Borür kaplama, yağlama ihtiyacını ortadan kaldıran, sürtünmeyi azaltan, sertliği arttıran ve

ateşli silah ömrünü önemli ölçüde artıran bir kaplamadır. UCT Coatings, EXO Teknolojisi adını verdiği Ni_3B kaplamaları, sürgü hamili (bolt carrier), horoz (hammer) ve üst gövde parçalarına uygulayarak “Fail Zero” serisi ile tanıttı.

Tungsten karbür seramik kaplamalar: Philco-Ford, “Silah Namlusu Uygulamaları için Kimyasal Buhar Biriktirilmiş (CVD) Tungsten İşlem Geliştirme ve Karakterizasyonu” adlı bir rapor yayınlamıştır. Raporda silah namlularının deliklerine tungsten uygulamak için geliştirilmiş kimyasal buhar biriktirme (CVD) süreçleri geliştirmek ve ayrıca CVD tungstenin fiziksel ve mekanik özelliklerini karakterize etmek için 20 aylık bir program yürütülmüştür. 4150 kalite çelik için -65°F ve 200°F ortam sıcaklıklarında CVD tungsten işlemi uygulanmıştır. Daha sonra yüksek gerinim-hızlı çekme ve sıkıştırma testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yoğunluk, ısı genleşme ve ısı iletkenlik ölçümleri de yapılmıştır. Namlu malzemesi olarak CG-27, L-605, 718 ve Pyromet X-15 araştırılmıştır. Namlular ile yapılan test atışlarına dayanarak, 4150 malzemesinde CVD tungsten işleminin kabul edilebilir düzeyde olduğu gözlemlendi ancak diğer dört alaşım beklenen kaliteyi ortaya koyamadığı gözlemlenmiştir. Beş malzemeden on dört MG3 test namlusu üretilerek Amerikan Ordusuna teslim edilmiştir.

Krom nitrür seramik kaplamalar, iyon ışını destekli biriktirme (IBAD) ile üretilen sert metal nitrür kaplamalar, bir dizi askeri sistemde elektrolizle kaplanmış sert kromun (EHC) yerini almaktadırlar. Özellikle çevresel hususlar, askeri sistemlerde EHC’nin bir zamanlar yaygın kullanımını sağlamaktaydı fakat bu hususlar EHC’yi Krom Nitrür’e göre daha pahalı ve tehlikeli hale getirmektedir.

Titanyum nitrür seramik kaplamalar (TiN); Titanyum Nitrür (TiN) kesme ve kayma yüzeylerini sertleştirmek ve korumak için kullanılan son derece sert bir seramik malzemedir. TiN, yüksek sertlik ve düşük aşınma özelliklerine sahiptir. Bu kaplamalar, taktik bir ateşli silahın dış kaplaması için ideal olmayan altın rengine sahiptir, ancak dış kaplamalar boyanabilmektedir [64].

1.4.5. Karbon Kaplamalar

Elmas benzeri karbon (Diamond-Like Carbon, CVD Diamond): Karbon kaplamalar genellikle grafit ve elmas bağlarının bir karışımıdır, bu nedenle bu tür kaplamalara genellikle elmas benzeri karbon kaplamalar (DLC) denir. Elmasın aşırı sertliği, yüksek aşınma direnci, iyi yorulma mukavemeti, yüksek termal iletkenliği, iyi radyasyon ve sıcaklık direnci,

kimyasal ve termal durgunluğu, yüksek korozyon direnci ve çevresel uyumluluk, onu tribolojik uygulamalar için mükemmel kılmaktadır [65]. Bu sebeple elmas benzeri kaplamalar ile şu anda ateşli silah namlularının hem içinin hem de dışının kaplanması üzerine çalışmalar devam etmektedir.

Tungsten elmas benzeri kaplamalar (W-DLC Tungsten Diamond-Like, Nitron), demir alaşımları ve paslanmaz çelikler için mükemmel bir kimyasal buhar biriktirme kaplamasıdır. Kaplamanın toplam kalınlığı yaklaşık 1 ila 3 μm 'dir. Genellikle plazma destekli buhar biriktirme ile uygulanır. Korozyon direnci, tipik olarak eklenen 3 μm akımsız nikel ara katmanı nedeniyle W-DLC ile artırılır [45]. Sigarms P226'nın ABD Donanmasının standart silahı olduğu ve W-DLC (Sigarms tarafından "Nitron" olarak adlandırılmaktadır.) ile kaplanmış ve akımsız nikel giydirildiği bilinmektedir.

Ayrıca fiziksel buhar biriktirme (PVD) kaplama yöntemi de ateşli silah parçalarında (Şekil 8) kullanılan bir yüzey sertleştirme metodudur. Bu yöntem ile 2-10 μm arası kaplama kalınlığı elde etmek mümkündür. İşlem vakum koşullarında gerçekleşir ve üç aşamada oluşmaktadır; buharlaştırma, taşıma ve yoğunlaştırma. Kaplama malzemesi hedef denilen malzeme kaynağından buharlaştırma yoluyla elde edilerek, vakum koşullarında plazma ortamında kaplanacak malzemeye doğru taşınır. Kaplanacak malzemeye ulaşan kaplama malzemesi, parça yüzeyinde yoğunlaştırılarak işlem tamamlanır. Bu yöntemle oldukça ince ve sert tabakalar elde etmek mümkündür. Prosesin doğası reaktif gazlar veya farklı malzemeler kullanılarak çok iyi özelliklere sahip hibrit/kompozit kaplama yapılmasına imkân vermektedir.



Şekil 8. PVD yöntemi ile kaplanmış tabanca namluları [51].

1.5. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

Nitrokarbürleme, mühendislik malzemelerinin aşınma direnci, yorulma mukavemeti ve korozyon direncini iyileştirmekte kullanılan, nitrürleme ve karbürleme işlemlerinin bileşik etkisini oluşturmak için uygulanan termokimyasal yüzey işlemlerinden biridir. İşlem sonucunda nitrokarbürizasyon tabakası yüzeyde $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}(\text{N}, \text{C})$ ve $\gamma'\text{-Fe}_4(\text{N}, \text{C})$ gibi nispeten çok daha sert demir nitrür ve karbürlerinden oluşan bir beyaz tabaka, onun altında alaşım nitrür ve karbürlerinin olduğu nispeten daha düşük sertlikte difüzyon tabakasından meydana gelir. Araştırmalar sonunda, nitrokarbürleme işlemi sonrası çelik malzeme yüzeylerinde çoğunlukla ϵ -fazı içeren 10-20 μm kalınlıkta beyaz tabakanın olduğu, bu tabaka kalınlığının sıcaklık ve zamanla arttığı ve gözenekli bir yapıya sahip olduğu belirlenmiştir [66, 59]. Bu işlemle, uygulama parametrelerine bağlı olarak malzemede yüzey sertliğinin yaklaşık 2-3 kata kadar artırılabilceği görülmüştür. İşlem şartlarına bağlı olarak malzemenin yorulma ömründe ise %55'lere varan oranlarda iyileşmelerin meydana geldiği görülmüştür [5]. Nitrokarbürleme yüzey işlemleri sonrası ise işlem şartlarına da bağlı olarak çelik malzemelerin aşınma dirençlerinin %60 oranına kadar artırılabilceği rapor edilmiştir [5]. Öte yandan, bu tip bir yüzey işleminin çelik malzemelerin yüzey pürüzlülük değerlerini de uygulama sıcaklık ve süresine bağlı olarak artırdığı görülmüştür [5].

Bellas vd. [67] tarafından Tenifer prosesi olarak da bilinen özel bir nitrokarbürleme işlemiyle AISI 4340 ve AISI 347 çelik malzemelerin özellikleri karşılaştırmalı olarak çalışılmış ve çalışmalarının sonucunda paslanmaz çelik malzemelerin yüzeyine azot ve karbon atomlarının difüzyonunun yüzeydeki pasif tabaka tarafından sınırlandığı bulunmuştur. Aynı zamanda paslanmaz çeliklerde bulunan alaşım elementleri de karbon ve azot atomlarının difüzyonlarını etkileyen bir parametre olarak belirlenmiştir. Karakan [5] plazma nitrokarbürizasyon işleminin AISI 1020 çeliğinin yorulma dayanımı üzerindeki etkisini incelemiştir. Yaptığı araştırmaların sonucunda artan nitrokarbürleme işlem süresiyle malzemenin yorulma mukavemetinin iyileştiği ve işlem ortamında bulunan CO_2 oranının artmasıyla birlikte yorulma mukavemetinin azaldığı sonuçlarına ulaşmıştır. Kaplan vd. [68] nitrokarbürizasyon sonrası yapılan oksidasyon işleminin AISI 4140 çeliğinin tribolojik özelliklerine etkisi üzerine yapılan çalışmada; bu işlem sonucunda malzeme yüzeyinde oluşan oksit tabakasının aşınma direncini artırdığı ve sürtünme katsayısını düşürdüğünü ortaya konulmuştur.

Zhang vd. [69] M50NiL kalite çelik altlık malzeme kullanarak yaptıkları çalışmada, plazma nitrokarbürizasyon parametrelerinin faz oluşumlarına etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında elde ettikleri veriler doğrultusunda nitrokarbürizasyon sıcaklığı 460°C'den 500°C'ye yükseldikçe ϵ -Fe₂₋₃ (N, C) fazı miktarının arttığı ve 540°C'de düştüğü, γ' -Fe₄ (N, C) miktarının ise çalışma sıcaklığı yükseldikçe arttığı tespit edilmiştir. Nitrokarbürize tabakaların sertliği, artan nitrokarbürizasyon sıcaklığı ile birlikte bariz bir iyileşme göstermiş ve 540°C'de 1287 HV maksimum yüzey sertliği elde edilmiştir [69]. Li vd. [70] tuz banyosu nitrokarbürizasyonunun ve ardıl işlem olan oksidasyonunun 17-4PH paslanmaz çelik üzerinde etkilerini inceledikleri çalışmada, nitrokarbürize edilmiş numunenin en dış yüzeyinde parlak bir bölge (bileşik ϵ -Fe₂₋₃ (N, C)), ardından hafifçe dağlanmış bir bölge (Fe₃N / Fe₄N / CrN / γ' -Fe karışımı) ve sonradan oksitlenen numunenin dış yüzeyinde ince bir oksit bölgesi (Fe₃O₄ / FeO) oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Li vd. [70] çalışmasına göre oksitlenme sonrası numunenin en dış yüzeyinde yüksek miktarda oksijen bulunduğu anlaşılmaktadır. Oksijenin itme etkisi, en yüksek nitrojen konsantrasyonuna yol açarken, nitrülenmiş katmanın önündeki pik karbon konsantrasyonu, nitrojenin itme etkisinden kaynaklanır. Yüzeyde yüksek mikro sertlik değerleri (> 1200 HV0.1) elde edilir ve ardından hem nitrokarbürize edilmiş hem de oksitlenmiş numunelerin her ikisi için kasa/çekirdek ara yüzünde alt metal mikro sertlik değerine aniden düşer.

Marusic vd. [71] nitrokarbürleme ve post oksidasyon işlemlerinin karbon çeliğinin yüzey özelliklerini inceledikleri çalışmalarında, oksidasyon sonrası numunelerin yüzey tabakası da ϵ -Fe₂₋₃ (N, C) ve γ' -Fe₄ (N, C)'den oluştuğu, ancak ek olarak Fe₃O₄ içerdiği sonucuna ulaşmışlardır. Elde edilen sonuçlar, Tenifer prosedürüne dayalı nitrokarbürizasyon ve post oksidasyon işlemlerinin, alaşımsız karbon çeliğinin daha iyi mekanik ve korozyon özellikleriyle sonuçlandığını göstermiştir. Termokimyasal olarak modifiye edilmiş alaşımsız karbon çeliğin korozyon özellikleri iyileştirilmiş ve çok iyi korozyon direnci ile bilinen östenitik paslanmaz çeliğin korozyon özelliklerine yaklaşmıştır [71]. Zhang vd. [72] ise 35CrMo çeliğinin nitrokarbürizasyon işlemi ardından yüksek çevrim yorulma rejiminde yorulma davranışı incelemişlerdir. Nitrokarbürizasyon işleminin bahsi geçen çeliğin yorulma ömrünü %51 oranında arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır [72]. Qiang vd. [73] nitrokarbürizasyon işleminin çeliklerde yük taşıma kapasitesini arttırdığını öne sürmüşlerdir. Qiang bir başka çalışmada [74], nitrokarbürizasyon sonrası oksidasyon işleminin sürtünme katsayısını ve aşınma direncini azalttığı sonucunu elde etmiştir.

Alver vd. [75] nitrokarbürleme süresinin korozyona etkisini incelediği çalışmada AISI 4140 numuneleri 1,2 ve 3 saat süre ile tuz banyosunda nitrokarbürlemiştir. Testler sırasında numunelerin polarizasyon eğrilerinden, işlem görmemiş 4140 çelik numunenin en düşük korozyon direncine sahip olduğu, 2 saat süreyle nitrokarbürize edilen 4140 çelik numunenin ise çözeltideki en yüksek korozyon direncine sahip olduğu anlaşılmaktadır [75].

Yukarıda kısaca verilen genel literatür özetinden de anlaşılacağı üzere, nitrokarbürizasyon işlemi ile ilgili farklı çelik gruplarına yönelik birçok araştırma ve çalışmanın yapılmış olmasına rağmen, nitrokarbürizasyon öncesi ve sonrası yüzey özelliklerinin durumu, işlem sonrası oluşan yapılar özellikle hafif silah üretiminde de kullanılan çelikler için detaylı bir şekilde ortaya konulamadığı görülmektedir. Bu nedenle bu tez çalışmasında, hafif silah üretiminde kritik parçalarda kullanılan az alaşımlı AISI 4140 çeliklerine nitrokarbürleme yaparak, işlem öncesi ve sonrası malzemede meydana gelen yapısal, mekanik, metalografik ve tribolojik değişimleri incelenecektir. Bu sayede işlem öncesi yüzey özellikleri de dikkate alınarak savunma sanayi sektöründe yer alan hafif silah kategorisindeki birçok ürün için tercih edilen nitrokarbürizasyon işlemi karakterize edilmeye çalışılacaktır. Dolayısıyla bu çalışmanın temel amacı, hafif silah kategorisinde yoğun bir şekilde uygulanan yüzey sertleştirme işlemlerinden biri olan nitrokarbürizasyon prosesinin hafif silahlara yönelik gerçek parçalar üzerinden (kapak parçaları) proses öncesi yüzey özelliklerini de katarak kapsamlı bir şekilde incelenmesi ve yapısal, mekanik ve tribolojik açılardan bu sürecin optimize edilmesidir.

Bu kapsamda sürtünme, aşınma, yorulma ve diğer mekanik etkilere maruz kalan temel tabanca parçalarından biri olan kapak parçasının nitrokarbürizasyon prosesi öncesi en iyi yüzey durumuna getirilmesi, bu kapsamda uygulanan yüzey hazırlık işlemlerinin en iyilemesi (optimizasyonu) ve sonrasında ise farklı nitrokarbürleme işlemlerine ait teknik verilerin incelenmesi temel çalışma konusunu oluşturmaktadır. Ayrıca bu çalışma ile deney numunelerine nitrokarbürizasyon işlemi sonrasında da yüzey işlemleri uygulayarak homojen bir yüzey ve estetik bir görünüm kazanmaları da hedeflenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Malzeme ve Deney Parçaları

Silah sistemleri ile ilgili çalışmalar genellikle mühimmat veya merminin belirli bir noktadan uzak bir hedefe atılması üzerine yürütülmektedir. Bu da ancak yüksek enerjili barut ve oluşacak basınca dayanıklı namlu ve kapak parçaları ile mümkün olabilmektedir. Tüm silah sistemlerinde bulunan namlu ve kapak parçaları silah sisteminin en önemli parçalarından olup tasarım ve imalatı oldukça karmaşık süreçler içermektedir. Günümüzde silah sistemlerinin geliştirilmesine yönelik çalışmaların önemli bir kısmı namlu ve kapak parçalarının daha dayanıklı ve uzun ömürlü olması üzerine yoğunlaşmıştır [76]. Bu tez kapsamında mevcut hafif silah modellerinde kullanılan AISI 4140 kalite standardına sahip sıcak dövme malzemeden üretilen kapak parçaları kullanılmıştır.

Hafif silah kategorisindeki ürünlerde kullanılan kapak (sürgü) parçaları en kritik parçalar arasında yer almaktadır. Patlama anı, merminin namluyu terketmesi, patlama sonrası oluşan basınç ile kapağın geri gelmesi gibi kritik öneme sahip hareketler doğrudan kapak malzemesi ile ilgilidir. Tabancalarda kullanım ömrü, bu çalışma hareketlerinin kusursuzluğu ile doğru orantılıdır [76]. Bu tez çalışmasında kullanılan AISI 4140 çelik malzemesine ait kimyasal bileşim aralıklarını içeren değerler Tablo 4’de verilmiştir. Çalışmalar kapsamında kullanılacak olan AISI 4140 ham kapak malzemelerinin kimyasal bileşimleri ARUN ARTUS 8 Spektral Analiz Cihazı ile analiz edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları Tablo 5’de verilmiştir. Çalışmalar boyunca kullanılacak olan AISI 4140 çelik malzemeye ait mekanik özellikler ise Tablo 6’da belirtilmiştir.

Tablo 4. AISI 4140 çelik malzemesine ait standart kimyasal bileşimler

Malzemenin Standartları							
DIN			AISI/SAE		EN		
17.225			4140		42CrMo4		
Malzemenin Kimyasal Bileşimi (%)							
C	Si	Mn	Pmax	Smax	Cr	Mo	V
0.38-0.45	0.15-0.40	0.50-0.80	0.035	0.035	0.90-1.20	0.15-0.30	-

Tablo 5. Örnek olması açısından, tedarik edilen 4140 kapak malzemesi üzerinden yapılan örnek bir spektral analiz raporu

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	97.26	0.393	0.237	0.752	0.0082	0.0026	1.04	0.186
2	97.23	0.423	0.233	0.752	0.0081	0.0035	1.04	0.185
3	97.26	0.406	0.237	0.756	0.0070	0.0033	1.03	0.181
Avg	97.25	0.407	0.236	0.753	0.0078	0.0032	1.04	0.184
	Ni	Al	B	Co	Cu	Nb	As	Sn
1	0.0529	0.0179	<0.001	0.0188	0.0261	<0.007	<0.002	<0.0005
2	0.0527	0.0170	<0.001	0.0197	0.0264	<0.007	<0.002	<0.0005
3	0.0513	0.0171	<0.001	0.0206	0.0266	<0.007	<0.002	<0.0005
Avg	0.0523	0.0173	<0.001	0.0197	0.0264	<0.007	<0.002	<0.0005
	Ti	V	W	Ca	Pb	Zn	Zr	Bi
1	0.0048	<0.001	<0.01	0.0017	<0.005	<0.004	<0.004	<0.0005
2	0.0048	<0.001	<0.01	0.0018	<0.005	<0.004	<0.004	<0.0005
3	0.0048	<0.001	<0.01	0.0018	<0.005	<0.004	<0.004	<0.0005
Avg	0.0048	<0.001	<0.01	0.0018	<0.005	<0.004	<0.004	<0.0005
	Sb							
1	<0.001							
2	<0.001							
3	<0.001							
Avg	<0.001							

Tablo 6. Tedarik edilen 4140 ham mamul malzemesine ait ortalama mekanik özellik değerleri

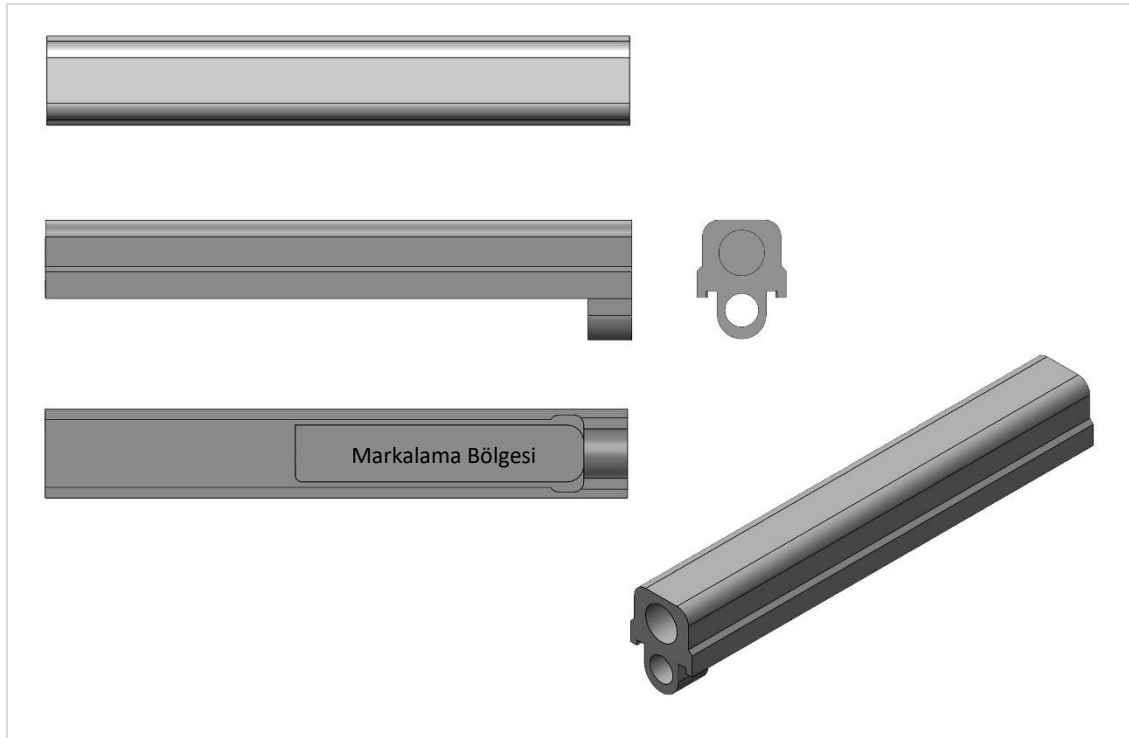
Mekanik Özellikler	Birim	Değer
Çekme Mukavemeti	MPa	965,0
Akma Dayanımı	MPa	802,0
Kopma Uzaması	%	18,8
Sertlik	BSD	290,0
Alan Daralması	Z (%)	57,6

2.2. Uygulanan Prosesler

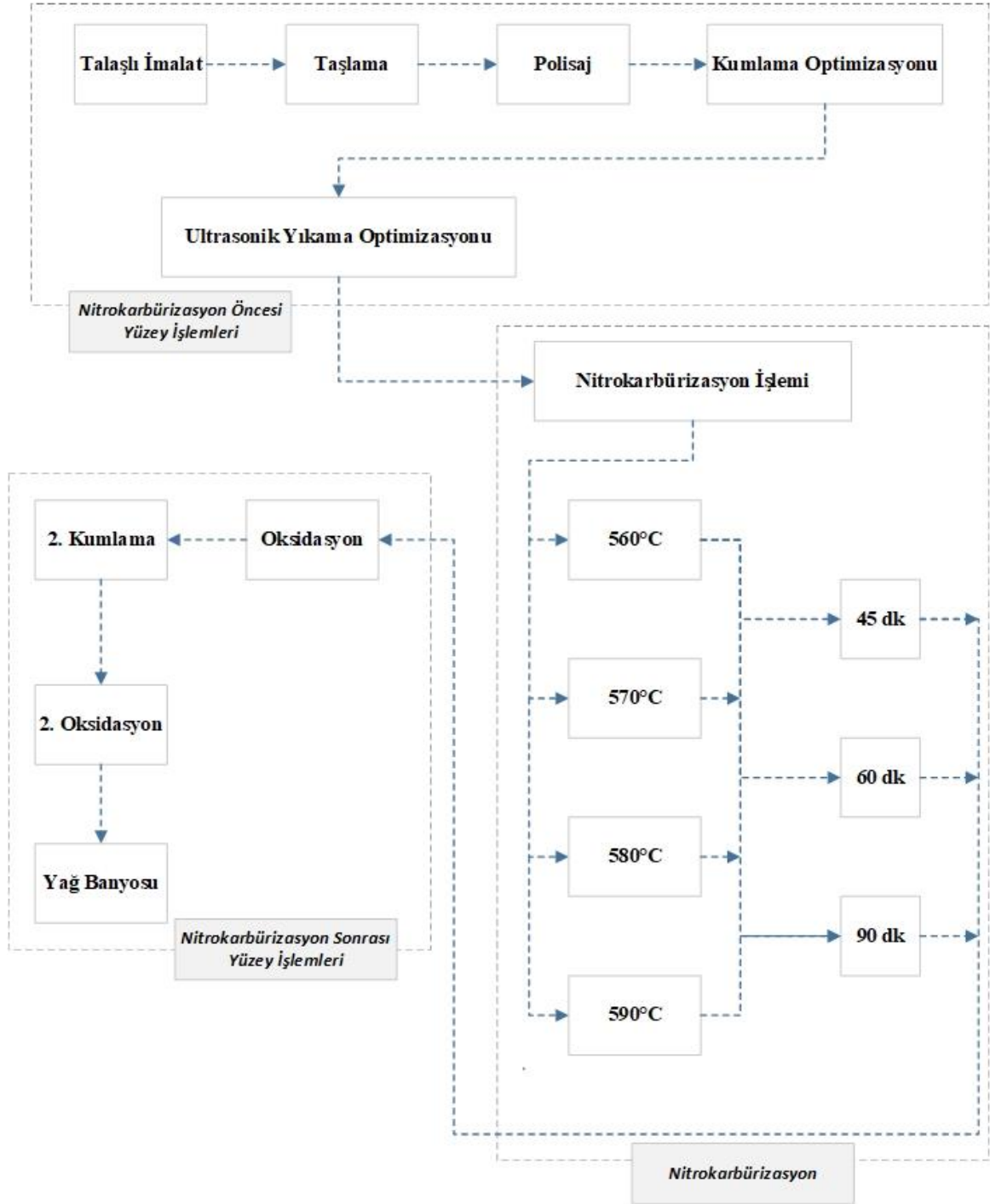
Kapak numunelerine uygulanan işlemler 3 ana başlık altında değerlendirilebilir:

1. Nitrokarbürizasyon öncesi yüzey işlemleri,
2. Nitrokarbürizasyon işlemi,
3. Nitrokarbürizasyon işlemi sonrası yüzey işlemleri.

Bu kapsamda nitrokarbürizasyon işlemi öncesi birçok yüzey işlem uygulanmış ve bazı işlemler için ayrıca en iyileme (optimum) çalışmaları yürütülmüştür. En iyilenen yüzey hazırlık süreçleri sonrasında nitrokarbürizasyon işlemine ait süre ve sıcaklık parametreleri üzerinden 12 farklı alt proseste (Şekil 10) kapak numuneleri hazırlanmıştır. Son olarak ise nitrokarbürizasyon işlemi sonrası yüzey işlemleri uygulanarak homojen ve kararlı bir yüzey elde edilmesi amaçlanmıştır. Uygulanan prosesler kapsamında kullanılan numunelerin takibi için kapak parçalarına lazer markalama işlemi uygulanmıştır (Şekil 9). Kullanılan kapak numunelerine ait katı model görüntüleri Şekil 9’da verilmiştir. AISI 4140 kapak numuneleri için öngörülen yüzey işlem iş planı genel hatları ile Şekil 10’da verilmiştir.



Şekil 9. Kapak deney numunelerine ait katı model görüntüleri



Şekil 10. Kapak numunelerine uygulanacak prosesler ve proseslere ait operasyon şeması

2.2.1. Nitrokarbürizasyon İşlemi Öncesi Uygulanan Yüzey İşlemleri

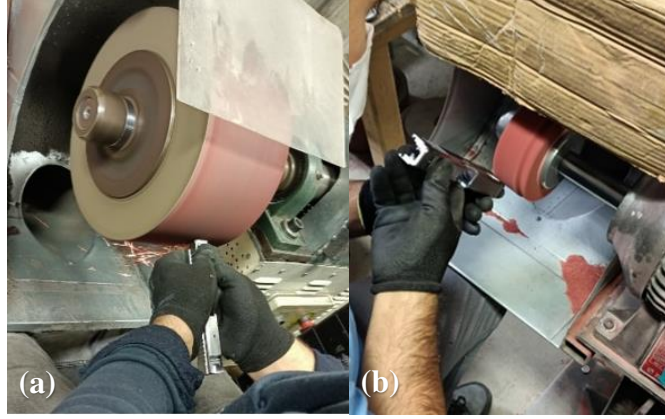
Talaşlı imalat sonrası kapak parçası numunelerine uygulanan yüzey hazırlık işlemleri ve operasyonları Şekil 10'da detaylı bir şekilde verilmiş ve bu kapsamdaki operasyon adımları aşağıda açıklanmıştır.

Taşılama İşlemi: Kapak numunelerine talaşlı imalat sonrası ilk operasyon olarak taşılama işlemi uygulanmıştır. Bu işlemde kapak numunelerinin üst ve yan yüzeyleri, Tablo 7'de verilen teknik verilere göre taşlanmıştır.

Tablo 7. Taşılama işlemine ait bazı teknik veriler

Taş Tipi	Radüs Taşılama Taşı	Düz Yüzey Taşılama Taşı
Taşın Ticari İsmi	OZT-AR60K5V	OZT-AR60K5V
Aşındırıcı Tipi	Pembe Alüminyum Oksit	Pembe Alüminyum Oksit
Kum Tane Boyutu (µm)	305-356	305-356
Taş Boyutları (mm)	300x20x76	300x30x76
Taşın Dönme Devri (dev/dak.)	1500	1500
Çevre Hızı (m/sn)	35	35
Bağlayıcı Tipi	Seramik	Seramik

Polisaj (Çapak Alma ve Parlatma) İşlemi: Çalışmalar boyunca kullanılan kapak numunelerine ait polisaj işlemi zımparalama, eğeleme ve ince zımparalama (skoç zımpara) işlemi gibi farklı uygulamalardan oluşmaktadır. Taşılama işlemi sonrasında taşılama işleminin uygulanmadığı yüzeylere çapak gidermek ve kesici takım izlerini yok etmek amacı ile 150-180 numaralı zımparalar ile manuel olarak (el ile) zımparalama işlemi (Şekil 11a) uygulanmıştır. Zımparalama işlemi tamamlandıktan sonra ise numune dış yüzeylerindeki zımpara izlerini gidermek ve parlatmak amacı ile ince zımparalama (skoç zımpara) işlemi (Şekil 11b) uygulanmıştır. Numunelere uygulanan polisaj işlemleri sonrasında göz kontrolü gerçekleştirilmiş ve istenmeyen yüzey kusurları kalması halinde numuneler aynı işlemlere tekrar tabi tutulmuştur.



Şekil 11. Kapak numunesine ait polisaj işlemleri: (a) Zımparalama ve (b) İnce zımparalama (Skoç zımparalama) işlemleri

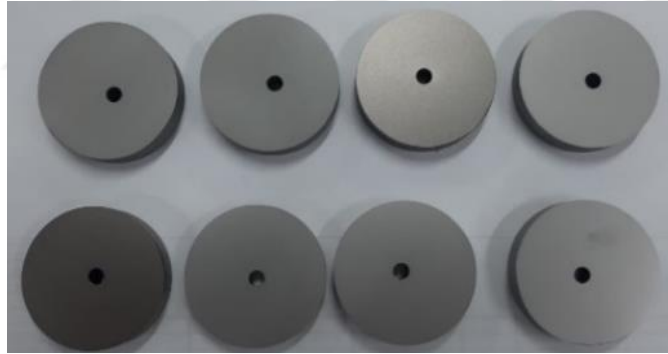
Silindirik AISI 4140 Numuneler Üzerinden Kumlama En İyilemesi (Optimizasyonu): Nitrokarbürizasyon işlemi öncesinde yer alan kumlama işlemi için de ayrı bir en iyileme (optimizasyon) çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda kapak numunelerine kumlama işlemi uygulanmadan önce silindirik AISI 4140 malzemedan, kumlama işlemi için özel numuneler hazırlanmıştır. Kapak numuneleri yerine bu numunelerin kullanılmasının sebebi proses kolaylığı, inceleme kolaylığı ve maliyet olarak gösterilebilmektedir. Silindirik AISI 4140 numunelere Tablo-8’de görülen farklı tip ve özellikte kumlama işlemleri uygulanmıştır (Şekil 12). Her proses için en az 2 adet AISI 4140 silindirik numune hazırlanmıştır (Şekil 12). Kullanılan kum türlerine ait teknik veriler Tablo 9’da ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Ayrıca 2 adet de kumlama işlemi uygulanmayan numune hazırlanarak da kumlama işlemi uygulanmayan numunelere ait veri sağlanması da amaçlanmıştır.

Tablo 8. Kumlama en iyilemesi sırasında kullanılan kum çeşitleri

Numune No	Kullanılan Kum Çeşidi (Bileşimi)
1	Alüminyum Oksit Kumu
2	
3	
4	Cam Küre Kumu
5	
6	Alüminyum Oksit Kumu + Cam Küre Kumu
7	
8	S70 Çelik Bilye (Otomatik Polisaj Sistemi ile)
9	
10	Kumlama işlemi uygulanmadı.

Tablo 9. Kumlama sırasında kullanılan kumlara ait teknik özellikler

CAM KÜRE		ALÜMİNYUM OKSİT KÜRE		S70 ÇELİK BİLYA	
Ürün Tipi	Cam Küre	Ürün Tipi	Alüminyum Oksit	Ürün Tipi	Çelik Bilya
Püskürtme	Enjektör ve Basınçlı Püskürtme	Püskürtme	Enjektör ve Basınçlı Püskürtme	Ürün Modeli	S70
Tane Boyutu (μm)	90-150	Tane Boyutu (μm)	120 (106-125)	Tane Boyutu (mm)	0,2-0,4
Özgül Ağırlık (g/cm^3)	2,5	Özgül Ağırlık (g/cm^3)	3,98	Özgül Ağırlık (g/cm^3)	7,8
Sertlik (HRC)	46	Sertlik (mohs)	9	Sertlik (HRC)	40-50
Erime Nok. ($^{\circ}\text{C}$)	730	Erime Nok. ($^{\circ}\text{C}$)	2040		
Kimyasal Kompozisyon	Yüzde (%)	Kimyasal Kompozisyon	Yüzde (%)	Kimyasal Kompozisyon	Yüzde (%)
SiO ₂	min. 65,0	Al ₂ O ₃	min. 99,60	C	0,8-1,2
Al ₂ O ₃	0,5-2,0	Fe ₂ O ₃	max. 0,045	Mn	0,35-1,2
Fe ₂ O ₃	max. 0,15	SiO ₂	max. 0,035	Si	max. 0,4
MgO	min. 2,5	TiO ₂	max. 0,008	S	max. 0,05
CaO	min. 8,0	CaO	max. 0,040	P	max. 0,05
Na ₂ O	min. 14,0	Na ₂ O	max. 0,290	Fe	Geriye kalan
Diğer	max. 2,0	-	-	-	-

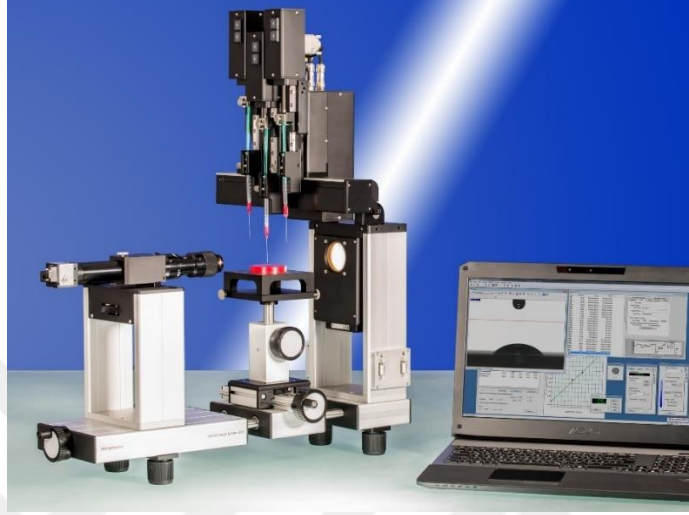


Şekil 12. Kumlamada kullanılan AISI 4140 silindirik parçalar

Kumlama işlemleri sonrasında nitrokarbürizasyon işlemi öncesinde silindirik numuneler için yüzey pürüzlülük ölçümleri ve Durağan Damla (Sessile Drop) yöntemi ile temas açısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Temas açısı ölçümleri Dataphysics markasının Oca 50 Micro modeli (Şekil 13) ile gerçekleştirilmiştir. Her numune için en az dört kez temas açısı ölçümü yapılarak ortalama değerlerin elde edilmesi amaçlanmıştır.

Kumlama işlemi sonrası temas açısı ölçümü yapılan numunelere daha sonra eşit şartlar altında tuz banyosunda nitrokarbürizasyon işlemi uygulanmıştır. Nitrokarbürizasyon işlemi uygulanan numuneler metalografik olarak incelenmiş ve beyaz

tabaka, gözenekli (poroz) tabaka ve difüzyon derinliği ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu alt en iyileme (optimizasyon) çalışması ile nitrokarbürizasyon işlemi öncesi kapak numunelerine uygulanacak en uygun kumlama işleminin belirlenmesi amaçlanmıştır.



Şekil 13. Temas açısı ölçüm cihazı (Dataphysics Oca 50 Micro)

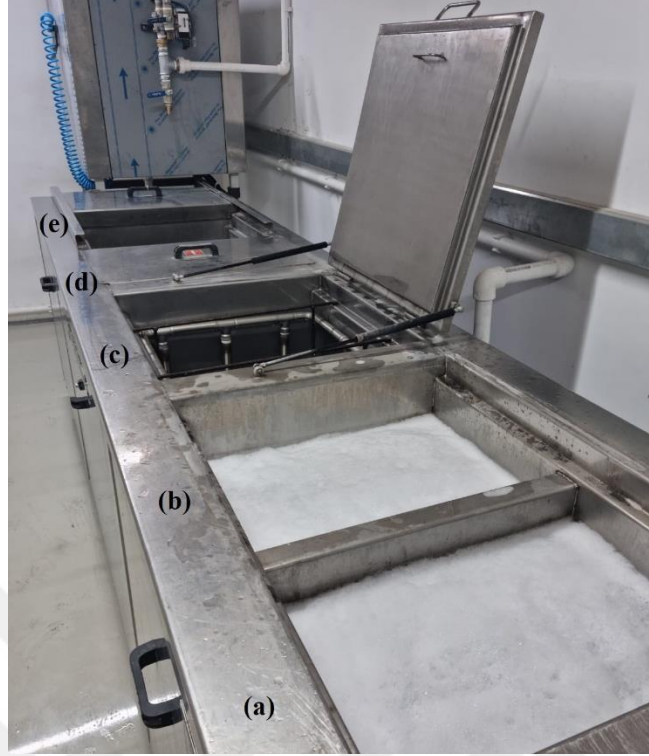
Ultrasonik Yıkama İşlemi En İyilemesi (Optimizasyonu): Nitrokarbürizasyon prosesi öncesi yüzeyin toz, kir ve kum partiküllerinden arındırılması hedeflenmiştir. Proses planında (Şekil 10) belirtildiği üzere ultrasonik yıkama işlemi için ayrıca deneysel çalışmalar yapılarak birçok farklı kimyasaldan oluşan banyolar hazırlanmıştır. Farklı yıkama işlemleri ile en temiz yüzeyi veren yıkama parametreleri elde edilmeye çalışılmıştır. Ultrasonik olarak yıkanan parçalar stereo mikroskobunda detaylı bir şekilde incelenerek yüzeyde temizlenmesi zor nokta ve bölgelerin yıkama öncesi ve sonrası durumları incelenmiştir. AISI 4140 deney numunelerinin daha homojen bir nitrokarbürizasyon işlemine tabi tutulabilmesi için ultrasonik yıkama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu ünite ultrasonik yıkama banyosu, durulama banyosu, korozyon koruyucu özellikte sıvı banyosu, bekleme bölgesi ve kurutma bölgesinden oluşmaktadır. 4 farklı kimyasal içerik ile gerçekleştirilen ultrasonik yıkama çalışmaları sonucunda en iyi yüzey şartlarını sağlayan işlemi belirleyebilmek adına “Ultrasonik Yıkama İşlemi En İyilemesi” çalışması da alt bir çalışma olarak bu tez kapsamında yürütülmüştür.

Yıkama işlemi Tablo 10’da görülen farklı içeriğe sahip banyolar ve işlem adımlarına göre sırası ile gerçekleştirilmiştir. İşlemlerde kullanılan malzeme, kimyasal ve bunlara bağlı sıcaklık-süre gibi teknik verilerde yine Tablo 10’da görülmektedir. Ultrasonik yıkama

optimizasyonu çalışmasında deney numunesi olarak farklı kapak parçaları kullanılmıştır. Ultrasonik yıkama işleminde parça geometrisinin yıkama kalitesine doğrudan etki etmesinden dolayı basit geometriye sahip numuneler tercih edilmemiştir. Ultrasonik yıkama işleminde numune olarak kullanılan AISI 4140 kapak parçaları özel olarak tasarlanan aparat yardımı ile ultrasonik yıkama banyosuna (Şekil 14a) yerleştirilmiş ve Tablo 10'da belirtilen banyo içeriklerine göre yıkama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Yıkama işlemlerinden sonra yüzeyde kalan kimyasal birikintilerin arındırılması için durulama (Şekil 14c) ve sonrasında yüzeye belirli bir süre korozyon dayanımı sağlamak için korozyondan koruyucu sıvıdan oluşan banyoya daldırma işlemleri (Şekil 14b), tüm proseslere Tablo 10'da yer alan parametrelere göre sırası ile uygulanmıştır. Son olarak ise numunelerin hızlı bir şekilde kuruması için 25°C'deki kurutma tankında (Şekil 14e) hava ile kurutulmuştur.

Tablo 10. Ultrasonik yıkama işlemleri ve parametreleri

İşlem	Ultrasonik Yıkama	Durulama	Korozyon Koruyucu	Kurutma
İçerik-1	1 Litre Beku Multi+ Su	Su	İnhibitör 1687	Hava
Sıcaklık (°C)	55	25	25	25
Süre (dk)	15	1	1	5
İçerik-2	1 Litre Brla-04 + Su	Su	İnhibitör 1687	Hava
Sıcaklık (°C)	55	25	25	25
Süre (dk)	15	1	1	5
İçerik-3	3 Litre Brla-04 + 1 Litre Beku + Su	Su	İnhibitör 1687	Hava
Sıcaklık (°C)	55	25	25	25
Süre (dk)	15	1	1	5
İçerik-4	3 Litre Brla-04 + 1 Litre Beku Multi+ Su	Su	İnhibitör 1687	Hava
Sıcaklık (°C)	55	25	25	25
Süre (dk)	15	1	1	5



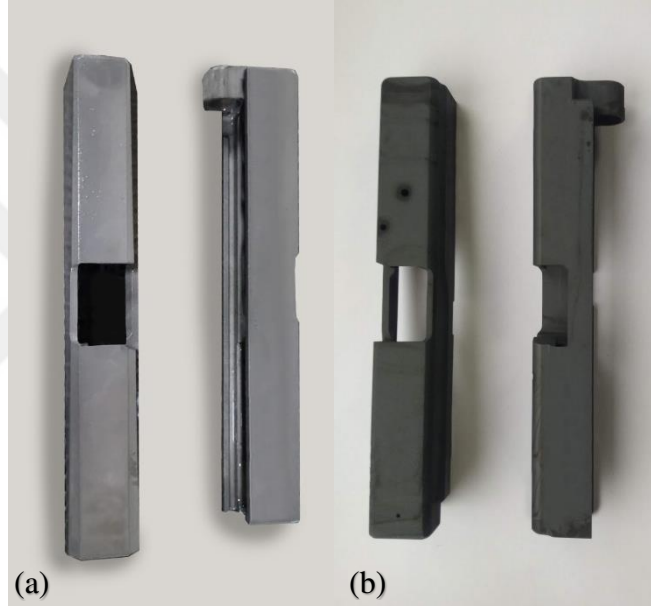
Şekil 14 . Ultrasonik yıkama ünitesi bölümleri: (a) Ultrasonik yıkama ünitesi, (b) Korozyondan koruyucu sıvıya daldırma (c) Durulama ünitesi, (d) Bekleme ünitesi ve (e) Kurutma ünitesi

Kapak Numunelerine En İyilenen Kumlama ve Ultrasonik Yıkama İşlemlerinin Uygulanması: AISI 4140 silindirik malzemeler ile gerçekleştirilen kumlama en iyileme (optimizasyon) çalışması ve farklı kapak parçaları ile gerçekleştirilen ultrasonik yıkama en iyileme çalışmaları sonrasında en iyilenen prosesler kapak numunelerine uygulanmıştır.

2.2.2. Nitrokarbürizasyon İşlemi

Nitrokarbürizasyon işlemi öncesi en iyilenen yüzey hazırlık işlemleri ile hazırlanan kapak numunelerine nitrokarbürizasyon işlemi uygulanmadan önce 350°C'de 30 dakika ön ısıtma işlemi uygulanmıştır. Bu işlemin temel sebebi soğuk malzeme girdisinin bir anda fırın sıcaklığının kontrolsüz düşmesine sebep olmasıdır. Ön ısıtma işlemi uygulanan numuneler daha sonra Şekil 10'da verilen proses planındaki gibi 4 farklı sıcaklık (560°C, 570°C, 580°C ve 590°C) ve 3 farklı süre (45, 60, 90 dk) kombinasyonundan oluşan 12 farklı nitrokarbürizasyon işlemine ve hemen ardından ise oksidasyon işlemine (430-450°C ve 10-20 dk) tabi tutulmuştur.

Nitrokarbürizasyon işlemi uygulanan kapak deney numuneleri Şekil 15a'da, hemen sonrasında oksidasyon işlemi uygulanan kapak deney numunelerine ait görseller ise Şekil 15b'de görülmektedir. Nitrokarbürizasyon ve oksidasyon işlemleri sonrasında Şekil 15b'de görüldüğü üzere yüzeydeki makro dalgalanmalar ve homojen olmayan yapı açık bir şekilde görülebilmektedir. Bu sebeple ikinci kumlama ve ikinci oksidasyon işlemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. İkinci kumlama işlemi ile yüzeyin tekrar homojen hale getirilmesi hedeflenmektedir. Daha sonra ise estetik görünüş ve korozyon dayanımı için ikinci oksidasyon işlemi uygulanarak daha kararlı bir yüzey elde edilmesi hedeflenmiştir.



Şekil 15. Bazı kapak numuneleri: (a) Nitrokarbürizasyon işlemi sonrası ve (b) Oksidasyon işlemi sonrası

2.2.3. Nitrokarbürizasyon İşlemi Sonrası Yüzey İşlemleri

İkinci Kumlama İşlemi: Nitrokarbürizasyon ve oksidasyon işlemleri sonrasında daha kararlı bir yüzey elde edebilmek için numune yüzeyleri S70 çelik bilye ile ikinci kez kumlanmıştır. Bu işlem bir önceki kumlama işleminden farklı olarak daha düşük devir ve daha kısa sürede (2250 d/dk'da 3 dakika boyunca) gerçekleştirilmiştir.

İkinci Oksidasyon İşlemi: Numuneler ikinci kez kumlandığında yüzeydeki koruyucu oksit tabakası nispeten kalktığından malzemeye tekrar oksidasyon işlem uygulanması gerekmektedir. Bu sebeple numunelere yine aynı şartlar (430-450°C ve 10-20 dk) altında

ikinci kez oksidasyon işlemi uygulanmıştır. İşlem sonrası numune görselleri Şekil 16’da yer almaktadır.



Şekil 16. İkinci kumlama ve ikinci oksidasyon işlemleri sonrası kapak numuneleri

Yağ Banyosuna Daldırma Operasyonu: İkinci oksidasyon işleminden sonra AISI 4140 kalite malzemelerden hazırlanan kapak numunelerine son işlem olarak koruyucu yağ banyosuna daldırma işlemi uygulanmıştır. Bu işlemin amacı, hem daha estetik bir görünüş elde etmek ve hem de parçaların korozyon dayanımını arttırmaktır. Bu amaçla kullanılan banyo derişimi Tablo 11’de yer almaktadır. Yağlama işlemi öncesi numuneler üzerinde yer alan izler büyük oranda kaybolmuş ve daha parlak bir görünüm elde edilmiştir (Şekil 17).

Tablo 11. Koruyucu yağ banyosu derişimi

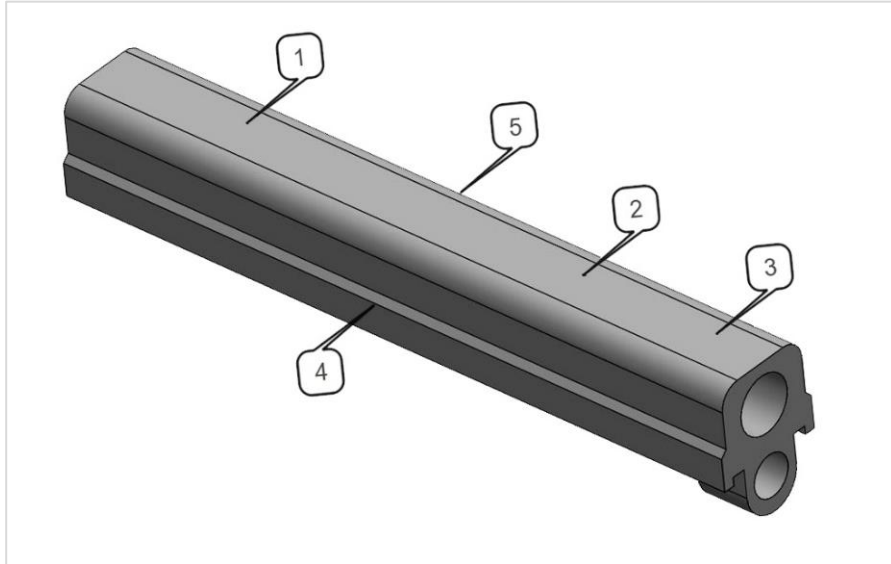
Banyo Yüzdesi	
Koruyucu Yağ	Su
%17	%83



Şekil 17. Koruyucu yağ banyosu daldırılmış kapak numuneleri

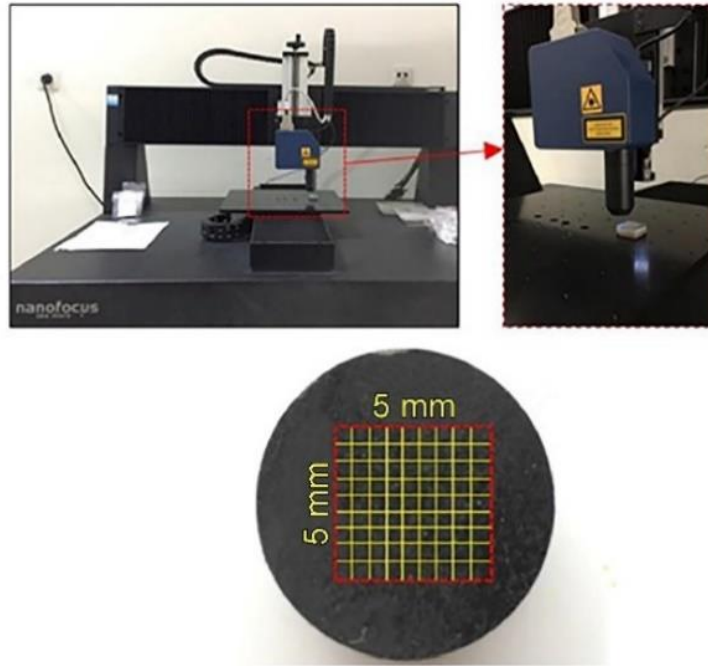
2.3. Pürüzlülük ve Yüzey Topografyası İncelemeleri

İncelenen her bir numune için her operasyon sonrası 5 farklı bölgeden (Şekil 18) yüzey pürüzlülük (R_a ve R_z) ölçümü yapılmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümleri Mahr PS-10 Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Cihazı ile aynı kalibrasyon şartlarında, aynı ortamda ve sabit bir düzencek yardımıyla yapılmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümleri her bir numune için aynı ölçüm noktası ve ölçüm yönü kullanılarak kayıt altına alınmıştır. Şekil 18’de kapak numunelerinde yüzey pürüzlülük ölçümlerinin gerçekleştirildiği bölgeler belirtilmiştir.



Şekil 18. Kapak numunelerindeki yüzey pürüzlülük ölçüm bölgeleri

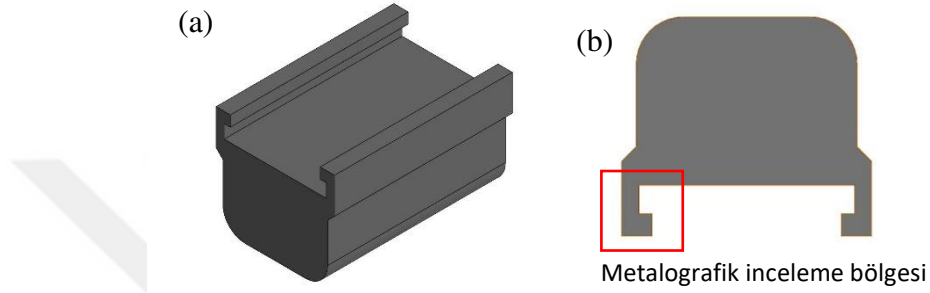
Proses planındaki (Şekil 10) tüm süreçleri tamamlanan numunelerin yüzey morfolojik durumları NANOFOCUS marka 3D optik profilometre (Şekil 19) kullanılarak incelenmiştir. Tüm kapak numuneleri için 10x10x5 boyutlarında numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler üzerinden 5x5 mm²'lik bir alan üzerinde 10 µm'lik çözünürlükte tarama işlemi gerçekleştirilmiştir. Tarama işlemi sonrasında yüzeye ait iki boyutlu topografik görüntüler elde edilmiştir. Elde edilen görüntüler üzerinden hem x hem de y ekseninde olmak üzere her bir numune için en az 15 yüzey pürüzlülüğü ölçümü gerçekleştirilmiştir.



Şekil 19. 3D optik profilometre cihazı

2.4. Numune Hazırlama Süreci

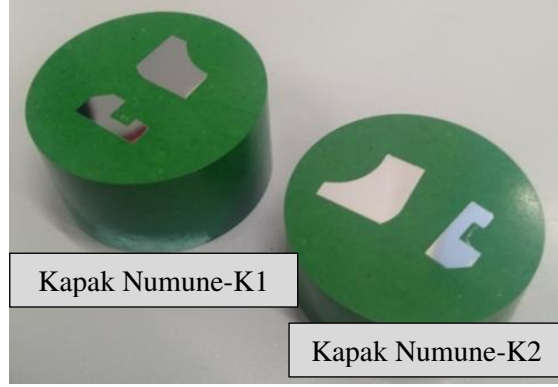
Proses planında (Şekil 10) yer alan operasyonlar tamamlandıktan sonra kapak parçalarından alınan numuneler aşağıda bahsedilen yöntem ve süreçleri izledikten sonra metalografik olarak incelenmiştir. Şekil 20a ve Şekil 20b’de görülen kapak parçası kesitinde kırmızı ile belirtilen bölgelerden numune alma işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 20. (a) Kapak parçasından alınan kesit örneği ve (b) Metalografik inceleme için belirlenen bölge

Metalografik olarak numuneleri incelemek için; sırası ile numune kesme, bakalite alma, zımparalama, parlatma ve dağlama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Metalografik numune kesme işlemi kesilecek parçanın cihaz mengenesine düz ve sıkı bir şekilde bağlanması ardından soğutucu ve yağlayıcı sıvının kesme bölgesinin yönlendirilmesi ile minimum kesme hızında gerçekleştirilmiştir.

Bakalite alma işlemi için ise kesilen numunelerin bakalite sağlıklı bir şekilde yapışabilmesi için numuneler alkol ile temizlenmiştir. Parçanın kesilen yüzeyi bakalit cihazının alt zımbasına yerleştirilmiş, parça boyutu ve hacmine göre uygun bakalit tozu miktarı belirlenmiştir. Belirlenen bakalit tozu üst zımbaya yerleştirilerek uygun sıcaklık ve basınç ayarlanarak bakalite alma işlemine başlanmıştır. Yaklaşık 5 dakika boyunca sıcaklık ve basınca maruz kalan numuneler soğuma gerçekleştikten sonra bakalit cihazından alınmıştır. Ayrıca inceleme kolaylığı sağlamak için incelenecek parçanın etrafına alüminyum folyo sarılmıştır. Bu kapsamda çalışma boyunca farklı proseslerde birçok numune kalıplama işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 21).



Şekil 21. Bakalite alınan numune örnekleri

Zımparalama ve parlatma işlemi P80 ve P1200 sınıfı (FEPA sınıflamasına göre) arasında en az üç farklı boyutta zımpara ile yapılmıştır. Dört aşamadan oluşan zımparalama ve parlatma işlemi aşağıda verilmiştir:

1. 180-320 nolu zımpara ile 3 dk-20 N basınç altında zımparalama,
2. 800-1000 nolu zımpara ile 5 dk-25 N basınç altında zımparalama,
3. 6 µm elmas suyu ile parlatma çuhası kullanılarak 20 N basınç altında 3 dakika parlatma,
4. 1 µm elmas suyu ile parlatma çuhası kullanılarak 20 N basınç altında 5 dakika parlatma şeklinde gerçekleştirilmiştir.

Her zımparalama işleminden sonra, numune şebeke suyu ile yıkanmıştır. Malzemenin mikro yapısını parlatma işlemi sonrasında mikroskopta görünür hale getirmek amacıyla dağlama işlemi yapılmıştır. Dağlama işlemi genel olarak malzeme yüzeyinin kimyasal maddelerle reaksiyona sokulması şeklinde yapılır. Bu çalışmada çelik numune yüzeylerinde dağlama ayırıcı olarak %2 Nital çözeltisi kullanılmıştır.

2.5. Sertlik İncelemeleri

Deney numunelerinin sertlik deneyleri Vickers sertlik ölçüm yöntemi kullanılarak Metkon marka (MH-3) mikrosertlik cihazında gerçekleştirilmiştir. Bunun için batıcı ucun basma yükü 0,1 kg ve yük altında bekleme süresi ise 10 s seçilmiştir. Numunelerin işlem bölgelerinin sertlik taramaları yüzeyden 0,25 mm aşağıdan başlanarak üstten aşağı doğru ve ilerleme tarafından gerileme tarafına doğru 0,25-0,50 mm'lik periyodik aralıklarla gerçekleştirilmiş ve bu bölgelerin sertlik haritaları çıkarılmıştır. Sertlik incelemeleri çalışma da yer alan tüm numuneler için en az 3 kez olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

2.6. Mikroyapısal İncelemeler

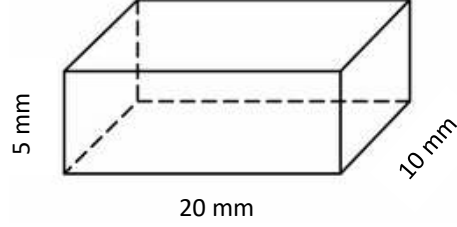
Numune hazırlama süreçlerinden geçen tüm numuneler içyapı incelemesi için hazır hale gelmiştir. Olympus GX53 Metal Mikroskop ile mikroyapısal incelemeler yapılarak görüntüler kaydedilmiştir. Mikroyapısal incelemeler kapsamında tabaka kalınlıkları ve difüzyon derinliği gibi veriler incelenmiştir.

500X büyütme kullanarak tabakada, alüminyum folyonun numuneye iyi yapışmadığı alanları dikkate almayarak, çatlaklardan ve dökülmeden arınmış alanlar aranmıştır. Daha sonra ise bileşik bölgenin üst ve alt bölge sınırlarından geçen çizgiler çekilmiş ve bu iki yatay çizgi arasındaki mesafeler ölçülerek bileşik tabaka kalınlığı, buna bağlı olarak da beyaz tabaka ve poroz (gözenekli) tabaka kalınlıkları belirlenmiştir. 100X büyütmede ise daha önce gerçekleştirilen mikrosertlik değerleri üzerinden difüzyon derinlikleri belirlenmiştir.

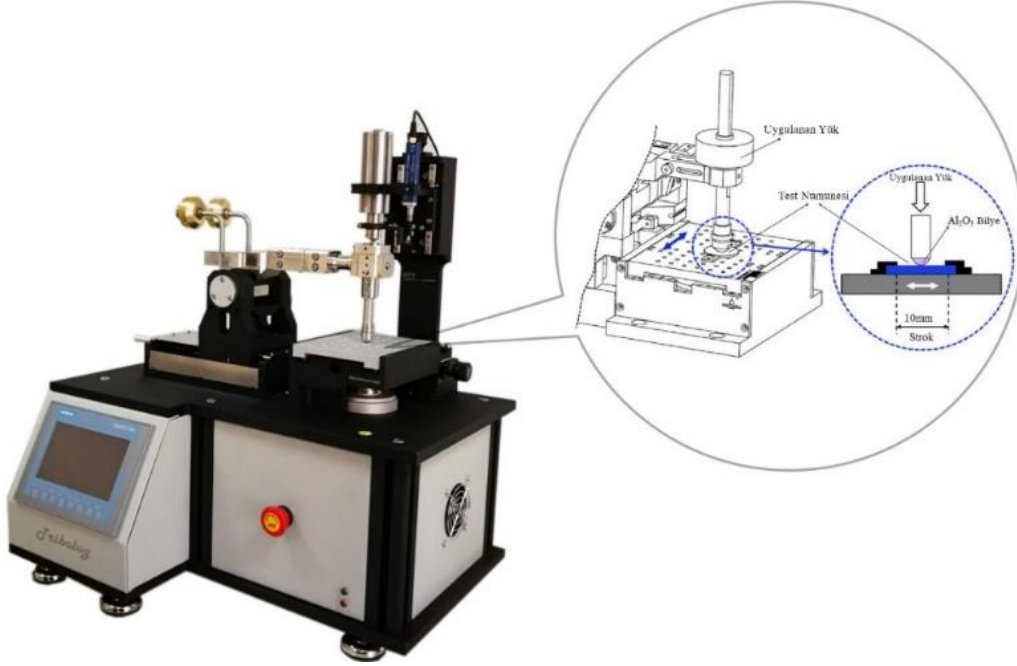
2.7. Sürtünme ve Aşınma Testleri

Farklı nitrokarbürizasyon proseslerine tabi tutulmuş AISI 4140 çeliklerin sürtünme ve aşınma davranışlarında meydana gelen değişimlerin incelemesi için farklı sıcaklık ve süre parametreleri ile hazırlanan, farklı tabaka kalınlıkları ve difüzyon derinliklerine sahip 3 farklı kapak parçasından 20mmx10mmx5mm boyutlarında numuneler hazırlanmıştır (Şekil 22). Sürtünme ve aşınma testleri, ASTM G133 standardına göre disk üzerinde bilye temas konfigürasyonuna sahip çok fonksiyonlu bir tribometre (UTS TRIBOLOG) ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 23). Testler için yük koluna 6 mm çapında 2500 HV sertlikte Al_2O_3 bilye sabitlenerek numuneye dik olacak şekilde yerleştirilmiştir. Al_2O_3 bilyesi, AISI 4140 numunelerine kıyasla daha yüksek sertliği, elastik modülü ve aşınma direnci nedeniyle karşı tarafın aşınmış yüzeylere aşırı yapışmasını kısıtlamak için özel olarak bir karşı yüzey olarak seçilmiştir. Her test kuru durumda laboratuvar ortamında yaklaşık 25°C sıcaklıkta ve yaklaşık %75 bağıl nemde gerçekleştirilmiştir. Tüm sürtünme ve aşınma testleri için strok uzunluğu, frekansı ve ortalama hızı sırasıyla 10 mm, 3 Hz ve 0,06 m/s olarak seçilmiştir. Testler, 100 m'lik bir kayma mesafesine karşılık gelen 5.000 devire kadar gerçekleştirilmiştir. Testler sırasında numunelere sabit 10 N yük uygulanmıştır. Testler sırasında bilye ile numuneler arasındaki sürtünme katsayısı da ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Aşınmış yüzeylerin morfolojik özelliklerini netleştirmek için aşınmış

numunelerin 2B ve 3B yüzey topografyası da optik profilometre (Nanofokus 3B yüzey profilometre) kullanılarak analiz edilmiş ve aşınma derinlikleri de grafikler ile kaydedilmiştir.



Şekil 22. Sürtünme ve aşınma testi için hazırlanan deney numunesine ait şematik görünüm



Şekil 23. Mevcut çalışmada kullanılan disk üzerinde bilye temas konfigürasyonuna sahip sürtünme ve aşınma test donanımı (UTS TRIBOLOG)

3. BULGULAR VE İRDELEME

3.1. Nitrokarbürizasyon İşlemi Öncesi En İyileme İşlemleri

Nitrokarbürizasyon işlemi öncesi uygulanan kumlama ve ultrasonik yıkama yüzey işlemleri bu tez kapsamında ayrı birer en iyileme çalışması olarak yürütülmüştür. Bu çalışmalar sonucunda kapak numunelerine uygulanacak en iyilenen kumlama işlemi ve kumlama işlemi sonrasında en iyilenen ultrasonik yıkama işlemi belirlenmiştir.

3.1.1. Kumlama En İyileme İşlemi (Silindirik Numune ile)

Nitrokarbürizasyon işlemi öncesinde ilk en iyilenen yüzey hazırlık işlemi kumlama işlemidir. Bu kapsamda gerçekleştirilen yüzey pürüzlülük ölçümleri ve ortalama değerleri Tablo 12’de verilmiştir. Bu tablo incelendiğinde, kumlanan numuneler arasında en düşük yüzey pürüzlülük değeri cam küre kumu ile kumlanan numunelerde (Proses-2) görülmüştür. Daha sonra sırası ile en düşük yüzey pürüzlülük değeri S70 çelik bilye (Proses-3) ve alümina bilyeler (Proses-1) ile kumlanan numunelerde elde edilmiştir. Numunelere uygulanan farklı kumlama işlemlerinin yüzeyde farklı pürüzlülük değerleri oluşturmasının temel sebebi kullanılan kum çeşitlerinin birbirinden farklı mekanik ve kimyasal özelliklere (Tablo 9) sahip olmasıdır. Cam küre kumu diğer kum çeşitlerine göre nispeten daha düşük tane boyutuna, sertliğe ve özgül ağırlığa sahip olduğundan dolayı uygulandığı numune yüzeyine diğer numunelere nispeten daha az etki etmekte ve bu sebeple de numune yüzeyinde daha düşük pürüzlülük oluşturmaktadır. Diğer kum çeşitleri (alümina bilye ve S70 çelik bilye) ise daha yüksek özgül ağırlığa, daha büyük tane boyutuna ve daha yüksek sertliğe sahip olduğundan yüzeye çarptıklarındaki etkileri daha fazla olmakta ve daha yüksek pürüzlülük değerleri oluşturmaktadırlar. Kumlama işlemlerinde kumun mekanik ve kimyasal özellikleri haricinde uygulanış şeklinin de (el ile ya da otomatik/otomasyon sistem) püskürtme basıncı ve püskürtme mesafesi gibi farklılıklar oluşturacağından numune yüzeylerindeki pürüzlülük miktarları ve dağılımları farklılık gösterebilmektedir.

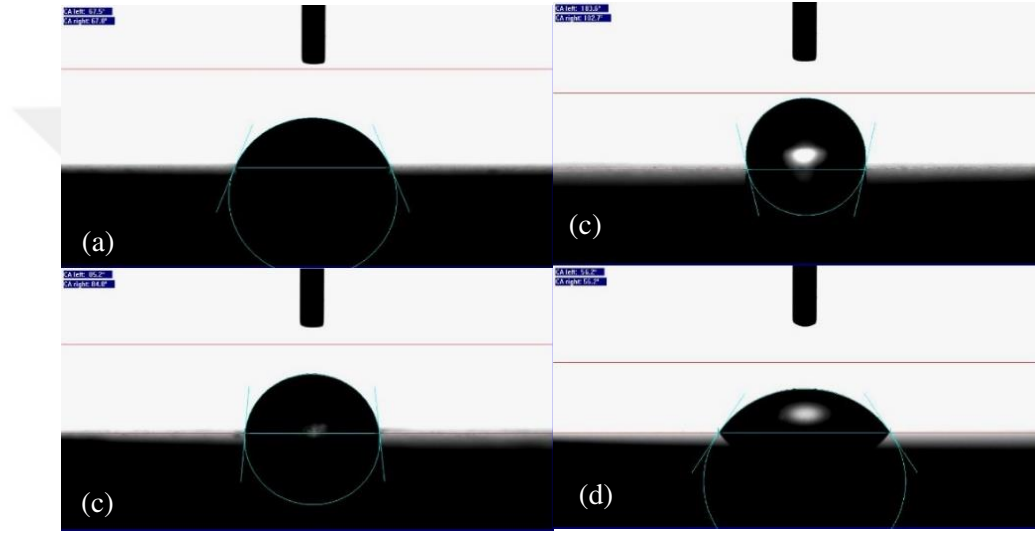
Tablo 12. Kumlama işlemi uygulanan numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri

Proses/Kum Türü	Ra-1	Ra-2	Ra-3	Ra-Ort.	Rz-1	Rz-2	Rz-3	Rz-Ort.
Proses-1/Alüminyum Oksit	1,256	1,272	1,258	1,262	10,220	10,395	10,790	10,468
Proses-2/Cam Küre	1,009	1,118	1,062	1,063	6,907	7,335	6,312	6,581
Proses-3/S70 Çelik Bilye	1,207	1,139	1,101	1,149	8,055	7,951	7,375	7,794
Proses-4/Kumlanmamış	0,405	0,401	0,411	0,404	3,649	3,600	3,580	3,609

Kumlama işlemleri sonrasında ayrıca tüm numuneler için temas açısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 24’de ise temas açısı ölçümlerine ilişkin bazı örnek ölçüm sonuçları ve damla görselleri verilmiştir. En yüksek temas açısı S70 çelik bilye ile kumlanan numunelerde (Proses-3) (Şekil 24c) elde edilmiştir (Tablo 13). Dolayısıyla S70 çelik bilye ile kumlanan numunelerin en düşük ıslanabilirlik ve yüzey gerilimine sahip oldukları söylenebilir [77, 78]. Numunelerde en düşük temas açısı ise kumlama işlemi uygulanmayan (Proses-4) numunelerde elde edilmiştir (Tablo 13). Kumlama işlemi uygulanan numuneler arasında ise en düşük temas açısı alümina bilyeler ile kumlanan numunelerde (Proses-1) (Şekil 24a) görülmüştür. Düşük temas açısına sahip numunelerin de nispeten daha yüksek ıslanabilirlik ve yüzey gerilimine sahip oldukları söylenebilir [77, 78]. Nitekim, en düşük temas açısının kumlama işlemi uygulanmamış numunelerde (Proses-4) görülmesi, metal yüzeyinin oldukça yüksek ıslanabilirlik ve yüzey gerilimine (~1880 mN/m) sahip olmasından kaynaklanmaktadır [77, 78, 79]. Ayrıca yüzeyi zımparalanmış ve parlatılmış numunelerin düşük pürüzlülüğe sahip olması (0.4 Ra), yüzeye herhangi bir kumlama işlemi uygulanmadığı için yüzey sertliğinin daha düşük olması ve yüzeyin tamamen homojen olmasının da etkisinin olduğu söylenebilir. Metal malzeme (AISI 4140) üzerine yapılan kumlama işlemlerinin belirli oranlarda metalin yüzey gerilimini ve ıslanabilirliğini düşürdüğünü ve buna bağlı olarak da temas açısında artışa sebep oldukları söylenebilir. Kullanılan kum türleri ile farklı temas açısı değerleri elde edilmesi, kumlarının hem mekanik hem de kimyasal özelliklerinin tamamen birbirinden farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Nitekim herhangi bir mekanik veya kimyasal özelliğin (sertlik, özgül ağırlık, pürüzlülük, kum kimyası vs.) temas açısı değişimine doğrudan etkisi ile ilgili kesin çıkarımlar yapılamamaktadır.

Tablo 13. Kumlama işlemi uygulanan numunelerin temas açısı değerleri

Proses/Kum Türü	TA-1 (°)	TA-2 (°)	TA-3 (°)	TA-4 (°)	Ortalama (°)
Proses-1/Alüminyum Oksit	64,72	64,25	64,15	68,21	65,33
Proses-2/Cam Küre	78,17	76,30	78,30	80,10	78,21
Proses-3/S70 Çelik Bilye	102,91	104,23	94,05	99,01	100,04
Proses-4/Kumlama Uygulanmamış	62,10	60,65	58,85	62,10	60,91



Şekil 24. Temas açısı ölçüm görüntüleri: (a) Proses-1 (Numune-1), (b) Proses-2 (Numune-3), (c) Proses-3 (Numune-5), (d) Proses-4 (Numune-7)

Kumlama işleminin en iyilemesi sırasında uygulanan farklı kumlama işlemleri ile hazırlanan numuneler eşit şartlar altında nitrokarbürizasyon işlemine (560°-50dk) tabi tutulmuştur. Bu numunelere ait difüzyon derinliği ve beyaz tabaka kalınlığı ölçümleri Tablo 14’de verilmiştir. En yüksek difüzyon derinliği cam küre kumu ile kumlanan numunelerde (Proses-2) ve kumlama işlemi uygulanmayan (Proses-4) numunelerde 140-150 μm mertebelerinde elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü nispeten daha yüksek olan Proses-1 ve Proses-3 (alümina bilye ve S70 çelik bilye ile kumlanan) numunelerinde ise daha düşük difüzyon derinliğinin (120-130 μm) elde edildiği görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğü düşük olan numunelerde difüzyon derinliğinin daha fazla olduğu görülmektedir. Tablo 13 ve Tablo 14 de yer alan temas açısı ve difüzyon derinliği değerleri incelendiğinde, en düşük temas açısına sahip prosesin (Proses-4) en yüksek difüzyon derinliğine, en yüksek temas açısına sahip prosesin (Proses-3) ise en düşük difüzyon derinliğine sahip olduğu görülmektedir.

Nitekim, temas açısı düştükçe ıslanabilirlik kabiliyetini arttığı bilinmektedir [77, 78]. Difüzyon mekanizması da ıslanabilirlik gibi kütle transferine dayanan bir mekanizma olduğundan ıslanabilirlik kabiliyetinin (düşük temas açısı) difüzyona olumlu etki ettiği söylenebilir. Difüzyon, sıcaklık yükseldikçe atomların ısıl titreşimlerinin artması ve bir kısmının içinde bulunduğu yapıda bir konumdan diğer konuma atlayarak yer değiştirmesi ile gerçekleştirilmektedir. Atomsal yayılım veya difüzyon denen bu olayda önce atomun çevresi ile bağları kopar, sonra atomlar arası boşluklardan geçer ve yeni konumunda tekrar çevresi ile bağ kurar. Nitekim, yüzey pürüzlülüğü ve temas açısı değerleri düştükçe difüzyon miktarının artması, atomsal yayılımının sağlanabilmesinin ve buna bağlı olarak da difüzyon mekanizmasının ilerleyebilmesinin altlık malzemenin yüzey kalitesi ile de ilişkili olmasıyla açıklanabilir [15]. Fakat alümina bilyeler ile hazırlanan numuneler en yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip olmasına rağmen en yüksek difüzyon derinliğine sahip olmadıkları görülmektedir. Nitekim bu durum difüzyon mekanizmasının sadece yüzey pürüzlülüğüne bağlı olmayıp yüzeydeki göç edecek türlerin atomik yoğunluğundan, yüzey reaksiyonlarından, yüzeyde bulunan elementlerden ve tane yapısından etkilenmesi ile açıklanmaktadır [5, 15]. Alümina bilye ile kumlanan numunelerin yüksek pürüzlülüğe sahip olmasına rağmen kumlanan numuneler arasında en düşük temas açısına sahip olması da bu durumu desteklemektedir.

Bir diğer kriter olan beyaz tabaka kalınlığı ise en yüksek 5-6 μm mertebelerinde cam küre kumu ile kumlanan deney numunelerinde (Proses-2) görülmüştür. En düşük yüzey pürüzlülüğüne (0,4 Ra) sahip numunelerde (Proses-4) en ince beyaz tabaka kalınlığının (2-3 μm) olduğu, kumlanmış ve belirli bir yüzey pürüzlülüğüne sahip diğer tüm numunelerde ise daha kalın beyaz tabaka kalınlığı (4-6 μm) elde edildiği görülmektedir. Nitekim, bu durumlar ve Tablo 14'de yer alan beyaz tabaka kalınlığı değerleri incelendiğinde, yeterli beyaz tabaka oluşumu için belirli bir seviyede yüzey pürüzlülüğüne ihtiyaç olduğu söylenebilir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü dağılımının nispeten daha homojen olduğu numunelerde (yani S70 çelik bilye ile kumlanan numunelerde) (Proses-3) beyaz tabaka kalınlığının da diğer numunelere göre nispeten daha homojen elde edildiği de görülmektedir. S70 çelik bilye ile kumlama işlemi parça bütününde homojen bir kumlama sağlamanın yanında, seri üretimde tekrarlanabilirlik sağlayarak her parça için aynı kalitede gerçekleşmektedir. Nitekim bu durumlar, S70 çelik bilyenin otomasyon sistemi ile parçaların her bir yüzeyine aynı basınç, püskürtme mesafesi, açı ve süre ile homojen bir şekilde operatör etkilerine maruz kalmadan püskürtülmesinden kaynaklanmaktadır.

Tablo 14. Kumlama işlemi optimizasyonu için hazırlanan silindirik numunelerin nitrokarbürizasyon işlemi sonrası difüzyon derinliği ve beyaz tabaka kalınlıkları

Numune	Uyg. Kumlama İşlemi	Difüzyon Der. (μm)	Beyaz Tabaka Kalınlığı (μm)		
			Max.	Min.	Ort.
N-1	Alüminyum Oksit	129,78	4,48	3,6	4,04
N-2	Alüminyum Oksit	135,61	4,11	3,74	3,92
N-3	Cam Küre	140,85	4,72	4,05	4,38
N-4	Cam Küre	137,78	6,1	5,48	5,79
N-7	S70 Çelik Bilya	122,77	4,4	4,19	4,30
N-8	S70 Çelik Bilya	120,8	5,11	4,1	4,61
N-9	Kumlama Uygulanmadı	137,8	2,66	2,19	2,43
N-10	Kumlama Uygulanmadı	143,97	3,55	2,6	3,10

Kumlama işleminin en iyilemesi (optimizasyonu) amacı ile 3 farklı kum ve 2 farklı tür kumlama tipi (manuel ve otomatik/otomasyon) kullanılmıştır. Kumlama işlemleri sonrasında yüzey pürüzlülüğü, temas açısı ölçümü ve nitrokarbürizasyon sonrası mikroyapı incelemeleri ile birlikte birçok veri elde edilmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde S70 çelik bilye kumunun kabul edilebilir seviyede yüzey pürüzlülüğü oluşturduğu ve temas açısının diğer kumlara nispeten düşük olduğu fakat difüzyon derinliği ve beyaz tabaka kalınlığı değerlerinin yeterli seviyede olduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca otomatik kumlama sisteminin (S70 çelik bilye kumunun kullanıldığı sistem) el ile kumlama tezgahlarına kıyasla numunelerde daha homojen bir yüzey ve daha kararlı bir renk oluşturmasının yanında seri üretim de aynı kararlılığı sağladığı görülmüştür. Ek olarak, daha az insan gücü ile daha fazla iş çıkarması da el ile kumlamaya göre büyük bir avantaj oluşturmakta ve seri üretimde süre kaybını azaltarak verim artışı sağlamaktadır. Elde edilen bu veriler eşliğinde kapak parçasına ait kumlama işlemlerinde otomasyon sistemi ile S70 çelik bilye kumlama prosesinin kullanılmasına karar verilmiştir.

3.1.2. Ultrasonik Yıkama En İyileme İşlemi

Tablo 10'da yer alan farklı ultrasonik banyo içerikleri ile yıkanan kapak numuneleri göz kontrolünden geçtikten sonra Stereo Mikroskobu altında incelenmiştir. İçerik-1, içerik-2 ve içerik-3'den oluşan banyolar ile yıkanan numunelerde kısmi kirlilik ve kısa sürede korozyon başlangıçları görülmüştür (Şekil 25). Kapak numunelerinde oluşan korozyonlar hem göz kontrolü hem de Stereo Mikroskop incelemeleri (Şekil 25) sonucunda

belirlenmiştir. İçerik-4 ile hazırlanan banyoda yıkanan numunelerin yüzeylerinin oldukça temiz olduğu ve 12 saatin üzerinde korozyon dayanımı sağladığı görülmüştür. Bu sebeple içerik-4 ile hazırlanan banyo, ultrasonik yıkama en iyileme çalışması sonrasında en efektif yıkama işlemi olarak belirlenmiş ve tez kapsamında kullanılan 12 adet numune kapak parçasının da içerik-4 ile hazırlanan ultrasonik yıkama banyosunda yıkanmasına karar verilmiştir. Ayrıca ultrasonik yıkama ünitesinin parçalarda yüzey temizliğinin haricinde homojen tabaka oluşumuna, difüzyon kalitesine ve banyo ömrüne de olumlu yönde etki ettiği söylenebilir.



Şekil 25. Korozyona uğrayan örnek numuneye ait stereo mikroskop görüntüsü

3.2. AISI 4140 Tabanca Malzemelerine Yönelik Nitrokarbürizasyon İşlemi

Tez kapsamında nitrokarbürizasyon işlemi öncesi en iyilenen (optimum) yüzey kalitesinin sağlanmasına yönelik birçok çalışma yürütülmüş ve en iyilenen yüzey elde edildikten sonra nitrokarbürizasyon işlemi için 12 farklı proses (Şekil 10) çalışması gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise bu prosesler kapsamında hazırlanan numuneler için aşağıda belirtilen incelemeler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar kapsamında birçok teknik veri eldesinin yanında karşılaştırma ve teknik analizlerde yapılmıştır.

3.2.1. Pürüzlülük

Tez kapsamında kapak numunelerine uygulanan yüzey işlemleri sonrasında gerçekleştirilen yüzey pürüzlülük ölçümleri sonucunda elde edilen Ra değerleri Tablo 15,

Rz değerleri ise Tablo 16’da ve bu değerlere ait ortalamalar ise Tablo 17 ve Tablo 18’de verilmiştir. Yüzey pürüzlülük ölçüm verileri kullanılarak iki farklı süreç için değerlendirme yapılabilmektedir. İlk süreç, numune kapak parçalarının farklı noktalarındaki yüzey pürüzlülük değişimlerinin izlenmesini içermektedir. Bu kapsamda K-1 numunesi için hazırlanan Şekil 26 ve Şekil 27 incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Kapak numunelerinin, talaşlı imalat sırasında parça yüzeylerine farklı işlemler ve operasyonlar uygulandığı ve bu sebeple de numune yüzeylerinde yüzey pürüzlülük değerlerinin yüzeyin maruz kaldığı işleme göre farklılık gösterdiği açıkça görülmektedir.
- Kapak numunelerinin talaşlı imalat işlemleri sonrasında üst ve yan yüzeylerine uygulanan taşlama işlemi ile yüzey pürüzlülüğünde bariz bir azalma yaşandığı ve tüm yüzeylerde yaklaşık aynı pürüzlülük değerlerinin elde edildiği görülmektedir. İşlem öncesi yüksek Rz değerleri taşlama işlemi ile düşürülmüş ve neredeyse tüm yüzeylerde eşit bir seviyeye indirgenmiştir. Bu durumdan taşlama işleminin yüzeyi homojen bir hale getirdiği anlaşılmaktadır.
- Kapak numunelerine taşlama işlemi sonrasında uygulanan polisaj işlemleri ile yüzey pürüzlülüğünde bariz bir değişim görülmediği, ancak küçük çaplı dalgalanmalar yaşandığı görülmektedir. Bu dalgalanmalar ve farklılıklar polisaj işlemlerinin operatörler tarafından el ile yapılmasından kaynaklanmaktadır. Her operatör parçaya aynı kuvvet ve aynı işçiliği uygulamadığından operasyonlarda kararlılık sağlanamamaktadır.
- Polisaj işlemi sonrasında kapak numunelerine S70 çelik bilye ile otomatik kumlama işlemi uygulandığı ve bu işleminin her yüzey ve her numune için homojen bir şekilde gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum, S70 çelik bilye kumunun otomatik kumlama sistemi ile gerçekleştirilmesi ve buna bağlı olarak operatör kaynaklı hatalara maruz bırakılmamasından kaynaklanmaktadır.
- S70 çelik bilye kumu taşlama işlemi sonrasında yüzey pürüzlülük değerlerinde bariz bir artış sağlamaktadır. Nitekim, talaşlı imalat ve taşlama işlemleri sonrasında uygulanan kumlama işleminin yüzey pürüzlülüğünü arttığı anlaşılmaktadır.
- Sırası ile nitrokarbürizasyon ve oksidasyon işlemlerine tabi tutulan kapak numunelerinde bariz bir yüzey pürüzlülük artışının yaşandığı ve bütün numunelerde hemen hemen homojen bir yüzey pürüzlülük dağılımı olduğu görülmektedir. Nitekim yüzey pürüzlülüğündeki artış nitrokarbürizasyon işlemi sonrasında oluşan nispeten daha fazla gözenekli (poroz) yapıdan kaynaklanmaktadır [11].
- Sırası ile nitrokarbürizasyon ve oksidasyon işlemlerine tabi tutulan tüm kapak numuneleri

tekrar kumlama işlemine (S70 çelik bilye ile) tabi tutulmuş ve bu işlem sonrasında yüzey pürüzlülüğünde bariz bir azalma yaşandığı gözlemlenmiştir. Nitekim, bu durum nitrokarbürizasyon işlemi sonrası elde edilen gözenekli yapının S70 çelik bilye ile kumlandığında nispeten kapanarak daha homojen ve kararlı bir yüzey oluşturması ile açıklanabilir.

- Kapak numunelerine uygulanan ikinci kumlama işlemi sonrasında uygulanan ikinci oksidasyon işleminin ise yüzey pürüzlülüğü açısından bariz bir değişim sergilemediği görülmektedir. Bu durum, nitrokarbürleme sonrası adımda oksidasyon işlemi ile ϵ bileşik tabakasının üzerine, 0,5-3,5 μm kalınlığında magnetit (Fe_3O_4) ve hematit (Fe_2O_3) fazlarından oluşan ince bir oksit filmi oluşturulması ve buna bağlı olarak bariz bir pürüzlülük değişiminin gerçekleşmemesi ile açıklanmaktadır [39, 21].

İkinci süreç olarak, farklı nitrokarbürizasyon işlemleri uygulanan 12 adet kapak numunesi üzerinden nitrokarbürizasyon işlemindeki süre ve sıcaklık parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda Tablo 15, Tablo 16, Tablo 17 ve Tablo 18'e dayanarak hazırlanan grafikler (Şekil 28 ve Şekil 29) incelendiğinde aşağıdaki çıkarımların yapılması mümkündür:

- Nitrokarbürizasyon işlemi sonrasında, kapak numunelerinde ortalama en düşük yüzey pürüzlülüğü (1,67 μm) K-1 numunesinde (570°, 45 dk) gözlemlenmiştir. Yine kapak numunelerinde ortalama en yüksek yüzey pürüzlülüğü (2,33 μm) ise K-12 numunesinde (590°, 90 dk) gözlemlenmiştir. Nitrokarbürizasyon işlemi sonrasında oluşan ortalama yüzey pürüzlülük değerlerine göre işlem süresi ve sıcaklığı arttığında yüzey pürüzlülük değerinde artış yaşandığı görülmektedir. Nitrokarbürizasyon işlem sıcaklığının artması ile oluşan gözenekli yapı (poroz) malzemelerin yüzey pürüzlülüğünü arttırmaktadır [11]. Bu durum $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}(\text{N}, \text{C})$ ve $\gamma'\text{-Fe}_4(\text{N}, \text{C})$ fazlarından oluşan bileşik tabaka oluşumundan kaynaklıdır [5].
- Nitrokarbürizasyon işlemi sonrasında elde edilen gözenekli yüzey bir sonraki operasyonun altlık malzemesi olacağından nitrokarbürizasyon işlemi sonrasında oluşan yüzey pürüzlülüğü, nitrokarbürizasyon sonrasında uygulanan işlemlerin (2. kumlama ve oksidasyon işlemleri gibi) ardından elde edilen yüzey pürüzlülüğüne de etki etmektedir. Nitekim, nitrokarbürizasyon sonrası düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip yüzeyler nispeten ikinci kumlama ve ikinci oksidasyon işlemleri sonrası da diğer yüzeylere göre daha düşük Ra değerleri sergilemektedir.

Tablo 15. Numunelere ait Ra değerleri tablosu

Operasyon	Ra	K-1	K-2	K-3	K-4	K-5	K-6	K-7	K-8	K-9	K-10	K-11	K-12
Talaşlı İmalat	Ra-1	1,948	2,104	1,985	2,124	2,401	2,236	2,102	1,955	1,789	2,005	1,913	2,405
	Ra-2	1,955	1,847	2,307	1,998	2,056	2,125	1,997	1,952	1,859	1,846	1,923	2,057
	Ra-3	1,413	1,695	2,344	1,782	1,501	1,860	2,032	2,324	1,666	1,698	1,754	1,401
	Ra-4	0,933	1,112	0,788	0,855	0,936	0,987	0,741	0,745	1,020	1,110	0,987	0,976
	Ra-5	2,266	1,856	2,002	1,871	1,962	2,014	2,354	1,742	1,687	2,174	1,965	1,912
	Ra-ort	1,703	1,723	1,885	1,726	1,771	1,844	1,845	1,744	1,604	1,767	1,708	1,750
Taşlama	Ra-1	0,170	0,149	0,166	0,139	0,180	0,170	0,165	0,150	0,089	0,170	0,166	0,139
	Ra-2	0,148	0,171	0,212	0,117	0,200	0,158	0,172	0,141	0,171	0,115	0,242	0,199
	Ra-3	0,137	0,111	0,116	0,153	0,181	0,173	0,177	0,099	0,186	0,184	0,116	0,136
	Ra-4	0,136	0,177	0,201	0,153	0,145	0,136	0,172	0,228	0,177	0,158	0,200	0,205
	Ra-5	0,154	0,158	0,125	0,160	0,117	0,156	0,207	0,163	0,141	0,139	0,138	0,198
	Ra-ort	0,149	0,153	0,164	0,144	0,165	0,159	0,179	0,156	0,153	0,153	0,172	0,175
Polisaj	Ra-1	0,296	0,395	0,439	0,328	0,299	0,333	0,296	0,356	0,247	0,322	0,395	0,375
	Ra-2	0,278	0,314	0,401	0,484	0,197	0,307	0,281	0,390	0,336	0,347	0,414	0,456
	Ra-3	0,369	0,345	0,316	0,437	0,277	0,258	0,359	0,285	0,276	0,310	0,367	0,445
	Ra-4	0,299	0,321	0,356	0,254	0,286	0,231	0,287	0,347	0,235	0,213	0,312	0,393
	Ra-5	0,218	0,205	0,372	0,203	0,309	0,229	0,217	0,272	0,325	0,202	0,195	0,257
	Ra-ort	0,292	0,316	0,377	0,341	0,274	0,272	0,288	0,330	0,284	0,279	0,337	0,385
Kumlama	Ra-1	1,653	1,482	1,707	1,853	1,575	1,426	1,633	1,382	1,506	1,409	1,670	1,815
	Ra-2	1,538	1,498	1,560	1,498	1,562	1,489	1,540	1,387	1,394	1,620	1,671	1,768
	Ra-3	1,575	1,567	1,635	1,670	1,361	1,518	1,590	1,591	1,584	1,287	1,440	1,694
	Ra-4	0,973	1,016	0,748	0,893	0,843	0,824	0,953	1,016	0,853	0,814	0,874	0,730
	Ra-5	0,923	1,028	1,010	0,804	0,834	0,822	0,901	1,028	0,930	1,026	0,829	1,062
	Ra-ort	1,332	1,318	1,332	1,344	1,235	1,216	1,323	1,281	1,253	1,231	1,297	1,414
Nitrokarb.+Oks.	Ra-1	2,086	2,146	2,257	2,069	2,364	2,163	2,091	2,416	2,291	2,435	2,719	2,708
	Ra-2	1,928	2,215	2,153	1,732	2,321	2,155	2,085	2,445	2,301	2,472	2,712	2,652
	Ra-3	2,026	2,134	2,225	2,053	2,222	2,227	2,037	2,175	2,343	2,477	2,595	2,868
	Ra-4	1,178	1,480	1,385	1,341	1,310	1,475	1,250	1,410	1,291	1,625	1,629	1,700
	Ra-5	1,172	1,351	1,516	1,424	1,248	1,516	1,348	1,382	1,314	1,552	1,580	1,757
	Ra-ort	1,678	1,865	1,907	1,724	1,893	1,907	1,762	1,966	1,908	2,112	2,247	2,337
2.Kumlama	Ra-1	1,525	1,592	1,676	1,524	1,505	1,692	1,436	1,614	1,520	1,555	1,512	1,614
	Ra-2	1,488	1,529	1,589	1,433	1,478	1,629	1,512	1,702	1,527	1,542	1,570	1,643
	Ra-3	1,532	1,522	1,616	1,589	1,530	1,522	1,574	1,715	1,475	1,669	1,638	1,679
	Ra-4	1,245	1,193	1,176	1,094	1,143	1,296	1,062	1,097	1,098	1,177	1,089	1,158
	Ra-5	1,154	1,174	1,322	1,204	1,148	1,197	1,177	1,211	1,187	1,243	1,194	1,129
	Ra-ort	1,389	1,402	1,476	1,369	1,361	1,467	1,352	1,468	1,361	1,437	1,401	1,445
2.Oksidasyon	Ra-1	1,531	1,497	1,550	1,363	1,439	1,717	1,546	1,676	1,454	1,621	1,424	1,746
	Ra-2	1,494	1,516	1,588	1,513	1,577	1,611	1,605	1,703	1,429	1,633	1,632	1,770
	Ra-3	1,526	1,597	1,570	1,511	1,574	1,607	1,557	1,651	1,436	1,709	1,697	1,630
	Ra-4	1,240	1,188	1,263	1,222	1,219	1,068	1,053	1,333	1,052	1,170	1,210	1,095
	Ra-5	1,245	1,187	1,294	1,290	1,207	1,140	1,146	1,219	1,177	1,112	1,106	1,144
	Ra-ort	1,407	1,397	1,533	1,380	1,403	1,429	1,381	1,516	1,310	1,449	1,414	1,477

Tablo 16. Numunelere ait Rz değerleri tablosu

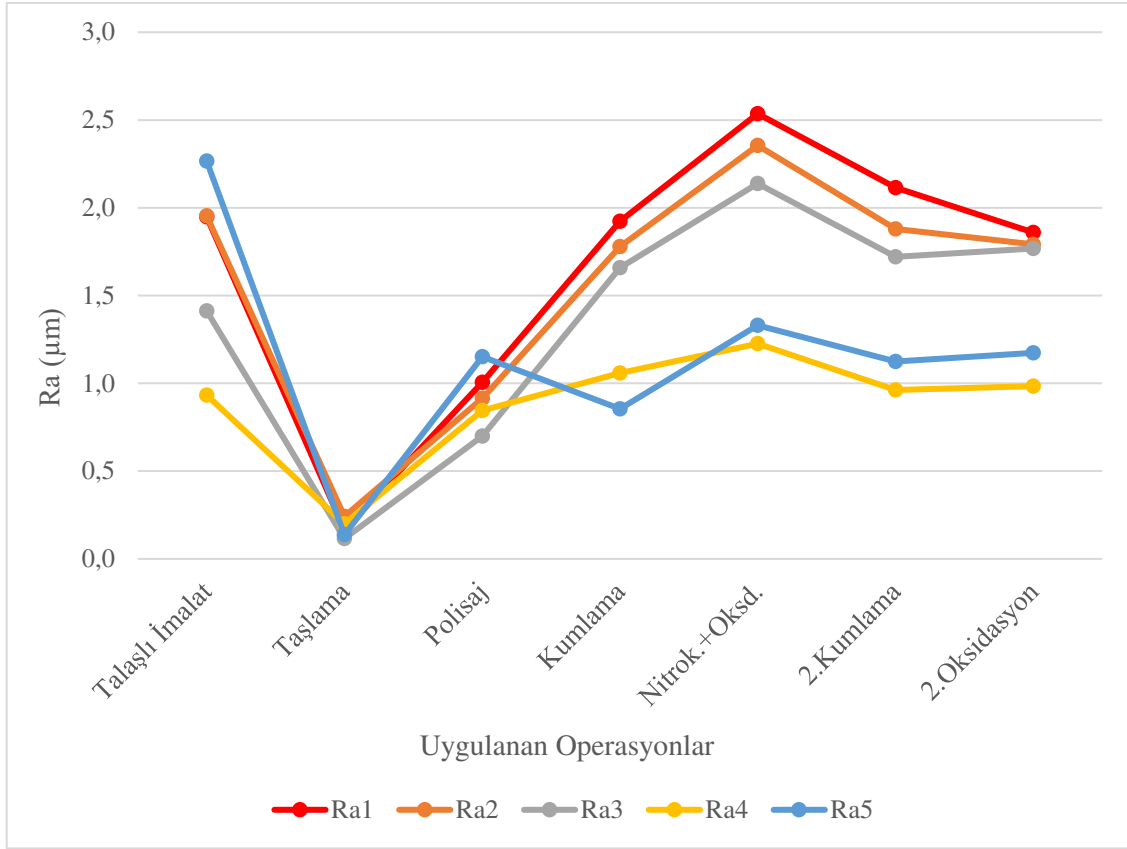
Op.	Ra	K-1	K-2	K-3	K-4	K-5	K-6	K-7	K-8	K-9	K-10	K-11	K-12
T. İmalat	Rz-1	10,560	10,760	9,861	10,254	11,021	9,998	11,874	10,654	10,412	10,907	10,520	9,255
	Rz-2	9,639	12,987	10,189	12,212	11,654	13,587	11,254	10,789	10,651	11,069	12,788	10,004
	Rz-3	10,251	12,025	8,505	10,434	10,258	10,412	13,187	10,690	9,521	9,783	10,658	12,852
	Rz-4	9,555	5,998	5,808	6,655	5,987	5,084	5,100	5,697	7,854	8,614	5,369	5,741
	Rz-5	9,874	9,874	12,429	10,409	8,695	10,195	9,874	12,102	8,412	9,456	8,364	9,801
	Rz-ort	10,18	10,33	9,36	9,99	9,52	9,86	10,26	9,99	9,37	9,97	9,54	9,53
Taşlama	Rz-1	1,359	1,347	1,451	1,326	1,377	1,340	1,060	1,205	1,222	1,236	1,244	0,909
	Rz-2	1,354	1,274	1,411	1,198	1,313	1,275	0,979	1,102	1,170	1,095	1,495	1,105
	Rz-3	1,257	1,219	1,333	1,143	1,254	1,221	1,583	1,115	1,360	1,093	0,753	1,238
	Rz-4	1,292	0,912	0,914	1,175	1,280	0,962	1,179	1,162	1,342	1,045	1,458	1,472
	Rz-5	1,074	1,487	1,177	1,112	1,048	1,679	1,527	1,148	0,978	1,090	1,000	1,566
	Rz-ort	1,27	1,25	1,26	1,19	1,25	1,30	1,27	1,15	1,21	1,11	1,19	1,26
Polisaj	Rz-1	3,803	3,952	3,711	3,489	3,612	3,729	4,036	3,609	3,346	4,952	4,664	4,075
	Rz-2	4,157	3,933	3,704	4,685	2,104	4,058	3,504	4,506	4,588	4,233	4,711	4,974
	Rz-3	3,786	4,288	3,405	4,005	3,701	3,826	4,421	3,272	3,716	4,396	4,434	4,464
	Rz-4	2,683	1,615	1,965	1,994	2,401	2,730	2,502	3,439	2,181	1,515	2,002	2,704
	Rz-5	1,650	1,517	1,526	1,712	1,922	1,606	1,798	1,777	2,762	1,418	1,850	2,027
	Rz-ort	3,22	3,06	2,86	3,18	2,75	3,19	3,25	3,32	3,32	3,30	3,53	3,65
Kumlama	Rz-1	10,247	11,025	11,115	10,264	11,025	9,565	10,468	10,676	10,177	9,774	10,401	11,831
	Rz-2	10,503	10,273	10,996	10,693	10,273	10,104	10,876	9,429	9,199	10,992	10,897	11,823
	Rz-3	11,746	9,906	11,594	11,836	9,485	10,377	10,351	10,489	11,175	9,049	9,665	11,184
	Rz-4	6,449	6,402	5,868	6,541	6,351	6,214	7,524	7,225	6,128	6,059	7,301	5,845
	Rz-5	6,749	5,899	7,495	6,886	5,990	6,260	6,973	7,025	7,208	7,156	6,109	7,975
	Rz-ort	9,14	8,70	9,41	9,24	8,62	8,50	9,24	8,97	8,78	8,61	8,87	9,73
Nitro.+Oks.	Rz-1	13,473	15,534	17,546	15,246	14,580	15,876	14,982	14,785	14,501	18,376	16,470	18,707
	Rz-2	13,295	15,998	14,459	12,229	15,553	16,410	14,233	15,632	14,932	18,472	15,420	16,904
	Rz-3	15,785	16,508	14,995	13,869	13,708	15,514	13,555	14,463	15,945	17,058	16,375	18,563
	Rz-4	8,629	10,498	10,566	9,594	9,298	10,570	9,559	11,122	9,634	11,675	10,828	13,139
	Rz-5	8,906	9,841	10,161	9,629	8,980	11,059	9,916	9,686	9,973	10,882	11,055	13,615
	Rz-ort	12,02	13,68	13,55	12,11	12,42	13,89	12,45	13,14	13,00	15,29	14,03	16,19
2.Kumlama	Rz-1	9,250	11,537	10,911	10,817	10,229	11,632	9,158	10,663	9,064	11,083	9,908	10,810
	Rz-2	10,254	11,799	10,827	9,198	9,568	11,891	10,254	12,410	9,080	9,937	10,804	11,373
	Rz-3	10,523	10,475	10,822	10,472	10,426	10,475	10,720	11,863	9,783	11,056	11,397	11,009
	Rz-4	7,382	10,444	9,824	8,278	7,458	10,465	7,350	7,191	7,686	7,970	8,379	8,059
	Rz-5	8,789	8,560	9,736	8,385	8,667	8,519	8,905	8,309	7,508	8,064	8,124	8,556
	Rz-ort	9,24	10,56	10,42	9,43	9,27	10,60	9,28	10,09	8,62	9,62	9,72	9,96
2.Oks.	Rz-1	9,105	11,535	11,699	10,121	9,679	11,966	10,867	10,463	9,904	11,123	9,765	11,487
	Rz-2	10,104	11,559	10,319	10,483	11,877	11,469	11,269	11,590	9,350	10,755	11,102	11,401
	Rz-3	10,525	10,470	11,369	11,505	10,419	10,052	10,466	11,974	9,665	11,773	11,186	10,700
	Rz-4	7,380	10,401	9,439	8,361	8,824	7,680	7,599	7,999	7,872	8,259	8,653	8,156
	Rz-5	8,777	8,571	8,825	8,954	9,631	8,211	8,654	9,188	8,232	8,185	7,867	8,351
	Rz-ort	9,18	10,51	10,33	9,88	10,09	9,88	9,77	10,24	9,00	10,02	9,71	10,02

Tablo 17. Numunelere ait ortalama Ra değerleri tablosu

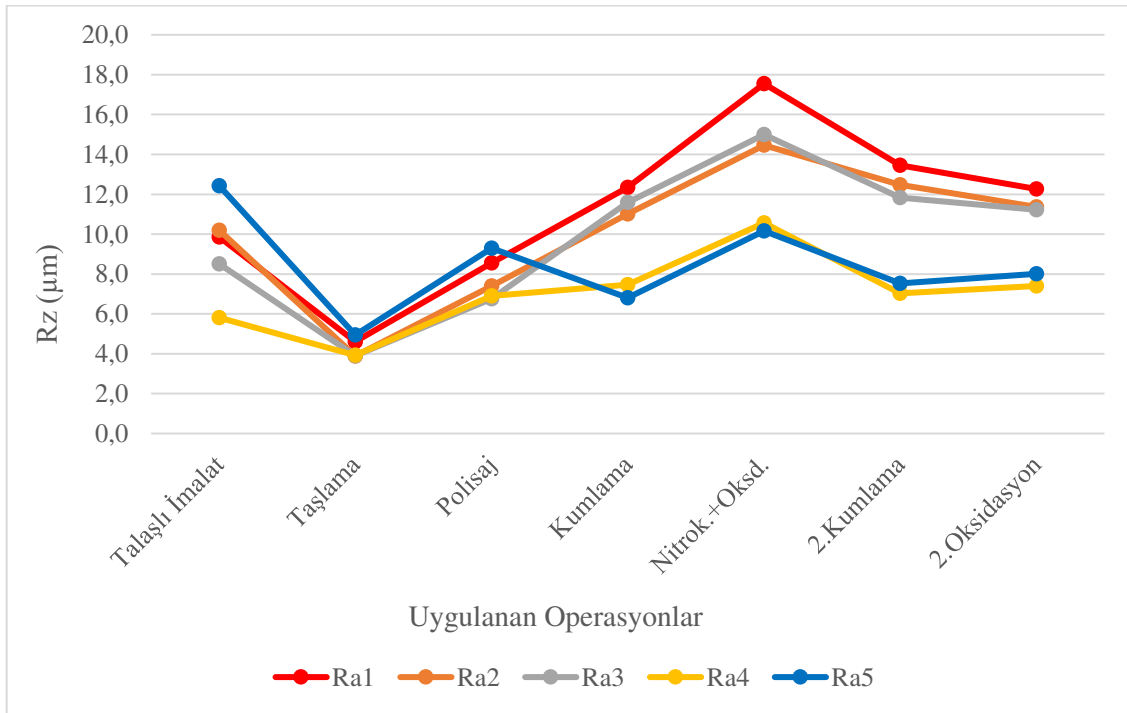
Operasyon	K-1	K-2	K-3	K-4	K-5	K-6	K-7	K-8	K-9	K-10	K-11	K-12
T. İmalat	1,703	1,723	1,885	1,726	1,771	1,844	1,845	1,744	1,604	1,767	1,708	1,750
Taşlama	0,149	0,153	0,164	0,144	0,165	0,159	0,179	0,156	0,153	0,153	0,172	0,175
Polisaj	0,292	0,316	0,377	0,341	0,274	0,272	0,288	0,330	0,284	0,279	0,337	0,385
Kumlama	1,332	1,318	1,332	1,344	1,235	1,216	1,323	1,281	1,253	1,231	1,297	1,414
Nitro.+Oks.	1,678	1,865	1,907	1,724	1,893	1,907	1,762	1,966	1,908	2,112	2,247	2,337
2.Kumlama	1,389	1,402	1,476	1,369	1,361	1,467	1,352	1,468	1,361	1,437	1,401	1,445
2.Oksd.	1,407	1,397	1,533	1,380	1,403	1,429	1,381	1,516	1,310	1,449	1,414	1,477

Tablo 18. Numunelere ait ortalama Rz değerleri tablosu

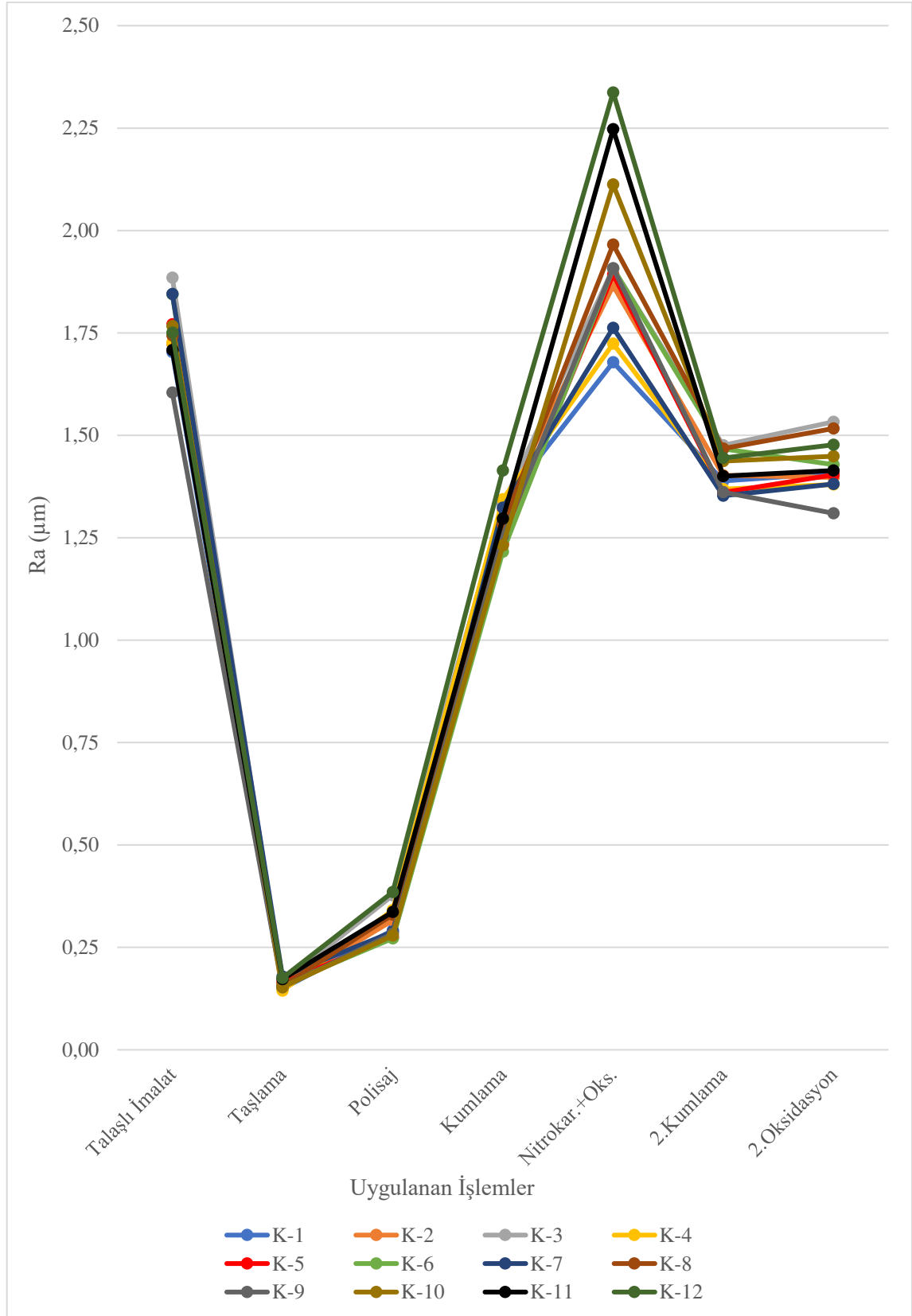
Operasyon	K-1	K-2	K-3	K-4	K-5	K-6	K-7	K-8	K-9	K-10	K-11	K-12
T. İmalat	10,176	10,329	9,358	9,993	9,523	9,855	10,258	9,986	9,370	9,966	9,540	9,531
Taşlama	1,267	1,248	1,257	1,191	1,254	1,295	1,266	1,146	1,214	1,112	1,190	1,258
Polisaj	3,216	3,061	2,862	3,177	2,748	3,190	3,252	3,321	3,319	3,303	3,532	3,649
Kumlama	9,139	8,701	9,414	9,244	8,625	8,504	9,238	8,969	8,777	8,606	8,875	9,732
Nitro.+Oks.	12,018	13,676	13,545	12,113	12,424	13,886	12,449	13,138	12,997	15,293	14,030	16,186
2.Kumlama	9,240	10,563	10,424	9,430	9,270	10,596	9,277	10,087	8,624	9,622	9,722	9,961
2.Oksd.	9,178	10,507	10,330	9,885	10,086	9,876	9,771	10,243	9,005	10,019	9,715	10,019



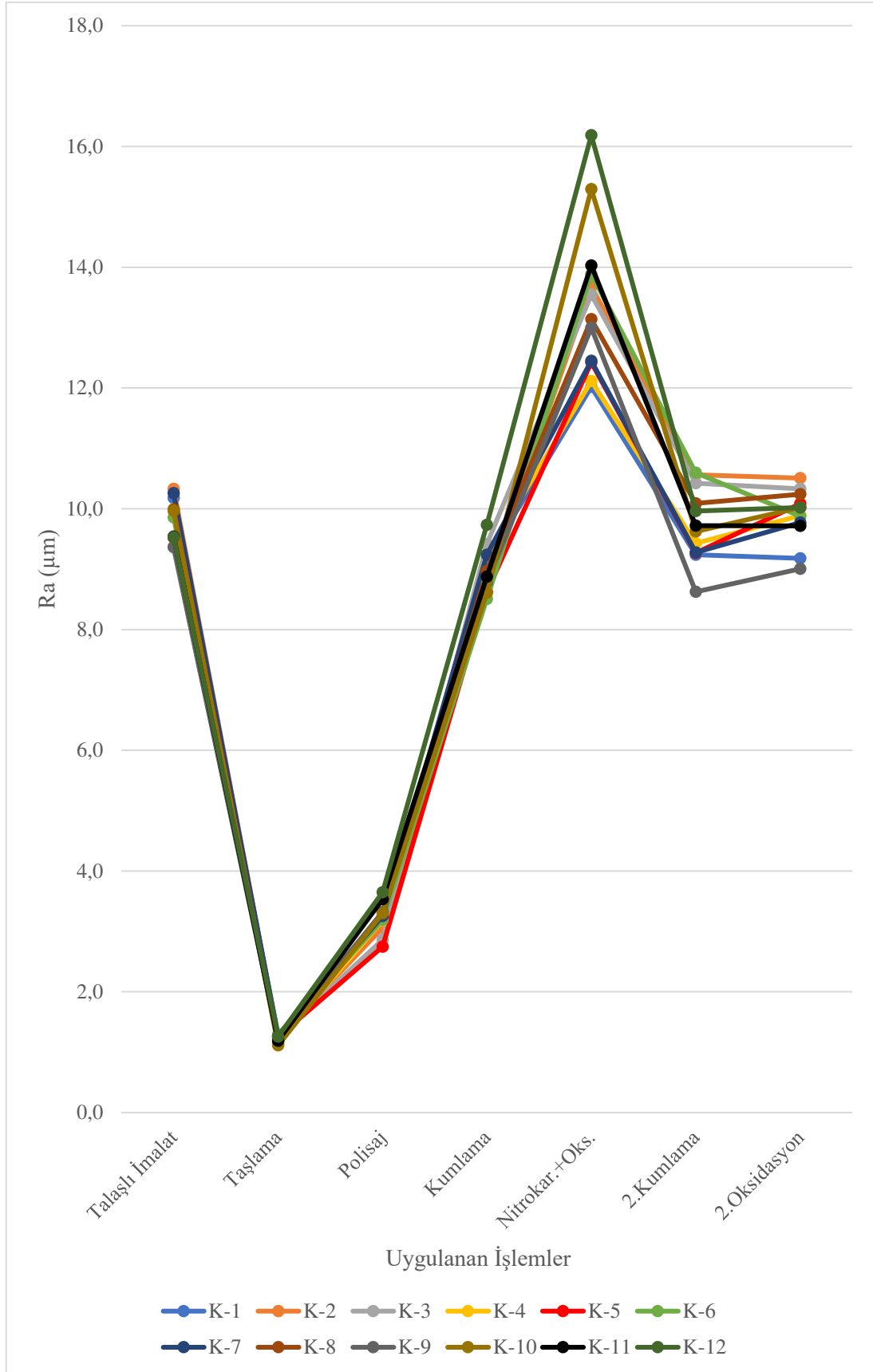
Şekil 26. K-1 Numunesine uygulanan operasyonlar sonrası Ra ölçümleri



Şekil 27. K-1 numunesine uygulanan operasyonlar sonrası Rz ölçümleri



Şekil 28. Numunelere uygulanan operasyonlar sonrası Ra grafiği

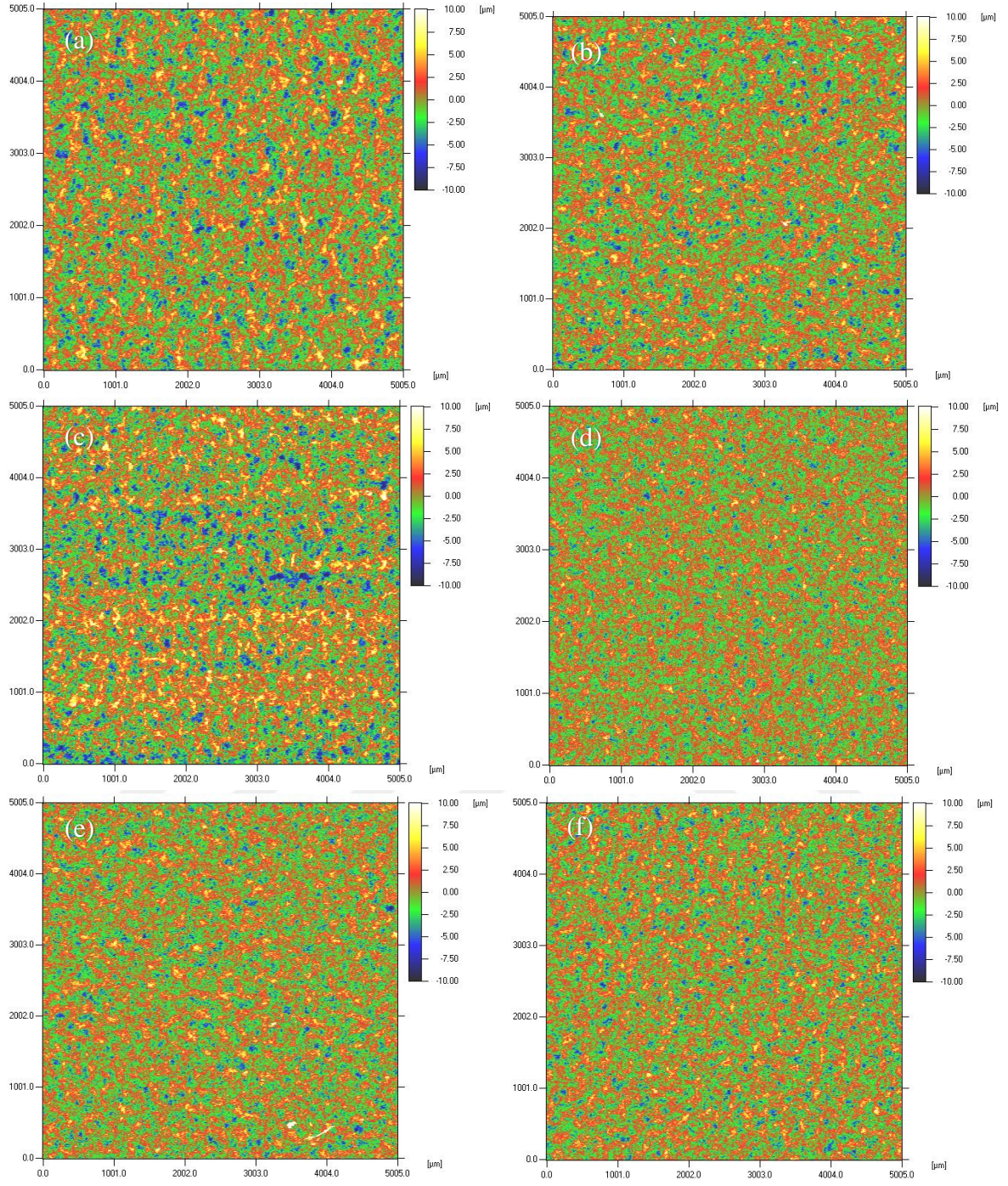


Şekil 29. Numunelere uygulanan operasyonlar sonrası Rz grafiği

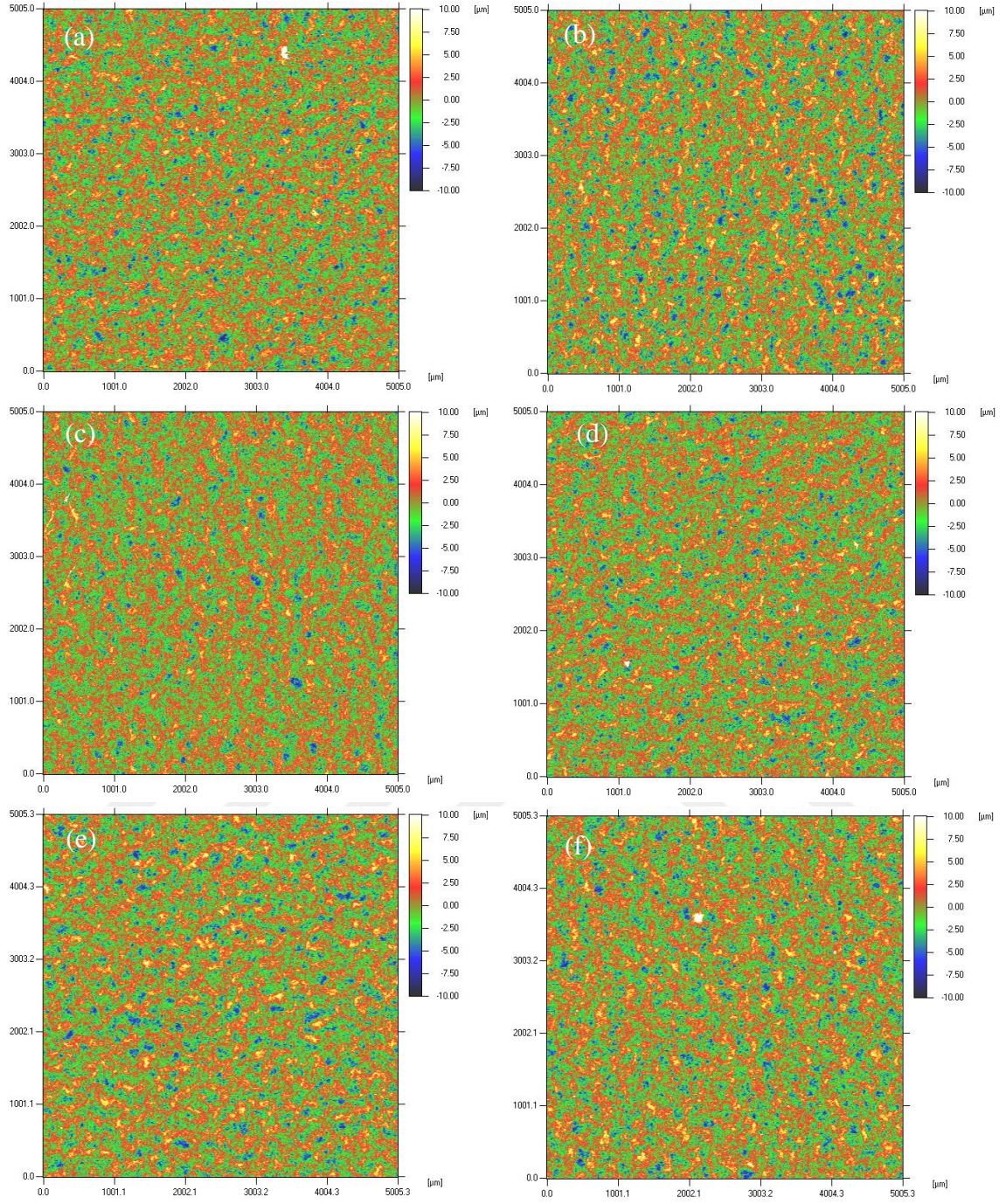
3.2.2. Yüzey Topografyası İncelemeleri

Tez kapsamında $5 \times 5 \text{ mm}^2$ alanda yüzey topoğrafyası incelemeleri gerçekleştirilen deney numunelerine ait tarama görüntüleri Şekil 30 ve Şekil 31’da verilmiştir. Tarama görüntüleri incelendiğinde, deney numunelerine uygulanan ikinci kumlama işleminin yaklaşık olarak tüm numunelerde benzer pürüzlülük dağılımı oluşturduğu, fakat bazı numunelerde (Numune 1 ve Numune 3) daha yüksek pürüzlülük dağılımının (Şekil30a ve 30c) meydana geldiği görülmektedir. Bu farklılığın sebebi olarak kapak deney numunelerinin karmaşık geometrisi ve bu geometriden kaynaklı dar kesitlerin yeterince kumlanamaması gösterilebilmektedir. Ayrıca ek olarak kumlama işlemi sırasında deney numunelerinin kumlama tezgâhı aparatına yerleşiminin de (çok sık veya birbirine çok yakın dizilmesi gibi) belli bir oranda farklılığa sebebiyet verdiği anlaşılmaktadır.

Yüzey topoğrafyası tarama görüntüleri üzerinden ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri ortalama, maksimum ve minimum değerler şeklinde Tablo 19’da verilmiştir. Kapak numunelerinde ortalama en düşük yüzey pürüzlülüğü ($1.61 \mu\text{m}$) K-4 numunesinde (570° , 45 dk) gözlemlenmiştir. Kapak numunelerinde ortalama en yüksek yüzey pürüzlülüğü ($2.1 \mu\text{m}$) ise K-3 numunesinde (560° , 90 dk) gözlemlenmiştir. Yüzey pürüzlülük ölçümleri (Mahr PS10 ile ölçülen) ve yüzey topoğrafyası tarama görüntülerinden elde edilen pürüzlülük ölçümleri kıyaslandığında aynı numunelerde farklı pürüzlülük değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Bu durum, ölçüm sistemlerinin farklı olması, parça geometrisi, parçaların aparatlara hatalı dizilimi ve ölçüm noktalarının farklı (yüzey topoğrafyası ölçümleri sadece $5 \times 5 \text{ mm}^2$ ’lik alanı kapsamakta fakat Mahr PS10 ile gerçekleştirilen ölçümlerin birçok yüzey ve noktadan alınması) olmasından kaynaklanmaktadır. Yüzey topoğrafyası tarama görüntüleri üzerinden ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri nihai deney numuneleri üzerinden alındığından dolayı nitrokarbürizasyon işlemi ile ilgili uygulanan farklı sıcaklık ve süre parametreleri ile ilgili sağlıklı bir kıyas sağlayamamaktadır. Çünkü ikinci kumlama işlemi sonrasında numunelerde yaklaşık aynı pürüzlülük değerleri elde edilmiştir.



Şekil 30. Deney numunelerine ait yüzey topografyası görüntüleri: (a) Numune 1, (b) Numune 2, (c) Numune 3, (d) Numune 4, (e) Numune 5 ve (f) Numune 6



Şekil 31. Deney numunelerine ait yüzey topografyası görüntüleri: (a) Numune 7, (b) Numune 8, (c) Numune 9, (d) Numune 10, (e) Numune 11 ve (f) Numune 12

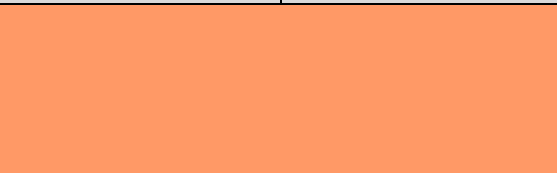
Tablo 19. Deney numunelerinin yüzey topoğrafya incelemeleri sonucu elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerleri

Numune	Ra-ort (μm)	Ra-maks (μm)	Ra-min (μm)
K-1	1,850	1,990	1,680
K-2	1,774	1,960	1,530
K-3	2,101	2,330	1,870
K-4	1,619	1,766	1,400
K-5	1,748	1,940	1,580
K-6	1,722	1,930	1,570
K-7	1,726	1,960	1,520
K-8	1,922	2,161	1,731
K-9	1,616	1,828	1,445
K-10	1,742	1,988	1,568
K-11	1,871	2,071	1,596
K-12	1,813	1,978	1,669

3.2.3. Mikroyapı

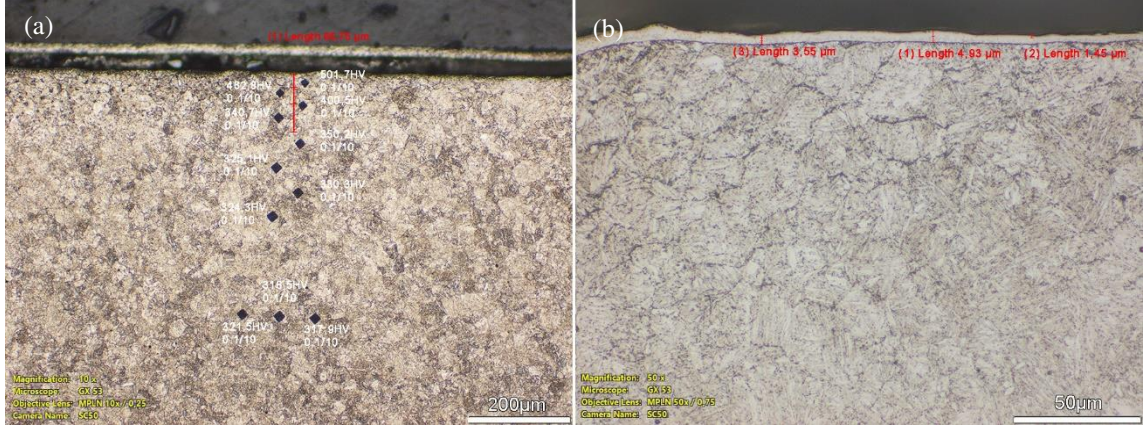
Numune hazırlama işlemleri sonrası metalografik inceleme için hazır hale getirilen numunelere ait bileşik tabaka, beyaz tabaka, poroz tabaka ve difüzyon derinliği verileri ters metal mikroskobu yardımı ile belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Gerçekleştirilen ölçümler ve içyapı görüntüleri Tablo 20’de yer alan sistematığe göre verilmiştir.

Tablo 20. Mikroyapı inceleme verileri şablonu

Bakalit		Bakalit	
Alüminyum Folyo		Alüminyum Folyo	
Bileşik Tabaka	Poroz Tabaka (2)	Bileşik Tabaka (1)	
	Beyaz Tabaka (3)		
 [1] Difüzyon Derinliği (Mikrosertlik İzleri) <i>İç Yapı (X 100)</i>		 <i>İç Yapı (X 500)</i>	

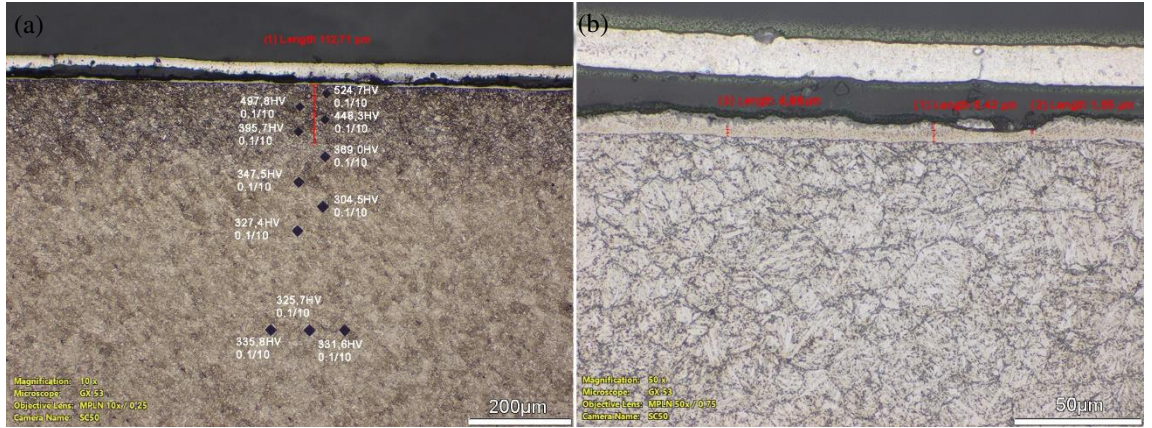
Şekil 32’de 560°C-45 dk. nitrokarbürizasyon işlemi sonrasında oluşan bileşik tabaka kalınlığının 4,93 μm , beyaz tabaka kalınlığının 3,55 μm , poroz tabaka kalınlığının 1,45 μm

ve difüzyon derinliğinin ise 86,75 μm olduğu görülmüştür.



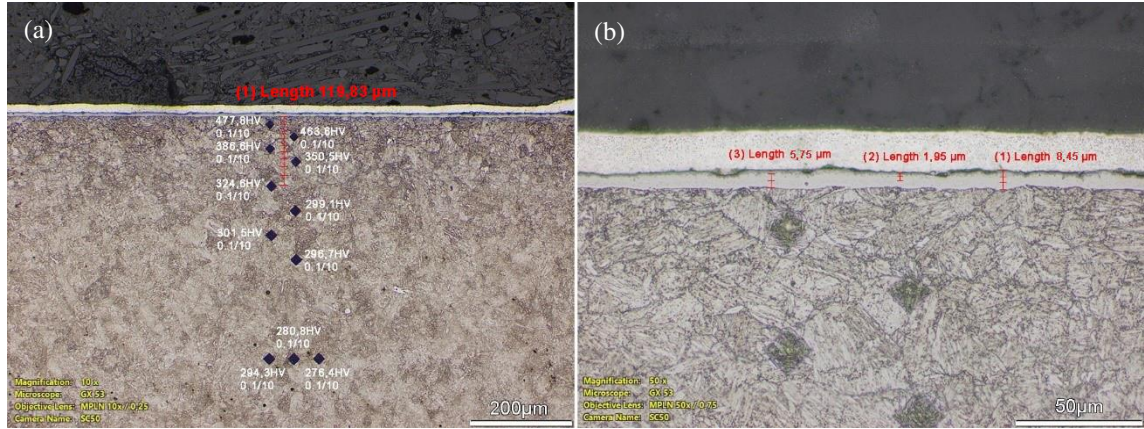
Şekil 32. Kapak-1 numunesine ait iç yapı görüntüleri: (a) Difüzyon derinliği, (b) Tabaka kalınlığı ((1) Bileşik tabaka, (2) Poroz tabaka ve (3) Beyaz tabaka) ölçümleri

Şekil 33’de 560°C-60 dk. nitrokarbürizasyon işlemi sonrasında oluşan bileşik tabaka kalınlığının 6,42 μm , beyaz tabaka kalınlığının 4,96 μm , poroz tabaka kalınlığının 1,65 μm ve difüzyon derinliğinin ise 112,71 μm olduğu görülmüştür.



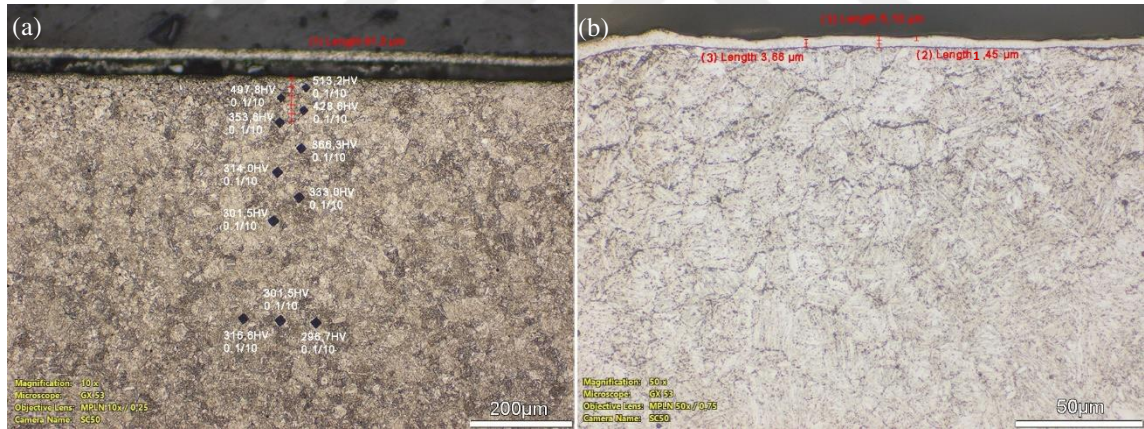
Şekil 33. Kapak-2 numunesine ait iç yapı görüntüleri: (a) Difüzyon derinliği, (b) Tabaka kalınlığı ((1) Bileşik tabaka, (2) Poroz tabaka ve (3) Beyaz tabaka) ölçümleri

Şekil 34’de 560°C-90 dk. nitrokarbürizasyon işlemi sonrasında oluşan bileşik tabaka kalınlığının 8,45 μm , beyaz tabaka kalınlığının 5,75 μm , poroz tabaka kalınlığının 1,95 μm ve difüzyon derinliğinin ise 119,83 μm olduğu görülmüştür.



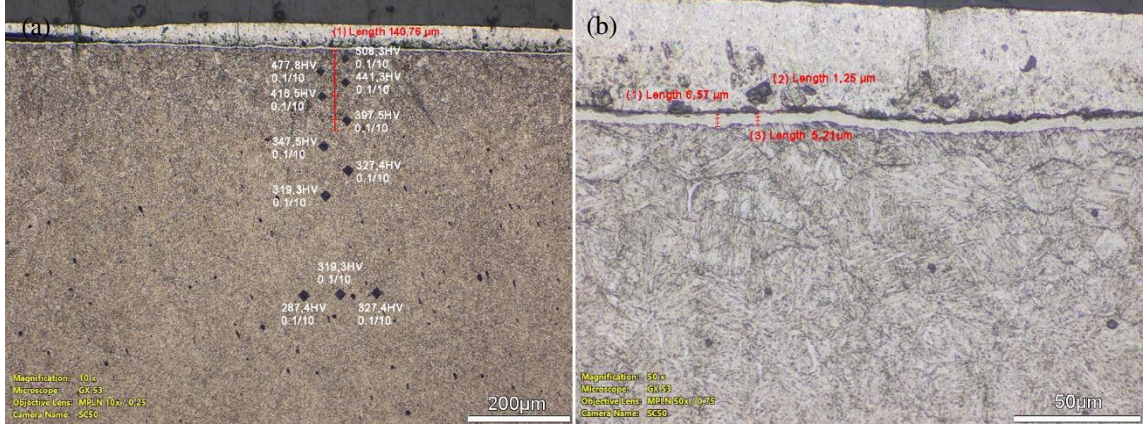
Şekil 34. Kapak-3 numunesine ait iç yapı görüntüleri: (a) Difüzyon derinliği, (b) Tabaka kalınlığı ((1) Bileşik tabaka, (2) Poroz tabaka ve (3) Beyaz tabaka) ölçümleri

Şekil 35’de 570°C-45 dk. nitrokarbürizasyon işlemi sonrasında oluşan bileşik tabaka kalınlığının 5,10 µm, beyaz tabaka kalınlığının 3,66 µm, poroz tabaka kalınlığının 1,45 µm ve difüzyon derinliğinin ise 91,3 µm olduğu gözlenmiştir.



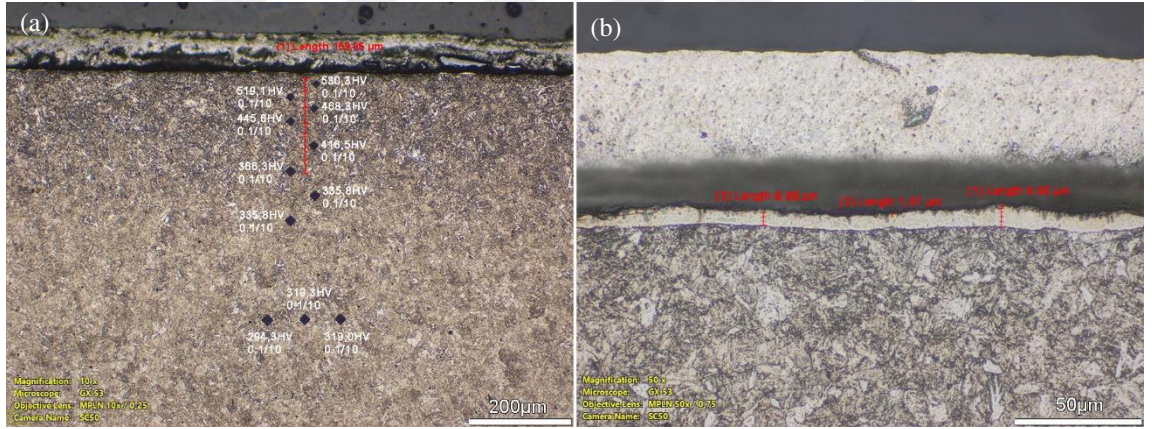
Şekil 35. Kapak-4 numunesine ait iç yapı görüntüleri: (a) Difüzyon derinliği, (b) Tabaka kalınlığı ((1) Bileşik tabaka, (2) Poroz tabaka ve (3) Beyaz tabaka) ölçümleri

Şekil 36’da 570°C-60 dk. nitrokarbürizasyon işlemi sonrasında oluşan bileşik tabaka kalınlığı 6,57 µm, beyaz tabaka kalınlığı 5,21 µm, poroz tabaka kalınlığı 1,25 µm ve difüzyon derinliği ise 140,76 µm olarak belirlenmiştir.



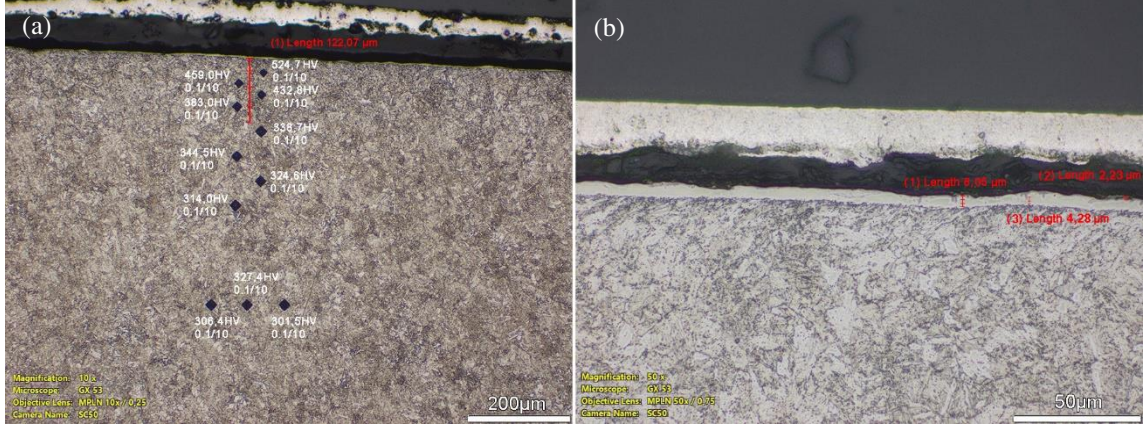
Şekil 36. Kapak-5 numunesine ait iç yapı görüntüleri: (a) Difüzyon derinliği, (b) Tabaka kalınlığı ((1) Bileşik tabaka, (2) Poroz tabaka ve (3) Beyaz tabaka) ölçümleri

Şekil 37’de 570°C-90 dk. nitrokarbürizasyon işlemi sonrasında oluşan bileşik tabaka kalınlığının 9,95 µm, beyaz tabaka kalınlığının 6,88 µm, poroz tabaka kalınlığının 1,67 µm ve difüzyon derinliğinin ise 159,85 µm olduğu gözlenmiştir.



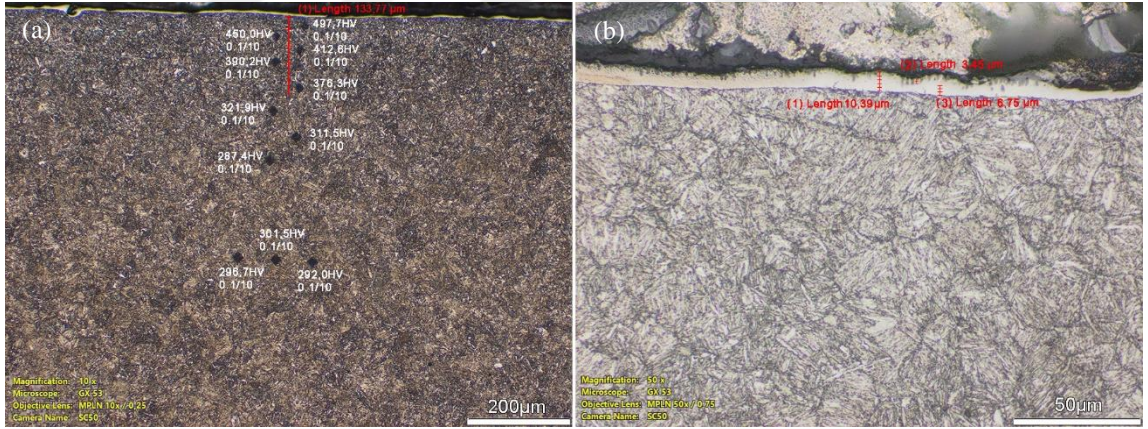
Şekil 37. Kapak-6 numunesine ait iç yapı görüntüleri: (a) Difüzyon derinliği, (b) Tabaka kalınlığı ((1) Bileşik tabaka, (2) Poroz tabaka ve (3) Beyaz tabaka) ölçümleri

Şekil 38’de 580°C-45 dk. nitrokarbürizasyon işlemi sonrasında oluşan bileşik tabaka kalınlığının 6,05 µm, beyaz tabaka kalınlığının 4,28 µm, poroz tabaka kalınlığının 2,23 µm ve difüzyon derinliğinin ise 122,07 µm olduğu görülmüştür.



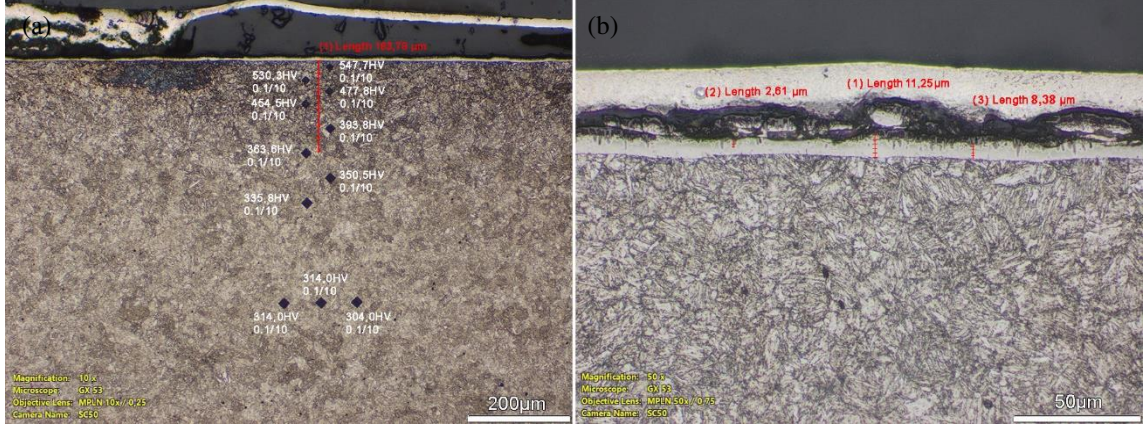
Şekil 38. Kapak-7 numunesine ait iç yapı görüntüleri: (a) Difüzyon derinliği, (b) Tabaka kalınlığı ((1) Bileşik tabaka, (2) Poroz tabaka ve (3) Beyaz tabaka) ölçümleri

Şekil 39’da 580°C-60 dk. nitrokarbürizasyon işlemi sonrasında oluşan bileşik tabaka kalınlığının 10,39 µm, beyaz tabaka kalınlığının 6,75 µm, poroz tabaka kalınlığının 3,45 µm ve difüzyon derinliğinin ise 133,77 µm olduğu gözlenmiştir.



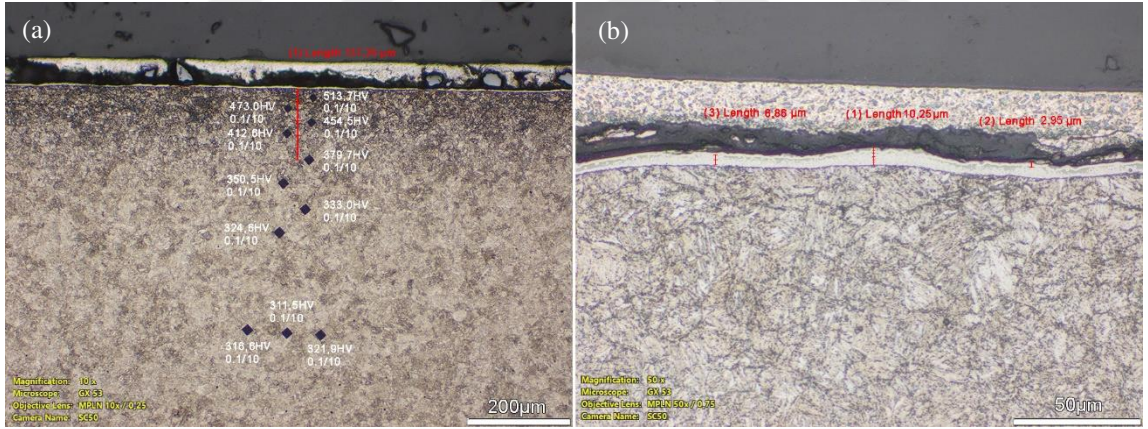
Şekil 39. Kapak-8 numunesine ait iç yapı görüntüleri: (a) Difüzyon derinliği, (b) Tabaka kalınlığı ((1) Bileşik tabaka, (2) Poroz tabaka ve (3) Beyaz tabaka) ölçümleri

Şekil 40’da 580°C-90 dk. nitrokarbürizasyon işlemi sonrasında oluşan bileşik tabaka kalınlığının 11,25 µm, beyaz tabaka kalınlığının 8,38 µm, poroz tabaka kalınlığının 2,61 µm ve difüzyon derinliğinin ise 183,78 µm olduğu görülmüştür.



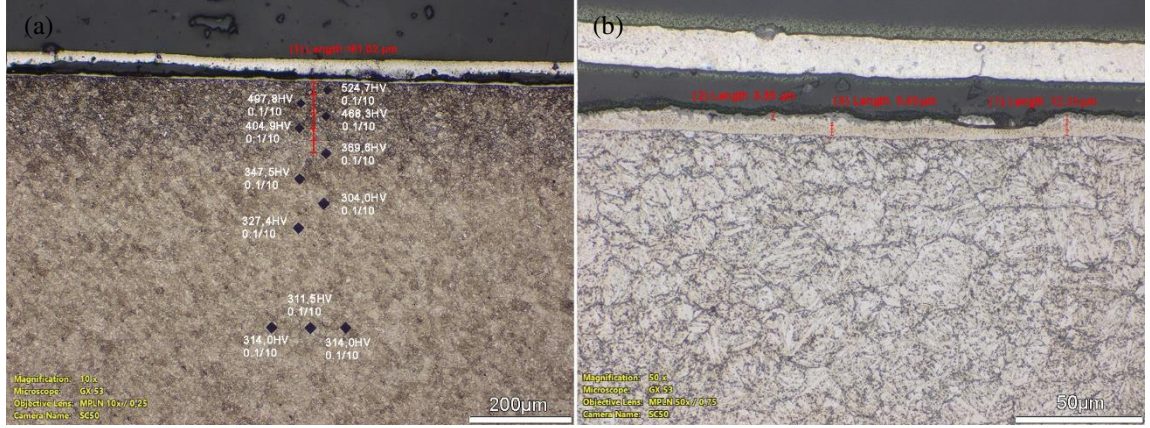
Şekil 40. Kapak-9 numunesine ait iç yapı görüntüleri: (a) Difüzyon derinliği, (b) Tabaka kalınlığı ((1) Bileşik tabaka, (2) Poroz tabaka ve (3) Beyaz tabaka) ölçümleri

Şekil 41’de 590°C-45 dk. nitrokarbürizasyon işlemi sonrasında oluşan bileşik tabaka kalınlığının 10,25 µm, beyaz tabaka kalınlığının 6,86 µm, poroz tabaka kalınlığının 2,95 µm ve difüzyon derinliğinin ise 137,29 µm olduğu gözlenmiştir.



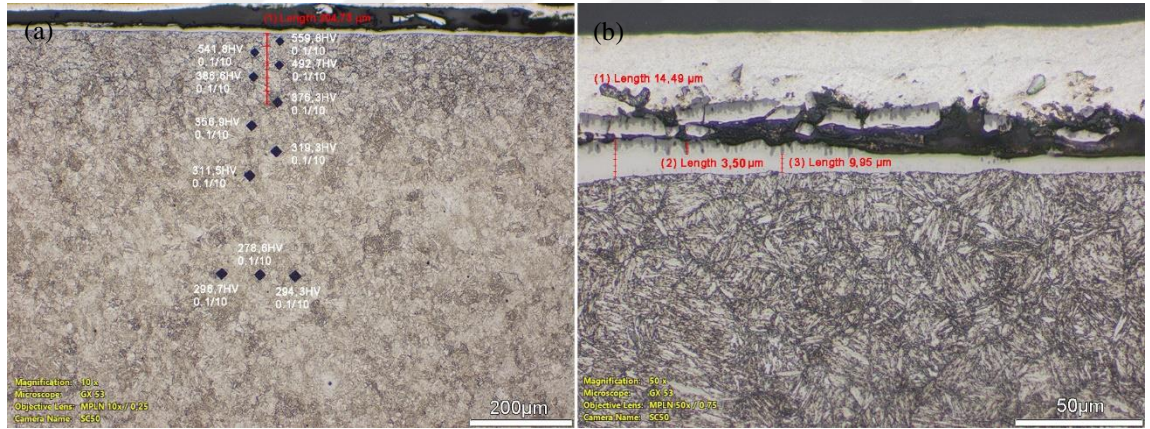
Şekil 41. Kapak-10 numunesine ait iç yapı görüntüleri: (a) Difüzyon derinliği, (b) Tabaka kalınlığı ((1) Bileşik tabaka, (2) Poroz tabaka ve (3) Beyaz tabaka) ölçümleri

Şekil 42’de 590°C-60 dk. nitrokarbürizasyon işlemi sonrasında oluşan bileşik tabaka kalınlığı 12,33 µm, beyaz tabaka kalınlığı 8,45 µm, poroz tabaka kalınlığı 3,35 µm ve difüzyon derinliği ise 161,02 µm olarak belirlenmiştir.



Şekil 42. Kapak-11 numunesine ait iç yapı görüntüleri: (a) Difüzyon derinliği, (b) Tabaka kalınlığı ((1) Bileşik tabaka, (2) Poroz tabaka ve (3) Beyaz tabaka) ölçümleri

Şekil 43’de 590°C-90 dk. nitrokarbürizasyon işlemi sonrasında oluşan bileşik tabaka kalınlığının 14,49 μm , beyaz tabaka kalınlığının 9,95 μm , poroz tabaka kalınlığının 3,5 μm ve difüzyon derinliğinin ise 204,73 μm olduğu gözlenmiştir.



Şekil 43. Kapak-12 numunesine ait iç yapı görüntüleri: (a) Difüzyon derinliği, (b) Tabaka kalınlığı ((1) Bileşik tabaka, (2) Poroz tabaka ve (3) Beyaz tabaka) ölçümleri

Hazırlanan içyapı görüntülerine ait tüm veriler Tablo 21’de özet halinde verilmiştir. Tablo 21’de yer alan verileri kıyaslayabilmek adına Şekil 44, Şekil 45, Şekil 46 ve Şekil 47’de karşılaştırmalı grafikler oluşturulmuştur. Bu grafikler incelendiğinde aşağıdaki çıkarımlar yapılabilir:

- Nitrokarbürizasyon işlemi uygulanan numunelerde en düşük bileşik tabaka kalınlığı; 560°C ve 45 dk şartlarında uygulanan işlemde (K-1) 4,93 μm seviyelerinde elde edilmiştir. En kalın bileşik tabaka kalınlığı ise 590°C ve 90 dk şartlarında uygulanan

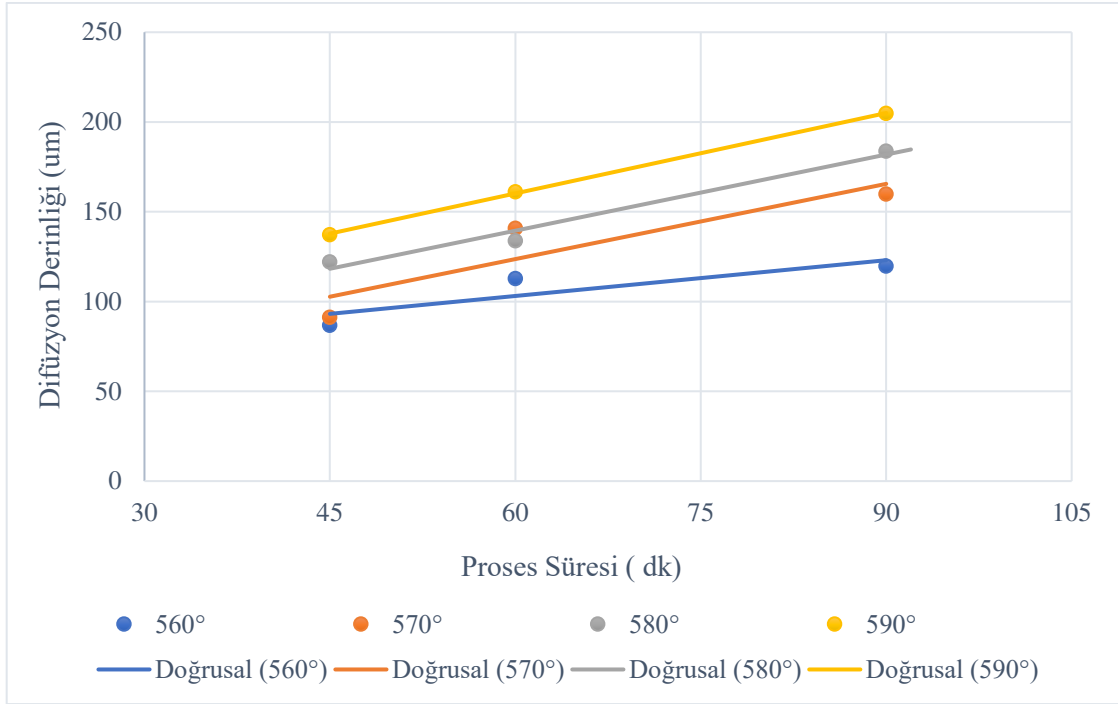
işlemede (K-12) 14,49 μm seviyelerinde elde edilmiştir. Bileşik tabaka kalınlığının sıcaklık ve süre ile orantılı şekilde *Fick difüzyon* yasasına uygun arttığı gözlenmiştir. Nitrokarbürizasyon işlem sıcaklığı arttıkça bileşik tabaka kalınlığının da artması, banyo sıcaklığının artışına bağlı olarak artan atomsal hareketlilik sayesinde daha fazla difüze olan atomların bileşik tabaka kalınlığının artışına sebep olması ile açıklanmaktadır [34]. Fakat çok yüksek proses sıcaklıklarında N atomlarının hareketliliği çok yüksek olacağından, elementel azot oluşturma ihtimalleri oldukça yükselmekte ve bileşik tabaka gözenekli hale gelmektedir [34]. Bileşik tabakanın gözenekli olması aşınma dayanımı haricinde ki mekanik özelliklere olumsuz yönde etki etmesi de göz ardı edilmemelidir [35].

- Bileşik tabakanın düşük banyo sıcaklığına sahip proseslere nispeten yüksek banyo sıcaklığına sahip proseslerde daha homojen olduğu görülmüştür. Nitekim, bu durum düşük sıcaklıktaki proseslerde difüzyonun tane sınırlarında gerçekleşmesinden ve yüksek işlem sıcaklığına sahip proseslerde N ve C atomlarının difüzyon kabiliyetlerinin artmasıyla latis difüzyonunun baskın hale gelmesine bağlı olarak daha üniform bir yapıda oluşmasından kaynaklanmaktadır [34].
- Bileşik tabaka kalınlığının doğrudan beyaz tabaka kalınlığındaki değişim ile doğru orantılı olduğu, sıcaklık ve süre artışı ile arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum bileşik tabaka kalınlığının büyük bir çoğunluğunu beyaz tabakanın oluşturmamasından kaynaklanmaktadır.
- Beyaz tabaka ile birlikte poroz tabakanın da proses süresi ile birlikte artış gösterdiği görülmektedir. Fakat poroz tabakada en belirgin artışın proses sıcaklığındaki artış ile sağlandığı görülmüştür. Bu durum oksit filminin yüzeye tutunmasının oksidasyon sıcaklığına bağlı olması ile açıklanabilmektedir [41]. Fakat oksidasyon sıcaklığının artışı ile oksit filmi gözenekli (poroz) bir hal almaktadır. Yoğun ve bağlanması iyi olan bir oksit filmi nispeten düşük sıcaklıklarda oluşturulmaktadır [41]. Oksidasyon işlem süresi belirli değerin üzerine çıktığında hematit fazı çekirdeklerinin büyüdüğü ve sonrasında yüzeyden parçalanarak pul pul döküldüğü bilinmektedir [40, 21].
- Difüzyon tabakasının süre ve sıcaklık artışı ile birlikte doğru orantılı arttığı tespit edilmiştir. Artan işlem sıcaklığı ile birlikte ise N ve C atomlarının difüzyon kabiliyetleri atomsal hareketlilik ile artmakta ve buna bağlı olarak da difüzyon tabaka kalınlığı artmaktadır [34]. Difüzyon tabakasının belirli kalınlığa ulaştıktan sonra yavaş ilerlediği; sertliğin ise difüzyon tabakasına bağlı olmaksızın arttığı görülmüştür. Bu durum süreyle

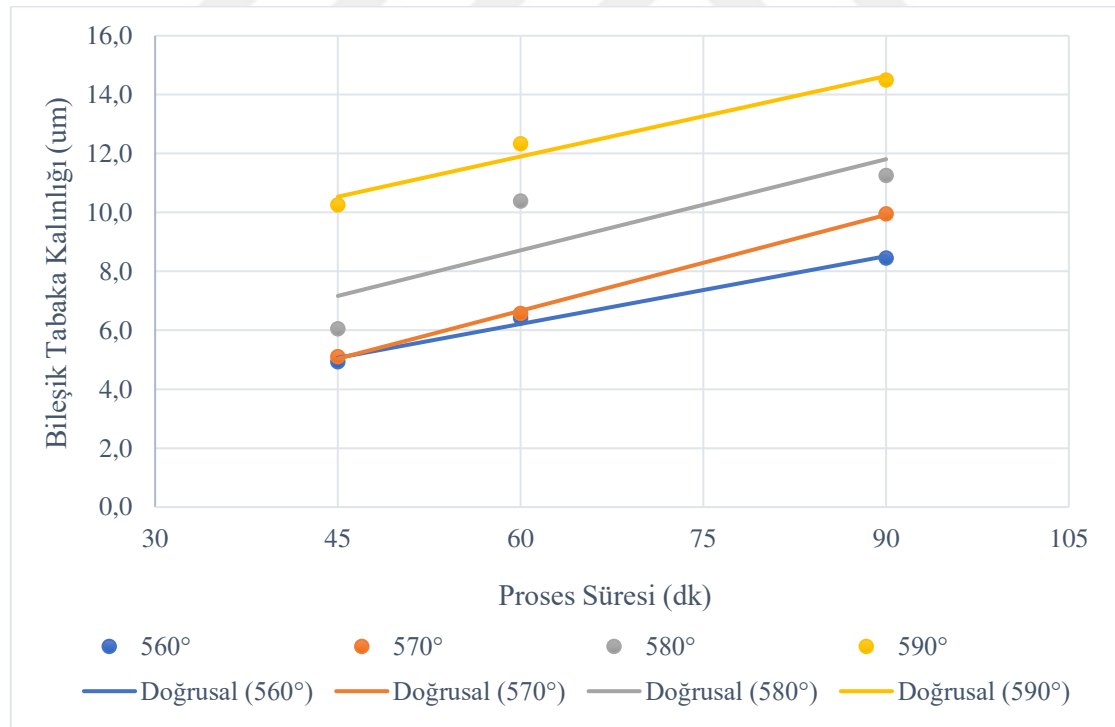
birlikte difüzyon tabakasında artışın çok daha sınırlı olması nedeniyledir [5] . Ayrıca difüzyon tabakasının belirli bir seviyenin üzerine çıkması durumunda çekirdeğe yakın bölgelerdeki sertlik arttığı ve malzeme yapısının kırılğan bir hal aldığı söylenebilir.

Tablo 21. Tüm proseslere ait mikroyapı inceleme verileri (Difüzyon derinliği, bileşik tabaka kalınlığı, beyaz tabaka kalınlığı ve poroz tabaka kalınlığı)

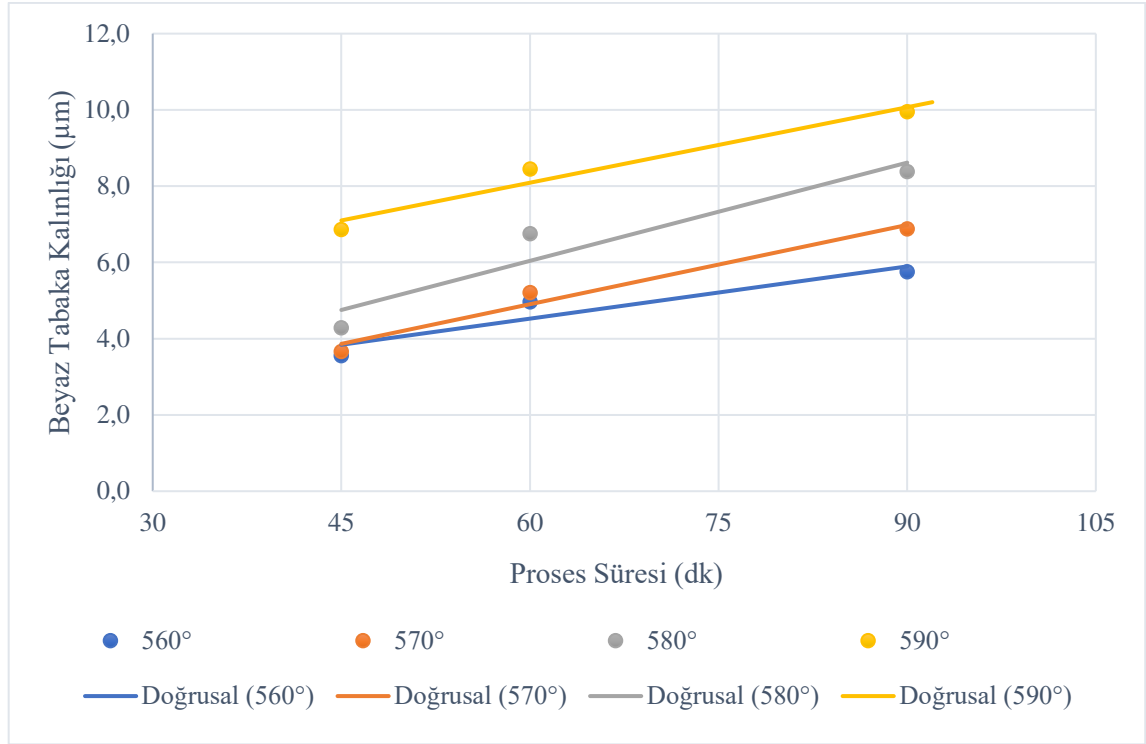
Numune	Sıc. (°)	Süre (dk)	Dif. Der. (um)	Bileşik T. (um)	Poroz T. (um)	Beyaz T. (um)
K-1	560	45	86,75	4,93	1,45	3,55
K-2	560	60	112,71	6,42	1,65	4,96
K-3	560	90	119,83	8,45	1,95	5,75
K-4	570	45	91,30	5,10	1,45	3,66
K-5	570	60	140,76	6,57	1,25	5,21
K-6	570	90	159,85	9,95	1,67	6,88
K-7	580	45	122,07	6,05	2,23	4,28
K-8	580	60	133,77	10,39	3,45	6,75
K-9	580	90	183,78	11,25	2,61	8,38
K-10	590	45	137,29	10,25	2,95	6,86
K-11	590	60	161,02	12,33	3,35	8,45
K-12	590	90	204,73	14,49	3,50	9,95



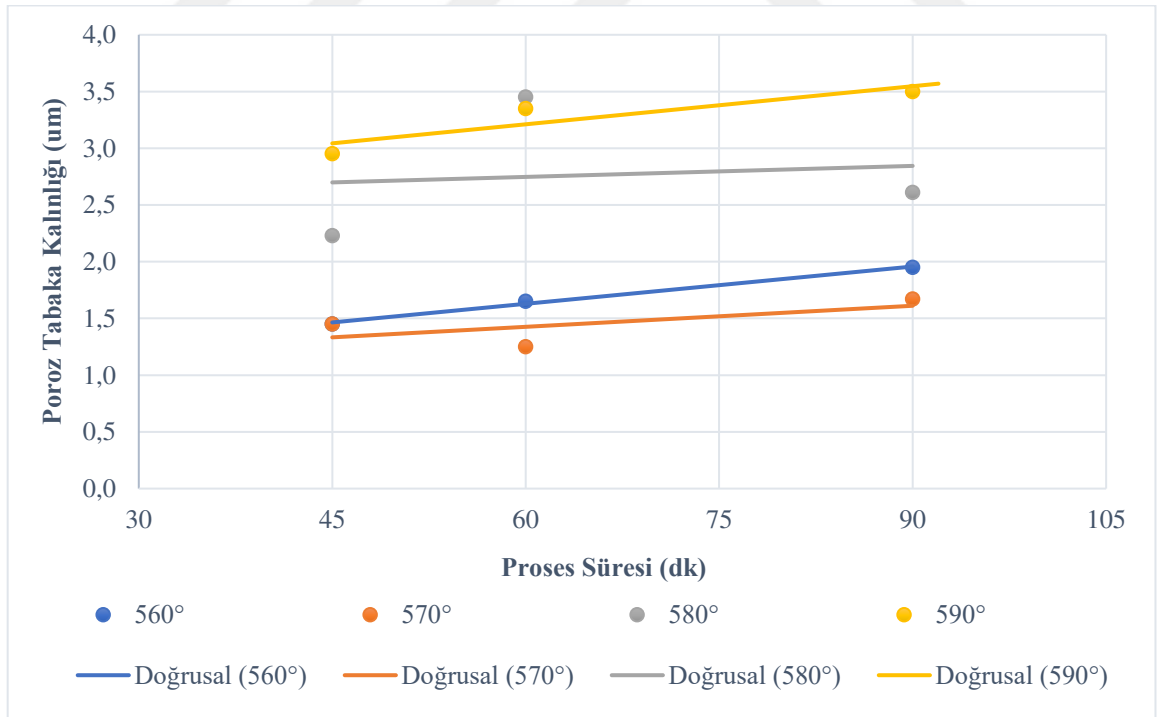
Şekil 44. Difüzyon derinliğinin sıcaklık ve süre ile değişimi



Şekil 45. Bileşik tabaka kalınlığının sıcaklık ve süre ile değişimi



Şekil 46. Beyaz tabaka kalınlığının sıcaklık ve süre ile değişimi



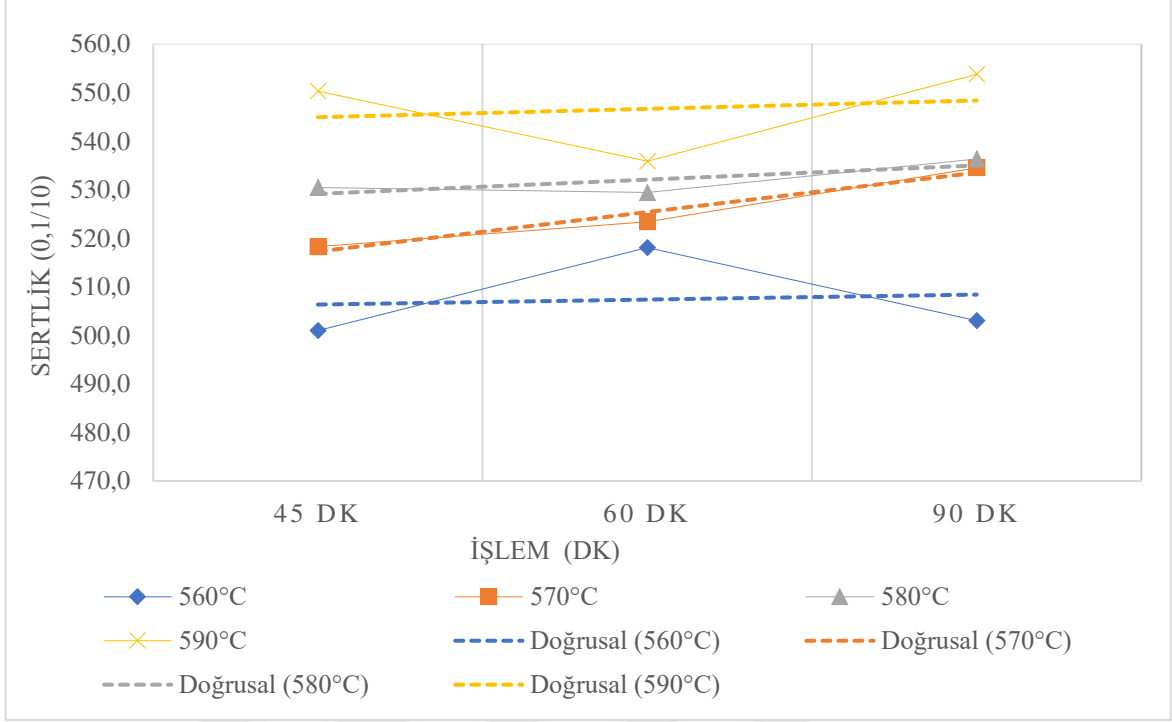
Şekil 47. Poroz tabaka kalınlığının sıcaklık ve süre ile değişimi

3.2.4. Sertlik

Numunelere uygulanan sertlik ölçüm işlemlerine ait sonuçlar Tablo 22’de verilmiştir. Yüzeyden 25 µm derinlikteki ortalama sertlik ölçümlerine ait değerler Şekil 48’de verilmiştir. Tablo 22 ve Şekil 48 incelendiğinde; yüzey sertliğinin sıcaklık ile beraber arttığı, süre ile birlikte belirgin bir değişim (kısmi artışlar mevcut) göstermediği görülmüştür. Bu durum, sıcaklık artışının çelik malzemelerde kafes parametrelerinin büyümesine ve buna bağlı olarak azot atomlarının fazladan yer sağlamasına sebep olması ile açıklanabilir. Böylece düşük sıcaklıklarda çelik malzemelere uzun süreli nitrokarbürizasyon işlemi uygulansa dahi difüzyon tabakası ve beyaz tabaka yeterli seviyelerde oluşmayacak ve buna bağlı olarak da istenilen yüzey sertliği elde edilemeyecektir.

Tablo 22. Numunelere ait ortalama sertlik değerleri ve standart sapma değerleri (Uygulanan yük= 0,1 kg ve Vickers uç)

Numune	Yüzeyden Derinlik (µm)																					
	25		50		75		100		150		200		250		300		500 (Ç)		500 (Ç)		500 (Ç)	
K-1	501	9,3	469	6,3	403	2,8	346	6,1	349	1,2	326	1,4	331	0,5	322	2,3	317	1,5	322	2,0	319	0,8
		-9,3		-6,2		-2,5		-5,3		-0,9		-0,9		-0,7		-2,8		-1,3		-0,5		-1,1
K-2	518	+6,7	499	1,2	444	4,3	403	7,7	364	5,0	339	8,5	315	10,4	324	3,4	313	12,7	325	10,8	326	5,6
		-5,5		-1,2		-3,8		-7,3		-5,4		-9,0		-10,5		-3,9		-13,2		-11,5		-6,3
K-3	503	25,3	470	7,2	403	18,1	365	15,4	339	15,3	309	10,8	305	2,7	298	1,3	297	3,1	290	8,4	278	2,4
		-25,2		-6,4		-16,4		-14,5		-14,4		-9,9		-3,5		-1,3		-2,7		-9,2		-1,6
K-4	518	5,4	499	0,6	427	1,6	364	11,5	364	2,3	321	7,8	334	1,5	307	5,2	314	2,6	304	1,6	301	3,7
		-4,8		-1,1		-0,7		-10,4		-3,2		-7,0		-1,0		-5,5		-1,9		-2,5		-4,3
K-5	523	15,5	494	16,1	455	13,5	425	9,4	394	3,5	350	2,2	329	1,3	320	1,1	291	4,0	311	8,3	327	0,4
		-14,7		-16,2		-13,7		-8,5		-3,6		-2,5		-1,6		-0,7		-3,6		-8,0		-1,1
K-6	535	3,8	521	1,2	470	1,4	449	3,3	418	2,0	373	7,5	338	2,7	333	2,8	303	9,5	310	9,3	320	2,2
		-4,7		-1,9		-1,7		-3,4		-1,5		-6,7		-2,2		-3,1		-8,7		-9,3		-1,0
K-7	531	5,0	455	4,0	431	1,8	375	8,0	334	4,7	345	0,2	323	1,6	317	2,9	304	2,4	318	9,4	314	13,7
		-6,0		-4,2		-2,2		-7,6		-3,5		-0,5		-2,2		-3,0		-2,5		-9,2		-12,5
K-8	529	10,8	456	5,1	418	5,3	395	5,1	379	3,2	334	11,5	319	7,6	299	12,1	306	9,5	309	8,1	309	16,9
		-9,9		-6,0		-5,4		-4,8		-2,7		-12,1		-7,5		-11,6		-9,3		-7,5		-17,0
K-9	536	11,7	515	15,3	466	11,8	443	11,5	386	7,8	361	2,1	342	8,5	329	6,8	316	1,8	318	4,0	312	9,4
		-11,0		-14,4		-10,8		-10,8		-7,2		-2,3		-8,7		-6,0		-2,0		-4,0		-8,0
K-10	550	-2,3	521	7,8	466	11,7	426	12,9	389	10,8	361	9,7	339	6,5	328	3,1	318	2,0	306	5,5	323	2,8
		3,0		-7,3		-11,5		-13,4		-9,3		-10,5		-6,0		-3,4		-1,4		-4,0		-1,1
K-11	536	11,1	508	10,8	471	2,6	409	4,3	372	2,1	363	0,0	315	11,1	328	2,0	316	2,5	306	5,5	311	3,0
		-11,3		-10,2		-2,7		-4,1		-2,4		-0,8		-11,0		-0,6		-2,0		-3,9		-2,1
K-12	554	5,8	530	11,8	491	1,7	393	5,7	372	4,3	354	2,9	320	2,2	317	5,5	298	2,1	289	9,8	303	9,4
		-6,2		-10,9		-1,5		-6,4		-3,5		-3,5		-0,7		-5,5		-1,3		-10,4		-8,7



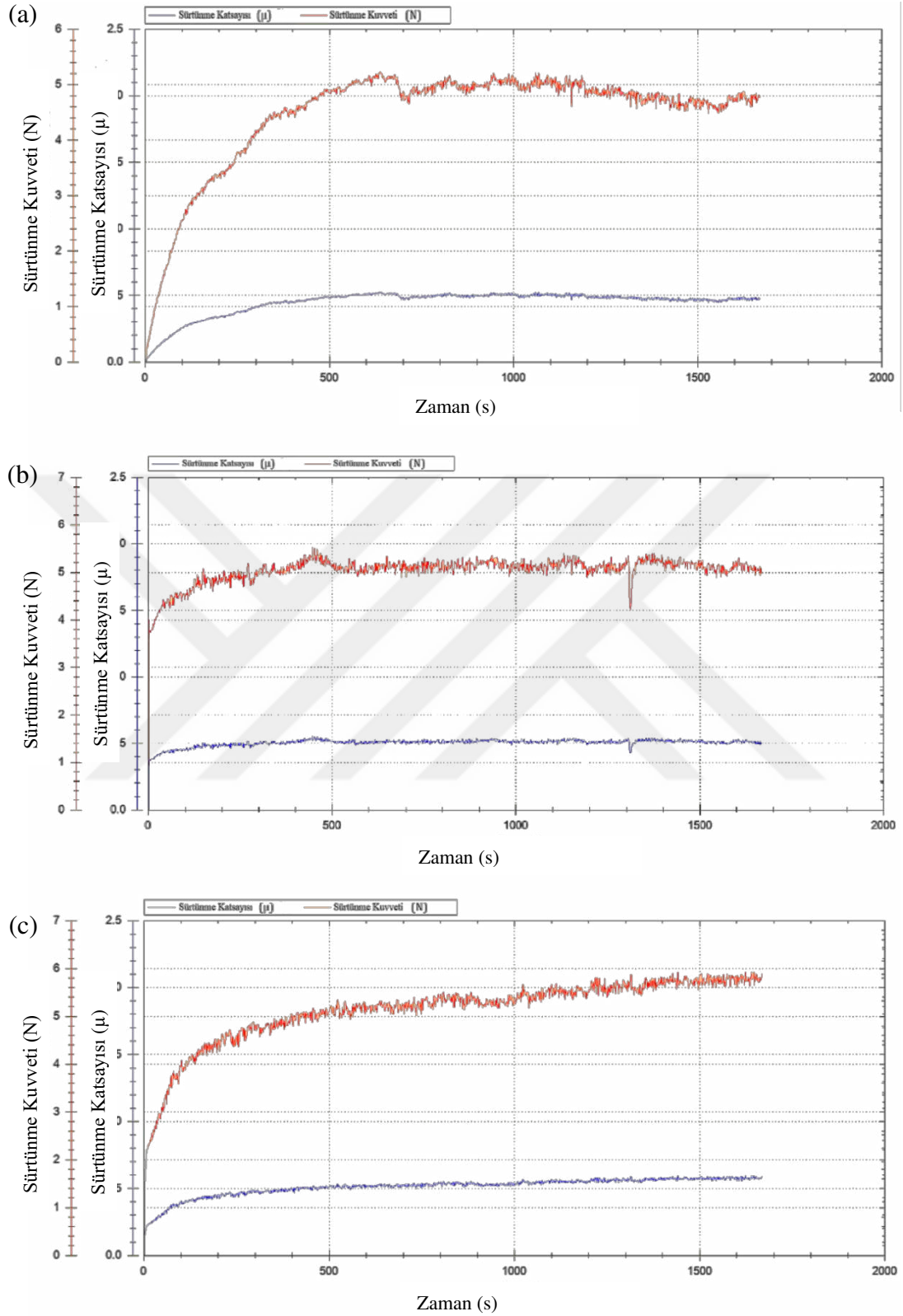
Şekil 48. Yüzeyden 25 µm derinlikteki ortalama sertlik değerleri grafiği

3.2.5. Sürtünme ve Aşınma Testleri

Belirlenen deney numunelerine uygulanan sürtünme ve aşınma testleri sonrasında sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı grafikleri Şekil 49’da verilmiştir. Ölçülen sürtünme kuvveti değerleri ise Tablo 23’de verilmiştir. Şekil 49 ve Tablo 23 incelendiğinde, sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı değerleri büyükten küçüğe doğru sırası ile Numune 10, Numune 8 ve Numune 3 şeklindedir. Şekil 49’de yer alan sürtünme kuvveti/katsayısı-zaman grafiğinde yaşanan değişimlere bakıldığında; Numune 3’ün sürtünme katsayısının 0,03 seviyelerinde başladığı ve 500 saniyeye kadar artan bir grafik sergilediği, 500 saniye sonrasında saçılımı bir grafik yapısı ile 0,4-0,5 seviyelerine yükselip sonrasında sabit sürtünme katsayısı değeri sergilediği dikkat çekmektedir. Numune 8’de sürtünme katsayısının 0,3-0,4 seviyelerinde başladığı ve kısa süre sonra 0,5 seviyelerine çıktığı ve sonrasında da lineer bir dağılım sergilediği görülmektedir. Numune 3 ve Numune 8’deki ortalama sürtünme katsayılarına bakıldığında aralarında önemli bir farkın olmadığı görülmektedir. Numune 10’da ise sürtünme katsayısının 0,1-0,2 seviyelerinde başladığı ve 400 saniyeye kadar düzenli artan bir grafik sergilediği, 500 saniye sonrasında 0,5-0,6 seviyelerine yükselip sonrasında sabit sürtünme katsayısı değeri sergilediği görülmektedir.

Sürtünme ve aşınma testlerinde kullanılan numunelerin nitrokarbürizasyon işlem sıcaklığı sıralamaları yüksekte düşüğe doğru Numune 10, Numune 8 ve Numune 3 şeklindedir. İşlem süresi, sıcaklığı ve sürtünme katsayısı (Tablo 23) verileri incelendiğinde işlem süresinin sürtünme katsayısını arttırmadığı fakat işlem sıcaklığının sürtünme katsayısını arttırdığı söylenebilir. Bu verilere göre işlem süresinin sürtünme katsayısı üzerinde önemli etki yapmadığı, fakat işlem sıcaklığının sürtünme katsayısında farklılıklara sebep olduğu söylenebilir. Ayrıca Tablo 16 ve Tablo 24’de yer alan pürüzlülük değerleri incelendiğinde numunelerin pürüzlülük değerlerinde bariz farklılıklar olmadığından sürtünme kuvveti katsayısına etkisi ile ilgili net çıkarımlar yapılamamıştır.

Numune 8 ve Numune 10’da oldukça kararlı olarak gözlenen sürtünme katsayısının, Numune 3’de aynı kararlılığı göstermediği ve değişken bir karakter izlediği söylenebilir. Bu durum nispeten daha yumuşak bir yapıya sahip olan Numune 3’ün yüzeyinde bulunan sert ve gevrek beyaz tabakanın parçalanarak abrazif partiküllerin ortaya çıkmasına neden olmasıyla ilişkilendirilebilir. Bu abrazif partiküller aşınan yüzeye gömülerek ya da yüzeyde kazıma etkisi yaparak sürtünme katsayısının değişken bir grafik oluşturmaya sebep olabilmektedir. Nitrokarbürleme de aşınma mekanizmasının başlangıçta adhezif olmasına rağmen sert ve kırılgan beyaz tabakanın parçalanmasıyla abrazif aşınmanın en önemli aşınma mekanizması olduğu ve yüzeyde oluşacak tek fazlı ya da baskın ϵ -Fe₂₋₃(N, C) beyaz tabakasının aşınma mukavemetini iyileştirdiği bilinmektedir [18].



Tablo 23. Deney numunelerine ait sürtünme katsayısı değerleri

Numune	Sürtünme Katsayısı Değeri (μ)		
	Maksimum	Minimum	Ortalama
-			
K-3	0,52	0,45	0,49
K-8	0,55	0,47	0,51
K-10	0,59	0,56	0,58

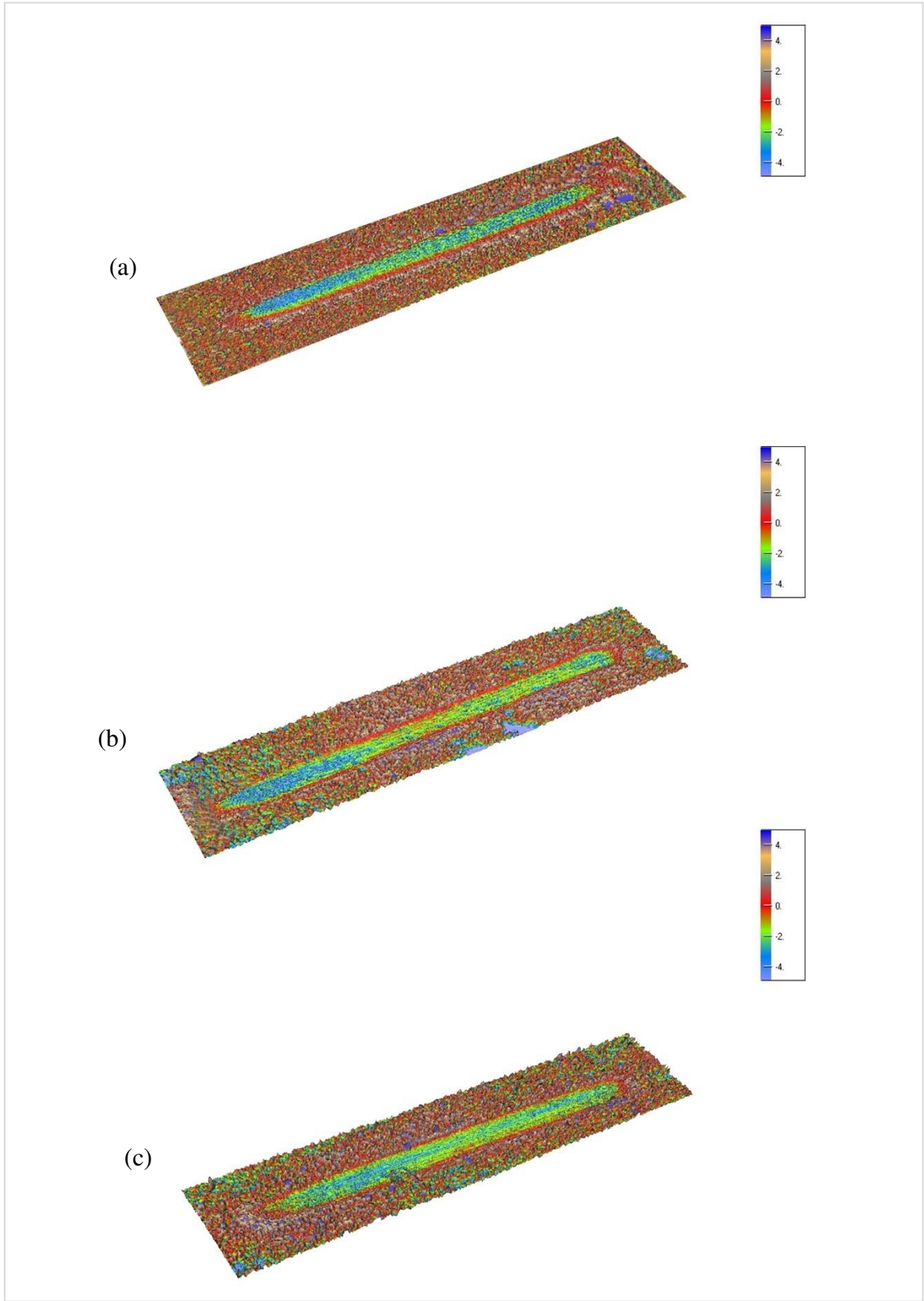
3.2.5.1. Sürtünme ve Aşınma Testi Sonrası Yüzey Topoğrafya ve Pürüzlülüğü İncelemeleri

Sürtünme ve aşınma testleri sonrasında deney numunelerinin aşınmış bölgeleri için yüzey topoğrafyası incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Bu incelemelere ilişkin elde edilen veriler Şekil 50’de görülmektedir. Aşınma yüzeylerine ait yüzey topoğrafyalarının tamamında aynı renk skalası kullanılarak aşınma miktarlarının ve derinliklerinin kıyaslanabilmesi amaçlanmıştır. Sürtünme ve aşınma testi öncesinde ve sonrasında elde edilen tüm teknik verileri birlikte kıyaslayabilmek ve yorumlayabilmek için Tablo 24 hazırlanmıştır. Şekil 50’de yer alan renk skalaları, Şekil 51’de yer alan yüzey pürüzlülük ölçüm görüntüleri ve elde edilen diğer teknik verilerin özet halinde verildiği Tablo 24 incelendiğinde; en yüksek aşınma derinliğinin ve miktarının Numune 3’de olduğu açıkça görülmektedir. Numune 8 ve Numune 10’da ise aşınma miktarının ve aşınma derinliğinin Numune 3’e göre daha az olduğu açıkça görülmekte fakat birbirleri arasında aşınma miktarlarında ve derinliklerinde belirgin bir fark görülmemekle birlikte en az aşınma Numune 8’de görülmektedir (Şekil 51 ve Tablo 24’de yer alan verilerce). Tüm numunelerde aşınmanın strok boyunca her noktada homojen olmadığı ve ilk bölgede (sürtünmenin başladığı ilk nokta; başlangıçta yer alan mavi bölgeler) aşınma derinliğinin daha fazla olduğu açıkça görülmektedir.

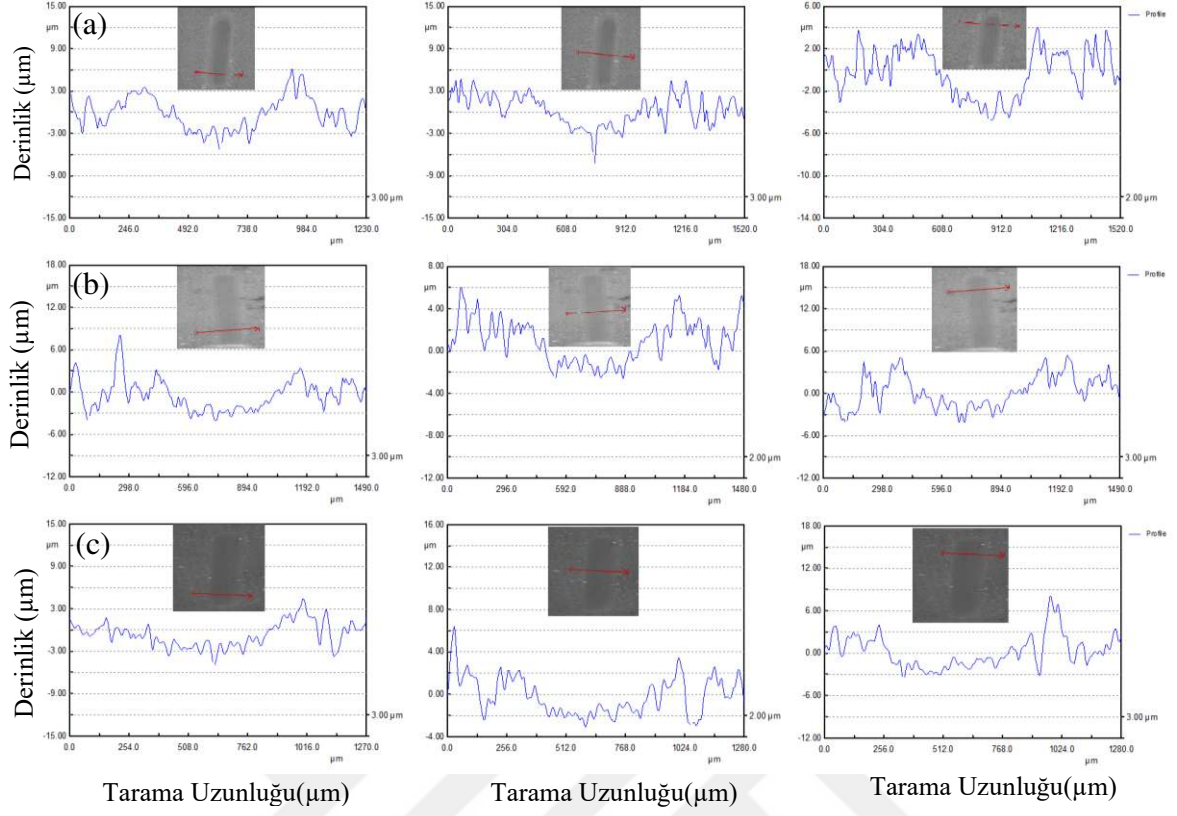
Sürtünme ve aşınma testi uygulanan numunelere ait yüzey pürüzlülüğü değerleri Tablo 17 ve Tablo 19’da görüldüğü üzere sırası ile büyükten küçüğe doğru Numune 3, Numune 8 ve Numune 10 şeklindedir. Fakat yüzey pürüzlülük değerlerinin birbirine yakın olduğu ve bu sebeple de yüzey pürüzlülüğünün aşınmaya etkisinin çok belirgin olmadığı fakat yine de en yüksek pürüzlülüğe sahip olan Numune-3’ün diğer numunelere göre bir miktar daha fazla aşındığı da görülmektedir.

Tablo 21 ve Tablo 24’de görülen bileşik tabaka kalınlıkları sırası ile büyükten küçüğe doğru Numune 8, Numune 10 ve Numune 3 şeklindedir. En kalın bileşik tabakaya sahip olan Numune 8’in en düşük aşınma davranışı sergilediği açıkça görülmektedir (Şekil 50 ve Şekil 51). Numune 10’unda Numune 8’e yakın bir bileşik tabaka kalınlığı sergilediği ve aşınma miktarlarının da benzer olduğu görülmektedir. Fakat en düşük bileşik tabaka kalınlığına sahip olan Numune-3’ün diğer numunelere göre oldukça fazla aşındığı açıkça görülmektedir. Bileşik tabaka kalınlığı ve aşınma derinliği miktarları kıyaslandığında da bileşik tabaka kalınlığı arttıkça aşınma miktarının azaldığı dolayısıyla aşınma direncinin arttığı ifade edilebilmektedir. Bu durum nitrokarbürleme sonrası yüzeyde oluşan baskın hegzagonal sıkıpaket (hcp) yapılı ϵ -Fe₂₋₃ (N, C) fazı içeren beyaz tabakanın yüksek sertliği ve işlem sıcaklığının artışına bağlı olarak artan atomsal hareketlilik sayesinde daha fazla difüze olan atomların bileşik tabaka kalınlığını arttırmasına sebep olması ile açıklanmaktadır [34]. Ayrıca işlem sıcaklığı arttıkça N atomlarının hareketliliği artacağından elementel azot oluşturma ihtimalleri oldukça yükselmekte ve bileşik tabaka gözenekli (poroz) hale gelmektedir [34]. Nitekim, bileşik tabakanın gözenekli yapıda (poroz) olması yüzey pürüzlülüğünü arttırmakta ve aşınma direncine olumlu yönde etki etmektedir [11, 35]. Özetle, bu sert tabaka kalınlığı arttıkça aşınma oranında azalma ve dolayısıyla aşınma direncinde artış olduğu söylenebilir. Beyaz tabaka gibi beyaz tabakanın altında yer alan ve ince taneli alaşım nitrür ve karbürlerin etkisi ile sertlikte kademeli artışın meydana geldiği difüzyon tabakası da aşınmaya olumlu etki etmektedir.

İşlem parametrelerinden biri olan sıcaklığın aşınmaya etkisi ise nitrokarbürizasyon işlem sıcaklığı arttıkça yüzey sertliğinin artması (ϵ nitrokarbür fazı ile ilgilidir) ve buna bağlı olarak da aşınma direncinin arttığı şeklinde yorumlanabilir. Düşük sıcaklıklarda bu fazın (ϵ) yeterince gelişmemiş olması ise, en yüksek aşınmanın en düşük sertliğe sahip olan 560° sıcaklıkta (en düşük sıcaklıkta) gerçekleştirilen numunede (K-3) meydana gelmesine neden olmuştur.



Şekil 50. Sürtünme ve aşınma testi uygulanan deney numunelerine ait üç boyutlu (3D) yüzey topografyası görüntüleri: (a) Numune 3, (b) Numune 8 ve (c) Numune 10



Şekil 51. Sürtünme ve aşınma testi uygulanan deney numunelerine ait iki boyutlu (2D) aşınma izi profili: (a) Numune 3, (b) Numune 8 ve (c) Numune 10

Tablo 24. Sürtünme ve aşınma testi uygulanan numunelerden elde edilen teknik veriler özet tablosu

Numune	K-3	K-8	K-10
Difüzyon Derinliği (µm)	119,83	133,77	137,29
Bileşik Tabaka Kalınlığı (µm)	8,45	10,39	10,25
Beyaz Tabaka Kalınlığı (µm)	5,75	6,75	6,86
Maksimum Aşınma Derinliği (µm)	~ 5,5	~ 3,5	~ 3,7
Sürtünme Kuvveti Katsayısı (ort)	0,49	0,51	0,58
25 µm'daki Sertlik Değeri (HV)	470,8	497,7	513,7
Ra (µm)	2,101	1,922	1,742

4. GENEL SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, AISI 4140 hafif silah çelik malzemelerine nitrokarbürizasyon işlemi öncesi yüzey işlemleri, 12 farklı prosese sahip nitrokarbürizasyon işlemi ve nitrokarbürizasyon işlemi sonrası yüzey işlemlerinden oluşan bir takım yüzey işlemleri uygulanmıştır. Nitrokarbürizasyon öncesi uygulanan yüzey işlemlerinin malzeme üzerindeki etkilerinin incelenmesinin yanında, kumlama ve ultrasonik yıkama işlemlerine ait en iyileme (optimizasyon) işlemleri gerçekleştirilmiştir. Nitrokarbürizasyon işlemi sırasında ise süre ve sıcaklık parametrelerinin AISI 4140 çelik üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca nitrokarbürizasyon sonrası yüzey işlemleri de uygulanarak malzeme üzerindeki etkileri takip edilmiştir. Bu kapsamda elde edilen genel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Taşlama işlemi ile yüzey pürüzlülüğünde bariz bir azalma meydana gelmekte ve tüm yüzeylerde yaklaşık aynı pürüzlülük değerleri elde edilerek homojen bir yüzey elde edilmektedir.
2. S70 çelik bilye ile otomatik kumlama işlemi yüzeyde homojen bir kumlama ve (talaşlı imalat sonrası yüzeylerde) yüzey pürüzlülük değerlerinde bariz bir artış oluşturmaktadır.
3. Sırası ile uygulanan nitrokarbürizasyon ve oksidasyon işlemleri gözenekli (poroz) bir yapı oluşturarak belirgin bir yüzey pürüzlülük artışına neden olmaktadır.
4. Nitrokarbürizasyon ve oksidasyon işlemleri sonrasında ikinci kez kumlama işlemine tabi tutulan numunelerin yüzey pürüzlülüğünde belirgin bir azalma meydana gelmektedir.
5. Kumlama işleminin optimizasyonu sırasında en düşük yüzey pürüzlülük değeri sırası ile cam Küre, S70 çelik bilye ve alümina bilyeler ile kumlanan numunelerde ortaya çıkmaktadır.
6. Kumlama işleminin en iyilemesi (optimizasyonu) sırasında en yüksek difüzyon derinliği cam küre kumu ile kumlanan numunelerde (Proses-2) ve kumlama işlemi uygulanmayan (Proses-4) numunelerde 140-150 µm mertebelerinde elde edilmektedir. Bileşik tabaka kalınlığı ise en iyi sonucu 5-6 µm mertebelerinde cam küre kumu ile kumlanan deney numunelerinde vermektedir.
7. Kumlama işlemi en iyilemesi sırasında, en yüksek temas açısı S70 çelik bilye ile kumlanan numunelerde (Proses-3), en düşük temas açısı kumlama işlemi uygulanmayan yüzeyi zımparalanmış ve parlatılmış numunelerde (Proses-4) ve kumlanan numunelerde ise alümina bilyeler ile kumlanan numunelerde (Proses-2) ortaya çıkmaktadır.

8. Otomatik kumlama sistemi el ile kumlama tezgahlarına kıyasla numunelerde daha homojen ve kararlı bir yüzey oluşturmalarının yanında daha az insan gücü ile daha fazla iş çıkartmakta ve el ile kumlamaya göre seri üretimde süre kaybını azaltarak verimlilik artışı sağlamaktadır.
9. Ultrasonik yıkama ünitesinin parçalarda yüzey temizliğinin haricinde homojen tabaka oluşumuna, difüzyon kalitesine ve banyo ömrüne de olumlu yönde etki ettiği söylenebilir.
10. Nitrokarbürizasyon işlemi sonrasında oluşan ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerine göre işlem süresi ve sıcaklığı arttığında yüzey pürüzlülük değeri de artmaktadır.
11. Nitrokarbürizasyon işlem sıcaklığı ve süresi arttıkça bileşik ve beyaz tabaka kalınlıkları orantılı bir şekilde artmaktadır. Beyaz tabaka ile birlikte gözenekli (poroz) tabaka da proses süresi ile birlikte artmakta, fakat poroz tabakada en belirgin artış proses sıcaklığındaki artış ile sağlanmaktadır.
12. Difüzyon tabakası süre ve sıcaklık artışı ile birlikte doğru orantılı artmaktadır. Difüzyon tabakası belirli kalınlığa ulaştıktan sonra yavaş ilerlemekte; sertlik ise difüzyon tabakasına bağlı olmaksızın artmaktadır.
13. Yüzey sertliği sıcaklık ile beraber artmakta, süre ile birlikte belirgin bir değişim göstermemektedir.
14. Bileşik ve beyaz tabaka kalınlıkları, aşınma derinlikleri ile kıyaslandığında tabaka kalınlıkları arttıkça aşınma miktarı azalmakta ve aşınma direnci artmaktadır. Ayrıca nitrokarbürizasyon ve oksidasyon işlemleri sonrası oluşan gözenekli yapıda aşınma direncini arttırmaktadır.
15. Sertlikte kademeli artışın meydana geldiği difüzyon tabakası da aşınmaya olumlu etki etmektedir.
16. Nitrokarbürizasyon işlem sıcaklığı arttıkça yüzey sertliği artmakta ve buna bağlı olarak aşınma direnci artmaktadır.

5. ÖNERİLER

Tez sonunda elde edilen genel sonuçlar doğrultusunda bu konu hakkında verilebilecek öneriler ise aşağıda verilmiştir:

1. Hafif silah sanayinde kullanılan farklı çelikler için de nitrokarbürizasyon karakterizasyon çalışmaları yürütülebilir.
2. Her deney parçasının homojen kumlanabilmesi ve bütün numunelerde yaklaşık aynı pürüzlülük oluşumunun sağlanabilmesi için kumlama sisteminde kullanılan aparatlar üzerine çalışmalar yapılmalıdır. En iyilenen (optimum) aparat tasarımı ve aparat kapasitesi her parça veya numune için ayrıca çalışılabilir.
3. Hafif silah sanayisinin tabi olduğu teknik şartnamelere uygun mukavemet test atışları yapılarak karakterize edilen deney numuneleri incelenebilir.
4. Hafif silah bileşenlerinde yer alan kritik parçalar için farklı yüzey sertleştirme işlemleri uygulayarak minimum maliyet ile maksimum aşınma ve korozyon direncinin elde edileceği çalışmalar yürütülebilir.
5. Bu tez kapsamında bileşik tabaka kalınlığı arttıkça aşınma miktarının azaldığı görülmekte, fakat bileşik tabaka kalınlığı arttıkça tabakanın yapışma kabiliyetinin yaşanacak değişim üzerine de çalışmalar yürütülebilir.

6. KAYNAKLAR

1. Lampman, S., Introduction to Surface Hardening of Steels, 4, 259-267, ASM International, ASM Handbook.,1991.
2. Yenilmez, A., Plazma Nitrokarbürleşmiş AISI 316 Paslanmaz Çeliğinin Korozyon Direncinin Postoksidasyonla İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2013.
3. Özdemir, U. ve Erten, M., Plazma (iyon) Nitrürleme Yöntemi ve Malzeme Özellikleri Üzerindeki Etkisi, Journal of Aeronautics and Space Technologies, 1,2 (2003) 41-48.
4. Ulu, S., Aytekin, H. ve Said, G., Farklı Çeliğın Bazı Mekanik Özelliklerine Fe-Fe₃C Faz Diyagramında A1-A3 Arasında Yapılan Isıl İşlemlerin Etkisi, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 2 (2006) 1.
5. Karakan, M., Plazma Nitrokarbürleşen AISI 4140 ve 1020 Çeliklerinin Yapısal, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2004.
6. Eker, A.A., Yüzey Sertleştirme İşlemleri, [www.scribd.com](http://www.scribd.com/doc/38624856/Yuzey-Sertlestirme-Islemleri).
<http://www.scribd.com/doc/38624856/Yuzey-Sertlestirme-Islemleri>, 26.02.2022.
7. Yılmaz, U., Gaz Ortamında Nitrürleme ve Nitrokarbürleme Yüzey Sertleştirme İşlemlerinin AISI 4140, 1.7131 ve 1.8550 Çeliklerinin Aşınma, Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 2016.
8. Öncel, E., Yüzey Sertleştirme İşlemlerinin AISI 4140 Çeliğinin Yorulma Dayanımına Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2011.
9. Altakan C., AISI 1010 ve 1040 Çeliklerine Nikel ve Krom Yayındırılarak Yüzey Özelliklerin Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.
10. Chen G., Wang J., Fan H., Wang D., Li X. ve Dong H., Combat Molten Aluminum Corrosion of AISI H13 Steel by Low-temperature Liquid Nitrocarburizing, Journal of Alloys and Compounds, 776 (2019) 702-711.

11. Sohi, M.H., Ebrahimi, M., Raouf, A.H. ve Mahboubi, F., Plazma Nitrokarbürizasyon Sıcaklığının AISI 4140 Çeliğinin Aşınma Davranışı Üzerindeki Etkisi, Yüzey ve Kaplama Teknolojisi, 205 (2010) 84-89.
12. Totten, G., E., Steel Heat Treatment; Metallurgy and Technologies, Second Edition, Taylor and Francis Group LLC, Boca Raton, FL, Oregon, 2006.
13. Bell, T., ASM Handbook, 4, 425-436, ASM International Materials Park, Ohio, 1997.
14. Bhushan, B. ve Gupta, B.K., Hanbook of Triboloji, McGraw-Hill, USA, 1991.
15. Kocabaş, M., Elektrolitik Sert Krom Kaplanmış 1010 ve 1040 Çelik Yüzeylerin Nitrülenmesi ve Nitrokarbürülenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012.
16. Çolak, E., İyon Nitrülenmiş AISI 5140 Çeliğinin Korozyon Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2010.
17. Krishnaraj, N., Iyer, K.J.L., Sundaresan, S. ve Srinivasan, P.B., Optimization of Compound Layer Thickness for Wear Resistance of Nitrocarburized H11 Steels, Wear, 215 (1998) 123-130.
18. Chang, C.N. ve Chen, F.S., Wear Resistance Evaluation of Plasma Nitrocarburized AISI 316L Stainless Steel, Materials Chemistry and Physics, 82 (2003) 281-287.
19. Chen, F.S. ve Chang, C.N., Effect of CH₄ Addition on Plasma Nitrocarburizing of Austenitic Stainless Steel, Surface and Coating Technology, 173 (2003) 9-18.
20. Lee, K. H., Nam, K. S., Shin, P. W., Lee, D. Y. ve Song, Y. S., Effect of Post-Oxidizing Time on Corrosion Properties of Plasma Nitrocarburized AISI 1020 Steel, Materials Letters, 57 (2003) 2060-2065.
21. Denктаş, O., Plazma Nitrokarbürülen AISI 4140 Çeliğinin Tribolojik ve Korozyon Davranışı Üzerine Post-Oksidasyon İşleminin Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2009.
22. Davis, J.R., Davis ve Associates., Surface Hardening of Steels, 44073-0002, First Printing, 1-15, ASM International Materials Park, Ohio, 2002.
23. <https://cdn.bartın.edu.tr/metalurji/d7ee7cd9-f063-4669-8e1c-393503ed6ffb/isil-islemler-12.-hafta.pdf> Yüzey Sertleştirme. 1 Mart 2021.
24. Yüksel, M. ve Meran, C., Malzeme Bilgisi, MMO/543/3, 574 sayfa, 5.Baskı, MMO Yayını, Ankara, 2018.
25. Oğuz, B., Sert Lehimleme, Oerlikon Yayını, İstanbul, 1988.
26. Schneider, M. ve Chatterjee, M., ASM Handbook Steel Heat Treating Fundamentals and Processes, J. Dossett and G.E. Totten, Editors, 4, Ohio, 2013.

27. Grube, W.L. ve Verhoff, S., ASM Handbook, 4, 352-562, ASM International Materials Park, Ohio, 1997.
28. Karamış, M.B., Nair, F. ve Selçuk, B., Borlanmış Malzemelerin Tribolojik Özellikleri, 6. Denizli Malzeme Sempozyumu, Nisan 1995, Denizli, Bildiriler Kitabı, 446-454.
29. Kaestner, P., Olfe, J. ve Rie, K.T., Plasma-Assited Boriding of Pure Titanium and TiAl6V4, Surface Coating Technology, 142-144 (2001) 248-252.
30. Thelning, K.E., Çelik ve Isıl İşlemi Bofors El Kitabı, Hakan Ofset, İstanbul, 1984.
31. Boblet, J. ve Kreutz, M., Tufftride/QPQ Process.
<https://www.houstonunlimitedinc.com/pdf/Tufftride.pdf> 27 Şubat 2022
32. Pérez, M. ve Belzince, F. J., A Comparative Study of Salt-Bath Nitrocarburizing and Gas Nitriding Followed by Post-Oxidation Used as Surface Treatments of H13 Hot Forging Dies, Surface and Coatings Technology, 305 (1993) 146-157.
33. Fares, M. L., Touhami, M. Z., Belaid, M. ve Bruyas, H., Surface Characteristics Analysis of Nitrocarburized (Tenifer) and Carbonitrided Industrial steel AISI 02 Types, Surface and Interface Analysis: An International Journal Devoted to The Development and Application of Techniques for The Analysis of Surfaces, Interfaces and Thin Films, 41,3 (2009) 179-186.
34. Sohi, M. H., Ebrahimi, M., Raouf, A. H. ve Mahboubi, F., Effect of Plasma Nitrocarburizing Temperature on The Wear Behavior of AISI 4140 Steel, Surface and Coatings Technology, 205 (2010) 84-89.
35. Sran, E. R. S. ve Sharma, E. G. R., Surface Modification of A105 Steel Using Tenifer Process of Ferritic Nitrocarburizing, International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, 8 (2020) 104-109.
36. Krishnaraj, N., Srinivasan, P. B., Iyer, K. J. L. ve Sundaresan, S., Optimization of Compound Layer Thickness for Wear Resistance of Nitrocarburized H11 Steels, Wear, 215 (1998) 123-130.
37. Sachs, K. ve Clayton, D. B., Nitriding and Nitrocarburizing in Gaseous Atmospheres, Heat Treatment of Metals, 6,2 (1979) 29-34.
38. Bell, T. ve Lee, S. Y., Gaseous Atmospheric Nitrocarburizing, Heat Treatment, 73 (1973) 99-107.
39. Bell, T., Sun, Y. ve Suhadi, A., Environmental and Technical Aspects of Plasma Nitrocarburizing, Vacuum, 59,1 (2000) 14-23.
40. Sun, Y., Structures and Properties of Oxide Films Formed on Plasma Nitrocarburized Steels by Post-Oxidation Treatments, Heat Treatment of Metals, 29,1 (2002) 15-19.

41. Esfahani, A., Sohi, M.H., Rassizadehghani, J. ve Mahboubi, F., Effect of Treating Atmosphere in Plasma Post-Oxidation of Nitrocarburized AISI 5115 Steel, Vacuum, 82, 3 (2008) 346-351.
42. Alsaran, A., Altun, H., Karakan, M. ve Çelik, A., Effect of Post-Oxidizing on Tribological and Corrosion Behaviour of Plasma Nitrided AISI 5140 Steel, Surface Coating Technology, 176,3 (2004) 344-348.
43. Lee, I., Post-Oxidizing Treatments of the Compound Layer on The AISI 4135 Steel Produced by Plasma Nitrocarburizing, Surface and Coatings Technology, 188 (2004) 669-674.
44. Davis, J. R., Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance, ASM International, 2001.
45. Boban, G., Tribological Comparison of Traditional and Advanced Firearm Coatings, Master's Thesis, California Polytechnic State University, Master of Science in Engineering, Specializations in Materials, San Luis Obispo, 2010.
46. Sweeney, P., Gunsmithing: Pistols and Revolvers, Second Edition, Wisconsin: Krause Publications, 2004.
47. Pfeifer, M., Materials Enabled Designs: The Materials Engineering Perspective to Product Design and Manufacturing, 115-160, Butterworth-Heinemann, 2009.
48. Dunlap, R.F, Gunsmithing, Second Edition, Stackpole Books, Mechanicsburg, Pennsylvania ,1963.
49. Traister, J.E. Professional Care and Finishing of Gun Metal, Tab Books, Blue Ridge Mountain, Pennsylvania, 1982.
50. Develi, F., Plazma Nitrüleme ve Borlama ile Çift Yüzey İşlem Uygulanmış AISI 8620 Çeliğinin Aşınma Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, AKÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 2010.
51. <https://www.hefusa.net/pdfs/Firearm-Surface-Treatments-and-Coatings-from-HEF-2019.pdf>, İnnovative Surface Treatments Coatings. 5 Şubat 2022.
52. Westberg, H.J., Nilsson, P.H., Rosén, B.G. ve Stenbom, B., Manganese Phosphating of Gears and Surface Roughness Consequence, In Tribology Series Elsevier, 38 (2000) 145-153.
53. Duszczuk, J., Siuzdak, K., Klimczuk, T., Strychalska-Nowak, J. ve Zaleska-Medynska, A., Manganese Phosphatizing Coatings: The Effects of Preparation Conditions on Surface Properties, Materials, 11-12 (2018) 2585.
54. Ahmet, Z., Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control, Elsevier, 2006.
55. Khurshudov, A. G., Olsson, M. ve Kato, K., Tribology of Unlubricated Sliding Contact of Ceramic Materials and Amorphous Carbon, Wear, 205 (1997) 101-111.

56. MIL-S-5002D, Surface Treatments and Inorganic Coatings for Metal Surfaces of Weapons Systems, Department of Defense, DC: Systems Engineering and Standardization Department, Washington, 1998.
57. Paz Martínez-Viademonte, M., Abrahami, S. T., Hack, T., Burchardt, M. ve Terryn, H., A Review on Anodizing of Aerospace Aluminum Alloys for Corrosion Protection, Coatings, 10-11 (2020) 1106.
58. Parkinson, R., Properties and Applications of Electroless Nickel, 37, Nickel Development Institute, Toronto, 1997.
59. Bejbl, J., Thin, Dense, Chromium Coating Protects Parts (Tech Spotlight), Advanced Materials and Processes, 160,3 (2002) 37-39.
60. Clauss, F., Solid Lubricants and Self-Lubricating Solids, Academic Press, Inc., New York, 1972.
61. Loomis, W., New Directions in Lubrication, Materials, Wear and Surface Interactions: Tribology in the 80's, Noyes Publications, New Jersey, 1985.
62. Army Research Laboratory, Mechanical and Thermal Properties of Advanced Ceramics for Gun Barrel Applications, Yayın No: ARL-TR-3417, Aberdeen, 2005.
63. Burakowski, T. ve Wierzchon, T., Surface Engineering of Metals: Principles, Equipment, Technologies, CRC Press, Florida, 1998.
64. Myshkin, N. K., Petrokovets, M. I. ve Kovalev, A. V., Tribology of Polymers: Adhesion, Friction, Wear, and Mass-Transfer, Tribology International, 38 (2005) 910-921.
65. Malinova, T., Malinov, S. ve Pantev, N., Simulation of Microhardness Profiles for Nitrocarburized Surface Layers by Artificial Neural Network, Surface and Coatings Technology, 135 (2001) 258-267.
66. Li, S., Manory, R. R. ve Hensler, J. H., Compound Layer Growth and Compound Layer Porosity of Austenite Plasma Nitrocarburized Non-Alloyed Steel, Surface and Coatings Technology, 71,2 (1995) 112-120.
67. Bellas, L., Castro, G., Mera, L., Mier, J. L., García, A. ve Varela, A., Comparative Study of AISI 4340 and AISI 347 Nitrocarburizing by Tenifer-QPQ (R) Process, Revista de Metalurgia, 55,1 (2019).
68. Kaplan, Y., Yıldırım, A. ve Aksöz, S., Nitrokarbürizasyon Sonrası Oksidasyon İşlemlerinin AISI 4140 Çeliğinin Tribolojik Özelliklerine etkisi, Politeknik Dergisi, 23,4 (2020) 1357-1362.
69. Zhang, C. S., Yan, M. F., Sun, Z., Wang, Y. X., You, Y., Bai, B., Chen, L., Long, Z., Li, R. W. ve Li, R. W., Optimizing the Mechanical Properties of M50NiL Steel by Plasma Nitrocarburizing, Applied Surface Science, 315 (2014) 28-35.

70. Li, G. J., Wang, J., Peng, Q., Li, C., Wang, Y. ve Shen, B. L., Influence of Salt Bath Nitrocarburizing and Post-Oxidation Process on Surface Microstructure Evolution of 17-4PH Stainless Steel, Journal of Materials Processing Technology, 207 (2008) 187-192.
71. Marušić, K., Otmačić, H., Landek, D., Cajner, F. ve Stupnišek-Lisac, E., Modification of Carbon Steel Surface by the Tenifer® Process of Nitrocarburizing and Post-Oxidation, Surface and Coatings Technology, 201,6 (2006) 3415-3421.
72. Zhang, J. W., Lu, L. T., Shiozawa, K., Zhou, W. N. ve Zhang, W. H., Effect of Nitrocarburizing and Post-Oxidation on Fatigue Behavior of 35CrMo Alloy Steel in Very High Cycle Fatigue Regime, International journal of Fatigue, 33,7 (2011) 880-886.
73. Qiang, Y. H., Ge, S. R. ve Xue, Q. J., Sliding Wear Behavior of Nitrocarburized Bearing Steel, Materials Science and Engineering: A, 278 (2000) 261-266.
74. Qiang, Y. H., Ge, S. R. ve Xue, Q. J., Microstructure and Tribological Properties of Complex Nitrocarburized Steel, Journal of Materials Processing Technology, 101 (2000) 180-185.
75. Alver, Ü., Güler, O., Çuvalcı, H. ve Demir, D., The Investigation of the Effect of Nitrocarburizing on the Corrosion Resistance of AISI 4140 Steel, Presented at the 19th International Metallurgy and Materials Congress, Ekim 2018, Ankara, Bildiriler Kitabı, 1203-1206.
76. Işık, H., Namlu İçerisindeki Balistik Parametrelerin Modellenmesi, Savunma Bilimleri Dergisi, 15,2 (2016) 157-177.
77. Zhang, Z., Chen, H., Zhong, J., Saraf, G. ve Lu, Y., Fast and Reversible Wettability Transitions on ZnO Nanostructures, Journal of Electronic Materials, 36,8 (2007) 895-899.
78. Adamson, A.W., Physical Chemistry of Surfaces, Fifth Edition, Wiley Interscience, 777, New York, 1990.
79. Han, K. N., Fundamentals of Aqueous Metallurgy, 3-20, SME, Colorado, 2002.

ÖZGEÇMİŞ

Yavuz KÖKSAL, 2013 yılında, Bursa Hürriyet Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2018 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden lisans derecesini aldı. Aynı yıl Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2019 yılında ise Trabzon Silah Sanayi A.Ş. bünyesinde yer alan TİSAŞ Ar-Ge Merkezinde göreve başlayan Yavuz KÖKSAL 2022 yılı itibari ile Ar-Ge Mühendisi olarak görevine devam etmektedir. Yavuz KÖKSAL çeşitli kurum veya kuruluşlar tarafından desteklenen 10 adet projede yürütücü veya araştırmacı olarak görev almıştır. Yavuz KÖKSAL'ın 3. Uluslararası Savunma Sanayi Sempozyumunda yayınlanmış 1 adet uluslararası bildirisi bulunmaktadır.

Yüksek lisans eğitimi kapsamındaki yayını:

- 1- Kumlama İşleminin Nitrokarbürize edilmiş AISI 4140 Çeliği Üzerindeki Etkisi