

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AISI 4340 ISLAH ÇELİĞİNE UYGULANAN YÜZEY
SERTLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Ömer Faruk DİREK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Üretim Programı

Danışman

Doç. Dr. Nilüfer DUYGULU

TEMMUZ, 2025

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AISI 4340 ISLAH ÇELİĞİNE UYGULANAN YÜZEY
SERTLEŞTİRME YÖNTEMLERİ**

Ömer Faruk DİREK tarafından hazırlanan tez çalışması 09.07.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Üretim Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Nilüfer DUYGULU
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Nilüfer DUYGULU, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Aylin ALTINBAY, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Azade YELTEN COŞKUN, Üye
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Danışmanım Doç. Dr. Nilüfer DUYGULU sorumluluğunda tarafımda hazırlanan “AISI 4340 Islah Çeliğine Uygulanan Yüzey Sertleştirme Yöntemleri” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Ömer Faruk DİREK

İmza



*Aileme
ve
eşime*

TEŐEKKÜR

Tez çalıőmam sűresince bilgi, deneyim ve rehberlięiyle bana yol gűsteren, her aőamada desteklerini esirgemeyen danıőman hocam Sayın Doç. Dr. Nilűfer Duygulu'ya en içten teőekkűrlerimi sunarım.

Bu tezin hazırlanmasına katkı sağladıkları için Aęaoęlu Havacılık ve Savunma Sanayi LTD. ŐTİ.'ye, Baykar Makina Sanayi ve Ticaret A.Ő.'ye ve Teknotest Test Merkezi'ne teőekkűr ederim.

Hayatım boyunca her koőulda yanımda olan, maddi ve manevi destekleriyle bugűnlere gelmemde en bűyűk paya sahip olan sevgili anneme ve babama sonsuz teőekkűrű bir borç bilirim.

Bu zorlu sűrete yanımda olan, sabrıyla, anlayıőıyla ve manevi desteęiyle her zaman gű veren sevgili eőime gűnűlden teőekkűr ederim.

Ömer Faruk DİREK

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
TABLO LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT.....	xiv
1 GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez	2
2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	4
2.1 Çelik	4
2.2 İslah Çelikleri	5
2.3 AISI 4340 Çeliği.....	7
2.4 Çeliklerde Yüzey Sertleştirme	8
2.5 Termal Yüzey Sertleştirme.....	9
2.6 Termokimyasal Yüzey Sertleştirme.....	10
2.6.1 Nitrasyon	10
2.6.2 Nitrokarbürizasyon.....	22
2.6.3 Plazma Nitrokarbürizasyon	24
2.6.4 Karbonitrasyon.....	25

2.6.5	Sementasyon (Karbürleme)	26
2.6.6	Borlama	27
2.7	KN Kontrollü Yüzey Sertleştirme	29
3	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	32
3.1	Numune Hazırlama	32
3.2	Nitrasyon ve Nitrokarbürizasyon İşlemi	33
3.3	Karakterizasyon	36
3.3.1	Yüzey Sertlik Karakterizasyonu	36
3.3.2	Yüzey Pürüzlülük Karakterizasyonu.....	37
3.3.3	Difüzyon Derinliği Karakterizasyonu	38
3.3.4	Morfolojik Karakterizasyon (Optik Mikroskop)	41
3.3.5	Morfolojik Karakterizasyon (SEM)	42
3.3.6	Elementel Analiz (EDS).....	43
4	SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR	44
4.1	Nitrasyon Sonuçları	44
4.1.1	Yüzey Sertlik Karakterizasyon Sonuçları	44
4.1.2	Difüzyon Derinliği Karakterizasyon Sonuçları	45
4.1.3	Yüzey Pürüzlülük Karakterizasyon Sonuçları.....	51
4.1.4	Morfolojik Karakterizasyon (Optik Mikroskop) Sonuçları.....	52
4.1.5	Morfolojik Karakterizasyon (SEM) Sonuçları	58
4.1.6	Elementel Analiz (EDS) Sonuçları	60
4.2	Nitrokarbürizasyon Sonuçları.....	64
4.2.1	Yüzey Sertlik Karakterizasyon Sonuçları	64
4.2.2	Difüzyon Derinliği Karakterizasyon Sonuçları	65
4.2.3	Morfolojik Karakterizasyon (Optik Mikroskop) Sonuçları.....	66
5	SONUÇ	68
	KAYNAKÇA	71
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	75

SİMGE LİSTESİ

Al	Alüminyum
NH ₃	Amonyak
Ar	Argon
N ₂	Azot
p	Basınç
FeB	Demir Borür
ϵ	Epsilon
γ'	Gama
g	Gram
H ₂	Hidrojen
C	Karbon
CO ₂	Karbondiyoksit
Cr	Krom
m	Metre
μ m	Mikrometre
mm	Milimetre
nm	Nanometre
N	Newton
KN	Nitrürleme Potansiyeli
°C	Santigrat Derece
Fe ₃ C	Sementit
Ti	Titanyum
Ra	Yüzey Pürüzlülüğü

KISALTMA LİSTESİ

AISI	American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Endüstrisi)
ASTM	American Society for Testing and Materials (Amerika Malzeme ve Testler Derneği)
CNC	Computer Numeric Control (Bilgisayarlı Sayısal Kontrol)
Fe-C	Demir Karbür
Fe-N	Demir Nitrür
DIN	Deutsches Institut für Normung (Almanya Standartları Enstitüsü)
EDS	Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (Enerji Dağıtıcı X-Işını Spektroskopisi)
HV	Hardness Vickers
MeN	Metal Nitrür
OM	Optical Microscope (Optik Mikroskop)
QT	Quenched and Tempered (Sertleştirilmiş ve Temperlenmiş)
SEM	Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
TIG	Tungsten Inert Gaz
XRD	X-Ray Diffraction (X Işını Kırınımı)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Fe-N denge diyagramı	12
Şekil 2.2 Nitrasyon tabakaları ve özellikleri	14
Şekil 2.3 Alaşım elementlerinin sertliğe etkisi	15
Şekil 2.4 Alaşım oranının nitrürleme derinliği üzerindeki etkisi	16
Şekil 2.5 Gaz nitrasyon fırını.....	17
Şekil 2.6 Gaz nitrasyon prosesi difüzyon mekanizması.....	19
Şekil 2.7 Lehrer diyagramı	30
Şekil 3.1 AISI 4340 ıslah çeliğine uygulanan yüzey sertleştirme adımları.....	32
Şekil 3.2 Thermo Scientific ARL 3460 optik emisyon spektrometre cihazı.....	33
Şekil 3.3 Numune görüntüsü a)Hazırlanmış numune b)Teknik çizim.....	33
Şekil 3.4 Nitrasyon işlemi için kullanılan parametreler	34
Şekil 3.5 Nitrokarbürizasyon işlemi için kullanılan parametreler	34
Şekil 3.6 Teknovak DGN-10 nitrasyon fırını	35
Şekil 3.7 Karakterizasyon işlem adımları.....	36
Şekil 3.8 Innovatest Vickers sertlik ölçüm cihazı.....	37
Şekil 3.9 Mitutoyo SJ-210 178-560-01D yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı.....	37
Şekil 3.10 Metkon Metacut–M 250 Cut-Off Machine.....	38
Şekil 3.11 METSPRE BC-45 sıcak bakalite alma cihazı.....	39
Şekil 3.12 Metkon Forcipol 202 Zımparalama ve Parlatma Cihazı.....	40
Şekil 3.13 DIN 50190-3 standardında difüzyon derinliği ölçümünün şematize hali	41
Şekil 3.14 Nikon Eclipse MA100 optik mikroskop cihazı.....	42
Şekil 3.15 Hitachi SU5000 SEM cihazı	43
Şekil 4.1 Yüzey sertlik değerlerinin karşılaştırılması	45
Şekil 4.2 3 saat nitrasyon numunesi sertlik taraması	46
Şekil 4.3 4 saat nitrasyon numunesi sertlik taraması	47
Şekil 4.4 6 saat nitrasyon numunesi sertlik taraması	48

Şekil 4.5	10 saat nitrasyon numunesi sertlik taraması	50
Şekil 4.6	Nitrasyon numuneleri difüzyon derinliklerinin karşılaştırması	51
Şekil 4.7	Yüzey pürüzlülük değerleri.....	52
Şekil 4.8	Nitrasyon numunelerinin beyaz tabaka kalınlık değerleri	53
Şekil 4.9	3 saat nitrasyon numunesine ait optik mikroskop görüntüleri a)Görüntü 1 b)Görüntü 2.....	54
Şekil 4.10	4 saat nitrasyon numunesine ait optik mikroskop görüntüleri a)200x büyütme b)500x büyütmeye	55
Şekil 4.11	6 saat nitrasyon numunesine ait optik mikroskop görüntüleri a)Görüntü 1 b)Görüntü 2.....	56
Şekil 4.12	10 saat nitrasyon numunesine ait beyaz tabaka görüntüleri a)200x büyütme b)500x büyütmeye	57
Şekil 4.13	4 saat nitrasyon numunesine ait SEM görüntüleri a)9000x büyütmeye b)10000x büyütmeye c)12000x büyütmeye.....	59
Şekil 4.14	10 saat nitrasyon numunesine ait SEM görüntüleri a)5000x büyütmeye b)3000x büyütmeye.....	60
Şekil 4.15	4 saat nitrasyon numunesine ait EDS analizi yapılan noktalar	61
Şekil 4.16	Spektrum 8 noktasına ait EDS analiz sonuçları görüntüsü	62
Şekil 4.17	4 saat nitrasyon numunesine ait ağırlıkça %N miktarları.....	62
Şekil 4.18	10 saat nitrasyon numunesine ait EDS analizi yapılan noktalar	63
Şekil 4.19	Spektrum 12 noktasına ait EDS analiz sonuçları görüntüsü	63
Şekil 4.20	10 saat nitrasyon numunesine ait ağırlıkça %N miktarları	64
Şekil 4.21	Nitrokarbürizasyon numunesine ait yüzey sertlik değişimi.....	65
Şekil 4.22	Nitrokarbürizasyon numunesi sertlik taraması.....	66
Şekil 4.23	Nitrokarbürizasyon numunesine ait optik mikroskop görüntüleri a)Görüntü 1 b)Görüntü 2	67

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Islah çeliklerinin kimyasal kompozisyonları	7
Tablo 2.2 AISI 4340 çeliğinin kimyasal bileşimi.....	8
Tablo 2.3 Fe-N atomlarının kristal yapıları ve azot miktarları	13
Tablo 3.1 AISI 4340 malzemesinin kimyasal analizi	33
Tablo 3.2 Nitrasyon ve nitrokarbürizasyon işlem parametreleri.....	34
Tablo 4.1 Nitrasyon öncesi ve sonrası yüzey sertlik değerleri.....	44
Tablo 4.2 3 saat nitrasyon numunesi sertlik değerleri ve difüzyon derinliği	46
Tablo 4.3 4 saat nitrasyon numunesi sertlik değerleri ve difüzyon derinliği	47
Tablo 4.4 6 saat nitrasyon numunesi sertlik değerleri ve difüzyon derinliği	48
Tablo 4.5 10 saat nitrasyon numunesi sertlik değerleri ve difüzyon derinliği	49
Tablo 4.6 Nitrokarbürizasyon öncesi ve sonrası yüzey sertlik değerleri	65
Tablo 4.7 Nitrokarbürizasyon numunesi sertlik değerleri ve difüzyon derinliği ..	66

AISI 4340 Islah Çeliğine Uygulanan Yüzey Sertleştirme Yöntemleri

Ömer Faruk DİREK

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Nilüfer DUYGULU

AISI 4340 çeliği, yüksek çekme dayanımı, tokluk ve ısıl işlem kabiliyeti sunan düşük alaşımlı bir ıslah çeliğidir. Bu özellikleri sayesinde havacılık, otomotiv ve savunma sanayi gibi kritik uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Ayrıca, içerdiği alaşım elementleri sayesinde AISI 4340 çeliği nitrasyon ve nitrokarbürizasyon yüzey sertleştirme işlemlerine oldukça uygun görülmektedir. Termokimyasal yüzey sertleştirme yöntemlerinden nitrasyon ve nitrokarbürizasyon işlemleri sayesinde, malzemenin yüzeyinde yüksek sertliğe sahip tabakalar oluşturulurken, çekirdek yapısı tokluğunu korumaya devam etmektedir.

Bu tez çalışmasında AISI 4340 çeliğinden hazırlanan numunelere 520°C'de 3, 4, 6 ve 10 saat sürelerinde gaz nitrasyon ve 565°C'de 2 saat gaz nitrokarbürizasyon işlemleri uygulanmıştır. Uygulanan bu yüzey sertleştirme işlemleri için KN (nitrüleme potansiyeli) kontrollü bir fırın tercih edilmiş olup farklı KN değerlerinde işlemler gerçekleştirilmiştir. Uygulanan işlemlerin malzeme üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla çeşitli karakterizasyon yöntemleri

kullanılmıştır. Bunlar; yüzey sertlik ve yüzey pürüzlülük ölçümü, sertlik taraması ile difüzyon derinliklerinin hesaplanması, optik mikroskop ve SEM incelemeleri ile birlikte EDS analizidir.

Yüzey sertlik ölçümleri sonucunda 6 saat nitrasyon uygulanan numunenin 618 HV ile en yüksek yüzey sertliğine sahip olduğu görülürken nitrasyon süresinin daha da uzaması durumunda yüzey sertliğinde düşüş olduğu görülmüştür. Ancak nitrasyon süresindeki artışın beyaz tabaka kalınlığını ve difüzyon derinliğini arttırdığı görülmüştür. Nitrasyon işleminin yüzey pürüzlülüğüne önemli ölçüde etkisi olmadığı görülmüştür. EDS analizi sonucunda yüzeye yakın bölgelerde önemli miktarda azot varlığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: AISI 4340 Çeliği, Gaz Nitrasyon, Gaz Nitrokarbürizasyon, Yüzey Sertliği, Beyaz Tabaka, Difüzyon Derinliği

Surface Hardening Methods Applied to AISI 4340 Reclamation Steel

Ömer Faruk DİREK

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Nilüfer DUYGULU

AISI 4340 steel is a low-alloy, quenched, and tempered steel that offers high tensile strength, toughness, and excellent heat treatment capabilities. Due to these properties, it is widely preferred in critical applications such as aerospace, automotive, and defense industries. Furthermore, the presence of alloying elements makes AISI 4340 highly suitable for nitriding and nitrocarburizing surface hardening treatments. Through thermochemical surface hardening methods such as nitriding and nitrocarburizing, it is possible to form high-hardness layers on the surface of the material while maintaining the toughness of the core structure.

In this thesis study, gas nitriding was applied to AISI 4340 steel specimens at 520°C for 3, 4, 6, and 10 hours, and gas nitrocarburizing was carried out at 565°C for 2 hours. A KN-controlled (nitriding potential) furnace was used for these surface hardening treatments, and the processes were conducted at different KN values. To evaluate the effects of these treatments on the material, various characterization techniques were employed. These include surface hardness and roughness measurements, hardness profiling for diffusion depth calculations,

optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM), and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) analyses.

According to surface hardness measurements, the specimen subjected to 6 hours of nitriding exhibited the highest surface hardness value of 618 HV. However, further extending the nitriding time led to a decrease in surface hardness. On the other hand, increasing the nitriding duration resulted in greater white layer thickness and deeper diffusion zones. It was also observed that the nitriding process had no significant effect on surface roughness. EDS analysis revealed a significant presence of nitrogen in regions close to the surface.

Keywords: AISI 4340 Steel, Gas Nitration, Gas Nitrocarburization, Surface Hardness, White Layer, Diffusion Depth

1.1 Literatür Özeti

Günümüz endüstriyel uygulamalarında, makine elemanlarından beklenen performansın artmasıyla birlikte malzemelerin yalnızca hacimsel özellikleri değil, yüzey özellikleri de kritik hale gelmiştir. Özellikle aşınma, yorulma ve korozyon gibi yüzey kaynaklı hasar mekanizmalarının malzeme ömrü üzerindeki belirleyici etkisi, yüzey mühendisliği alanının önemini her geçen gün artırmaktadır. Bu bağlamda, yüzey sertleştirme işlemleri, malzemelerin mekanik ve tribolojik özelliklerini geliştirmeye yönelik etkili yöntemler olarak öne çıkmaktadır. Geleneksel ısıtma işlemlerinin yanı sıra, daha kontrollü ve yüzeye odaklı özellik değişimi sağlayan termokimyasal işlemler, mühendislik çelikleri üzerinde sıklıkla tercih edilmektedir [1, 2, 3].

Termokimyasal yüzey sertleştirme işlemleri arasında nitrasyon ve nitrokarbürizasyon, düşük sıcaklıklarda sert yüzey tabakaları oluşturarak çekirdek tokluğunu korumaları nedeniyle avantaj sağlamaktadır. Bu işlemler, özellikle nitrür yapıcı elementler içeren alaşımlı çeliklerde daha etkili sonuçlar vermektedir. Nitrasyon işlemi; gaz, sıvı ve plazma ortamlarında gerçekleştirilebilen, yüzeye azot difüzyonuyla sert bir bileşik tabakası ve difüzyon bölgesi oluşturan bir uygulamadır. Nitrokarbürizasyon ise hem azot hem karbonun yüzeye difüzyonuyla daha karmaşık bir mikro yapı meydana getirerek aşınma ve korozyon direncini artırmayı hedeflemektedir. Her iki işlemde de sıcaklık, süre ve atmosfer kompozisyonu gibi parametrelerin optimize edilmesi, elde edilecek yüzey kalitesini doğrudan etkilemektedir. Özellikle gaz nitrasyon işleminde, nitrürleme potansiyelini temsil eden KN değerinin kontrol altında tutulması, işlem

kararlılığı ve tekrarlanabilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle modern nitrasyon uygulamalarında KN kontrollü fırın sistemleri tercih edilmekte olup, bu sistemler sayesinde yüzey bileşiminin ve oluşan tabaka kalınlıklarının hassas biçimde yönetilmesi mümkün hale gelmektedir [2, 4, 5, 6].

Nitrasyon ve nitrokarbürizasyon işlemlerine uygunluğu ile bilinen AISI 4340 çeliği, içeriğinde krom (Cr), molibden (Mo) ve alüminyum (Al) gibi nitrür yapıcı elementleri barındırması sayesinde yüzey sertleştirme uygulamalarında sıkça tercih edilmektedir. Havacılık, otomotiv ve savunma sanayi gibi yüksek performans gerektiren alanlarda yaygın olarak kullanılan bu çelik, sahip olduğu yüksek çekme dayanımı ve tokluk özellikleri ile hem mekanik hem tribolojik uygulamalar için uygun bir altlık oluşturmaktadır [7, 8, 9].

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının temel amacı, mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan AISI 4340 çeliği üzerinde uygulanan nitrasyon ve nitrokarbürizasyon işlemlerinin, farklı işlem parametrelerinde malzeme yüzeyinde meydana getirdiği yapısal ve mekanik değişimleri kapsamlı bir şekilde incelemektir. Bu doğrultuda, yüzey sertliği, pürüzlülük, difüzyon derinliği ve mikro yapı gibi özelliklerin işlem parametrelerine bağlı olarak nasıl değiştiği deneysel yöntemlerle analiz edilerek, yüzey sertleştirme işlemlerinin etkinliğinin değerlendirilmesi hedeflenmektedir. Elde edilen veriler doğrultusunda, özellikle yüksek performans gerektiren endüstriyel uygulamalarda optimum yüzey özelliklerini sağlayacak işlem parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır.

1.3 Hipotez

Nitrasyon ve nitrokarbürizasyon işlemlerinde kullanılan sıcaklık, işlem süresi ve nitrürleme potansiyeli (KN) gibi proses parametrelerindeki değişiklikler, AISI 4340 çeliği üzerinde oluşan yüzey özelliklerinde anlamlı farklılıklara neden olmaktadır. Uygun şekilde optimize edilen işlem koşulları sayesinde hem yüzey sertliği hem de difüzyon derinliği artırılabilen; böylece malzemenin aşınma ve

korozyon direnci önemli ölçüde geliştirilebilmektedir. Özellikle KN kontrollü gaz nitrasyon sistemlerinin kullanımı, tekrarlanabilir ve homojen yüzey kalitesi elde edilmesinde kritik bir rol oynamaktadır [2, 5, 7]. Bu çalışmada, farklı işlem parametrelerinin yüzey özellikleri üzerindeki etkileri kapsamlı biçimde değerlendirilmiş ve elde edilen bulgular doğrultusunda mühendislik uygulamalarına yönelik öneriler geliştirilmiştir.



2.1 Çelik

Çelik, esas olarak demir ve karbonun bir alaşımı olup mekanik özellikleri ve kimyasal bileşimi değişiklik gösteren bir mühendislik malzemesidir. İçerdiği karbon oranı genellikle %0,02 ile %2,1 arasında değişmektedir. Çeliğin mukavemeti, sünekliği ve işlenebilirliği, karbon oranı ve ek olarak kullanılan diğer alaşım elementleri (örneğin Cr, Ni, Mo gibi) ile ayarlanabilmektedir. Endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bu malzeme, inşaat, otomotiv, enerji ve imalat gibi birçok sektörde önemli bir yere sahiptir [10, 11, 12].

Çelik, kullanım alanına, sahip olduğu bileşim ve özelliklere göre farklı türlere ayrılmaktadır. Karbon oranı ve içerdiği alaşım elementlerine bağlı olarak farklı mekanik ve fiziksel özellikler kazanmaktadır. Karbon çelikleri, çelik türleri arasında en yaygın olanıdır ve karbon oranına göre sınıflandırılmaktadır. Düşük karbona sahip çelikler, süneklik ve kaynaklanabilirlik açısından avantaj sağlarken, yüksek karbona sahip çelikler sertlik ve aşınma direnci ile öne çıkmaktadır [7, 10, 13].

Paslanmaz çelikler, minimum %10,5 Cr içeriği sayesinde korozyona karşı direnç göstermekte ve özellikle kimya, gıda ve medikal sektörlerinde tercih edilmektedir. Östenitik, ferritik, martensitik ve dubleks gibi alt grupları, farklı mekanik ve korozyon özellikleri sunmaktadır. Alaşımli çelikler ise krom, nikel, vanadyum gibi elementlerin eklenmesiyle özelleştirilmekte ve genellikle yüksek mukavemet, korozyon direnci veya yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır [8, 10, 11].

İslah çelikleri, ısıtılma işlem sonrası yüksek mukavemet ve darbe dayanımı sağlayarak otomotiv ve makine sektörlerinde yaygın olarak kullanılırken takım çelikleri ise sertlik ve aşınma direncine odaklanmış olup genellikle kesici takımlar ve

kalıpların üretiminde tercih edilmektedir. Yapısal çelikler, inşaat ve altyapı projeleri için geliştirilmiş olup düşük karbon içeriği ve iyi şekillendirilebilirlik özellikleriyle dikkat çekmektedir. Otomotiv sektörüne yönelik çelikler ve yay çelikleri gibi özel kullanım alanlarına hitap eden türler de bulunmaktadır [9, 12].

Nitrasyon çelikleri ise yüzey sertliği, aşınma direnci ve yorulma dayanımı sağlamak amacıyla nitrasyon işlemine uygun olarak tasarlanmış özel çelik türleridir. Bu çelikler, genellikle Cr, Mo, Al gibi alaşım elementleri içerir ve yüksek yüzey sertliği ile birlikte çekirdek mukavemetini koruma avantajı sunmaktadır. Takım parçaları, motor bileşenleri ve dişli sistemleri gibi yüksek dayanıklılık gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir [9, 10, 13].

Çelik türlerinin bu çeşitliliği, malzemenin farklı sektörlerde geniş bir yelpazede kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Bu farklı türler, çelikteki karbon oranı, alaşım elementleri ve uygulanan işlemler ile özelleştirilmektedir [10, 11].

2.2 Islah Çelikleri

Islah çelikleri, kimyasal bileşimleri ve özellikle karbon içeriği bakımından sertleştirme işlemlerine uygun olan, su verme ve temperleme gibi ısı işlemler sonucunda yüksek çekme dayanımı ve tokluk özelliği kazanan alaşım ve alaşımsız makine imalat çelikleridir. Islah işlemi, sertleştirme ve bunu takip eden menevişleme süreçlerinin bir arada uygulandığı bir ısı işlem prosedürü olarak tanımlanmaktadır. Sertleştirme işlemi sonucunda çeliğin çekme mukavemeti en üst seviyeye ulaşırken, menevişleme aşamasında bu değer kontrollü bir şekilde düşürülerek malzemeye darbe tokluğu kazandırılmaktadır [11, 12].

Bu tür çeliklerde, yeterli sertlik seviyesinin elde edilmesi amacıyla karbon içeriği, diğer çelik türlerine kıyasla daha yüksektir. Özellikle kalın kesitli parçalarda sertlik derinliğinin kritik bir faktör olması sebebiyle, bu parçaların üretiminde genellikle alaşım ıslah çelikleri tercih edilmektedir. Malzemenin sertlik dağılımını ve sertleşebilirlik özelliklerini analiz etmek için Jominy testi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu test, malzemenin sertleştirme sıcaklığına kadar ısıtıldıktan sonra bir ucunun hızlı bir şekilde soğutulmasıyla farklı mesafelerdeki sertlik değerlerini ölçmektedir [11, 12].

Islah elikleri, ıslı işlem sonrasında elde edilen mekanik özellikleri sayesinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Pimler, krank milleri, akslar, miller, piston kolları, trbın bileşenleri, cıvata ve somunlar, dişli parçaları ve tahrik sistemleri gibi çeşitli makine ve taşıt parçalarının üretiminde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu tür malzemelerde, hem doğru elik türünün seçimi hem de uygun bir ıslah işleminin uygulanması büyük önem taşımaktadır [11, 12].

Islah elikleri, sertleēebilme yeteneklerine göre düşük, orta ve yüksek sertleēebilirlik gösteren türlere ayrılabilir. Genel olarak şu şekilde sınıflandırılabilirler:

- Krom alaşımlı ıslah elikleri,
- Mangan alaşımlı ıslah elikleri,
- Alaşımsız ıslah elikleri,
- Bor alaşımlı ıslah elikleri,
- Krom-molibden alaşımlı ıslah elikleri.

Alaşım elementleri içermeyen çeliklerde, karbon miktarının artışı sertleēme dayanımını doğrudan etkilemektedir. Mangan alaşımlı ıslah çeliklerinde, mangan elementi sertleēebilirliėi arttırarak, rneğin 30Mn4 ve 40Mn4 gibi çeliklerde akma sınırını C60 çeliğindeki seviyelere ulaştırmaktadır. Krom alaşımlı çelikler ise sertleēebilirliėi önemli lde arttırırken, aynı zamanda plastisiteye de olumlu bir katkı sağlamaktadır. Molibden elementi, kroma kıyasla daha yüksek bir sertleēme kapasitesi sunarak çeliklerin mekanik özelliklerini optimize etmektedir. Piyasada yaygın olarak kullanılan ıslah çelikleri arasında 42CrMo4 (AISI 4140), 41Cr4 (AISI 5140), 50CrMo4 (AISI 4150), 34CrMo4 (AISI 4135), 34CrNiMo6 (AISI 4340), C45 (AISI 1045), C40 (AISI 1040), C50 (AISI 1050) ve C60 (AISI 1060) gibi elik türleri bulunmaktadır [11, 12]. Tablo 2.1'de ıslah çeliklerinin kimyasal kompozisyonları gösterilmektedir.

Tablo 2.1 İslah çeliklerinin kimyasal kompozisyonları [13]

İSLAH ÇELİKLERİ KİMYASAL KOMPOZİSYONLARI											
İml.No	Sembol/DIN	AISI/SAE	C	Si	Mn	P (max.)	S (max.)	Cr	Mo	Ni	V
1.1186	C40	1040	0,37	0,015	0,5	0,035	0,035				
			0,44	0,35	0,8						
1.0503	C45	1045	0,42	0,15	0,5	0,045	0,045				
			0,5	0,35	0,8						
1.0540	C50	1050	0,47	-	0,6	0,045	0,045				
			0,55	0,4	0,9						
1.0601	C60	1060	0,57	0,15	0,6	0,045	0,045				
			0,65	0,35	0,9						
1.7035	41Cr4	5140	0,38	0,15	0,6	0,035	0,035	0,9			
			0,45	0,4	0,9			1,2			
1.7218	25CrMo4	4130	0,22	0,15	0,5	0,035	0,035	0,9	0,15		
			0,29	0,4	0,8			1,2	0,3		
1.7220	34CrMo4	4135	0,3	0,15	0,5	0,035	0,035	0,9	0,15		
			0,37	0,4	0,8			1,2	0,3		
1.7225	42CrMo4	4140	0,38	0,15	0,5	0,035	0,035	0,9	0,15		
			0,45	0,4	0,8			1,2	0,3		
1.7228	50CrMo4	4150	0,46	0,15	0,5	0,035	0,035	0,9	0,15		
			0,51	0,4	0,8			1,2	0,3		
1.6511	36CrNiMo4	9840	0,3	0,15	0,4	0,035	0,035	0,9	0,15	0,9	
			0,38	0,4	0,7			1,2	0,3	1,2	
1.6582	34CrNiMo6	4340	0,3	-	0,5	0,025	0,035	1,3	0,15	1,3	
			0,38	0,4	0,8			1,7	0,3	1,7	
1.8159	50CrV4	6150	0,47	0,15	0,7	0,035	0,035	0,9			0,1
			0,55	0,4	1,1			1,2			0,2

2.3 AISI 4340 Çeliği

AISI 4340 çeliği, nikel, krom ve molibden içeren düşük alaşımlı, yüksek mukavemetli bir ıslah çeliğidir. Bu çelik türü, su verme ve temperleme işlemleri sonrasında yüksek çekme ve akma mukavemeti ile birlikte iyi tokluk ve süneklik özellikleri sergilemektedir. Ayrıca, kaynaklanabilirliği ve iyi işlenebilirliği, üretim süreçlerinde avantaj sağlamaktadır. Bu özellikleri sayesinde, ağır yük altında çalışan ve yüksek dayanım gerektiren dişli, mil, krank mili ve uçak iniş takımı gibi makine ve uçak parçalarının üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır [7, 8, 9].

Kimyasal bileşim açısından bu çelik, yaklaşık %0,38–%0,43 karbon, %1,65–%2,00 nikel, %0,60–%0,80 krom ve %0,20–%0,30 molibden içermektedir. Bu alaşım elementleri, çeliğin sertleşebilirliğini ve yüksek mukavemetini artırırken, darbe dayanımı ve yorulma direncine katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, çelik

malzemenin kalın kesitlerde bile çekirdek mukavemetini korumasını sağlamaktadır. AISI 4340 çeliğinin tipik kimyasal bileşimi Tablo 2.2’de gösterilmektedir [7, 8, 9].

Tablo 2.2 AISI 4340 çeliğinin kimyasal bileşimi [7]

Element	Miktar (%)
Karbon (C)	0,38–0,43
Manganez (Mn)	0,60–0,80
Silisyum (Si)	0,15–0,30
Krom (Cr)	0,70–0,90
Nikel (Ni)	1,65–2,00
Molibden (Mo)	0,20–0,30
Fosfor (P)	≤0,035
Kükürt (S)	≤0,040

AISI 4340 çeliği, ısıtma işlemleriyle özelleştirilebilir. Özellikle su verme ve temperleme işlemleriyle, çeliğin mikro yapısı optimize edilerek yüksek sertlik ve darbe dayanımı elde edilmektedir. Bu özellikleri sayesinde, ağır yük taşıyan ve yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir [7, 8, 9].

2.4 Çeliklerde Yüzey Sertleştirme

Isıl işlemle farklı olarak malzemenin yalnızca yüzey özelliklerini geliştiren işleme yüzey sertleştirme işlemi denmektedir. İç yapısında yüksek tokluk ve yüzeyinde aşınma dayanımı aranan parçalar için yüzey sertleştirme uygun olmaktadır [1].

Bu işlemde amaç, sertliği yüksek ve dayanıklı bir yüzey tabakası oluşturmaktır. Oluşturulan bu tabaka ile aynı zamanda malzemenin yorulma dayanımı ve korozyon dayanımı da iyileştirilmektedir [1].

Yüzey sertleştirme işlemi, yüksek aşınma direnci, yüksek tokluk ve darbe dayanımı gerektiren makine parçalarında kullanım için idealdir. Özellikle kam

milleri, krank milleri, dişli çarklar, akslar, burçlar ve kovanlar gibi makine elemanlarında tercih edilmektedir [1].

Yüzey sertleştirme yöntemleri termal ve termokimyasal yüzey sertleştirme yöntemleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

2.5 Termal Yüzey Sertleştirme

Termal yüzey sertleştirme, çelik malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla uygulanan bir ısı işlem yöntemidir. Bu işlemde, malzemenin yüzeyi kontrollü bir şekilde ısıtılmakta ve ardından hızlı bir şekilde soğutulmaktadır. Böylece yüzeyde sert bir tabaka oluşmaktayken, iç kısımlar sünek ve tokluk özelliklerini korumaktadır. Termal yüzey sertleştirme işlemlerinde çelik yüzeyinde bileşim değişimi olmaz, yüzey sadece faz dönüşümü ile sertleştirilmektedir. Bu yöntem, aşınma direncini artırmak ve yorulma ömrünü uzatmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. İndüksiyonla sertleştirme, alevle sertleştirme ve lazerle sertleştirme termal yüzey sertleştirme yönteminin sıklıkla kullanıldığı çeşitleridir [1, 14].

İndüksiyonla sertleştirme, yüksek frekanslı bir elektrik akımının, çeliğin yüzeyinde ısı oluşturacak şekilde geçişini sağlamaktadır. Bu işlemde, yüzeyde meydana gelen ısınma, çeliğin martensitik yapıya dönüşmesini sağlayacak kadar hızlı olmakta ve ardından su, yağ veya hava ile soğutulmaktadır. İndüksiyonla sertleştirme, özellikle dişli çarklar, miller ve rulmanlar gibi yüksek aşınma direnci gerektiren parçalar için tercih edilmektedir. Bu işlemde, yalnızca yüzeyde sertleşme sağlanırken, iç kısım sünekliğini korumaktadır [14].

Alevle sertleştirme yönteminde iş parçasının seçilmiş bir bölgesine yüksek yoğunluklu oksijen alevi uygulanmaktadır. Sıcaklık östenit dönüşüm bölgesine çıkıncaya kadar yükseltilmektedir. Ardından, su veya yağ ortamında hızlı bir soğutma işlemi yapılmaktadır. Bu işlemde sertlik derinliği ısıtma zamanı arttıkça artmaktadır. Fırına giremeyecek kadar büyük parçaların yüzeylerini bu yolla sertleştirmek mümkün olmaktadır [15].

Lazerle sertleştirme, malzeme yüzeyinin yüksek enerjili lazer ışını ile ısıtılması ve ardından hızlı bir şekilde soğutulmasıyla gerçekleştirilen bir ısıl işlemdir. Lazerle sertleştirme, geleneksel sertleştirme yöntemlerine göre daha hassas ve lokalize bir işlem sunmakta, böylece istenmeyen bölgelere zarar verme riski azalmaktadır. Bu nedenle özellikle küçük, karmaşık geometrik şekillere sahip parçalarda tercih edilmektedir [16].

2.6 Termokimyasal Yüzey Sertleştirme

Termokimyasal yüzey sertleştirme, çelik malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılan, ısıl ve kimyasal etkileşimlerin bir arada uygulandığı bir yöntemdir. Bu işlemde, malzemenin yüzeyi yüksek sıcaklıklara ısıtılır ve yüzeydeki elementler, dış ortamda bulunan bir gaz ya da sıvı ile reaksiyona girerek kimyasal bir değişim oluşturmaktadır. Bu süreç, malzemenin yüzeyinde sert, aşınmaya dayanıklı ve korozyona karşı dirençli bir tabaka meydana getirirken, iç kısımlarının sünekliğini ve darbe dayanımını korumaktadır. Termokimyasal sertleştirme yöntemleri, genellikle yüksek aşınma direncine sahip ancak esneklik ve tokluk gibi özelliklerinin de korunması gereken uygulamalarda tercih edilmektedir [1].

Nitrasyon, nitrokarbürizasyon, karbonitrasyon, sementasyon (karbürleme) ve borlama işlemleri termokimyasal yüzey sertleştirme yöntemleridir.

2.6.1 Nitrasyon

Nitrasyon, çelik yüzeyine azot ile işleme yaparak sert metal nitrür bileşiklerinin oluşumunu sağlayan bir termokimyasal işlemdir. Bu işlem, 19. yüzyılın başlarında ilk kez uygulanmaya başlanmıştır. Nitrasyon ile ilgili ilk sistematik çalışma ise 1921 yılında, “çelik alaşımlarının azotlama yoluyla sertleştirilmesi” başlıklı patentle gerçekleştirilmiştir. Karbürleme işlemine benzer şekilde uygulanan bu teknik, ancak kullanılan azot verici gazın bileşimi ve işlem sıcaklığının farklı olmasıyla ayrılmaktadır. Nitrasyon, 450-592°C arasında gerçekleştirilmektedir. Düşük işlem sıcaklıkları ve ani soğutma yapılmaması nedeniyle, bu işlemde

parçada oluşabilecek ısı gerilmeler, çarpılmalar ve oksidasyon en düşük seviyeye indirgenmektedir [2, 3].

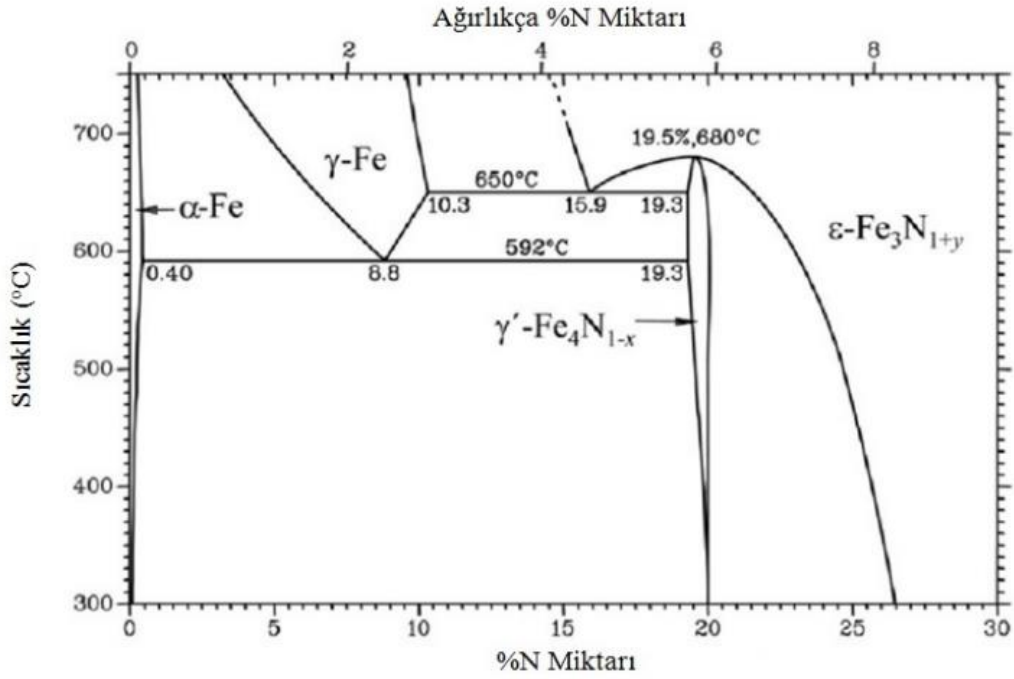
Nitrürleme sürecinde, ortamda bulunan azot gazı atomları, çelik atomlarına göre daha küçük yapıda olup, malzemenin çekirdeğine doğru ilerlemektedir. Bu süreçle birlikte, çeliğin yüzeyinde alüminyum nitrür, demir nitrür ve krom nitrür gibi bileşikler meydana gelmekte, bu da çeliğin sertliğini arttırmaktadır. Ayrıca, bu nitrür tabakasının yüksek korozyon direnci, parçanın korozif ortamlara karşı dayanımını da arttırmaktadır. Nitrürleme işlemiyle birlikte, malzeme yüzeyinde yüksek sertlik değerine sahip beyaz tabaka ve hemen altında da difüzyon tabakası oluşmaktadır [2, 17, 18].

Nitrürleme işlemi için çeliklerin, yaklaşık %0.3 karbon ve azot afinitesi yüksek olan elementleri %2 oranında içermesi önerilmektedir. Her ne kadar pek çok çelik türü nitrürleme işlemine tabi tutulabilse de yüksek kalınlıkta beyaz tabaka istenen durumlarda nitrasyon çeliklerinin kullanılması daha uygun olmaktadır. Nitrasyon çeliklerinin en belirgin özelliği, bileşimlerinde azotla nitrür oluşturabilen Al, Cr, Ti, Mo, V ve Ni gibi alaşım elementlerini içermeleridir [3, 19].

Difüzyon tabakasının derinliğini etkileyen başlıca nedenler; işlem süresi, işlem sıcaklığı, gaz basıncı ve çeliğin bileşimi olarak sıralanmaktadır. Tüm bu parametreler doğru bir şekilde seçilse de, azot afinitesi düşük alaşım elementlerine sahip çelik kullanılması durumunda, yüzeyde oluşan tabaka kırılğan ve ince olmaktadır. Bu sebeple nitrasyon işlemi yapılacak çeliğin nitrasyon çeliklerinden seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Nitrürleme işlemi, sıvı, gaz ve plazma ortamlarında uygulanabilen bir işlemdir. Bu işlem, parçaların sertliğini, aşınma direncini, korozyon dayanımını ve darbe mukavemetini arttırmaktadır. Ayrıca, düşük işlem sıcaklıkları nedeniyle ısı çarpılmalar minimum seviyededir, bu da yüksek hassasiyet gerektiren ve talaşlı imalatla üretilen parçaların nitrürlenmesini endüstride yaygınlaştırmaktadır [3, 20].

Nitrürleme işleminin ve yüzeyde oluşan fazların daha iyi anlaşılabilmesi için Fe-N denge diyagramının bilinmesi önemlidir. Bu diyagram, nitrürleme işleminin

azotun demir içinde nasıl çözüldüğüyle doğrudan ilişkilidir. Şekil 2.1'de Fe-N'e ait denge diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Fe-N denge diyagramı [21]

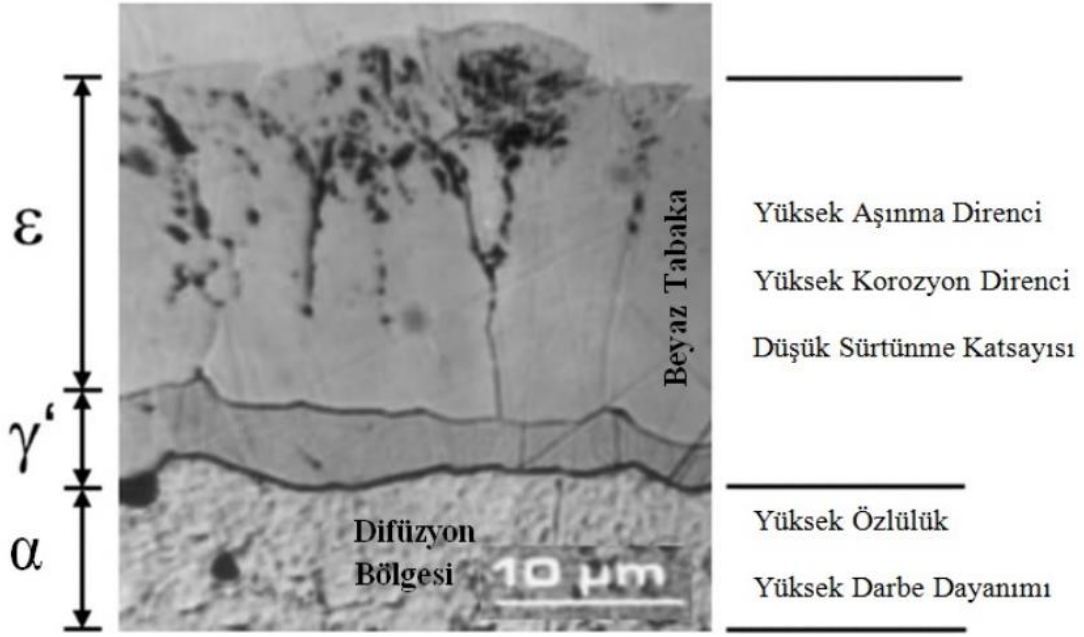
Diyagramda da açıkça görüleceği gibi, demir içinde azotun oluşturduğu kristal yapılar, sıcaklığa ve çelik içerisinde çözülmüş olan azot miktarına bağlı olarak değişmektedir. Tablo 2.3'te Fe-N atomlarının kristal yapıları ve içerdikleri azot miktarları detaylı olarak sunulmaktadır.

Tablo 2.3 Fe-N atomlarının kristal yapıları ve azot miktarları [2]

Faz	Bileşimi	Kristal Yapısı	Ağırlıkça %N	Atomik %N	100 Fe Atomu Arasındaki Arayer N Sayısı
α – Ferrit	Fe	Hacim Merkezli Kübik	<0.1	<0.4	–
γ – Ostenit	Fe ₁₆ N ₂	Yüzey Merkezli Kübik	<2.8	<10.3	<12
α' – Martenzit	Fe ₁₆ N ₂	Yüzey Merkezli Tetragonal	<2.6	<10	<11
γ'	Fe ₄ N	Yüzey Merkezli Kübik	5.7-6.1	19.3-20.2	25
ϵ	Fe ₂₋₃ N	Hegzagonal Sıkı Paket	4.5-11	14-32	22-49
ζ	Fe ₂ N	Ortorombik	11.4	33	50

Nitrasyon işlemi sonucunda yüzeyde γ' -Fe₄N ve ϵ -Fe₂₋₃N fazlarından oluşan beyaz tabaka meydana gelmektedir. Bu tabakanın devamında MeN fazlarının yer aldığı difüzyon bölgesi oluşmaktadır. Tabloda görüldüğü üzere γ' -Fe₄N fazı %5.7-6.1 oranında azot içermektedir. Nitrür oranı bu değer üzerine çıktığı zaman beyaz tabaka içerisinde ϵ -Fe₂₋₃N fazı oluşmaya başlamaktadır. ϵ -Fe₂₋₃N, γ' -Fe₄N fazına kıyasla daha sert bir yapıya sahiptir. Bu nedenle aşınma ve yorulma dayanımının önemli olduğu uygulamalarda tercih edilmektedir. Ancak, sünekliğinin düşük olması sebebiyle darbe dayanımı zayıftır. γ' -Fe₄N fazı ϵ -Fe₂₋₃N fazına göre yumuşak olup bu durum düşük aşınma direnci sağlarken darbe dayanımının yüksek olmasına olanak tanımaktadır. Bu nedenle, yüksek darbe dayanımı gerektiren uygulamalarda γ' -Fe₄N fazı daha uygun bir seçimdir [17].

Yüzeyde oluşan beyaz tabakanın alt bölgesinde azot miktarı az olan γ' -Fe₄N fazı, üst bölgesinde ise azot oranı yüksek olan ϵ -Fe₂₋₃N fazı bulunmaktadır. Nitrasyon sonucunda tek fazlı beyaz tabaka oluşması oldukça zordur. Homojen ve tek faza sahip beyaz tabaka oluşturabilmek için KN kontrollü nitrasyon fırını kullanılması gerekmektedir [18]. Şekil 2.2'de nitrasyon tabakaları ve özellikleri gösterilmektedir.



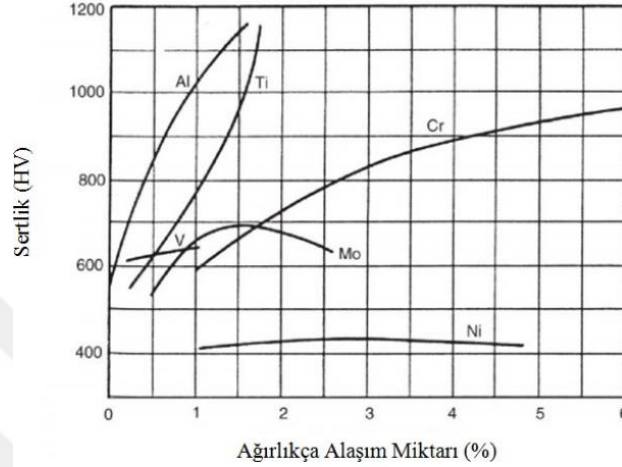
Şekil 2.2 Nitrasyon tabakaları ve özellikleri [2]

Beyaz tabakanın oluşumunu sağlayan fazlar, birbirinden farklı termal genleşme katsayılarına sahip oldukları ve zayıf bir bağ ile birbirlerine tutundukları için kırılğan bir yapı sergilemektedir. Beyaz tabakanın kalınlığının artmasıyla birlikte $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$ fazında meydana gelen porozite miktarı ve tabakanın gevrekliği de artış göstermektedir. $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$ fazının üst bölümünde meydana gelen porozite, sürtünme katsayısını azaltarak yağlayıcı bir etki sağlasa da beyaz tabakanın gevrekliğini ve kırılğanlığını artırdığı için genellikle istenmeyen bir durumdur [18].

Beyaz tabakanın oluşumunu sağlayan fazların farklı termal genleşme katsayısına sahip olması ve tabakanın kırılğan bir yapıya sahip olması, nitrasyon işleminin 450-590°C arasındaki ferritik bölgede gerçekleştirilmesini gerektirmektedir. Daha yüksek sıcaklıklarda uygulanan nitrasyon işlemi, ostenit-ferrit dönüşümü nedeniyle hacim değişikliğine yol açarak beyaz tabakanın parçalı şekilde dökülmesine neden olabilmektedir [19].

Nitrasyonun başarılı olması, çeliğin azotu çözme yeteneğine bağlıdır. Fe-N denge diyagramından anlaşılacağı üzere, nitrasyon işleminde demirin yalnız başına çözebileceği azot oranı başarılı sonuçlar ortaya koyamamaktadır. Bu nedenle,

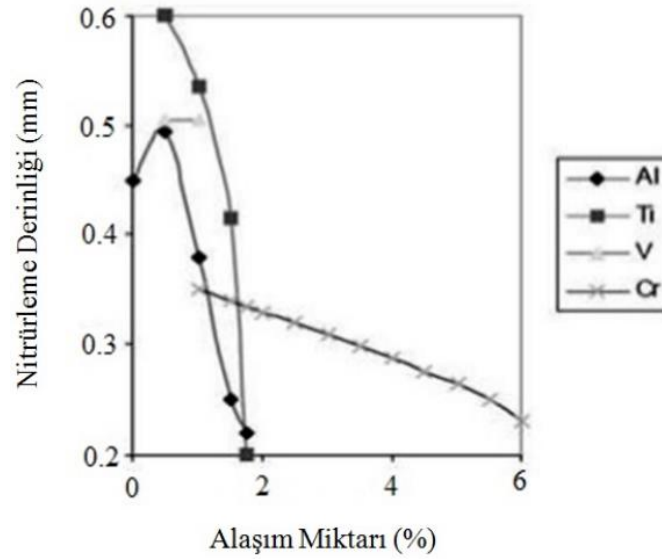
demir içinde nitrür oluşumunu sağlayacak ve azotla güçlü etkileşime girebilecek alaşım elementlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Örneğin, Cr, Ti ve Al gibi elementler, demir içerisinde sert nitrür fazlarının oluşmasına yardımcı olarak malzemenin sertliğini arttırmaktadır [19]. Şekil 2.3'te bu alaşım elementlerinin sertliğe etkisi gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Alaşım elementlerinin sertliğe etkisi [20]

Şekil 2.3'e göre, çeliğin yüzey sertliğini artırmada en etkili alaşım elementleri Al ve Ti'dir. Vanadyum, molibden ve krom sertliği arttırsa da bu elementlerin katkısı Al ve Ti etkisine kıyasla daha azdır. Nikel ise doğrudan sertliği yükseltmese de tane inceltici ve süneklik arttırıcı özellikleri sayesinde nitrasyon çeliklerinde kullanılmaktadır. Şekil 2.3'te verilen grafikte gösterilmemiş olsa da mangan elementinin çeliğin sertliği üzerinde önemli ölçüde etkisi mevcuttur. Mangan, çeliğin dayanımını arttıran etki göstermektedir. Bununla birlikte sertleşme, dövme ve kaynak kabiliyetini de arttırmaktadır. Manganın olumlu etkisi, karbon miktarının artmasıyla olmaktadır [20].

Alaşım elementleri, sadece çeliğin sertliğini arttırmakla birlikte nitrürleme derinliği üzerinde de belirleyici bir rol oynamaktadırlar. Bu elementlerin oranının artması, sertliği yükseltirken aynı zamanda azotun çelik içinde yayılma hızını düşürdüğü için nitrürleme derinliğinde azalma meydana gelmektedir [19]. Şekil 2.4'te alaşım elementlerinin oranındaki artışın nitrürleme derinliği üzerindeki etkisi gösterilmektedir.



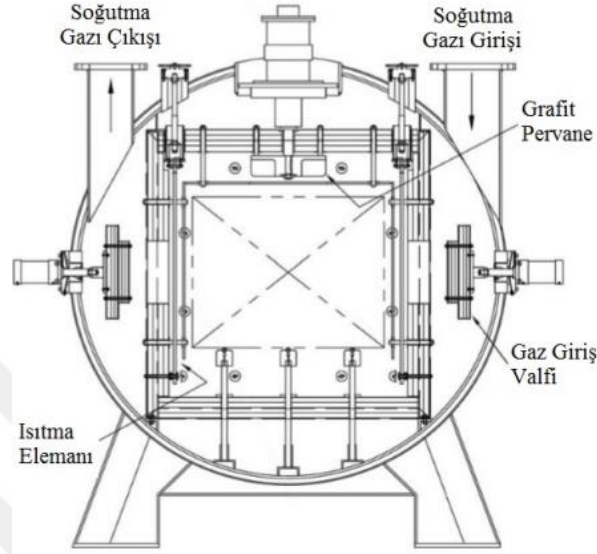
Şekil 2.4 Alaşım oranının nitrürleme derinliği üzerindeki etkisi [19]

Şekil 2.4'e göre, alaşım elementlerinin oranındaki artış nitrürleme derinliğinin azalmasına neden olmaktadır. Bunun başlıca nedeni, bu elementlerin çelik yapısında arayer atomları şeklinde bulunarak demir atomları arasında azotun hareketine engel olmasıdır. Bununla birlikte alaşım elementlerinin oluşturduğu nitrür fazları da azotun ilerleyişini yavaşlatmaktadır. Ayrıca çözünmüş sementit fazı azotun yayılımını kısıtlayarak nitrürleme derinliğinin düşmesine katkıda bulunmaktadır. İşte bu nedenlerden dolayı nitrasyon çeliklerinde düşük miktarda karbon bulunmaktadır. Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'ten de anlaşılacağı üzere alüminyum, nitrasyon için en kritik alaşım elementidir. Optimal nitrasyon derinliği ve sertlik dengesine ulaşabilmek amacıyla, çelik bileşiminde alüminyumun yaklaşık %1 oranında bulunması tercih edilmektedir. Diğer yandan, titanyum da güçlü nitrür yapıcı özelliklere sahip olsa da maliyetinin yüksek olması nedeniyle yaygın olarak tercih edilmemektedir [19].

2.6.1.1 Gaz Nitrasyon

Gaz nitrürleme işleminde azot kaynağı olarak amonyak (NH_3) kullanılmaktadır. Bu işlem, vakumlu bir fırında, gaz miktarlarının titizlikle kontrol edildiği koşullarda gerçekleştirilmektedir. Fırınlarda tavlama işlemi, doğal gaz ve elektrik enerjisi kullanılarak uygulanmaktadır. Endüstride, malzeme hacmine bakarak

farklı kapasitelerde nitrasyon fırınları tercih edilmektedir. Bu fırınlarda, kullanılan gaz türleri ve miktarlarının ayarlanabilmesi sayesinde, sadece nitrüleme değil; nitrokarbürleme ve post oksidasyon gibi diğer ısıtım işlemleri de uygulanabilmektedir [2, 22]. Şekil 2.5’de gaz nitrasyon fırını gösterilmektedir.



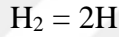
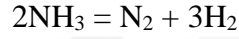
Şekil 2.5 Gaz nitrasyon fırını [22]

Nitrüleme işlemine başlamadan önce, işlenecek parçalar fırına dengeli bir şekilde yerleştirilmektedir. Bu düzenleme, her bir parçanın tüm yüzeyinin eşit oranda ısıtılması ve azot gazıyla aynı düzeyde temas etmesi açısından kritik öneme sahiptir. Fırın kapağı kapandıktan sonra, ortamın dış etkilere kapalı hale getirilmesi ve gaz kaçaklarının engellenmesi için gaz giriş valfi kapatılmaktadır. Ardından, fırının gaz dolu bölgesi, vakum pompası yardımıyla boşaltılmaktadır. Son adımda ise, oluşan vakum ortamına N_2 gazı enjekte edilerek istenen basınç seviyesine ulaşılmaktadır [2, 22].

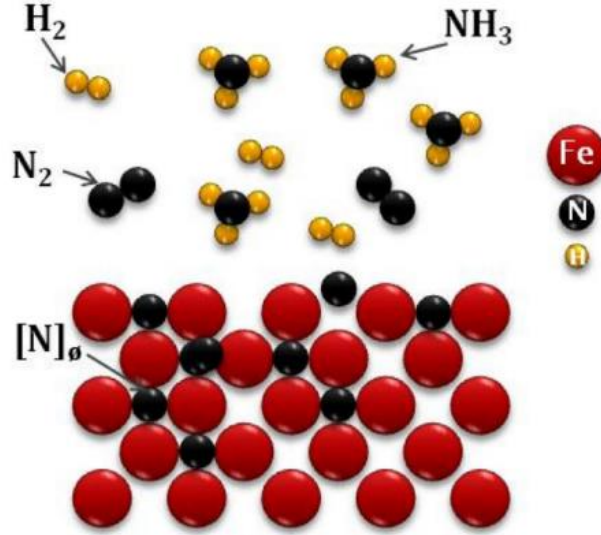
Tercihe bağlı olarak, tavlama işlemi kademeli veya kademeli şekilde uygulanmaktadır. İşlem sıcaklığına ulaşılması ve parçaların eşit olarak ısıtılması sonrasında, gaz devresindeki azot gazını vakum pompası temizlemekte ve yerine amonyak gazı enjekte edilmektedir. Yüksek sıcaklık etkisi altında NH_3 , N_2 ve H_2 gazlarına ayrışır; böylece sistemde bu üç gaz bulunmaktadır. Ortamdaki N_2 gazının serbest kalan azot atomlarına dönüşmesiyle nitrüleme süreci

başlamaktadır. İşlem sırasında gaz bileşimleri sürekli değişiklik gösterdiğinden, NH₃ sürekli olarak ilave edilirken H₂ devreden uzaklaştırılmaktadır. Belirlenen nitrürleme süresi tamamlandığında, ısıtma sonlandırılmakta, NH₃ gazı devreden çıkarılmakta ve yerine N₂ gazı verilmektedir. Parçaların ısı dengelerini korumak amacıyla kontrollü bir havada soğutma uygulanmakta ve bu adımların tamamlanmasıyla gaz nitrürleme işlemi sona ermektedir [22].

Gaz nitrürleme sürecinde en önemli adım, NH₃ gazının endotermik tepkimeyle ayrışmasıdır. NH₃ gazı 450 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kararsız hale gelerek (2.1) eşitliğinde görüldüğü gibi bileşenlerine ayrılmaktadır.



Bu ayrışma süreci sonucunda, nitrürleme için gerekli olan serbest azot atomları elde edilmektedir. Ortamda bulunan azot atomları, işlem devam ettikçe difüzyon yoluyla malzeme yüzeyine nüfuz etmektedir. Azot atomlarının çapı 0.142nm olup, demir atomları arasındaki boşluklara kolayca yerleşebilmektedir. Ancak azot atomlarının küçük boyutlarına rağmen, difüzyon tabakasının kalınlığı genellikle 1mm'yi aşmamaktadır. Bunun başlıca nedeni, azotun demir ve diğer alaşım elementleriyle birleşerek nitrür fazlarını oluşturması ve bu fazların azot atomlarının daha derine ilerlemesini kısıtlamasıdır [17]. Şekil 2.6'da gaz nitrasyon prosesine ait difüzyon mekanizması gösterilmektedir.



Şekil 2.6 Gaz nitasyon prosesi difüzyon mekanizması [23]

Gaz nitürleme yöntemi, diğer nitürleme tekniklerine kıyasla hem avantajlara hem de dezavantajlara sahiptir. Bu yöntemin başlıca avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- **Parça boyutuna bağlı olmaksızın uygulanabilmektedir:** Büyük ya da küçük her ölçekteki parça için uygun bir işlemdir.
- **Karmaşık yapıya sahip bileşenlerde etkili sonuç vermektedir:** Geometrik olarak karmaşık formlara sahip parçalar da eşit şekilde nitürlenebilmektedir.
- **İstenen nitür fazları elde edilebilmektedir:** KN katsayısı ve sıcaklık hassasiyetle kontrol edilerek belirli nitür fazları oluşturulabilmektedir.
- **Seri üretim için uygundur:** Sürekli üretim hatlarında verimli şekilde kullanılabilir.
- **Çevre dostu bir yöntemdir:** Çevreye zararlı atıklar veya gazlar yaymadığından ekolojik açıdan avantaj sağlamaktadır.
- **Isıl gerilmeleri minimize etmektedir:** Isıtma ve soğutma işlemlerinin kontrollü bir şekilde yapılması sayesinde, parçalarda boyutsal değişimler minimum seviyede tutulur ve yüksek ölçüsel hassasiyet sağlanmaktadır.

Her ne kadar gaz nitürleme yöntemi birçok avantaja sahip olsa da, bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bu dezavantajlar şu şekilde sıralanabilir:

- **Uzun işlem süresi:** Nitrürleme işleminin tamamlanması, diğer yüzey sertleştirme yöntemlerine kıyasla daha fazla zaman gerektirmektedir.
- **Yüksek başlangıç maliyetleri:** Gaz nitrürleme fırınlarının kurulumu ve işletme maliyetleri görece yüksektir [2, 20].

2.6.1.2 Sıvı Nitrasyon

Sıvı nitrürleme yöntemi, yüzey sertleştirme işlemlerinden biri olup, azot kaynağı olarak siyanür bileşikleri kullanılan bir prosestir. İşlem, yaklaşık 570°C sıcaklıkta gerçekleştirilir ve bu süreçte yalnızca azot difüzyonu değil, aynı zamanda karbon difüzyonu da meydana gelmektedir. Bu nedenle sıvı nitrürleme, nitrokarbürleme işlemi olarak da değerlendirilmektedir. Tuz banyosunun yüksek ısı transfer katsayısı sayesinde, gaz nitrürleme yöntemine kıyasla daha kısa sürede tamamlanabilmektedir. Genellikle 1 ila 10 saat arasında süren bu işlem, malzemenin yüzey sertliğini artırırken aşınma direncini de iyileştirmektedir [24].

İşlemden kullanılan tuz banyolarının içeriği genellikle %65 oranında sodyum siyanür ve %35 oranında potasyum siyanür bileşenlerinden oluşmaktadır. Ancak, azot kaynağı olarak farklı siyanür bileşenleri de kullanılabilir. Ayrıca, banyoda karbonat ve siyanat gibi yardımcı bileşenler de az miktarda bulunmaktadır. Bu katkı maddeleri, banyonun akışkanlığını artırarak işlem verimliliğini yükseltirken, tuz tüketimini de azaltmaktadır. Bunun sonucunda, difüzyon kinetiği hızlanmakta ve daha homojen bir nitrür tabakası elde edilmektedir. Özellikle, ϵ -Fe₂₋₃N tabakasının düzgün şekilde oluşması, malzemenin aşınma dayanımını artıran önemli bir etkidir [25, 26].

Sıvı nitrürleme yönteminin öne çıkan avantajlarından biri, kurulum maliyetlerinin düşük olmasıdır. Ayrıca, işlem süresinin gaz nitrürleme yöntemine göre daha kısa olması, aşırı temperleme riskini azaltmaktadır. Karbon difüzyonunun gerçekleşmesi sayesinde de dekarbürizasyon sorunu oluşmaz, bu da işlem kalitesini artıran bir unsurdur.

Ancak, bu yöntemin bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Öncelikle, tuz banyosunda kullanılan siyanür bileşiklerinin kontrol edilmesi zor olduğundan,

sürecin hassas şekilde yönetilmesi gerekmektedir. Bunun yanı sıra, siyanür bileşikleri doğaya zarar verebilecek atıklar oluşturduğundan, çevresel etkileri nedeniyle ek önlemler alınması gerekmektedir. Atık yönetimi, bu yöntemin en önemli dezavantajlarından biri olarak öne çıkmaktadır [1].

2.6.1.3 Plazma Nitrasyon

Metal yüzeylerinin mekanik özelliklerini artırmak ve aşınmaya karşı daha dirençli hale getirmek amacıyla plazma nitrürleme yöntemi yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu işlem sırasında, yüzeyde sert nitrür bileşikleri oluşturularak, parçaların kullanım ömrü uzatılmakta ve performansları iyileştirilmektedir. Genellikle 550°C-600°C sıcaklık aralığında uygulanan bu yöntem, yüzey sertliğini yükseltmenin yanı sıra sürtünmeye karşı daha dayanıklı bir yapı elde edilmesini sağlamaktadır [27, 28].

Plazma iyon nitrürleme, düşük basınçlı özel bir gaz ortamında gerçekleştirilen bir işlem olup, havası tahliye edilmiş kaplar içinde uygulanmaktadır. İşlem esnasında azot içeren gaz, elektrik enerjisi yardımıyla iyonlaştırılarak plazma hâline dönüştürülmektedir. Yüksek enerjili bu iyonlar, manyetik bir etkiyle metal yüzeyine yönlendirilerek çarpıştırılmakta ve böylece malzemenin yüzeyinde nitrür tabakası oluşumu sağlanmaktadır. Geleneksel gaz nitrürleme yöntemine kıyasla daha kontrollü ve verimli bir işlem sunan plazma nitrürleme, modern yüzey mühendisliğinde önemli bir yer tutmaktadır [27, 29].

Bu yöntem özellikle çelik parçaların aşınma ve sürtünme dayanımını artırmak amacıyla tercih edilmektedir. Kesici takımlar, kalıplar ve makine bileşenleri gibi yüzey sertliğinin kritik olduğu alanlarda kullanımı yaygındır. Plazma nitrürleme, yüzeyin mekanik özelliklerini geliştirmekle kalmaz, aynı zamanda hassas ve karmaşık geometrilere sahip parçaların işlenmesini kolaylaştıran bir süreç sunmaktadır.

Plazma nitrürleme ilk olarak 1932 yılında B. Berghaus tarafından Almanya'da keşfedilmiştir. Ancak, sanayide aktif olarak kullanılmaya başlanması 1967 yılında Almanya ve İsviçre'de yapılan geliştirme çalışmalarıyla mümkün olmuştur. Bu

süreçte farklı uygulamalar için araştırmalar devam etmiş ve Japonya'da 1973 yılında önemli ilerlemeler kaydedilmiştir [30, 31]. Günümüzde ise özellikle çelik malzemelerin yüzey sertleştirilmesi amacıyla bu yöntemin kullanımı yaygınlaşmıştır.

İyon nitrürleme, düşük basınç ortamında gerçekleştirilen bir yüzey sertleştirme yöntemidir. Bu işlemde, seyreltik amonyak gazı veya hidrojen ve azot karışımı kullanılan bir ortamda gazlar iyonize olmaktadır. Azot iyonları parçaların yüzeylerine çarparak ısınmalarına yol açar ve azot, malzeme yüzeyine nüfuz etmektedir. Böylece nitrürleme işlemi gerçekleşmektedir. İyon nitrürleme işlemi, düşük basınçlı ortamda yer alan iki elektrot arasında yüksek voltajlı doğru akım uygulandığında başlamaktadır. Bu elektriksel akım sayesinde, negatif elektrot (katot) artı yüklü iyonları çekerken, pozitif elektrot (anot) negatif yüklü iyonları çekmektedir. İyonlar, yüzeye çarparak ısı üretir ve bu da malzemenin sıcaklığını artırmaktadır [32].

Bu yöntem, diğer nitrürleme tekniklerine kıyasla daha yüksek sertlik ve aşınma dayanımı sağlamaktadır. Aynı zamanda işlemin sonunda oluşan nitrür tabakası oldukça incedir. Plazma iyon nitrürleme, paslanmaz çelikler, takım çelikleri gibi yüksek alaşımlı malzemelerde de başarıyla uygulanabilmektedir [32].

2.6.2 Nitrokarbürizasyon

Nitrokarbürizasyon, azot ve karbon atomlarının metal yüzeyine aynı anda difüze etmesiyle sert bir tabaka oluşturmayı amaçlayan termokimyasal yüzey sertleştirme yöntemidir. Bu işlem uygulandığında çeliklerin yorulma dayanımı, korozyon dayanımı ve aşınma dayanımı artarken, sürtünme katsayısı düşmektedir. Nitrokarbürizasyon işlemi sonunda çekirdek yapısında herhangi bir değişim olmamakla birlikte yüzeyde sert ve aşınmaya dayanıklı bir tabaka elde edilmektedir [2].

Nitrokarbürizasyon sayesinde yüzeyde yaklaşık 15 µm kalınlığında γ' -Fe₄(N, C) ve ϵ -Fe₂₋₃(N, C) fazlarını içeren bir beyaz tabaka oluşmaktadır. Oluşan bu tabakanın nitrasyon işlemindeki tabakadan farkı bu fazların yapısına karbon

atomlarının da dahil olmasıdır. Bu farkın nedeni, nitrasyon işleminde malzeme yüzeyine yalnızca azot emdirilirken nitrokarbürleme işleminde azot ve karbon atomlarının aynı anda emdirilmesidir. Bu durum, her iki işlem arasında hem uygulama süreci hem de oluşturdukları yapı açısından benzerlikler bulunmasına sebebiyet vermektedir. Nitrokarbürizasyon işlemi, karbon difüzyonu sayesinde dekarbürizasyon riskini ortadan kaldırmasıyla nitrasyon işlemine göre ek bir avantaj sağlamaktadır. Uzun yıllardır kullanılan nitrokarbürizasyon işlemi sayesinde günümüze kadar birçok farklı türden malzemenin yüzey sertliği artırılmıştır. Nitrokarbürizasyon yöntemi alaşımlı çelikler, paslanmaz çelikler ve demir esaslı malzemelere uygulanabilirken, en yüksek aşınma dayanımı ve sertlik değeri genellikle düşük alaşımlı çeliklerde elde edilmektedir [2, 4].

Nitrokarbürizasyon işlemi sıvı, gaz ve plazma ortamlarında gerçekleştirilebilir. Ancak günümüz endüstrisinde gaz ve plazma yöntemleri daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

2.6.2.1 Sıvı Nitrokarbürizasyon

Diğer bir adıyla tuz banyosunda nitrokarbürizasyon olan bu yöntem en eski tekniklerden biridir. Sıvı nitrokarbürizasyon yönteminde tuz banyosu azot ve karbon verici ortam olarak kullanılmaktadır. Tuz banyoları genelde sodyum siyanür, sodyum siyanat, sodyum karbonat, potasyum karbonat ve potasyum klorür gibi bileşikler içermektedir. Sıvı nitrokarbürizasyonda kurulum maliyetlerinin düşük olması ve işlem süresinin kısa olması avantajdır. Fakat çevreye zararlı siyanürlü atıkların oluşması dezavantaj olarak kabul edilmektedir [2].

2.6.2.2 Gaz Nitrokarbürizasyon

Gaz nitrokarbürizasyon işleminde, azot ve karbon sağlayıcı gazlar olarak amonyak, azot, hidrojen, metan, etan, propan, karbon monoksit ve karbon dioksit kullanılmaktadır. Maliyet avantajı nedeniyle genellikle azot kaynağı olarak amonyak tercih edilirken, karbon kaynağı olarak ise etan propan karışımı kullanılmaktadır. Fırın içerisine gönderilen gazların sıcaklık ile birlikte

parçalanmasıyla malzeme yüzeyine difüzyon işlemi başlamış olmakta ve gerekli sıcaklık ve gaz karışımı sağlandıkça nitrokarbürizasyon devam etmektedir [2].

Bu yöntemde azot ve karbon difüzyonu aynı anda gerçekleşmesine rağmen ortamda kullanılan gazların yaklaşık %95'i azot verici gazlardan, %5'i ise karbon verici gazlardan oluşmaktadır. Karbon kaynağı olan gazların oranının artması, beyaz tabakada sementit (Fe_3C) fazının oluşumuna yol açarak yapının gevrekleşmesine sebep olabilmektedir. Bu nedenle, karbon verici gazların miktarı dikkatle ayarlanmalıdır. Buradaki karbon difüzyonunun temel amacı, sementit oluşumuna yol açmadan yüzeydeki dekarbürizasyon riskini önlemek ve yüzeyin mekanik özelliklerini iyileştirmektir [17].

Gaz ortamında ferritik nitrokarbürizasyon işlemi genellikle 570-580°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir. Bu sıcaklıkların altında, difüzyon hızı azalmakta, bu da işlem süresinin uzamasına yol açmaktadır. Sıcaklık yükseltilecek difüzyon hızı arttırıldığında ise işlem östenitik nitrokarbürizasyon olarak adlandırılmaktadır. Ancak östenitik nitrokarbürleme sırasında faz dönüşümü kaynaklı beyaz tabakanın dökülme riski ve ısıl çarpılma riski ortaya çıkabilmektedir. Bu riskler, özellikle hassas parçalar için önemli bir dezavantaj oluşturmaktadır. Bu nedenle, endüstride yaygın olarak tercih edilen ferritik nitrokarbürleme işlemi, bu riskleri minimize ederek daha güvenli ve kontrollü bir yüzey sertleştirme yöntemi sunmaktadır [4, 25].

2.6.3 Plazma Nitrokarbürizasyon

Plazma nitrokarbürleme işlemi, genellikle amonyak, azot, hidrojen gibi gazların yanı sıra karbon kaynağı olarak kullanılan etan, metan, propan, karbonmonoksit ve karbondioksit gibi gazların bulunduğu bir atmosferde gerçekleştirilmektedir. İşlem sıcaklığına bağlı olarak farklı isimler almaktadır: 450–590°C aralığında uygulandığında bu işlem "ferritik nitrokarbürleme", 590–723 °C arasında ise "ostenitik nitrokarbürleme" olarak adlandırılmaktadır. Bu işlem sırasında kullanılan azot ve karbon içerikli gazların debisi kritik öneme sahiptir. Özellikle karbon verici gazların akış hızı ve basıncının artması durumunda, oluşan beyaz tabaka içerisinde sementit (Fe_3C) fazları meydana gelebilmektedir. Bu tabaka, genellikle $\gamma'-Fe_4(N, C)$ ve $\epsilon-Fe_{2-3}(N, C)$ fazlarından oluşmaktadır. Ancak sementit

fazının ortaya çıkması, tabakanın kırılmasını artırdığı için istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle, nitrokarbürleme süreçlerinde sementit oluşumu genellikle engellenmeye çalışılmaktadır. Ayrıca, karbonun yüzeye difüzyonu, yüksek sıcaklıklarda meydana gelebilecek dekarbürizasyonu önlemek açısından önemlidir [2].

Endüstriyel uygulamalarda ferritik ve ostenitik plazma nitrokarbürleme yöntemleri, çeşitli çelik türlerinin yüzey sertliğini ve aşınma direncini artırmak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Ferritik nitrokarbürleme, boyutsal hassasiyetin ön planda olduğu parçalarda tercih edilmekteyken; ostenitik nitrokarbürleme, karbon içeriği düşük olan sade karbonlu çeliklerin sertleştirilmesi amacıyla uygulanmaktadır. Ostenitik yöntemde elde edilen yüzey sertliği ve aşınma direnci daha yüksek olmasına rağmen, yüksek sıcaklık ve faz dönüşümlerinden kaynaklanan ısıl gerilmeler nedeniyle bu yöntem, boyutsal hassasiyetin kritik olduğu uygulamalarda tercih edilmemektedir [2].

Plazma ve gaz nitrokarbürleme işlemleri arasında yöntemsel bazı farklar bulunmakla birlikte, elde edilen yüzey özellikleri açısından büyük benzerlikler söz konusudur. Karbon ve azot atomlarının difüzyonu için gaz nitrokarbürleme işleminde ısı enerjisi kullanılırken, plazma nitrokarbürlemede bu gazlar iyonlaştırılarak yüzeye taşınmaları sağlanmaktadır. Bu yöntemlerin her ikisinde de beyaz tabakada $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}(\text{N}, \text{C})$ fazının daha fazla oluşmasını sağlamak amacıyla azot içeren gazların basıncının artırılması, yani KN değerinin yükseltilmesi gerekmektedir [2].

2.6.4 Karbonitrasyon

Karbonitrasyon, karbon ve azot atomlarının ostenit fazındaki çeliğe difüzyon yoluyla yayılmasını sağlayan bir yüzey sertleştirme işlemidir. Bu işlemde, karbon ve azotun difüzyonunun ardından yüzeydeki kimyasal bileşenlerin değiştirilmesi amacıyla parçaya suda soğutma işlemi uygulanmaktadır. Karbonitrleme işlemi nitrokarbürleme ile benzerlik gösterse de aralarındaki temel fark karbonitrleme işlemi sırasında faz dönüşümü meydana gelmesidir. Çünkü işlem, ostenit sıcaklıklarında (950-1050°C) gerçekleştirilmektedir. Nitrokarbürleme işlemi ise ferritik fazda gerçekleştiği için faz dönüşümüne yol açmaz. Karbonitrleme

işleminde difüzyon tamamlandığında ve parça suda soğutulduğunda martenzitik bir yapı elde edilmektedir [1].

Bu işlem, hem gaz ortamında hem de tuz banyolarında yapılabilir. Siyanür banyosunda yapılan yüzey sertleştirme işlemi tuz banyosunda karbonitrüleme ile temel olarak aynı yöntemleri içermektedir. Her iki süreçte de azot, yüzey sertliğini ve sertleşme kapasitesini artırırken, azotun yüzeyde birikmesi karbonun difüzyonunu engelleyebilmektedir. Ayrıca, yüzeydeki sementit fazlarının artması, azotun difüzyonunu engelleyerek sert nitrür fazlarının oluşumunu yavaşlatmaktadır. Karbonitrüleme işleminin başarısı, azot ve karbon sağlayıcı ortamların yanı sıra sıcaklık, süre gibi diğer parametrelerin de dikkatli bir şekilde seçilmesine bağlıdır [1].

2.6.5 Sementasyon (Karbürleme)

Sementasyon, 850-950°C sıcaklıkta ostenit fazında bulunan çeliğe karbon emdirilerek yüzeyde sementit (Fe₃C) fazının elde edildiği yüzey sertleştirme yöntemidir. Bu işlem genellikle düşük karbonlu çeliklere uygulanmaktadır. Örneğin, %0.2 karbon içeren bir çeliğe sementasyon uygulandığında yüzeydeki karbon oranının %0.8-1 aralığına çıkması ve yüzeyde sementit fazı oluşumu beklenmektedir. Sementasyon sonucunda yüzeydeki karbon oranının %1'in üzerine çıkması, malzemenin sertliğini arttırabilir ancak gevrekliğin de önemli ölçüde artmasına neden olmaktadır. Bu yüzden bu kadar yüksek karbon oranları genellikle tercih edilmemektedir. Sementasyon işleminden sonra, malzemenin kullanılacağı yere göre suda veya yağda soğutma yapılabilir. Düşük alaşımlı ve düşük karbonlu çeliklerde sementasyon sonrası soğutma işlemi yağda yapılırsa beynitik yapı, suda yapılırsa martenzitik yapı oluşmaktadır [1, 33].

Sementasyon çeşitli yöntemlerle yapılabilir. Bu yöntemler gaz, tuz, plazma, vakum ve paket olarak sıralanabilir. Temel prensip, her bir yöntemde çelik yüzeyine karbonun difüzyon yoluyla emdirilmesidir. Her bir yöntemin avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Vakum ve plazma karbürleme yöntemlerinde fırın içerisinde oksijen bulunmaması nedeniyle tercih edilmektedir. Yüksek miktarda üretimler için ısıtma işlem parametrelerinin daha hassas bir şekilde

kontrol edilebilmesi ve insan kaynaklı hataların minimize edilmesi nedeniyle gaz karbürleme tercih edilmektedir. Ancak bu yöntemin dezavantajı, yüksek ilk yatırım maliyetidir. Diğer yandan tuz banyosu ve paket karbürleme endüstriyel kullanımda azalsa da özellikle küçük ölçekli sanayiler tarafından hala kullanılmaktadır [1, 33].

Katı sementasyon yöntemi genellikle odun kömürü gibi karbon verici maddelerle uygulanmaktadır. Bu yöntemde ısıtma ve soğutma süreci uzun sürdüğünden büyük ölçülü parçaların sertleştirilmesine elverişli değildir. Ancak parçanın sadece belirli bir bölgesinde sementasyon isteniyorsa bu yöntem uygun olabilir [1, 33].

Sıvı sementasyon işlemi, karbon verici tuz banyoları kullanılarak yapılmaktadır. Tuz çeşidi olarak sodyum siyanür, kalsiyum siyanür ve potasyum siyanür gibi tuzlar kullanılmaktadır. Gaz sementasyonda ise karbon sağlayıcı olarak metan, etan ve propan gibi gazlar kullanılmaktadır. Katı ve sıvı sementasyon işlemlerine kıyasla daha hassas ve daha hızlı olması sebebiyle gaz sementasyon yöntemi tercih edilebilir [1].

Plazma sementasyon yöntemi proses olarak plazma nitrürleme işlemiyle benzerdir. İşlem esnasında kullanılan gazlar ve ısıl işlem parametreleri bu iki yöntemi birbirinden ayırmaktadır. Plazma sementasyon işlemi, ısıl işlem parametrelerinin hassas şekilde yönetilmesine olanak tanıyan bir yöntemdir. Bu yöntemde parça geometrisine bakılmaksızın sertlik derinliği homojen şekilde elde edilebilir. Ayrıca oksijensiz fırın ortamı sayesinde parça yüzeyinde oksitlenme riskini ortadan kaldırması nedeniyle de endüstride geniş bir kullanım alanına sahiptir [33].

2.6.6 Borlama

Borlama, 900-1100°C arasında değişen sıcaklıklarda bor atomlarının metal yüzeyine difüzyonu yoluyla sert borür fazları oluşturmayı amaçlayan bir termokimyasal yüzey işlemidir. İşlem sonucunda yüzeyde demir borür (FeB) ve FeB₂ gibi sert borür fazları meydana getirilmiş olmaktadır. Borlama işlemi, metal

yüzeyinin sertliğini, aşınma direncini, korozyon dayanımını artırmakta, ayrıca düşük sürtünme katsayısı ile yüksek sıcaklık mukavemeti sağlayan, altlık malzemeye iyi tutunan bir yüzey tabakası oluşturmaktadır [1].

Borlama işleminde, altlık olarak seçilen malzemenin kimyasal içeriği, işlem sıcaklığı ve işlem süresi yüzeyde FeB ve FeB₂ bileşenlerinden oluşan tabakanın özelliklerini etkilemektedir. FeB, sert ancak kırılabilir bir yapıya sahip olup, sertliği 1800-2000 HV arasında değişmektedir. FeB₂ ise FeB'ye kıyasla daha az sert olup 1500-1600 HV sertliğe sahip olmakla birlikte, daha homojen bir yapıya sahiptir [34].

Borlama, katı, sıvı, gaz veya plazma gibi farklı ortamlar kullanılarak her türlü çeliğe, demir ve demirdışı alaşımlara uygulanabilmektedir. En sık kullanılan borlama yöntemlerinin kutu borlama, pasta borlama, sıvı borlama, gaz borlama ve plazma borlama olduğu söylenebilir.

Kutu borlama, katı ortamda gerçekleştirilen ve uygulama kolaylığı ile düşük maliyeti sayesinde yaygın olarak tercih edilen bir yüzey sertleştirme yöntemidir. İşlem sırasında, yüksek sıcaklığa dayanıklı potalar tercih edilmektedir. Borlama yapılacak malzeme pota içine yerleştirilir ve çevresi 10-20 mm kalınlığında borlama tozu ile kaplanır. Eğer işlem atmosferik şartlarda uygulanıyorsa, potanın tamamen kapatılarak sızdırmazlığının sağlanması gerekir; inert gaz ortamında ise bu gerekli değildir. İşlem sıcaklığı genellikle 840 °C ile 1050 °C arasında olup, süre 1 ile 8 saat arasında değişmektedir. İşlem tamamlandıktan sonra potalar fırından çıkarılarak soğutulmaktadır [35].

Pasta borlama yöntemi, kutu borlamada kullanılan tozun bağlayıcı bir madde ile yoğunlaştırılarak macun kıvamına getirilmesi esasına dayanmaktadır. Hazırlanan bu macun, borlama yapılacak yüzeye 2-5 mm kalınlığında uygulanmakta ve ardından kurumaya bırakılmaktadır. Kuruyan iş parçası, belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılan fırında işleme alınmaktadır. Genellikle 800 °C ile 1000 °C sıcaklık aralığında, yaklaşık 5 saat süren bir işlem uygulanmaktadır [36].

Sıvı borlama yönteminde boraks ve borik asit gibi borlayıcı sıvılar kullanılmaktadır. İşlem, iş parçasının 900-1100 °C sıcaklıktaki bor verici sıvıya 2-9 saat süreyle daldırılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Diğer borlama yöntemlerine kıyasla daha maliyetli olan bu yöntemin dezavantajları arasında, işlem sonrasında iş parçası yüzeyinde oluşan tuz tabakası ve ısının her bölgede eşit dağılmaması nedeniyle bor tabakasının yüzeyde eşit kalınlıkta oluşmaması yer almaktadır [37].

Gaz borlama yönteminde, bor halojenleri, diboran (B_2H_6) ve organik bor bileşikleri borlayıcı ortam olarak kullanılmaktadır. 700-950°C sıcaklık aralığında argon (Ar) ve hidrojen (H_2) gazları ile birlikte bor sağlayıcı gaz, yaklaşık 0,67 bar basınç ile parça üzerine uygulanmaktadır. Bu koşullar altında gerçekleştirilen işlem, yüzeyde istenilen borür tabakasının oluşumunu sağlamaktadır [38].

Plazma borlama yöntemi, 800-1000 °C sıcaklık aralığında bor sağlayıcı gazların plazma ortamında kullanılmasıyla gerçekleştirilen bir yüzey sertleştirme yöntemidir. Bu yöntemde, yüzeyde oluşan borür tabakası yalnızca Fe_2B fazından oluşmaktadır. Enerji verimliliği yüksek olan bu yöntem, iş parçasında deformasyon riskinin düşük olması nedeniyle avantaj sağlarken, yüksek maliyeti dezavantajları arasında yer almaktadır [39].

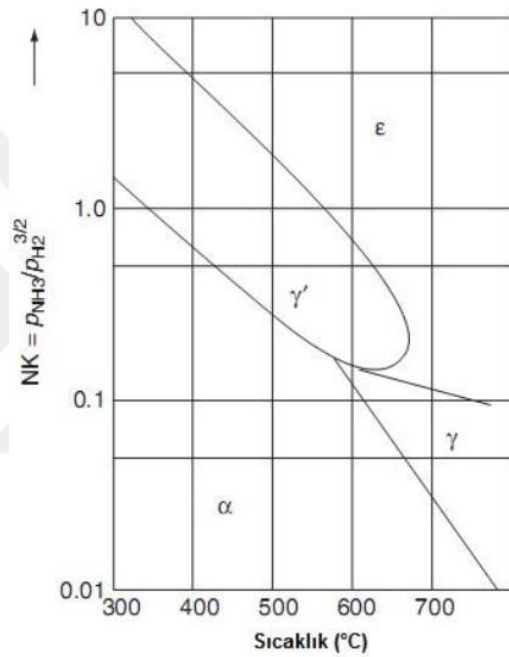
2.7 KN Kontrollü Yüzey Sertleştirme

KN kontrol sistemi, nitrasyon işlemi sırasında atmosferin nitrürleme potansiyelinin (KN) hassas bir şekilde kontrol edilmesini sağlayan modern bir yöntemdir. Bu sistem, nitrasyon sürecinin otomatik ve güvenilir bir şekilde yönetilmesine olanak tanıyarak, istenilen yüzey özelliklerinin elde edilmesini ve işlemin tekrarlanabilirliğini artırmaktadır. Nitrürleme potansiyeli olan KN değeri (2.2) eşitliği ile hesaplanmaktadır [5, 6].

$$KN = p_{H_2} / p_{NH_3} \quad (2.2)$$

Formülde yer alan p_{NH_3} nitrürleme atmosferindeki ayrıışmamış amonyak gazının kısmi basıncını belirtirken p_{H_2} , amonyağın ayrıışması sonucunda ortama yayılan hidrojen gazının kısmi basıncını ifade etmektedir [5, 6].

Nitrürleme işlemlerinde kullanılan KN kontrolü, Lehrer diyagramı ile ilişkilidir. Bu diyagram, Lehrer'in yaptığı termodinamik çalışmalar sonucunda, demir ile azotun oluşturduğu fazları ve fazlar arası sınırları, işlem sıcaklığının ve nitrürleme potansiyelinin fonksiyonu olarak tanımlayan temel diyagramdır [5, 6]. Şekil 2.7'de Lehrer denge diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 2.7 Lehrer diyagramı [40]

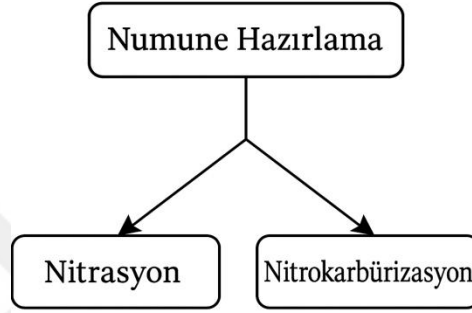
Kullanıcı tarafından, nitrasyon sonrası numuneden beklenen özellikler olacaktır. Bunlar beyaz tabakada oluşan faz tipleri ve miktarları, yüzeyin mekanik özellikleri, yüzey pürüzlülük değeri ve nitrasyonun difüzyon mesafesi gibi özellikler olabilir. Bu özellikleri sağlayabilmek için işlem esnasında yüzeye gönderilen azot miktarının belirli limitler içerisinde olması gerekmektedir. Bununla birlikte kullanıcıya sağlanan ürün özellikleri tekrarlanabilir olmak zorundadır. Tüm bu gereksinimlerin sağlanması, beyaz tabaka ve difüzyon bölgesinin büyüme kinetiğini etkileyen başta nitrürleme potansiyeli olmak üzere

sıcaklık, süre ve fırın içerisindeki gaz karışımının dikkatli şekilde seçilmesi ile mümkündür [5, 6].

KN kontrollü gaz nitrüleme sistemleri, günümüz endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler tamamen bilgisayar kontrollü olup, işlem süreci boyunca manuel müdahaleye ihtiyaç duyulmaz. Prosesin tüm aşamaları, fırın sistemine entegre yazılım aracılığıyla programlanarak, tekrarlanabilir işlemlerin gerçekleştirilmesine imkân tanımaktadır [5, 6].



Deneysel çalışmalar kapsamında AISI 4340 çeliğinden 5 adet numune hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numunelere nitrasyon ve nitrokarbürizasyon yüzey sertleştirme işlemleri uygulanmıştır. Şekil 3.1’de AISI 4340 ıslah çeliğine uygulanan yüzey sertleştirme adımları gösterilmektedir.



Şekil 3.1 AISI 4340 ıslah çeliğine uygulanan yüzey sertleştirme adımları

3.1 Numune Hazırlama

Yapılan bu çalışmada AISI 4340 olarak bilinen 34CrNiMo6 ıslah çeliği kullanılmıştır. Bu malzeme, içerisinde nitrür oluşturu elementler bulundurması sebebi ile nitrasyon uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan AISI 4340 çeliği soğuk çekilmiş ve tavllanmış şekilde 40 mm’lik çapa sahip çubuktan kesilerek temin edilmiştir. Malzemenin kimyasal analizi Şekil 3.2’de gösterilen Thermo Scientific ARL 3460 markalı optik emisyon spektrometre cihazı ile yapılmıştır. Analiz sonucu Tablo 3.1’de gösterilmektedir.

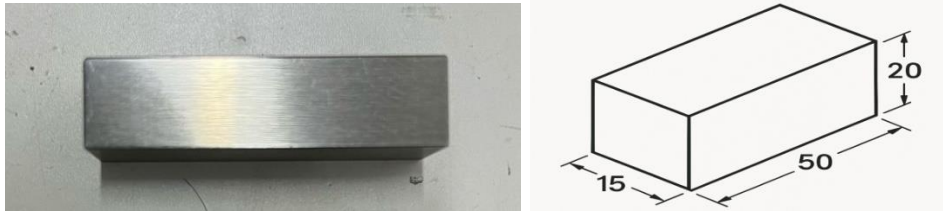


Şekil 3.2 Thermo Scientific ARL 3460 optik emisyon spektrometre cihazı [41]

Tablo 3.1 AISI 4340 malzemesinin kimyasal analizi

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Fe
%Ağırlık	0,391	0,247	0,705	0,010	0,007	0,794	0,229	1,687	0,072	0,088	95,77

Testere ve CNC tezgahı kullanılarak çap ölçüsü 40 mm olan AISI 4340 çubuk malzemeden 15x20x50mm boyutlarında 5 adet numune hazırlanmıştır. Numune görüntüsü Şekil 3.3'te gösterilmektedir.



a)

b)

Şekil 3.3 Numune görüntüsü a)Hazırlanmış numune b)Teknik çizim

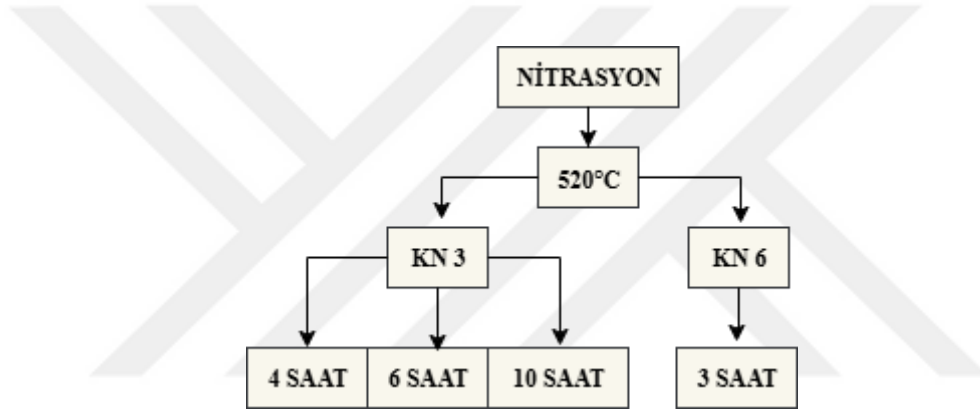
3.2 Nitrasyon ve Nitrokarbürizasyon İşlemi

Hazırlanan 5 adet numunenin bir tanesine nitrokarbürizasyon işlemi, kalan dördüne de nitrasyon işlemi uygulanmıştır. Tablo 3.2'de numunelere uygulanan nitrasyon ve nitrokarbürizasyon işlemlerinin detayları verilmiştir.

Tablo 3.2 Nitrasyon ve nitrokarbürizasyon işlem parametreleri

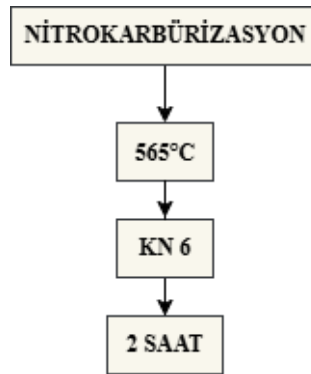
İŞLEM ADI	SICAKLIK	SÜRE	KN
NİTROKARBÜRİZASYON	565°C	2 SAAT	6
NİTRASYON	520°C	3 SAAT	6
NİTRASYON	520°C	4 SAAT	3
NİTRASYON	520°C	6 SAAT	3
NİTRASYON	520°C	10 SAAT	3

Uygulanan yüzey sertleştirme işlemlerinin detayları diyagram ile Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



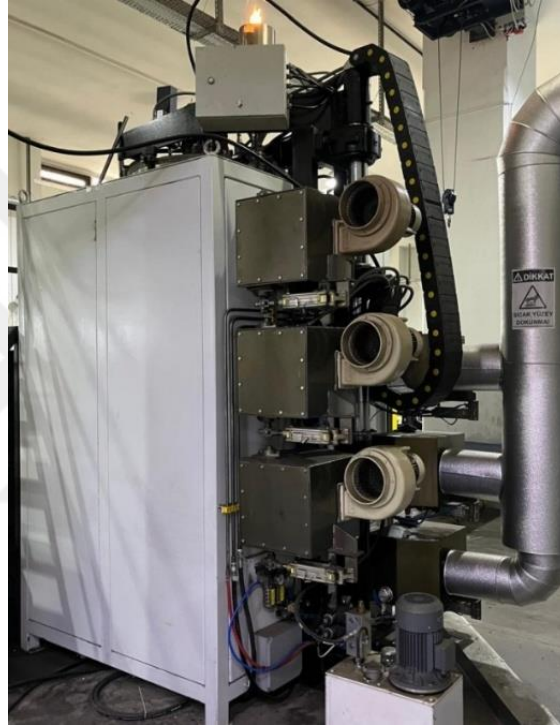
Şekil 3.4 Nitrasyon işlemi için kullanılan parametreler

Nitrokarbürizasyon işlemi için kullanılan parametreler Şekil 3.5'te yer almaktadır.



Şekil 3.5 Nitrokarbürizasyon işlemi için kullanılan parametreler

Yüzey sertleştirme işlemi için Şekil 3.6’da gösterilen Teknovak adlı firmanın üretmiş olduğu DGN-10 kodlu 1 ton kapasiteye sahip dikey gaz nitrasyon fırını kullanılmıştır. Bu fırın KN kontrollü olması sebebiyle işlem kontrolü ve tekrarlanabilirlik açısından ciddi anlamda kolaylıklar sağlamaktadır. Kullanılan bu fırında sistem sürekli olarak ortamda parçalanamayan amonyak miktarını ölçmekte ve gerekli miktarda amonyak gazını otomatik olarak takviye etmektedir. Bu sayede nitrasyon adımının sonuna kadar sabit KN değeri ile işlem gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3.6 Teknovak DGN-10 nitrasyon fırını

Nitrasyon ve nitrokarbürizasyon işlemlerinde azot sağlayıcı gaz olarak amonyak (NH_3) gazı kullanılmaktadır. Nitrokarbürizasyon işleminde bununla birlikte karbon sağlaması için karbondioksit (CO_2) gazı kullanılmaktadır. Fırın içerisine verilen amonyak gazının ayrışması sonucu ortamda hidrojen açığa çıkar ve bu hidrojen yakılarak bacadan dışarı atılmaktadır. Hidrojen gazını yakabilmek için propan gazı kullanılmaktadır. Propanın alevlenme özelliği sayesinde bacada sürekli alev oluşumu sağlanmış olmaktadır.

3.3 Karakterizasyon

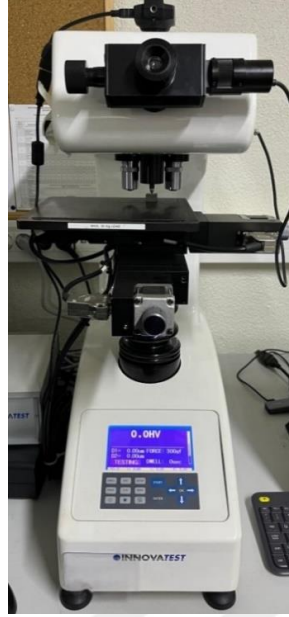
Yüzeyleri sertleştirilmiş olan numunelere Şekil 3.7’de gösterilmekte olan karakterizasyon işlemleri uygulanmıştır.



Şekil 3.7 Karakterizasyon işlem adımları

3.3.1 Yüzey Sertlik Karakterizasyonu

Yüzey sertlik ölçümü için Vickers ölçüm yöntemi kullanılmıştır. Sertlik ölçümü Innovatest markalı cihazda 10 saniye yükleme süresi ve 300 g yük ile her numuneye uygulanmıştır. Yüzey sertlik ölçümleri nitrasyon öncesi ve sonrası olacak şekilde tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.8’de sertlik ölçümü için kullanılan cihaz gösterilmektedir.



Şekil 3.8 Innovatest Vickers sertlik ölçüm cihazı

3.3.2 Yüzey Pürüzlülük Karakterizasyonu

Numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri Mitutoyo SJ-210 178-560-01D markalı ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları Ra cinsinden μm olarak hesaplanmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümleri nitrasyon öncesi ve sonrası olacak şekilde tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.9’da yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı gösterilmektedir.



Şekil 3.9 Mitutoyo SJ-210 178-560-01D yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı [42]

3.3.3 Difüzyon Derinliği Karakterizasyonu

Yüzey sertleştirme işlemi tamamlanmış olan numunelere sırasıyla kesme, bakalite alma, zımparalama ve parlatma metalografik numune hazırlama işlemleri uygulanmıştır.

Numuneleri kesme işlemi 4 HP motor gücüne, 90x65x130 mm kesme kapasitesine ve 250 mm çapında kesme diski kullanımına sahip Metkon marka Metacut–M 250 Cut-Off Machine model cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Kesme esnasında soğutucu ve korozyon önleyici sıvı olarak %3 Metkon Metcool + %97 su karışımı kullanılmıştır. Şekil 3.10’da kesme işleminin yapıldığı cihaz gösterilmektedir.



Şekil 3.10 Metkon Metacut–M 250 Cut-Off Machine [43]

Kesme işlemi tamamlanan numunelerin zımpara ve parlatma işlemlerinin daha rahat yapılabilmesi ve daha kolay incelenebilmesi için inceleme yapılacak yüzeye göre bakalite alma işlemi yapılmıştır. Bakalite alma işlemi şekil 3.11’de gösterilen METSPRE marka BC-45 model cihaz ile 195°C’de siyah bakalit tozu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.11 METSPRE BC-45 sıcak bakalite alma cihazı

Bakalite alınan numunelerin zımparalama ve parlatma işlemleri Metkon marka Forcipol 202 model zımparalama ve parlatma cihazı ile yapılmıştır. Zımpara işlemi için manyetik özellikli elmas diskler kullanılmıştır. Kabadan inceye olacak şekilde sırasıyla 54-18-15-3 mikrometrelik elmas disklerle işlem gerçekleştirilmiştir. Zımparalama esnasında su kullanılarak aşınan metallerin yüzeyden uzaklaşması ve numunenin soğuk kalması sağlanmıştır. Dönme süreleri her birinde yaklaşık 10 dakika olarak tutulmuştur. Şekil 3.12’de zımparalama ve parlatma cihazı gösterilmektedir.

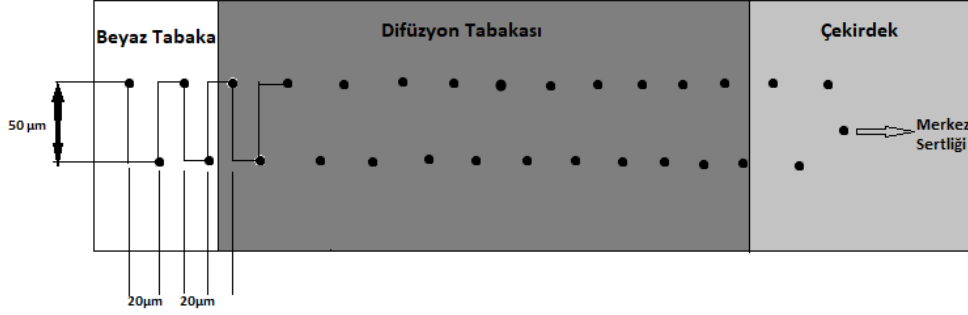


Şekil 3.12 Metkon Forcipol 202 Zımparalama ve Parlatma Cihazı [44]

Zımparalama işlemi tamamlanan numunelerin yüzeyinde çizik kalmaması ve yüzeyin parlaması için parlatma işlemine geçilmiştir. Zımparalama işleminin yapıldığı cihazda bu sefer aşındırıcı elmas diskler yerine parlatma çuhaları kullanılmıştır. Parlatma işlemi kaba ve ince parlatma olarak iki kademe yapılmıştır. İlk olarak tüysüz çuha ile 6 µm elmas solüsyonu kullanılmıştır. Parlatma işleminde kullandığımız çuhalar, sürtünmeyi ve bununla birlikte oluşabilecek ısınmayı engellemek amacıyla yağlayıcı solüsyon ile ıslatılmıştır. İnce parlatma adımı ise kadife çuha ile 1 µm elmas solüsyonu kullanılmıştır. İki parlatma adımı da yaklaşık 10 dakika sürmüştür. Bu süre boyunca ara ara elmas solüsyonu çuhaya sıkılmıştır. Parlatma tamamlandıktan sonra numuneler sabunlu pamukla temizlenmiş, ardından saf alkolle yıkanıp kurutma makinesi ile kurutulmuştur. Parlatma işlemi sonrasında numunelerin yüzeyi ayna gibi parlamıştır.

Parlatma işlemi tamamlanan numuneler için sertlik taraması adımına geçilmiştir. Sertlik taraması sonucu elde edilen veriler ile difüzyon derinlikleri de hesaplanmıştır. Sertlik ölçümü için Vickers ölçüm yöntemi kullanılmıştır. Ölçümler Şekil 3.8’de gösterilmiş olan Vickers sertlik ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Difüzyon derinliğinin hesaplanmasında DIN 50190-3 “Nitrüleme sonrası etkili sertleştirme derinliğinin belirlenmesi” standardı referans alınmıştır. İlk olarak

numunelerin merkezlerinden sertlik değeri alınmıştır. Bu değer çekirdek sertliğini ifade etmektedir. Sonrasında beyaz tabakanın en dış kenarından çekirdeğe doğru 20 mikron aralıklarla sertlik değerleri alınmıştır. Noktaların birbiri ile çakışmaması için her 20 mikron aralığında aşağı ve yukarı yönde 50 mikron gidilerek ölçüm yapılmıştır. Şekil 3.13'te DIN 50190-3 standardına uygun şekilde difüzyon derinliği ölçümünün nasıl yapıldığı şematize edilmektedir.



Şekil 3.13 DIN 50190-3 standardında difüzyon derinliği ölçümünün şematize hali

Şekilde gösterildiği gibi merkez sertliğine varıncaya kadar ölçüme devam edilmiştir. Elde edilen sertlik değerlerine göre şöyle bir hesaplama yapılmıştır;

- Merkez sertlik değerimiz “x” olsun. “x+50” sertlik değerini beyaz tabakanın dış kenarından çekirdeğe doğru ilerlerken kaç µm mesafede elde ediyorsak o mesafe bizim difüzyon mesafemizdir.

3.3.4 Morfolojik Karakterizasyon (Optik Mikroskop)

Numuneler optik mikroskop altında incelenmek için dağlanmıştır. Dağlama işlemi tane sınırlarını ortaya çıkararak, mikroyapıdaki fazların ve beyaz tabakanın mikroskop altında rahat şekilde incelenmesini sağlar. Dağlayıcı olarak %2 Nital solüsyonu kullanılmıştır. Numuneler öncelikle etil alkol ile yıkanmıştır. Ardından %2 nitrik asit + %98 saf su ile hazırlanmış olduğumuz %2 Nital dağlayıcı solüsyonu ile numuneler yaklaşık 10 saniye dağlanmıştır. Dağlama gerçekleştikten sonra yüzeyler hızlı şekilde etil alkol ile yıkanıp kurutma makinesi ile kurutulmuştur.

Mikroskop altında incelemeye hazır olan numuneler Şekil 3.14'te gösterilmekte olan Nikon marka Eclipse MA100 model optik mikroskop cihazı ile incelemeye

alınmıştır. Kullanmış olduğumuz bu mikroskop 50x, 100x, 200x, 500x ve 1000x büyütme yapabilmektedir. Numunelerin bütün kenarları beyaz tabaka oluşumunu görebilmek için incelenmiştir. Sonrasında farklı büyütmelerde farklı noktalardan görüntü alarak beyaz tabaka kalınlıkları ölçülmüştür.



Şekil 3.14 Nikon Eclipse MA100 optik mikroskop cihazı [45]

3.3.5 Morfolojik Karakterizasyon (SEM)

SEM incelemesi için Hitachi marka SU5000 model Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. SEM analizi 4 ve 10 saatlik nitrasyon numuneleri için yapılmıştır. Şekil 3.15'te Hitachi SU5000 SEM cihazı gösterilmektedir.



Şekil 3.15 Hitachi SU5000 SEM cihazı [46]

3.3.6 Elementel Analiz (EDS)

SEM cihazında bulunan bir yöntem olan Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) analizi ile de beyaz tabaka ve difüzyon bölgesindeki azot ve diğer elementlerin miktarları incelenmiştir. EDS analizi 4 ve 10 saatlik nitrasyon numuneleri için yapılmıştır. EDS analizi için Şekil 3.15'te gösterilmekte olan Hitachi SU5000 SEM cihazı kullanılmıştır.

SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Bu bölümde, 520°C de farklı sürelerde nitrasyon ve 565°C 2 saat süresince nitrokarbürizasyon işlemi uygulanmış numunelerin yüzey sertlik, yüzey pürüzlülük değerlerindeki değişimler, difüzyon derinlikleri, optik mikroskop ve SEM ile yapılan morfolojik inceleme sonuçları ve EDS ile yapılan elementel analiz sonuçları sunulmuştur.

4.1 Nitrasyon Sonuçları

Bu başlık altında nitrasyon numunelerine ait karakterizasyon sonuçları sunulmuştur.

4.1.1 Yüzey Sertlik Karakterizasyon Sonuçları

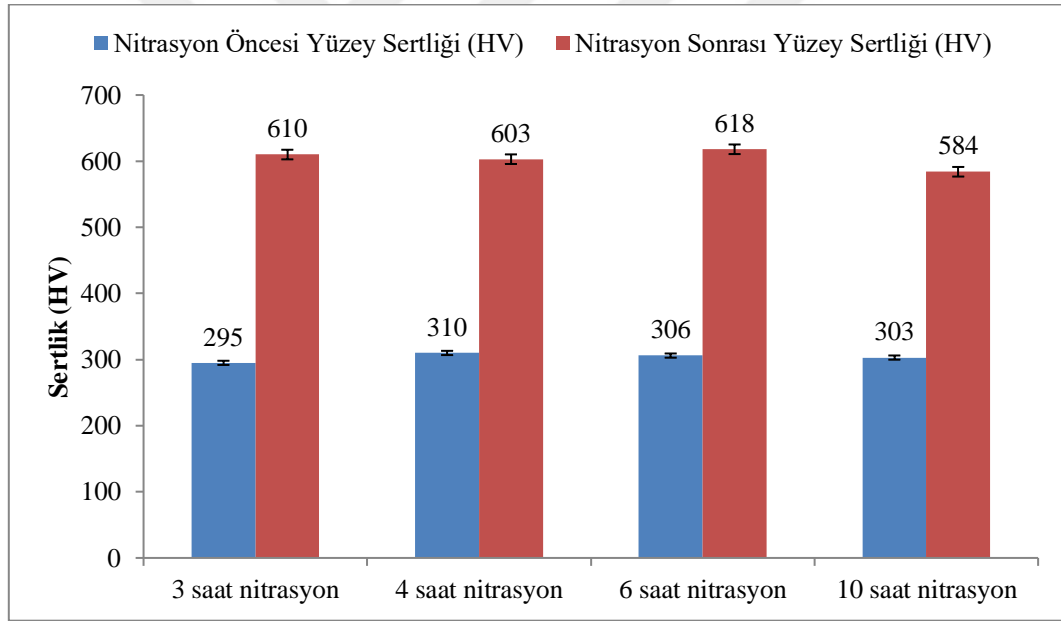
Yapılan çalışma kapsamında nitrasyon uygulanan numunelerin nitrasyon işlemi öncesi ve sonrası yüzey sertlikleri Şekil 3.8’de gösterilmiş olan Vickers sertlik ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Numunelerin hepsi AISI 4340 malzeme ve aynı lota ait malzemeden seçildiği için yüzey sertleştirme işlemi öncesi alınan yüzey sertlik değerlerinin beklenen şekilde birbirine yakın olduğu görülmüştür. Tablo 4.1’de numunelerin nitrasyon işlemi öncesi ve sonrası yüzey sertlik değerleri gösterilmektedir.

Tablo 4.1 Nitrasyon öncesi ve sonrası yüzey sertlik değerleri

Numune	Nitrasyon Öncesi Yüzey Sertliği (HV)	Nitrasyon Sonrası Yüzey Sertliği (HV)	Yüzeydeki Sertlik Değişimi (HV)
3 saat nitrasyon	295	610	+315
4 saat nitrasyon	310	603	+293
6 saat nitrasyon	306	618	+312
10 saat nitrasyon	303	584	+281

Yapılan yüzey sertlik ölçümleri sonucunda yüzey sertliği en çok artan numunenin +315 HV'lik artışla 3 saatlik nitrasyon numunesi olduğu, yüzey sertliği en az artan numunenin ise +281 HV'lik artışla 10 saatlik nitrasyon numunesi olduğu tespit edilmiştir. Nitrasyon numunelerinde ortalama olarak 300 HV'lik bir sertlik artışı görülmüştür.

Nitrasyon işlemlerinde kullanılan farklı KN değerlerinin yüzey sertliğine etkisi incelenmiştir. 3 saat nitrasyon işleminde KN değeri 6, diğer nitrasyon işlemlerinde ise KN değeri 3 olarak belirlenmiştir. Nitrasyon süresi 3 saat olan numunedeki yüzey sertlik artışı 4 saat nitrasyon gören numuneye göre daha fazla olmuştur. Bu fark 3 saatlik nitrasyon işleminde kullanılan KN değerinin 4 saat nitrasyon işleminde kullanılan KN değerine göre daha yüksek olması ile ilişkilendirilmiştir. Şekil 4.1'de yüzey sertlik değerleri karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.1 Yüzey sertlik değerlerinin karşılaştırılması

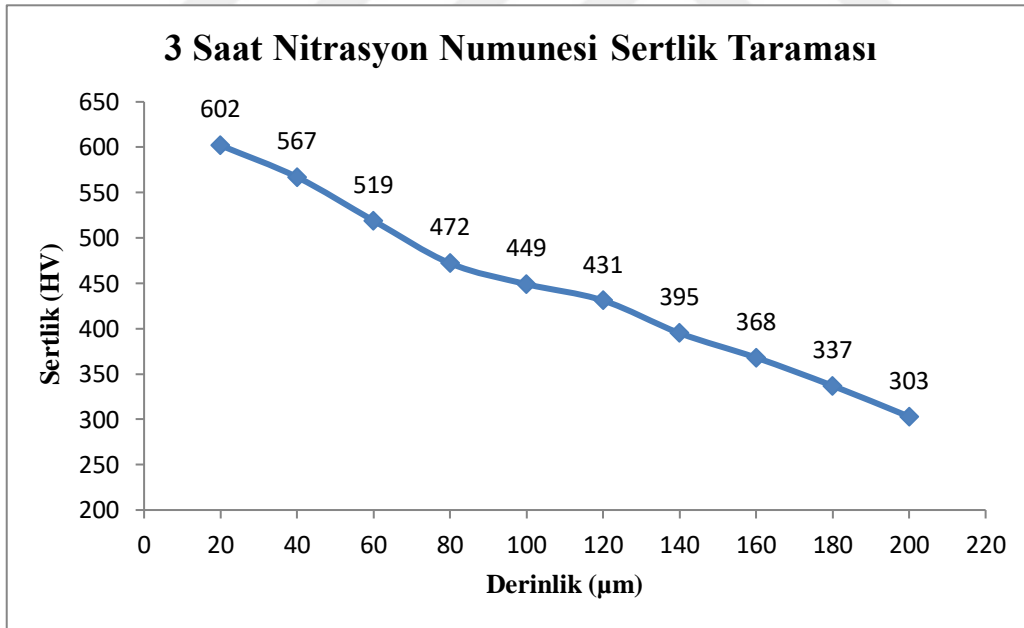
4.1.2 Difüzyon Derinliği Karakterizasyon Sonuçları

Nitrasyon işlemi sonrası her numune bakalite alınarak yüzeyden çekirdeğe doğru sertlik taramaları yapılmıştır. Sertlik taraması için Şekil 3.8'de gösterilmiş olan Vickers sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Sertlik taraması sonucunda malzemelerin difüzyon derinlikleri Bölüm 3'te anlatıldığı şekilde DIN 50190-3

standardına göre hesaplanmıştır. Aşağıda sırasıyla bütün numunelerin sertlik tarama sonuçları ve difüzyon derinlikleri gösterilmektedir.

Tablo 4.2 3 saat nitrasyon numunesi sertlik değerleri ve difüzyon derinliği

Numune	Derinlik (μm)	Sertlik (HV)	Çekirdek Sertliği = 295 HV $295 + 50 = 345$ HV <u>Difüzyon Derinliği = 180 μm</u>
3 saat nitrasyon	20	602	
	40	567	
	60	519	
	80	472	
	100	449	
	120	431	
	140	395	
	160	368	
	180	337	
	200	303	



Şekil 4.2 3 saat nitrasyon numunesi sertlik taraması

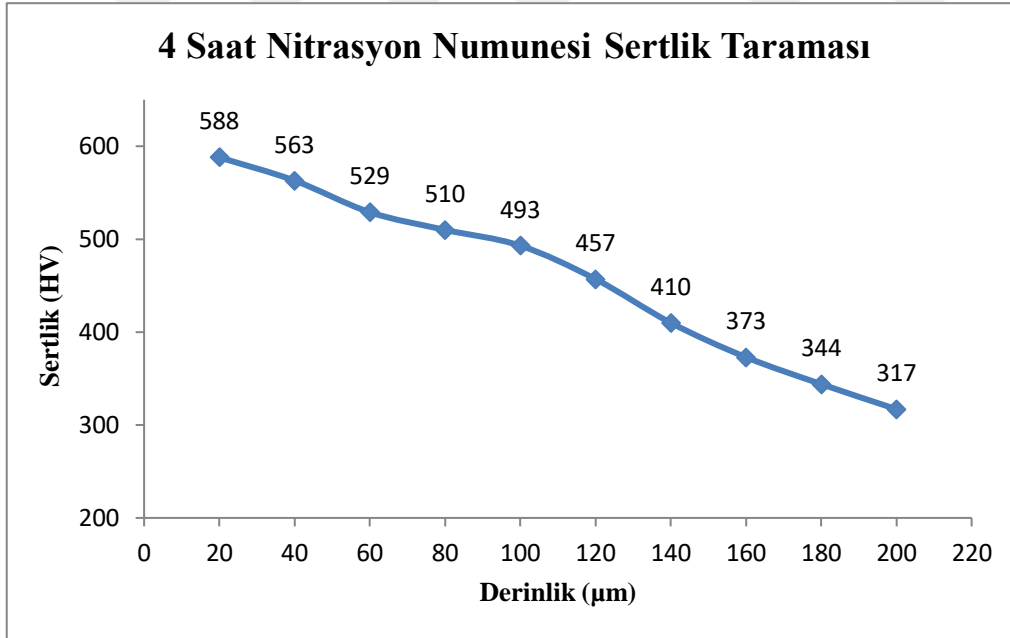
Tablo 4.2 ve Şekil 4.2'de 3 saat nitrasyon işlemi uygulanmış olan numunenin sertlik tarama sonuçları ve bu değerlerden yola çıkarak hesaplanmış olan difüzyon derinliği gösterilmektedir. Çekirdek sertliği 295 HV olarak ölçülen numunenin

yüzeysel sertleştirme işlemi sonrası yüzey sertlik değerinin 610 HV'ye yükseldiği görülmektedir. DIN 50190-3 standardı referans alınarak yapılan hesaplama sonucunda difüzyon derinliği 180 µm ölçülmüştür.

Tablo 4.3 4 saat nitrasyon numunesi sertlik değerleri ve difüzyon derinliği

Numune	Derinlik (µm)	Sertlik (HV)
4 saat nitrasyon	20	588
	40	563
	60	529
	80	510
	100	493
	120	457
	140	410
	160	373
	180	344
	200	317

Çekirdek Sertliği = 310 HV
 $310 + 50 = 360$ HV
Difüzyon Derinliği = 170 µm



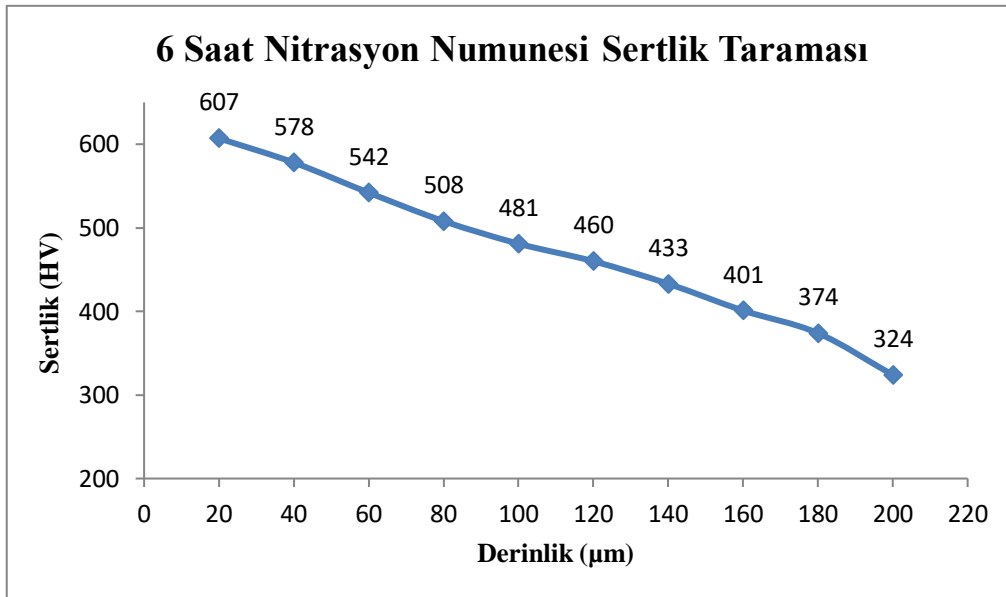
Şekil 4.3 4 saat nitrasyon numunesi sertlik taraması

Tablo 4.3 ve Şekil 4.3'te 4 saat nitrasyon işlemi uygulanmış olan numunenin sertlik tarama sonuçları ve bu değerlerden yola çıkarak hesaplanmış olan difüzyon derinliği gösterilmektedir. Çekirdek sertliği 310 HV olarak ölçülen numunenin yüzey sertleştirme işlemi sonrası yüzey sertlik değeri 603 HV'ye yükseldiği görülmüştür. DIN 50190-3 standardı referans alınarak yapılan hesaplama sonucunda difüzyon derinliği 170 µm ölçülmüştür.

Tablo 4.4 6 saat nitrasyon numunesi sertlik değerleri ve difüzyon derinliği

Numune	Derinlik (µm)	Sertlik (HV)
6 saat nitrasyon	20	607
	40	578
	60	542
	80	508
	100	481
	120	460
	140	433
	160	401
	180	374
	200	324

Çekirdek Sertliği = 306 HV
 $306 + 50 = 356$ HV
Difüzyon Derinliği = 190 µm

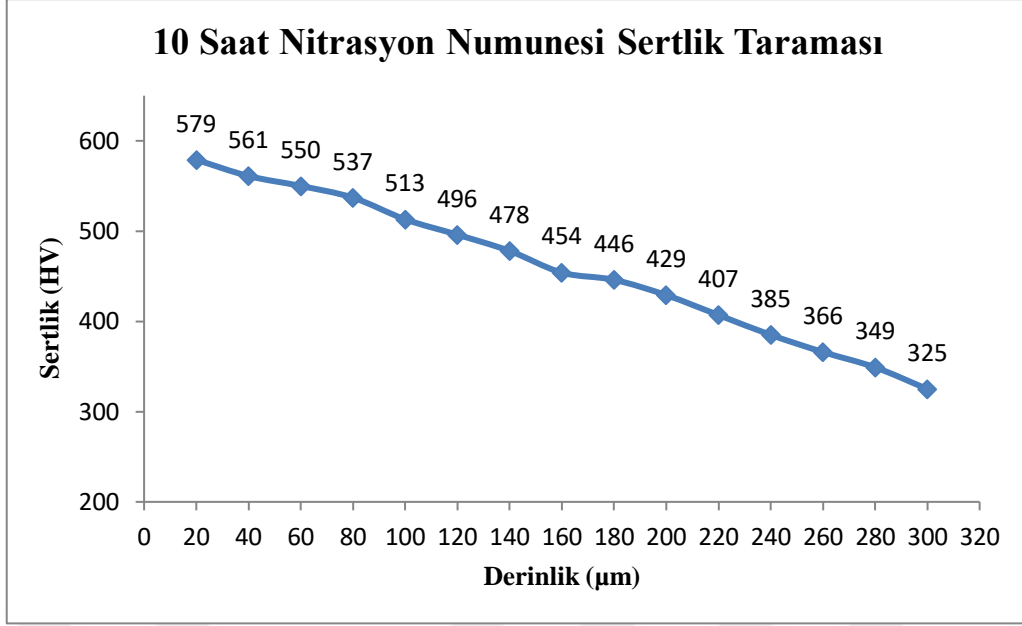


Şekil 4.4 6 saat nitrasyon numunesi sertlik taraması

Tablo 4.4 ve Şekil 4.4'te 6 saat nitrasyon işlemi uygulanmış olan numunenin sertlik tarama sonuçları ve bu değerlerden yola çıkarak hesaplanmış olan difüzyon derinliği gösterilmektedir. Çekirdek sertliği 306 HV olarak ölçülen numunenin yüzey sertleştirme işlemi sonrası yüzey sertlik değeri 618 HV'ye yükseldiği görülmüştür. DIN 50190-3 standardı referans alınarak yapılan hesaplama sonucunda difüzyon derinliği 190 µm ölçülmüştür.

Tablo 4.5 10 saat nitrasyon numunesi sertlik değerleri ve difüzyon derinliği

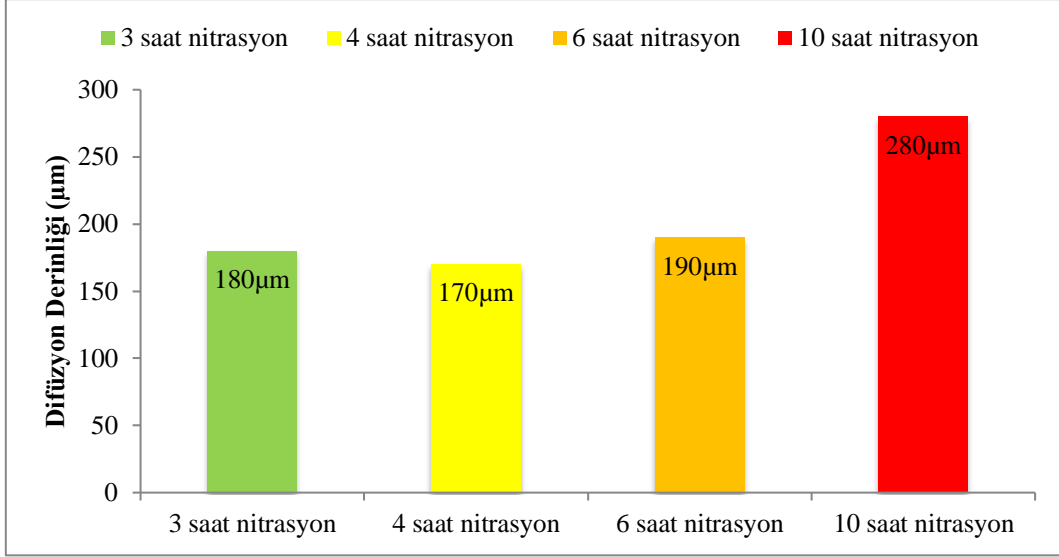
Numune	Derinlik (µm)	Sertlik (HV)	
10 saat nitrasyon	20	579	Çekirdek Sertliği = 303 HV $303 + 50 = 353$ HV <u>Difüzyon Derinliği = 280 µm</u>
	40	561	
	60	550	
	80	537	
	100	513	
	120	496	
	140	478	
	160	454	
	180	446	
	200	429	
	220	407	
	240	385	
	260	366	
	280	349	
	300	325	



Şekil 4.5 10 saat nitrasyon numunesi sertlik taraması

Tablo 4.5 ve Şekil 4.5'te 10 saat nitrasyon işlemi uygulanmış olan numunenin sertlik tarama sonuçları ve bu değerlerden yola çıkarak hesaplanmış olan difüzyon derinliği gösterilmektedir. Çekirdek sertliği 303 HV olarak ölçülen numunenin yüzey sertleştirme işlemi sonrası yüzey sertlik değeri 584 HV'ye yükseldiği görülmüştür. DIN 50190-3 standardı referans alınarak yapılan hesaplama sonucunda difüzyon derinliği 280 µm ölçülmüştür.

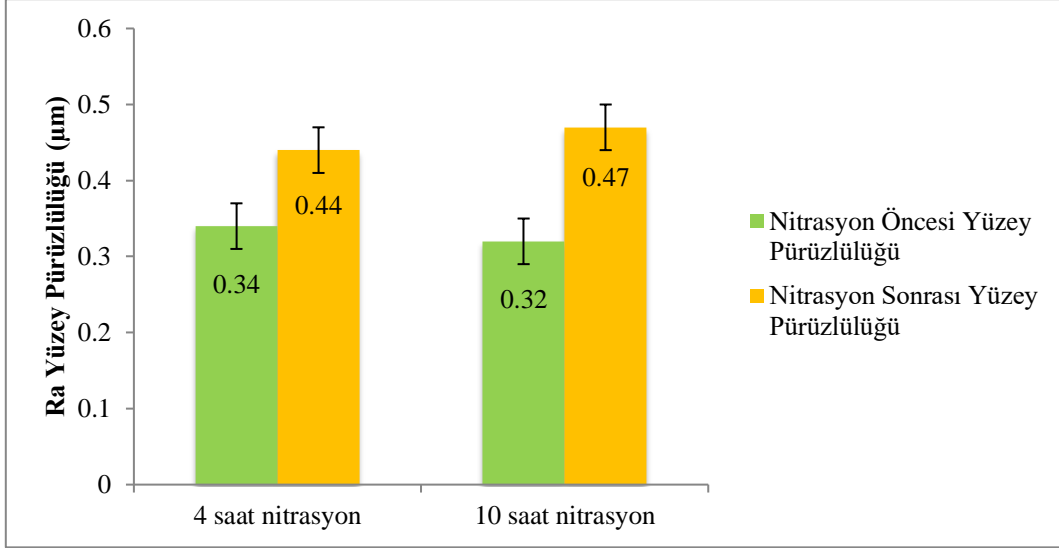
Yapılan ölçüm ve hesaplamalar sonucunda en yüksek difüzyon derinliği 280 µm olarak 10 saatlik nitrasyon işlemi uygulanan numunede görülmüştür. 170 µm'lik difüzyon derinliği olan 4 saatlik nitrasyon numunesi ise en düşük difüzyon derinliğine sahip numune olmuştur. 3, 4 ve 6 saat nitrasyon işlemi uygulanmış olan numuneler 170-190 µm'lik difüzyon derinliği ile birbirine yakın sonuçlar göstermişlerdir. Şekil 4.6'da difüzyon derinlik değerleri karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.6 Nitasyon numuneleri difüzyon derinliklerinin karşılaştırması

4.1.3 Yüzey Pürüzlülük Karakterizasyon Sonuçları

Nitrasyon işleminin yüzey pürüzlülüğüne etkisini inceleyebilmek için 4 ve 10 saat nitasyon uygulanmış olan numunelerin nitasyon öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Her bir numunenin ölçümü üçer kez tekrarlanmış olup standart sapma değerleri hesaplanmıştır. 4 ve 10 saatlik nitasyon numunelerinin nitasyon öncesi yüzey pürüzlülük değerleri sırasıyla $0,34 \pm 0,03 \mu\text{m}$ ve $0,32 \pm 0,03 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Nitasyon sonrası 4 saatlik nitasyon numunesinde yüzey pürüzlülüğünün yaklaşık $0,1 \mu\text{m}$ artarak $0,44 \pm 0,04 \mu\text{m}$ olduğu, 10 saatlik nitasyon numunesinde ise yaklaşık $0,15 \mu\text{m}$ artarak $0,47 \pm 0,03$ olduğu görülmüştür. Şekil 4.7’de numunelerin nitasyon öncesi ve sonrası şeklinde yüzey pürüzlülük değerleri karşılaştırılmıştır.

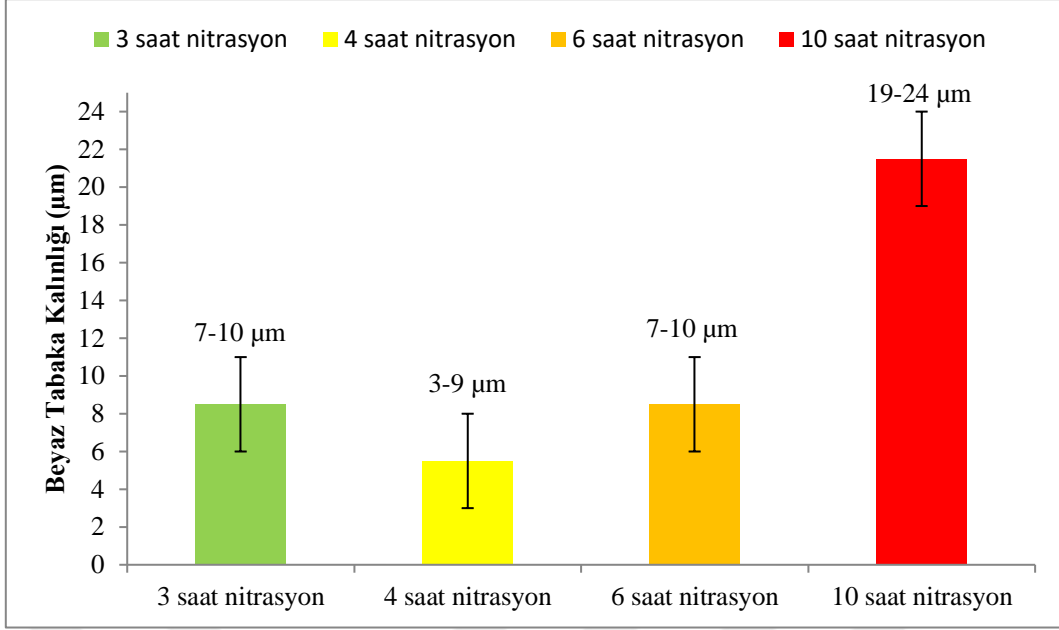


Şekil 4.7 Yüzey pürüzlülük değerleri

Ölçüm sonuçlarına bakıldığında 10 saatlik nitrasyon uygulamasında 4 saatlik nitrasyona göre yüzey pürüzlülüğünün yaklaşık 0,05 µm daha fazla arttığı görülmektedir. Ancak her iki nitrasyon süresinde de yüzey pürüzlülüğünün önemli bir seviyede değişmediği anlaşılmaktadır.

4.1.4 Morfolojik Karakterizasyon (Optik Mikroskop) Sonuçları

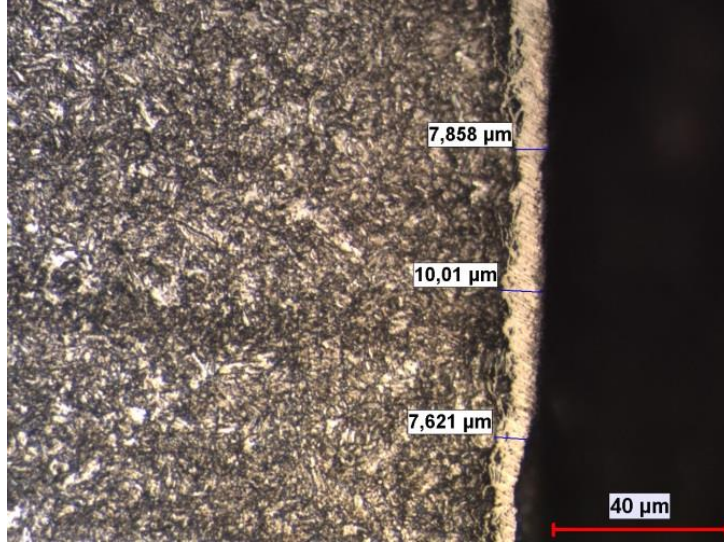
Nitrasyon işlemi uygulanmış olan numunelerin yüzeyinde demir-nitrür bileşimine sahip beyaz tabaka oluşmuştur. Numunelere uygulanan farklı yüzey sertleştirme parametrelerinin beyaz tabakaya etkisini araştırmak için optik mikroskop altında inceleme yapılmış ve farklı noktalardan beyaz tabaka kalınlıkları ölçülmüştür. Şekil 4.8'de farklı parametrelerde işlem gören numunelerin optik mikroskop altında incelemeleri sonucunda elde edilen beyaz tabaka kalınlıkları gösterilmektedir.



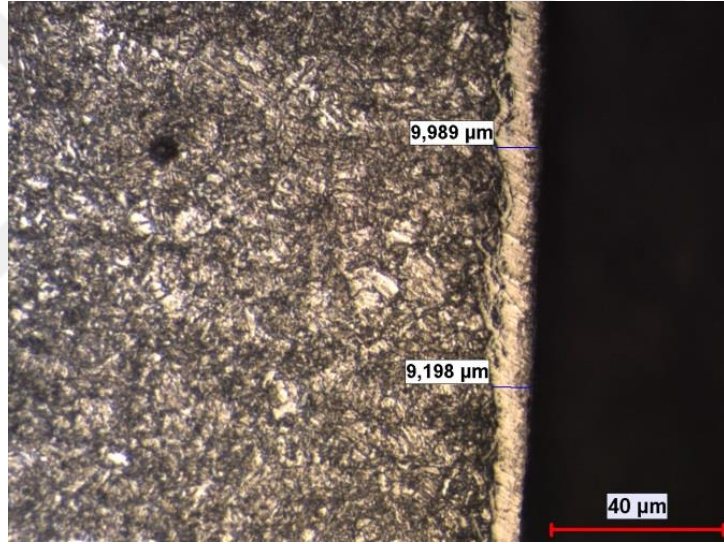
Şekil 4.8 Nitasyon numunelerinin beyaz tabaka kalınlık değerleri

Şekil 4.8’de görüldüğü üzere 3 ve 6 saatlik nitasyon işlemi gören numunelerde 7-10 µm kalınlığında beyaz tabaka oluşumu görülmüştür. 4 saatlik nitasyon numunesi 3-9 µm beyaz tabaka kalınlığıyla en düşük değeri verirken 10 saatlik nitasyon numunesinde 19-24 µm ile en kalın beyaz tabaka oluşumu gözlemlenmiştir.

520°C’de KN6 değeri ile 3 saat nitasyon işlemine tabii tutulan numunede beyaz tabaka kalınlığı 7-10 µm olarak ölçülmüştür. Numunenin bütün kenarları incelendiğinde beyaz tabakanın kenarların tamamında oluştuğu görülmüştür. Şekil 4.9’da 3 saat nitasyon işlemi uygulanan numuneye ait optik mikroskop görüntüleri gösterilmektedir. Görüntüler 500x büyütmede alınmıştır.



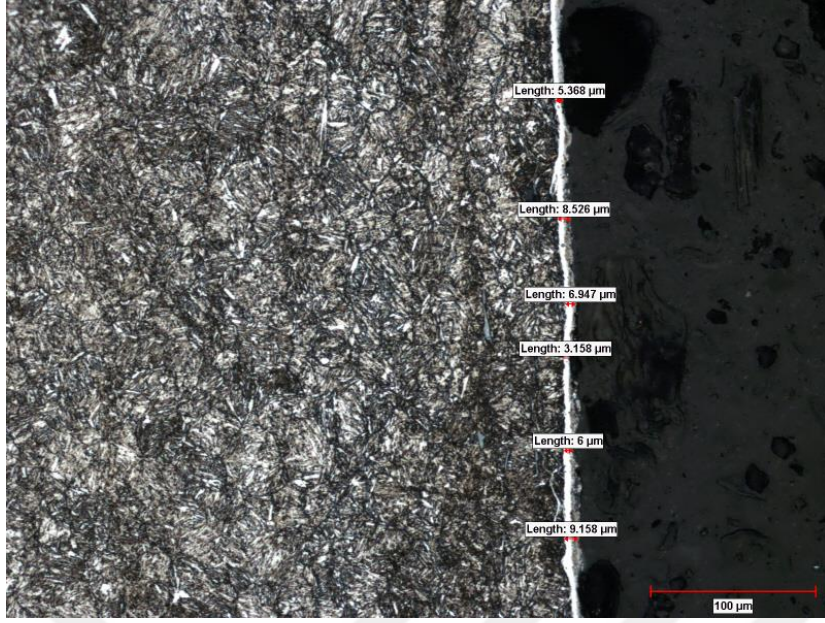
a)



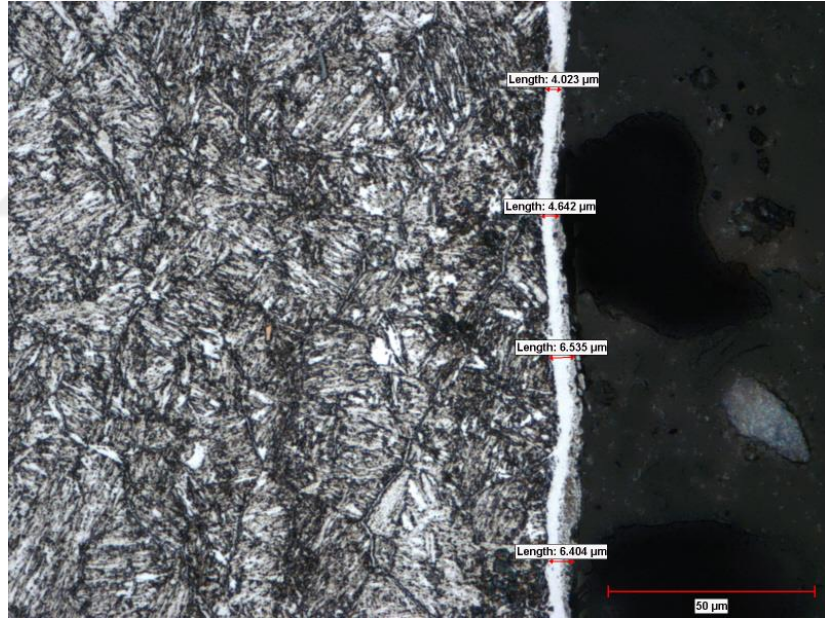
b)

Şekil 4.9 3 saat nitrasyon numunesine ait optik mikroskop görüntüleri a)Görüntü 1 b)Görüntü 2

520°C KN3 değeri ile 4 saat nitrasyon işlemi uygulanan numunenin beyaz tabaka kalınlığı 3-9 μm olarak ölçülmüştür. Şekil 4.10'da 4 saat nitrasyon işlemi uygulanan numuneye ait optik mikroskop görüntüleri gösterilmektedir. Görüntüler 200x ve 500x büyütmelerde alınmıştır.



a)

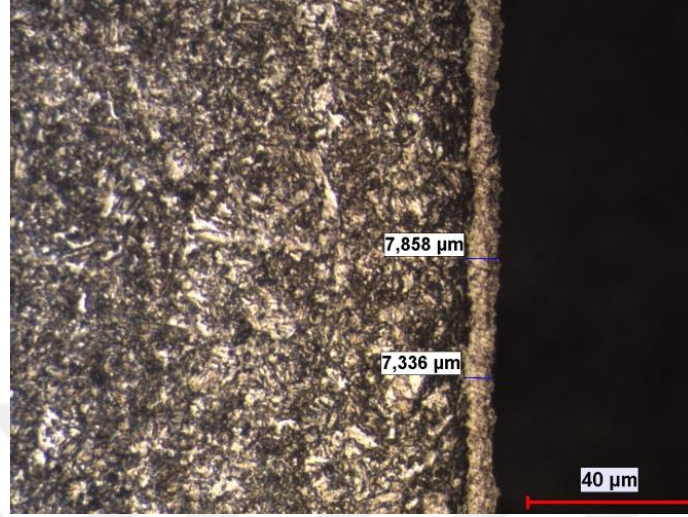


b)

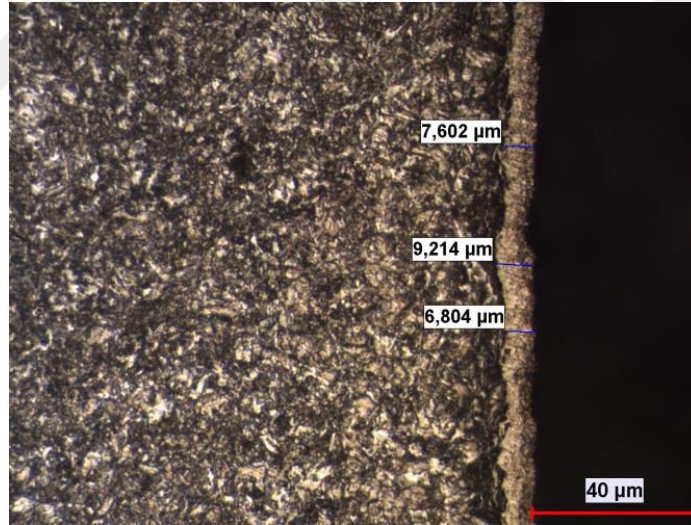
Şekil 4.10 4 saat nitrasyon numunesine ait optik mikroskop görüntüleri a)200x büyütme b)500x büyütme

520°C'de KN3 değeri ile 6 saat nitrasyon işlemine tabii tutulan numunede beyaz tabaka kalınlığı 7-10 µm olarak ölçülmüştür. Şekil 4.9'da gösterilmiş olan 520°C KN6 3 saat parametrelerine sahip nitrasyon numunesi ile bu numunede aynı

kalınlıkta beyaz tabaka oluşumu görülmüştür. Şekil 4.11’de 6 saat nitrasyon işlemi uygulanan numuneye ait optik mikroskop görüntüleri gösterilmektedir. Görüntüler 500x büyütmede alınmıştır.



a)

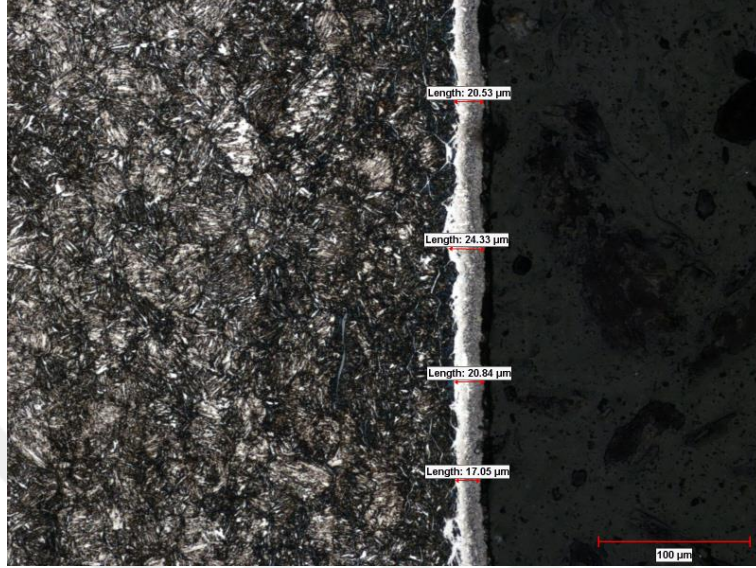


b)

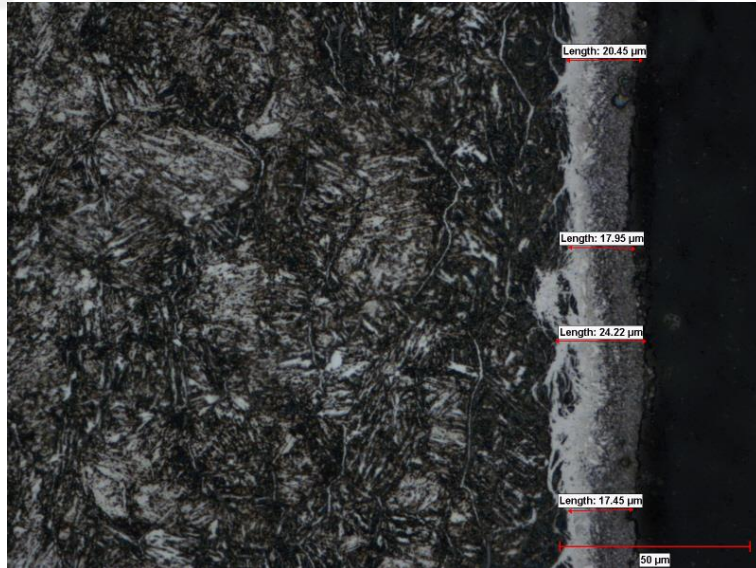
Şekil 4.11 6 saat nitrasyon numunesine ait optik mikroskop görüntüleri
a)Görüntü 1 b)Görüntü 2

Son olarak 520°C KN3 10 saat değerindeki parametreler ile nitrasyon işlemi uygulanan numunenin beyaz tabaka kalınlığı 19-24 µm olarak ölçülmüştür. Çalışma kapsamında uygulanan yüzey sertleştirme işlemleri arasında en uzun

işlem süresine sahip olan bu numunenin en kalın beyaz tabakaya sahip olduğu görülmüştür. Şekil 4.12’de 10 saat nitrasyon işlemi uygulanan numuneye ait optik mikroskop görüntüleri gösterilmektedir. Görüntüler 200x ve 500x büyütmelerde alınmıştır.



a)

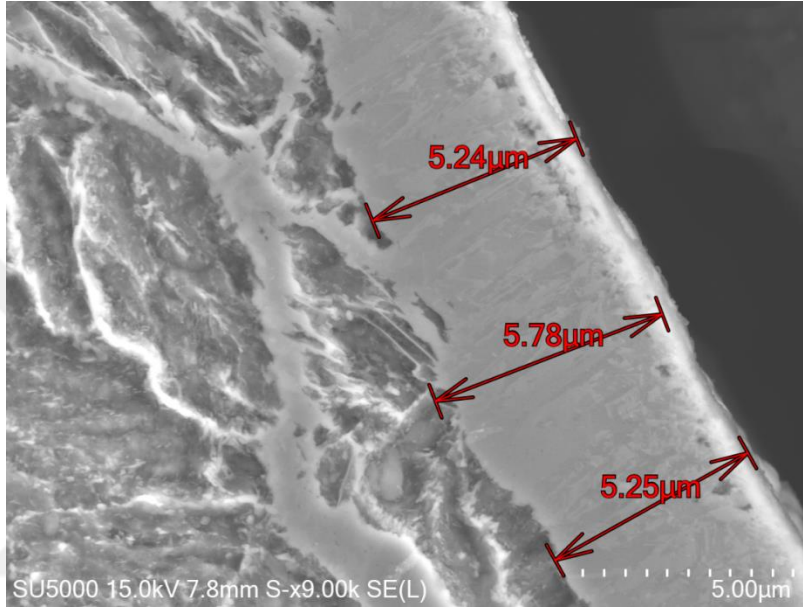


b)

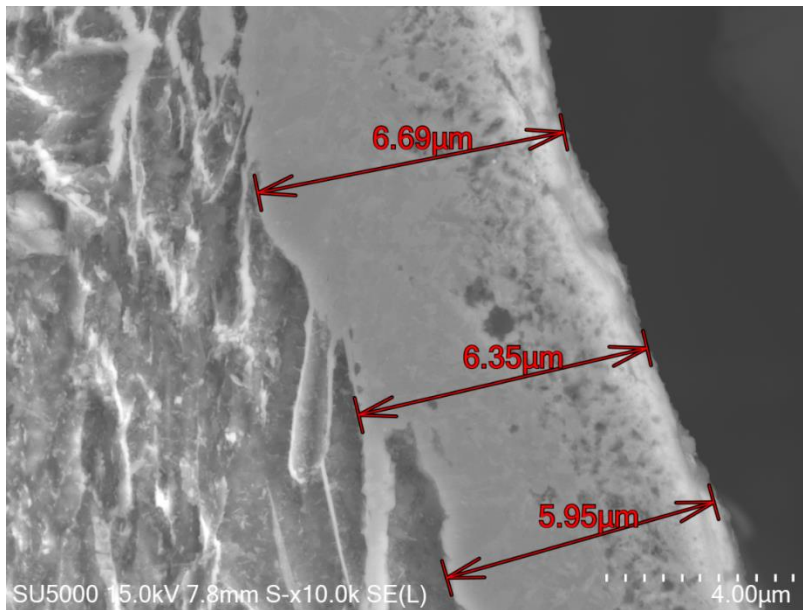
Şekil 4.12 10 saat nitrasyon numunesine ait beyaz tabaka görüntüleri a)200x büyütme b)500x büyütme

4.1.5 Morfolojik Karakterizasyon (SEM) Sonuçları

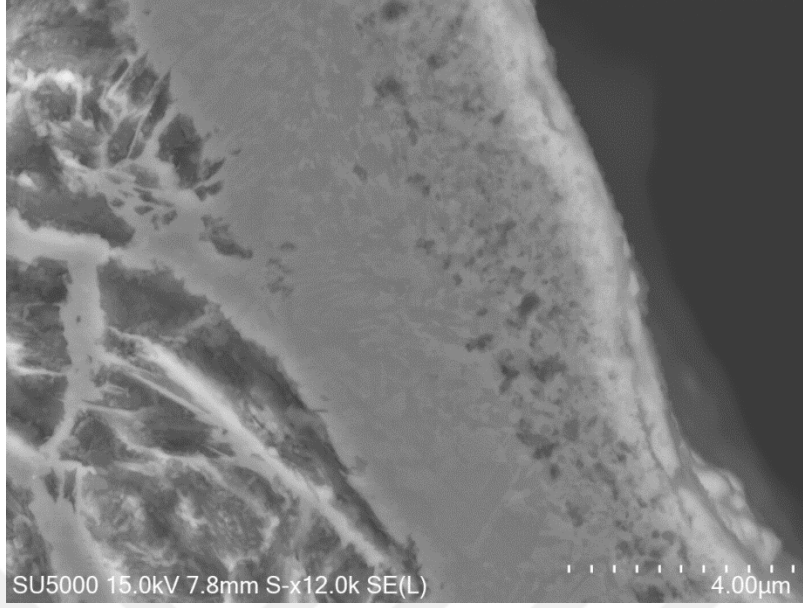
Nitrasyon uygulanan numunelerden kesit olarak yüksek ölçekli büyütmelerde incelemek için SEM cihazı kullanılmıştır. 4 ve 10 saat nitrasyon işlemine tabii tutulan numunelerden alınan kesitler SEM cihazı ile farklı büyütmelerde incelenmiştir. 4 saatlik nitrasyon numunesine ait SEM görüntüleri Şekil 4.13'te gösterilmektedir.



a)



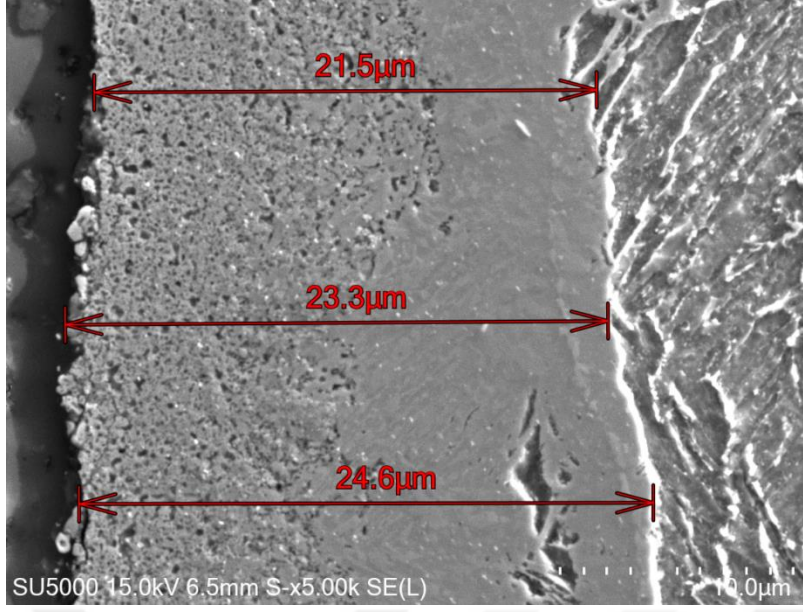
b)



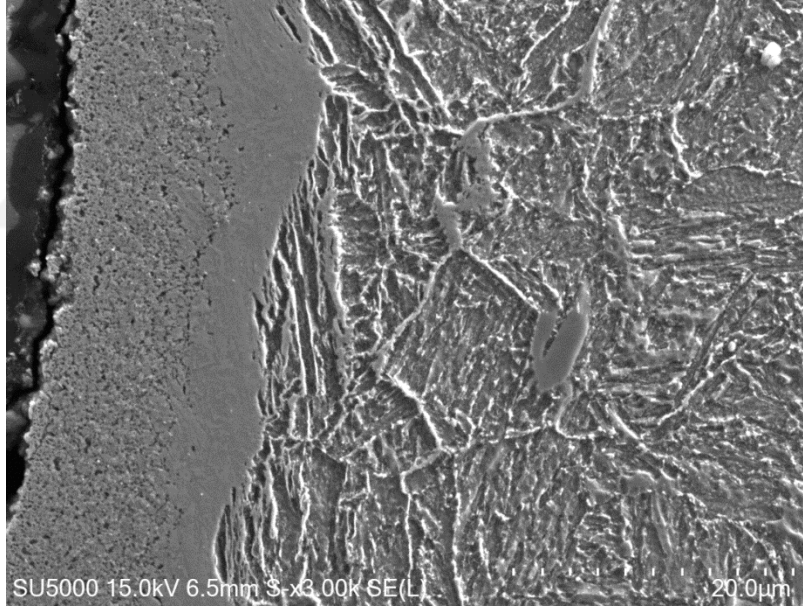
c)

Şekil 4.13 4 saat nitrasyon numunesine ait SEM görüntüleri a)9000x büyütme
b)10000x büyütme c)12000x büyütme

SEM altında ölçülen beyaz tabaka kalınlıkları ile optik mikroskop altında ölçülen beyaz tabaka kalınlıkları birbirini doğrulamaktadır. 4 saat nitrasyon numunesinde 3-9 μm beyaz tabaka görülürken, 10 saat nitrasyon numunesinin beyaz tabaka kalınlığı 19-24 μm ölçülmüştür. 10 saatlik nitrasyon numunesine ait SEM görüntüleri Şekil 4.14'te gösterilmektedir.



a)



b)

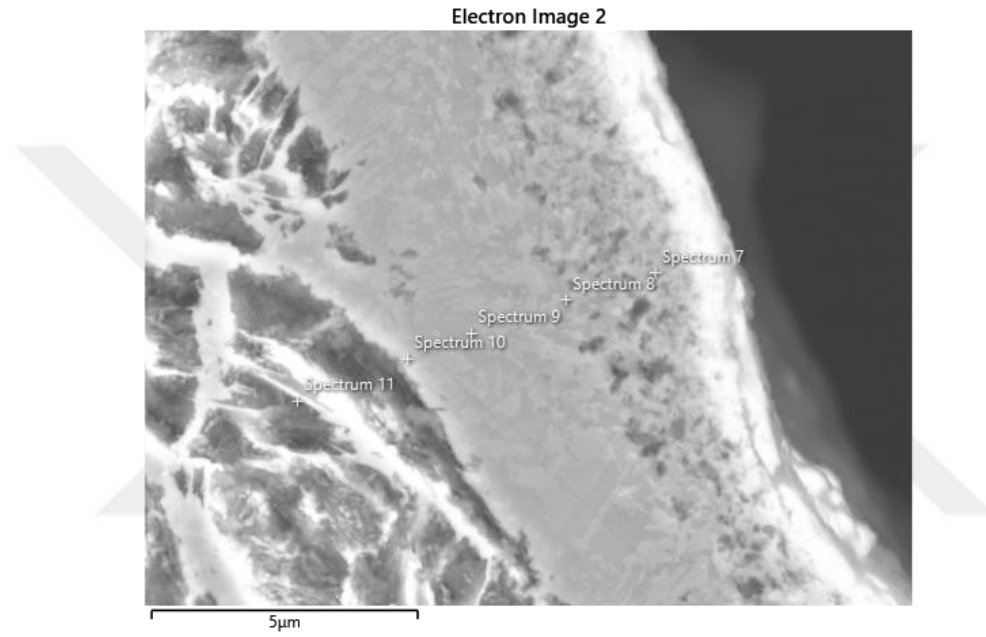
Şekil 4.14 10 saat nitrasyon numunesine ait SEM görüntüleri a)5000x büyütme
b)3000x büyütme

4.1.6 Elementel Analiz (EDS) Sonuçları

Nitrasyon uygulanan numunelerin yüzeyinde farklı kalınlıklarda Fe-N (demir-nitrür) bileşimine sahip beyaz tabaka oluşmuştur. Numunelerin yüzeyden

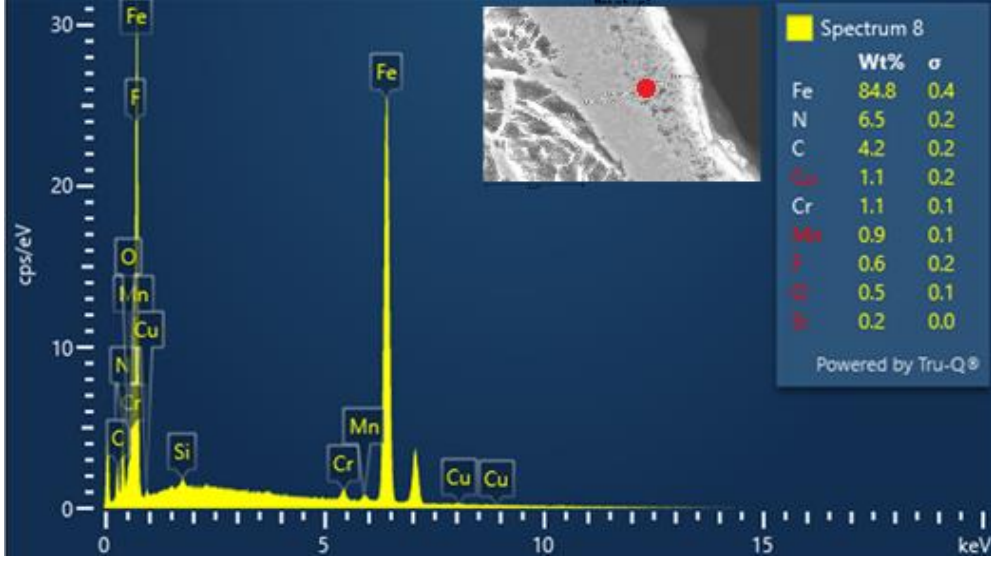
çekirdeğe doğru içerdiği azot miktarını inceleyebilmek için EDS analizi yapılmıştır. Bu analiz yöntemi ile 4 saat ve 10 saat nitrasyon işlemi gören numuneler incelenmiştir.

4 saat nitrasyon işlemi uygulanan numunenin yüzeyinden merkezine doğru 5 farklı nokta atanarak bu noktadaki N elementinin miktarı incelenmiştir. Şekil 4.15'te 4 saat nitrasyon numunesine ait EDS analizi yapılan noktalar gösterilmektedir.



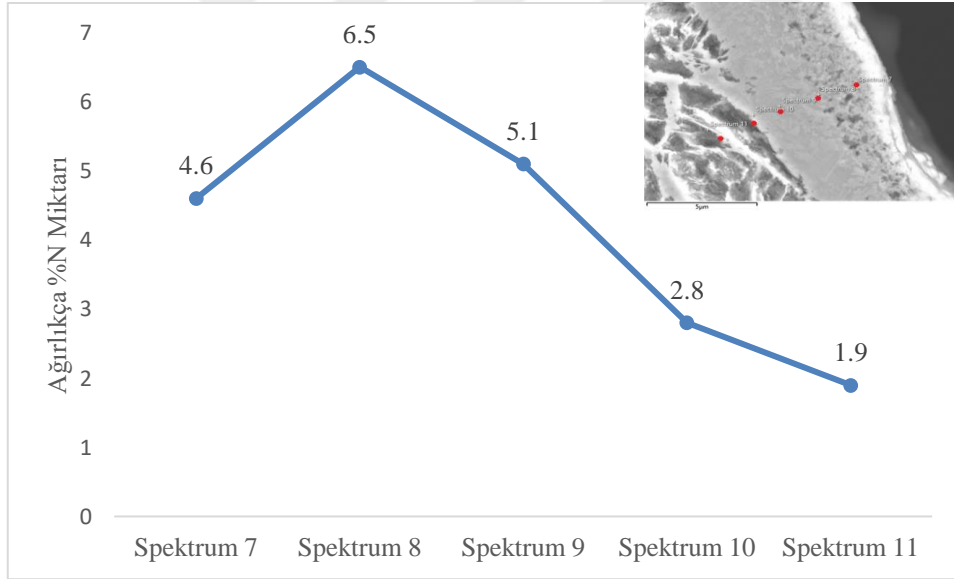
Şekil 4.15 4 saat nitrasyon numunesine ait EDS analizi yapılan noktalar

Şekil 4.15'te gösterilen noktalarda yapılan EDS analizi sonucunda yüzeyden merkeze doğru gidildikçe ağırlıkça %N miktarının düştüğü görülmektedir. Yüzeye en yakın noktada yapılan EDS analizinde ağırlıkça %4,6 N tespit edilirken merkeze en yakın noktada ise bu değer %1,9'a düşmektedir. 4 saat nitrasyon uygulanan numunenin EDS analizi sonucuna bakıldığında en fazla %6,5 miktarında N görülmektedir. Şekil 4.16'da spektrum 8 noktasına ait EDS analiz sonuçları görüntüsü gösterilmektedir.



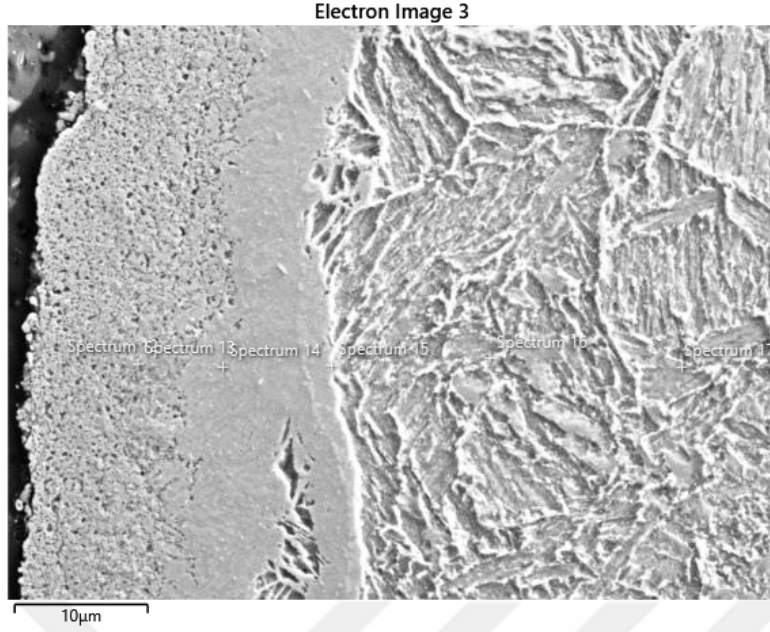
Şekil 4.16 Spektrum 8 noktasına ait EDS analiz sonuçları görüntüsü

Şekil 4.17’de 4 saat nitrasyon numunesine ait ağırlıkça %N miktarları gösterilmektedir.



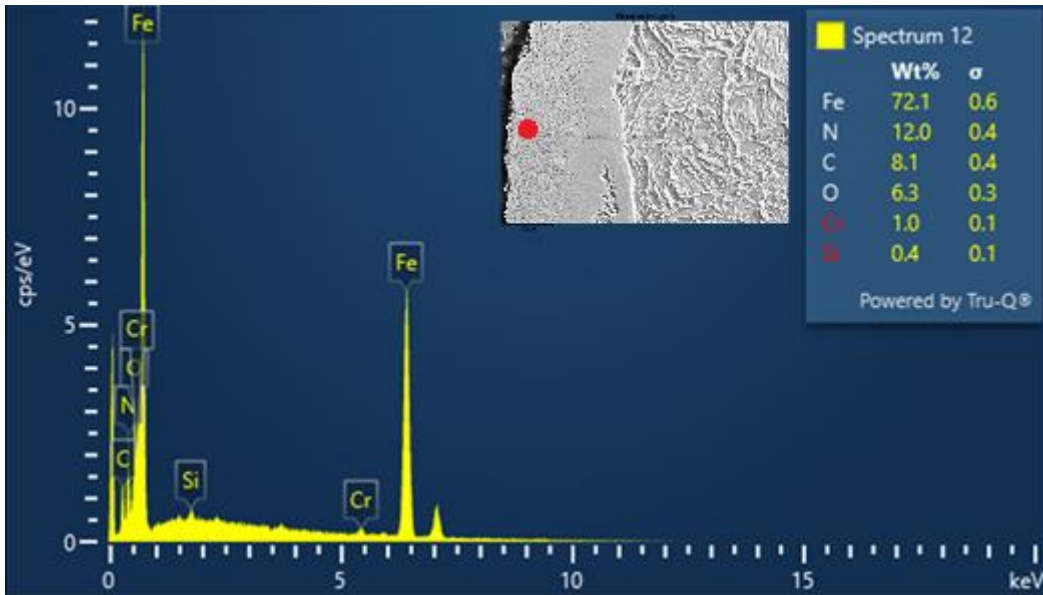
Şekil 4.17 4 saat nitrasyon numunesine ait ağırlıkça %N miktarları

10 saat nitrasyon işlemi uygulanan numunenin yüzeyinden merkezine doğru 6 farklı nokta atanarak bu noktalardaki N elementinin miktarı incelenmiştir. Şekil 4.18’de 10 saat nitrasyon numunesine ait EDS analizi yapılan noktalar gösterilmektedir.



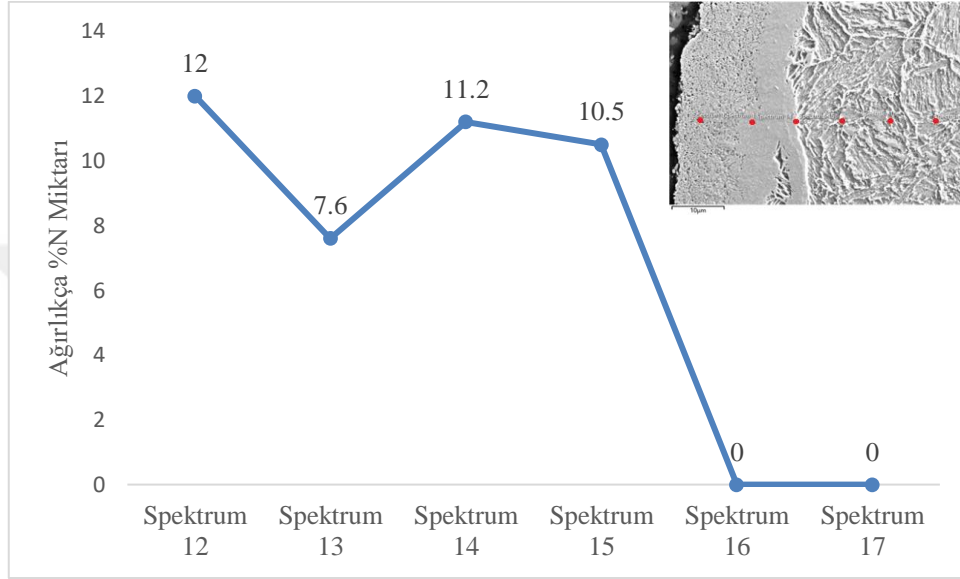
Şekil 4.18 10 saat nitrasyon numunesine ait EDS analizi yapılan noktalar

Şekil 4.18’de gösterilen noktalarda yapılan EDS analizi sonucunda yüzeyden merkeze doğru gidildikçe ağırlıkça %N miktarının düştüğü görülmektedir. Yüzeğe en yakın noktada yapılan EDS analizinde ağırlıkça %12 N tespit edilirken merkeze en yakın noktada ise azot görülmemektedir. Şekil 4.19’da spektrum 12 noktasına ait EDS analiz sonuçları görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 4.19 Spektrum 12 noktasına ait EDS analiz sonuçları görüntüsü

10 saatlik nitrasyon numunesinde en fazla %12 miktarında N görülmüştür. Merkeze yakın atılan son iki noktada ise N elementine rastlanmamıştır. Bununla birlikte her iki numunede de yüksek oranda Karbon (C) elementi tespit edilmiştir. Karbon miktarının azot bulunan bölgelerde azot ile neredeyse aynı yüzde oranına sahip olduğu görülmüştür. Şekil 4.20’de 10 saat nitrasyon numunesine ait ağırlıkça %N miktarları gösterilmektedir.



Şekil 4.20 10 saat nitrasyon numunesine ait ağırlıkça %N miktarları

4.2 Nitrokarbürizasyon Sonuçları

Bu başlık altında nitrokarbürizasyon numunesine ait karakterizasyon sonuçları sunulmuştur.

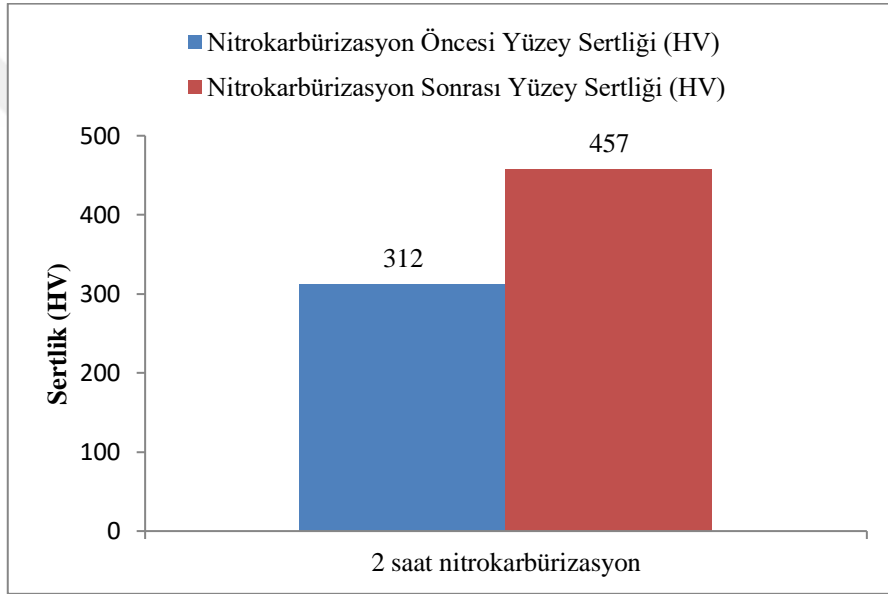
4.2.1 Yüzey Sertlik Karakterizasyon Sonuçları

Nitrokarbürizasyon işlemi öncesi ve sonrası yüzey sertliği Şekil 3.8’de gösterilmiş olan Vickers sertlik ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Tablo 4.6’da numunenin nitrokarbürizasyon işlemi öncesi ve sonrası yüzey sertlik değerleri gösterilmektedir.

Tablo 4.6 Nitrokarbürizasyon öncesi ve sonrası yüzey sertlik değerleri

Numune	Nitrokarbürizasyon Öncesi Yüzey Sertliği (HV)	Nitrokarbürizasyon Sonrası Yüzey Sertliği (HV)	Yüzeydeki Sertlik Değişimi (HV)
2 saat nitrokarbürizasyon	312	457	+145

Yapılan yüzey sertlik ölçümleri sonucunda nitrokarbürizasyon numunesinde 145 HV'lık bir sertlik artışı görülmüştür. Şekil 4.21'de nitrokarbürizasyon numunesine ait yüzey sertlik değişimi gösterilmektedir.



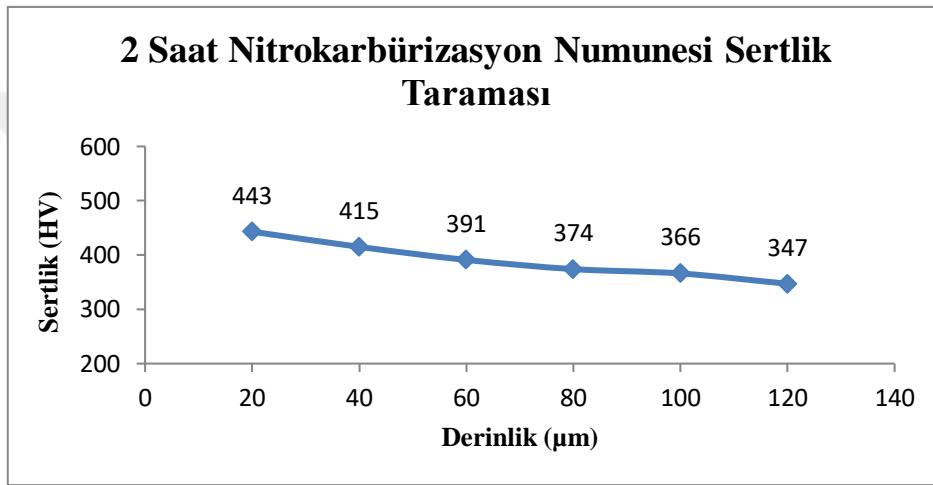
Şekil 4.21 Nitrokarbürizasyon numunesine ait yüzey sertlik değişimi

4.2.2 Difüzyon Derinliği Karakterizasyon Sonuçları

Nitrokarbürizasyon işlemi sonrası numune bakalite alınarak yüzeyden çekirdeğe doğru sertlik taraması yapılmıştır. Sertlik taraması sonucunda elde edilen veriler ile numunenin difüzyon derinliği Bölüm 3'te anlatıldığı şekilde DIN 50190-3 standardına göre hesaplanmıştır. Aşağıda nitrokarbürizasyon numunesine ait sertlik tarama sonuçları ve difüzyon derinliği gösterilmektedir.

Tablo 4.7 Nitrokarbürizasyon numunesi sertlik değerleri ve difüzyon derinliği

Numune	Derinlik (µm)	Sertlik (HV)	Çekirdek Sertliği = 312 HV 312 + 50 = 362 HV Difüzyon Derinliği = 100 µm
2 saat nitrokarbürizasyon	20	443	
	40	415	
	60	391	
	80	374	
	100	366	
	120	347	



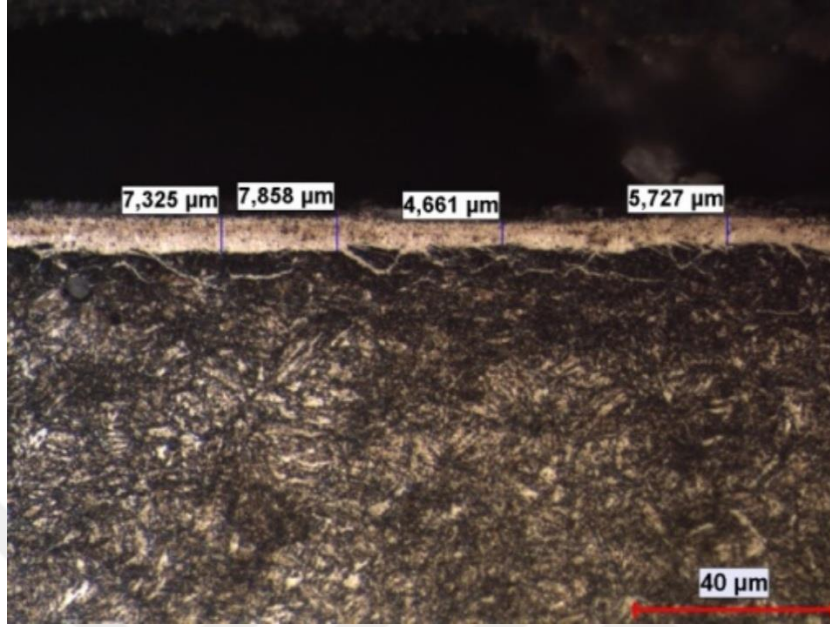
Şekil 4.22 Nitrokarbürizasyon numunesi sertlik taraması

Tablo 4.7 ve Şekil 4.22’de nitrokarbürizasyon işlemi uygulanmış olan numunenin sertlik tarama sonuçları ve bu değerlerden yola çıkarak hesaplanmış olan difüzyon derinliği gösterilmektedir. Çekirdek sertliği 312 HV olarak ölçülen numunenin yüzey sertleştirme işlemi sonrası yüzey sertlik değeri 457 HV’ye yükseldiği görülmüştür. DIN 50190-3 standardı referans alınarak yapılan hesaplama sonucunda difüzyon derinliği 100 µm ölçülmüştür.

4.2.3 Morfolojik Karakterizasyon (Optik Mikroskop) Sonuçları

2 saat nitrokarbürizasyon işlemi uygulanmış olan numuneden alınan kesitin bütün kenarları optik mikroskop altında incelenmiş ve beyaz tabaka kalınlığı ölçülmüştür. Ölçüm sonucunda beyaz tabaka kalınlığının 3-7 µm olduğu görülmüştür. Şekil 4.23’te nitrokarbürizasyon numunesine ait farklı kenarlardan

alınmış optik mikroskop görüntüleri gösterilmektedir. Görüntüler 500x büyütmede alınmıştır.



a)



b)

Şekil 4.23 Nitrokarbürizasyon numunesine ait optik mikroskop görüntüleri
a)Görüntü 1 b)Görüntü 2

Bu çalışmada, AISI 4340 çeliğine farklı parametreler ile uygulanan gaz nitrasyon ve gaz nitrokarbürizasyon yüzey sertleştirme işlemlerinin malzeme üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan araştırmalar değerlendirilmiş ve ulaşılan sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- 520°C’de 3, 4, 6 ve 10 saat nitrasyon işlemi gören numunelerin yüzey sertlik değerleri karşılaştırıldığında en yüksek yüzey sertliği 6 saat nitrasyon uygulanan numunede +312 HV artış ile 618 HV, en düşük yüzey sertliği ise 10 saat nitrasyon uygulanan numunede +281 HV artış ile 584 HV olarak ölçülmüştür. 3, 4 ve 6 saatlik nitrasyon numunelerinde birbirine yakın yüzey sertlik değerleri ölçülmüş olup işlem süresinin bir noktadan sonra artması ile yüzey sertliğinin düşüşe geçtiği sonucuna varılmıştır. Şirin ve arkadaşları 2008 yılında yaptıkları çalışmada nitrasyon işlem süresi ve sıcaklığı arttıkça beyaz tabaka kalınlığı ve yüzey sertliğinde artış olduğunu, ancak uzun süreli nitürleme işlemlerinde büyük nitür çökeltilerinin oluşumu nedeniyle yüzey sertliğinde önemli bir kayıp gözlemlendiğini aktarmıştır [47].
- 565°C’de 2 saat nitrokarbürizasyon işlemi görmüş olan numunede işlem öncesi 312 HV olan yüzey sertliği işlem sonrası +145 HV artış ile 457 HV’ye ulaşmıştır. Bu sonuç nitrasyon numuneleri ile karşılaştırıldığında yüzey sertliğindeki artış oranı nitrokarbürizasyonda yaklaşık %50 düşüş göstermiştir.
- 4 saat nitrasyon uygulanan numunenin yüzey pürüzlülüğü $0,34\pm 0,03$ μm ’den $0,44\pm 0,04$ μm ’ye, 10 saat nitrasyon uygulanan numunenin yüzey pürüzlülüğü ise $0,32\pm 0,03$ μm ’den $0,47\pm 0,03$ μm ’ye yükselmiştir. Bu sonuçlara istinaden nitrasyonun yüzey pürüzlülüğünde önemli ölçüde bir etkisinin olmadığı anlaşılmıştır. Altınsoy ve arkadaşları 2013 yılında yaptıkları çalışmada 34CrAlNi7 çeliğine 10, 20 ve 30 saat boyunca 500°C, 520°C ve 540°C’de gaz nitrasyon uygulamış ve tüm numunelerin nitrasyon

sonrası neredeyse aynı yüzey pürüzlülüğüne ($R_a = 0,28-0,32 \mu\text{m}$) sahip olduğunu aktarmıştır [48].

- 520°C 'de KN3 değeri ile uygulanan 4, 6 ve 10 saatlik nitrasyon işlemleri sonucunda numunelerde sırasıyla 3-9 μm , 7-10 μm , 19-24 μm değerlerinde beyaz tabaka kalınlığı ölçülmüştür. Bu sonuçlara bakıldığında işlem süresinin artmasıyla beyaz tabaka kalınlığının arttığı görülmüştür. Literatüre bakıldığında Yaman'ın 2007 yılında, Şirin ve arkadaşlarının 2008 yılında ve Altınsoy ve arkadaşlarının 2013 yılında yaptıkları çalışmalarda da nitrasyon işlem süresindeki artışın beyaz tabaka kalınlığını arttırdığını söyledikleri görülmüştür [47, 48, 49]. Ayrıca Küçük ve arkadaşları 2023 yılında yaptıkları çalışmada %0,41 karbon içeren çelik ile imal edilen krank miline 520°C sıcaklıkta 15 saat gaz nitrasyon işlemi uygulamış ve gaz nitrasyon işlemi sonrasında krank mili numunelerinin yüzeyinde ortalama 23 μm beyaz tabaka oluşumu gördüğünü belirtmiştir [50].
- 2 saat nitrokarbürizasyon uygulanan numunede 3-7 μm kalınlığında beyaz tabaka ve 100 μm difüzyon derinliği ölçülmüş olup 4 saatlik nitrasyon numunesinde ise 3-9 μm beyaz tabaka kalınlığı ve 170 μm difüzyon derinliği ölçülmüştür. Bu duruma bakıldığında farklı yöntem ve farklı parametreler uygulanarak aynı beyaz tabaka kalınlığında farklı difüzyon derinlikleri oluşturulabileceği anlaşılmıştır.
- 520°C 'de KN3 değeriyle 6 saat ve 520°C 'de KN6 değeriyle 3 saat nitrasyon uygulanan numunelerin ikisinde de 7-10 μm kalınlığında beyaz tabaka ve 180-190 μm aralığında difüzyon derinliği ölçülmüştür. Bu değerlere bakıldığında KN ve süre parametrelerinin birbiri arasında doğru oran ile değiştirilmesiyle aynı sonuçların elde edilebileceği görülmüştür. Altınsoy ve arkadaşları 2016 yılında yaptıkları çalışmada 34CrAlNi7 nitrasyon çeliğine farklı sıcaklık, süre ve KN değerleri ile nitrasyon uygulamışlardır. Çalışma sonucunda, nitrasyon sıcaklığı arttıkça beyaz tabaka kalınlığı ve difüzyon derinliğinde artış olurken, KN değerinin azalması ile beyaz tabaka kalınlığı ve difüzyon derinliğinde düşüş

olduğunu belirtmişlerdir. Numunelerin mikrosertlik değerleri, tüm KN değerleri için işlem sıcaklığı arttıkça azalmıştır [51].

- En yüksek difüzyon derinliği 10 saat nitrasyon işlemi uygulanan numunede 280 μm olarak ölçülmüştür. Difüzyon derinlik değerlerine bakıldığında işlem süresinin artmasıyla difüzyon derinliğinin de arttığı sonucuna varılmıştır. Altınsoy ve arkadaşlarının 2013 yılında yaptıkları çalışmaya bakıldığında 34CrAlNi7 çeliğine farklı sürelerde nitrasyon uyguladıkları ve en yüksek difüzyon derinliğine en uzun işlem süresine sahip olan 30 saatlik nitrasyon işleminde ulaştıkları görülmüştür [48].
- Nitrasyon uygulanan numunelerin kesit görüntüleri SEM altında incelendiğinde beyaz tabaka bölgeleri net olarak görülmüş olup birbirleri arasında beyaz tabaka kalınlığı haricinde bir fark tespit edilememiştir. Hanbay' da 2023 yılında yaptığı çalışmada nitrasyon uyguladığı numuneleri SEM altında incelemiş ve bütün yüzeyde beyaz tabaka gördüğünü söylemiştir [52].
- EDS analizi sonucunda 4 saat ve 10 saat nitrasyon numunelerinde görülen en yüksek azot miktarları sırasıyla %6,5 ve %12'dir. Yapılan diğer karakterizasyon sonuçlarına da bakıldığında tahmin edileceği gibi nitrasyon süresinin artmasıyla malzemeye difüze olan azot miktarında artış görülmüştür. Yüzeyden çekirdeğe doğru ilerlendiğinde azot miktarında hızlı bir düşüş olduğu sonucuna da varılmıştır. Hanbay 2023 yılında yaptığı çalışmada azot konsantrasyonunun yüzeyden çekirdeğe doğru gidildiğinde azaldığını bildirmiştir [52].

KAYNAKÇA

- [1] S. Lampman, "Introduction to surface hardening of steels," ASM Handbook, Cilt 4, ASM International, Materials Park, Ohio, 1997.
- [2] E. J. Mittemeijer, "Fundamentals of Nitriding and Nitrocarburizing," ASM Handbook, Cilt 4A, ASM International, 2013.
- [3] C. Altakan, "AISI 1010 ve 1040 çeliklerine nikel ve krom yayındırılarak yüzey özelliklerin geliştirilmesi," Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.
- [4] M. Kocabaş, "Elektrolitik sert krom kaplanmış 1010 ve 1040 çelik yüzeylerin nitrülenmesi ve nitrokarbürlenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2012.
- [5] M. Korwin, W. Liliental, L. Maldzinski, A. Czelusniak ve G. Tymowski, "Nitreg controlled gas nitriding: An environment-friendly process for surface hardening of steel," Nitrex Metal Inc., Kanada, 1999.
- [6] W. Liliental ve M. Larson, "Longer life for forging dies through nitreg potential controlled gas nitriding," Nitrex Metal Inc., Kanada, 2000.
- [7] Ş. Y. Güven ve D. Çelik, "SAE 4340 çeliğinde ısıtma işlem parametrelerinin yorulma ve mikro yapı üzerine etkisi," Teknik Bilimler Dergisi, Cilt 8, Sayı 2, ss. 55–61, 2018.
- [8] O. A. Dahunsi, O. O. Awopetu, T. I. Ogedengbe, T. I. Mohammed ve T. M. Adamolekun, "Evaluation of optimal economic life of cemented carbide tool turning AISI4340," International Journal of Engineering Technologies, Cilt 3, Sayı 2, ss. 37–43, 2017.
- [9] H. Başak, H. Düzcükoğlu ve M. A. Şenyurt, "Effect of plasma nitration process at various temperatures on wear behavior of AISI 4340 steel," Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Cilt 31, Sayı 2, ss. 600–614, 2018.
- [10] W. Callister ve D. G. Rethwisch, Materials Science and Engineering: An Introduction, Wiley, 2020.
- [11] "Islah Çelikleri ve Özellikleri." Erişim: 26 Mayıs 2025. Erişim adresi: <https://artmetalurji.com/celik/islah-celikleri>
- [12] "Islah Çelikleri." Erişim: 26 Mayıs 2025. Erişim adresi: <https://www.omurcelik.com/urunlerimiz/islah-celikleri/80>
- [13] "4140 Islah Çeliği Özellikleri." Erişim: 26 Mayıs 2025. Erişim adresi: <https://hascelik.com/4140-islah-celikleri>
- [14] E. Yıldırım, H. Çebi, M. Şen ve S. Yılmaz, "Robot kontrollü indüksiyon sertleştirme parametrelerinin sac metal kalıp yüzey sertliğine etkilerinin Taguchi metodu ile incelenmesi," Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 23, Sayı 1, ss. 15–23, 2017, doi: 10.5505/pajes.2016.24540.
- [15] Bartın Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Ders Notları, "Yüzey Sertleştirme Teknikleri." Erişim: 26 Mayıs 2025. Erişim

adresi: <https://cdn.bartın.edu.tr/metalurji/d7ee7cd9-f063-4669-8e1c-393503ed6ffb/isil-islemler-12.-hafta.pdf>

- [16] E. Nöbet, “Effect of laser surface hardening parameters on impact sliding wear behavior of a hot work tool steel,” Temmuz 2019.
- [17] D. Pye, Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing, ASM International, 2003.
- [18] E. E. Korkmaz, “İyon implantasyonu ve plazma nitrüleme yöntemi ile yüzeyi sertleştirilmiş soğuk iş takım çeliklerinin iç yapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi,” Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, 2009.
- [19] U. Özdemir ve M. Erten, “Plazma (iyon) nitrüleme ve malzeme özellikleri üzerindeki etkisi,” Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, 2003.
- [20] R. Gecü, “Gaz nitrülenerek sertleştirilmiş 31CrMoV9 çeliğinde indentasyon yöntemiyle kalıntı gerilme ve sertlik değişimlerinin incelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2014.
- [21] A. R. Clauß, “Nitriding of Fe–Cr–Al alloys nitride precipitation and phase transformations,” Doktora Tezi, Stuttgart University-Max-Plank Institute, 2008.
- [22] “Vacuum Gas-Nitriding Furnace Produces Precision Nitrided Parts,” Heat Treating Progress, Eylül 2009.
- [23] N. Z. S. A. M. Yusoff, “The effective duration of gas nitriding process of AISI 316L,” 2013.
- [24] F. Üstel, “Çelik yüzeylerin kaplanması, Bölüm IV, Termokimyasal kaplama yöntemleri,” Erdemir Bilim ve Teknoloji Serisi, 2006.
- [25] Ö. Denктаş, “Plazma nitrokarbürlenen AISI 4140 çeliğinin tribolojik ve korozyon davranışı üzerine post-oksidasyon işleminin etkisinin araştırılması,” Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, 2009.
- [26] İ. Güneş, “Plazma nitrüleme ile çelikler üzerinde kompleks kaplamaların oluşturulması,” Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, 2006.
- [27] E. Hamzaoğlu, “Plazma nitrülemenin WC-Co kesici uçların performansına etkisi,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2008.
- [28] Ö. Çeğil, “Termoreaktif difüzyon yöntemiyle çeliklerin yüzeyinde Ti-Al-N esaslı kaplamaların oluşturulması ve özelliklerinin incelenmesi,” Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, 2012.
- [29] E. Metin ve O. İnal, “Kinetics of layer growth and multiphase diffusion in ion-nitrided titanium,” Metallurgical Transactions, Cilt 20A, ss. 1819, 1989.
- [30] T. Gülmez, “Ostenitik paslanmaz çelik ortopedik implantların iyon nitrülemeyle yorulma dayanımlarının artırılması,” Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 1998.
- [31] H. Baycık, “İyon nitrülenmiş H13 sıcak iş çeliğinin sıcaklık ve zaman ile sertlik değerlerinin değişimi,” Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 1999.

- [32] J. Dossett, "Heat Treating," ASM Handbook, Cilt 4, ss. 376–436, ASM International, 1991.
- [33] W. L. Grube ve S. Verhoff, "Plasma ion carburizing," ASM Handbook, Cilt 4, ASM International, 1997.
- [34] M. B. Karamış, F. Nair ve B. Selçuk, "Borlanmış malzemelerin tribolojik özellikleri," 6. Denizli Malzeme Sempozyumu, ss. 446–454, 1995.
- [35] M. Kulka, Current Trends in Boriding Techniques, Engineering Materials Series, Springer, 2019.
- [36] W. Gissler ve H. A. Jehn, Advanced Techniques for Surface Engineering, Springer Netherlands, 1992.
- [37] M. Y. Yılmaz, "Borlama işleminin 34CrNiMo6 çeliğinin bazı mekanik özellikleri üzerine etkisi," Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, 2021.
- [38] A. A. Malik, "Borlanmış tungstenin aşınma davranışının incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, 2018.
- [39] B. Bhushan ve B. K. Gupta, Handbook of Tribology, McGraw-Hill, ABD, 1991.
- [40] J. Grosch, "Steel heat treatment metallurgy and technologies," in Steel Heat Treatment, G. Totten (Ed.), CRC Press, ABD, 2006, ss. 446–537.
- [41] "ARLTM 3460 Optical Emission Spectrometer – Delta Analytical." Erişim: 1 Haziran 2025. Erişim adresi: <https://www.deltanalytical.com/products/new-product-test/>
- [42] "Mitutoyo, Category: Surface Roughness Measuring Instruments." Erişim: 1 Haziran 2025. Erişim adresi: <https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en/mitutoyo/04.01/Surface%20Roughness%20Measuring%20Instruments/index.xhtml>
- [43] "Abrasive Cutting Equipment - Metkon." Erişim: 1 Haziran 2025. Erişim adresi: <https://www.metkon.com/products/cutting/cutting-equipment/abrasive-cutting-equipment/>
- [44] "Grinding & Polishing - Metkon." Erişim: 1 Haziran 2025. Erişim adresi: <https://www.metkon.com/products/grinding-polishing/>
- [45] "Nikon Eclipse MA100." Erişim: 1 Haziran 2025. Erişim adresi: <https://www.mccrone.com/product/nylon-eclipse-ma100/>
- [46] "Schottky Field Emission Scanning Electron Microscope SU5000: Hitachi High-Tech in Singapore." Erişim: 1 Haziran 2025. Erişim adresi: <https://www.hitachi-hightech.com/sg/en/products/microscopes/sem-tem-stem/fe-sem/su5000.html#sec-1>
- [47] S. Y. Şirin, K. Şirin ve E. Kaluç, "Effect of the ion nitriding surface hardening process on fatigue behavior of AISI 4340 steel," Materials Characterization, Cilt 59, Sayı 4, ss. 351–358, Nisan 2008, doi: 10.1016/J.MATCHAR.2007.01.019.

- [48] İ. Altınsoy, K. G. Önder, F. G. Çelebi Efe ve C. Bindal, “Gas nitriding behaviour of 34CrAlNi7 nitriding steel,” *Acta Physica Polonica A*, ss. 414–416, Şubat 2014, doi: 10.12693/APhysPolA.125.414.
- [49] O. Yaman, “Assessment of the nitriding process parameters to improve the wear resistance of selected steels,” Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.
- [50] E. Küçük, İ. Uğur, Y. Sun ve H. Ahlatcı, “Orta karbonlu çelik döküm krank millerinde gaz nitrasyon işleminin aşınma davranışına etkisi,” *Journal of Steel Research and Development*, Cilt 4, Sayı 2, ss. 8–13, Aralık 2023.
- [51] İ. Altınsoy, G. F. Çelebi Efe, T. Yener, K. G. Önder ve C. Bindal, “Effect of double stage nitriding on 34CrAlNi7-10 nitriding steel,” *Acta Physica Polonica A*, ss. 663–666, Eylül 2017, doi: 10.12693/APhysPolA.132.663.
- [52] M. Hanbay, “Farklı kalite çeliklerin aşınma özelliklerine nitrasyon parametrelerinin etkisi,” 2023.



TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Kongre Bildirisi

1. N. Duygulu, Ö.F. Direk, “The Effect of Different Parameters on the Material Properties in Nitriding and Nitrocarburizing Processes Applied to AISI 4340 Tempered Steel” , 4rd International Symposium on Characterization, 2024

